

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

II ПОВОЛЖСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ  
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Материалы докладов

8–9 декабря 2016 г.

Том I

Казань 2016

УДК 681.2:62-83

ББК 34.9:31.291

П75

*Рецензенты:*

доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «КНИТУ» *В.Г. Макаров*;  
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «КГЭУ» *Р.С. Кашаев*

**П75      **Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве:**** материалы докладов II Поволжской научно-практической конференции / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – В 3 т. Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 517 с.

**ISBN 978-5-89873-471-8 (т. 1)**

**ISBN 978-5-89873-474-9**

Представлены тезисы докладов, в которых изложены результаты научно-практической работы молодых ученых, аспирантов, студентов, научных сотрудников инновационно-технологических учреждений, предприятий ЖКХ и топливно-энергетических комплексов по проблемам в области электроэнергетики, электротехники, приборостроения и автоматизированного электропривода.

Адресованы студентам, аспирантам и преподавателям вузов, а также широкому кругу лиц, интересующихся перспективными решениями в электроэнергетике.

УДК 681.2:62-83

ББК 34.9:31.291

*Редакционная коллегия:*

канд. техн. наук *Э.Ю. Абдуллазянов* (гл. редактор); канд. техн. наук *Э.В. Шамсутдинов*; д-р хим. наук *Н.Д. Чичирова*; д-р экон. наук *В.В. Хоменко*; д-р пед. наук *В.В. Кондратьев*; канд. техн. наук *О.В. Козелков*

**ISBN 978-5-89873-471-8 (т. 1)**

**ISBN 978-5-89873-474-9**

© Казанский государственный  
энергетический ун-т, 2016

# НАПРАВЛЕНИЕ 1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТЭК И ЖКХ

УДК 60-503.4

## АНАЛИЗ РАБОТЫ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

АЛЬТАХЕР АББАС А. КАРИМ, УлГТУ, аспирант  
ДОМАНОВ В.И., УлГТУ, к.т.н.

*Рассматриваются вопросы моделирования асинхронного двигателя. Приводится схема модели двигателя во вращающейся системе координат. Выполнен анализ вариаций параметров модели. Определены величины ошибок, возникающих при изменении сопротивлений статора, ротора и момента инерции при управляющем и возмущающем воздействиях. Сформулированы рекомендации к требованиям по точности и допустимым вариациям основных параметров асинхронного двигателя.*

*Ключевые слова: модель, параметры двигателя, переходный процесс, ошибка, вариации параметров, момент инерции, скорость.*

В настоящее время широкое распространение получили электроприводы, построенные по схеме преобразователь частоты – асинхронный двигатель (АД). Развитие таких электроприводов привело к созданию бездатчиковых систем векторного управления АД [1, 2]. В этом случае применяется наблюдатель скорости (НС), который, используя доступные сигналы (ток и напряжение статора), вычисляет текущее значение координаты. Отмечается [1, 3], что существует большое разнообразие схем НС. В то же время статическая и динамическая точность работы НС будет зависеть как от выбранной схемы, так и от соответствия ее параметров реальным значениям. В работе оцениваются ошибки, возникающие при вариации параметров модели АД в процессе работы.

Считаем, что параметры двигателя (коэффициенты, сопротивления, индуктивности) и нагрузки (коэффициент передачи, момент инерции) известны. В этом случае по классическим формулам описания АД с короткозамкнутым ротором [1] можно составить структурную схему машины. Для вращающейся системы координат  $\alpha - \beta$  она принимает следующий вид (рис. 1).

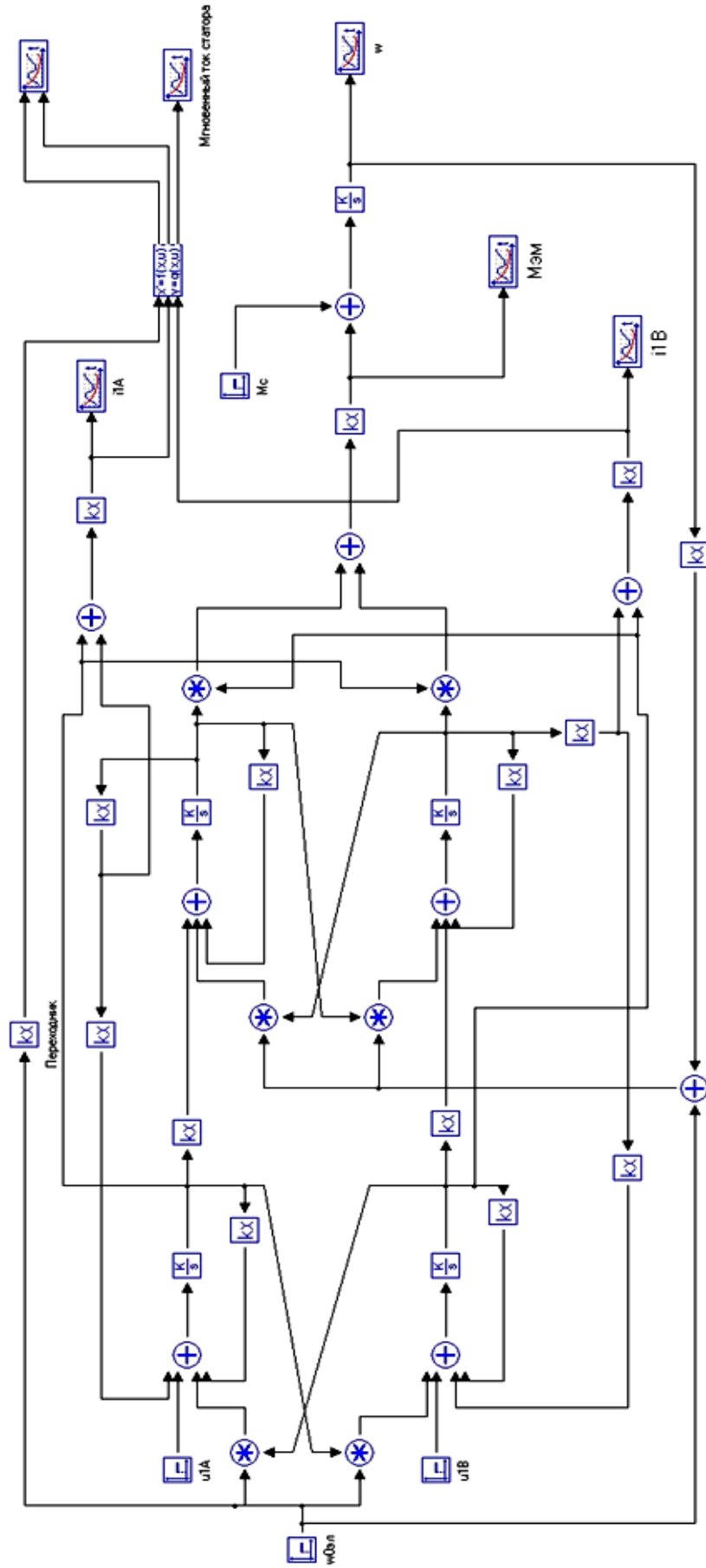


Рис. 1. Модель АД в проекциях пространственных векторов



Для случая ориентации вещественной оси по вектору потоко-сцепления ротора во вращающейся системе координат получено выражение [1]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0\text{эл}} \bar{\Psi}_1 \\ 0 &= R_2 \bar{I}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\omega_p \bar{\Psi}_2 \\ \bar{\Psi}_1 &= L_1 \bar{I}_1 + L_M \bar{I}_2 \\ \bar{\Psi}_2 &= L_M \bar{I}_1 + L_2 \bar{I}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $U, I, \Psi, R, L$  – напряжение, ток, потокосцепление, сопротивление и индуктивность;  $\omega_{0\text{эл}}$  – частота вращения векторов относительно неподвижной системы координат;  $\omega_p$  – частота вращения пространственных векторов ротора относительно ротора.

Частота вращения ротора относительно неподвижных координат определяется по формуле  $\omega = \omega_{0\text{эл}} - \omega_p$ .

Предположим, что по каким-либо причинам (нагрев, нелинейность характеристики) изменились реальные значения параметров двигателя. В этом случае исходная модель (рис. 1) будет работать с определенной погрешностью и координаты, полученные на модели, будут отличаться от первоначального варианта. Для оценки таких погрешностей была создана модель, которая содержит два блока:

- М1 – модель, соответствующая рис. 1 с исходными параметрами;
- М2 – модель, соответствующая рис. 1 с измененными параметрами.

Погрешность скорости определяется по выражению:

$$\Delta\omega = \omega_{\text{исх}} - \omega_{\text{изм}}.$$

На рис. 2 приведен переходный процесс, соответствующий работе модели, представленной на рис. 1.

Рассмотрим ошибки, возникающие при изменении параметров АД.

1. Изменение сопротивления статора. В соответствии с выражениями (1) и моделью (рис. 1) были изменены на 10 % значения соответствующих блоков модели М2. Результат моделирования приведен на рис. 3.

Видно, что при пуске двигателя имеется динамическая ошибка, амплитуда которой составляет ~4,5 % от значения установившейся скорости. Изменение момента нагрузки при  $t = 1$  с практически не вносит погрешности в процесс.

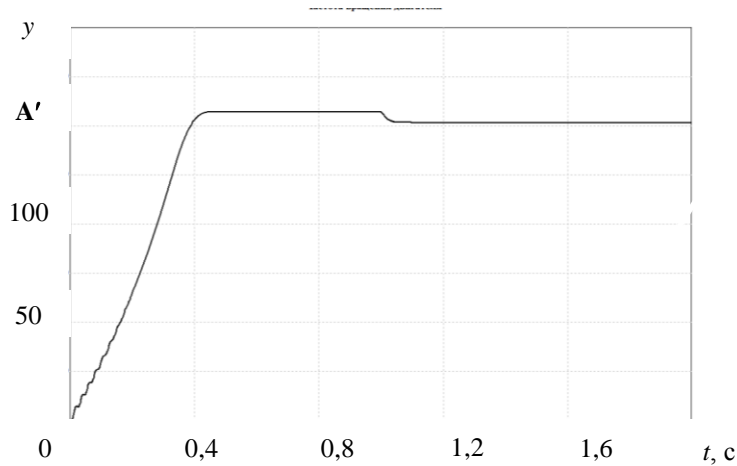


Рис. 2. Переходный процесс пуска АД и наброса нагрузки в момент времени 1 с

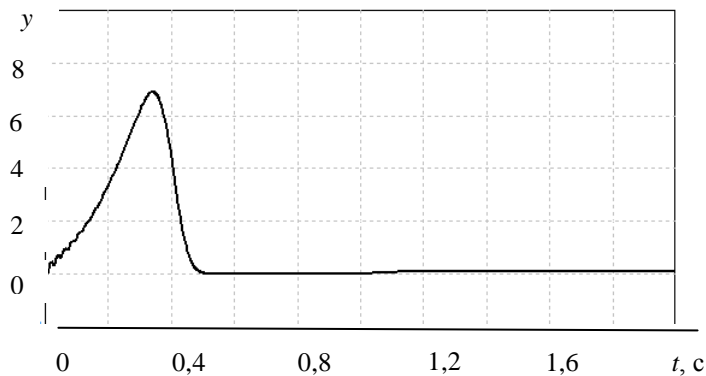


Рис. 3. Изменение ошибки скорости при вариации сопротивления статора

2. Изменение сопротивления ротора. Аналогично предыдущему, было проведено моделирование для этого условия (рис. 4).

В этом случае при пуске двигателя также имеется динамическая ошибка  $\sim 5,5\%$ , кроме того, появляется статическая ошибка при изменении момента нагрузки  $\sim 15\%$  от снижения скорости (рис. 3).

3. Изменение момента инерции. Результаты моделирования этого эксперимента приведены на рис. 5.

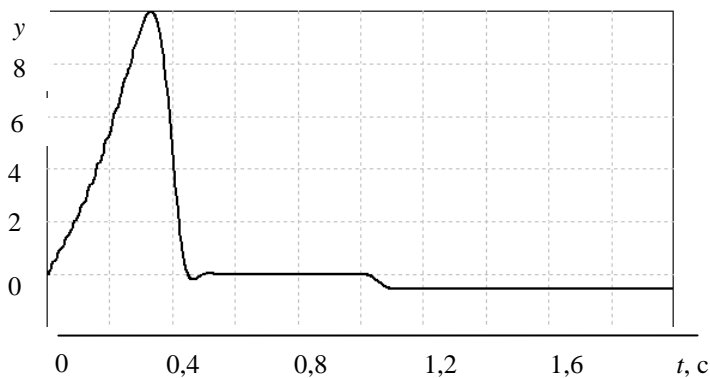


Рис. 4. Изменение ошибки скорости при вариации сопротивления ротора

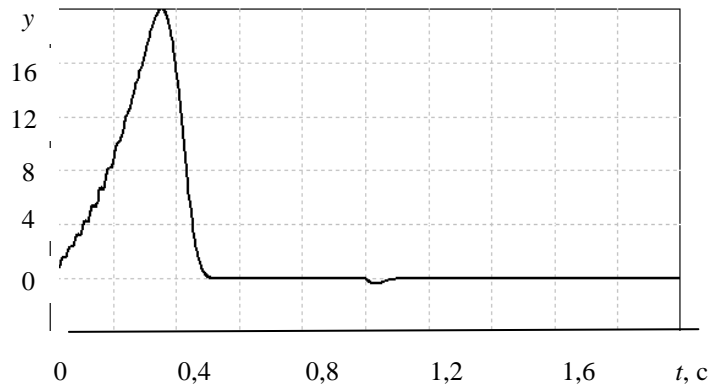


Рис. 5. Изменение ошибки скорости при вариации момента инерции

Как и в предыдущих случаях, имеется динамическая ошибка при пуске  $\sim 12\%$  и незначительная динамическая ошибка при изменении момента нагрузки.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- изменения значений сопротивления статора, ротора и момента инерции приводят к появлению динамической ошибки от задающего воздействия; изменению сопротивления статора соответствует минимальная амплитуда ошибки, а изменению момента инерции – максимальная;

- возмущающее воздействие приводит к появлению статической ошибки при изменении сопротивления ротора, а изменение сопротивления статора и момента инерции практически не влияет на процесс;

- для достижения высоких точностных показателей модели при задающем воздействии необходимо с высокой точностью определять значение момента инерции и его текущее изменение;

- для достижения высоких точностных показателей модели при возмущающем воздействии необходимо с высокой точностью определять значение сопротивления ротора и его текущее изменение.

### Источники

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. – М.: МЭИ, 2015. – 373 с.
3. Машиностроение: Энциклопедия: в 40 т. Т. IV–2. Электропривод / под ред. Л.Б. Масандилова, Ю.Н. Сергиевского, С.К. Козырева и др.; под общ. ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 2012. – 520 с.

## **ANALYSIS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR MODEL**

**ALTAHER ABBAS A. KARIM, DOMANOV V.I.**

*Asynchronous motor simulation is under consideration. Given motor model in the rotating coordinate system. The analysis of the variations of the model parameters. Defined values of errors that occur when changed the resistance of the stator, the rotor and the moment of inertia at the control and disturbance. Recommendations to the requirements in terms of accuracy and permissible variations of the main parameters of the asynchronous motor.*

*Keywords: model, motor parameters, transient, error, variation of parameters, moment of inertia, speed.*

УДК 621.372.54

## **АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

**АФАНАСЬЕВ А.Ю.**, КНИТУ–КАИ, Казань, д.т.н., профессор,  
afanasiev\_eo@mail.ru

**ГАЗИЗОВ И.Ф.**, КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант, darik31790@gmail.com

**КУНГУРЦЕВ А.А.**, КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант,  
my21144@gmail.com

*Представлена схема трехфазного активного фильтра высших гармоник. Фильтр построен на базе мостовой схемы управляемого трехфазного выпрямителя, потребляет из сети синусоидальный ток с единичным коэффициентом мощности для питания собственной нагрузки и компенсирует высшие гармоники токов нелинейной нагрузки базовой цепи.*

*Ключевые слова: активный фильтр высших гармоник, выпрямитель, трехфазная сеть, конденсатор, дроссель, диод, IGBT-транзистор, высшие гармоники, напряжение, ток, мощность, блок управления.*

Сложно представить какое-либо современное производство без использования автоматизированного электропривода, работающего с применением полупроводниковой информационной и силовой электроники.

Применение силовых полупроводниковых приборов (выпрямителей, инверторов частоты, конверторов и др.), потребляющих ток в импульсном режиме, приводит к появлению высших гармоник в питающей сети, что, в свою очередь, увеличивает потери электроэнергии и снижает срок службы оборудования.

В данной работе предлагается активный фильтр высших гармоник, построенный на базе классической схемы управляемого трехфазного выпрямителя. Предложенный фильтр, помимо компенсации высших гармонических искажений, присутствующих в питающей сети, фильтрует собственные входные токи.

Схема активного фильтра представлена на рис. 1.

К трехфазной сети подключена базовая цепь, содержащая нелинейные элементы и потребляющая несинусоидальный ток (элементы  $Z_A, Z_B, Z_C$ ).

Фильтр включает в себя IGBT-транзисторы  $T1 - T6$ , диоды  $D1 - D6$ , дроссели  $L_A, L_B, L_C$ , конденсаторы  $C1, C2$ , резистор  $R$ , датчики напряжения ДНА – ДНС, ДН1, ДН2, датчики тока ДТА<sub>н</sub> – ДТС<sub>н</sub>, ДТА – ДТС, ДТ, генератор пилообразного напряжения ГПН, блоки управления Б<sub>1</sub> – Б<sub>3</sub>.

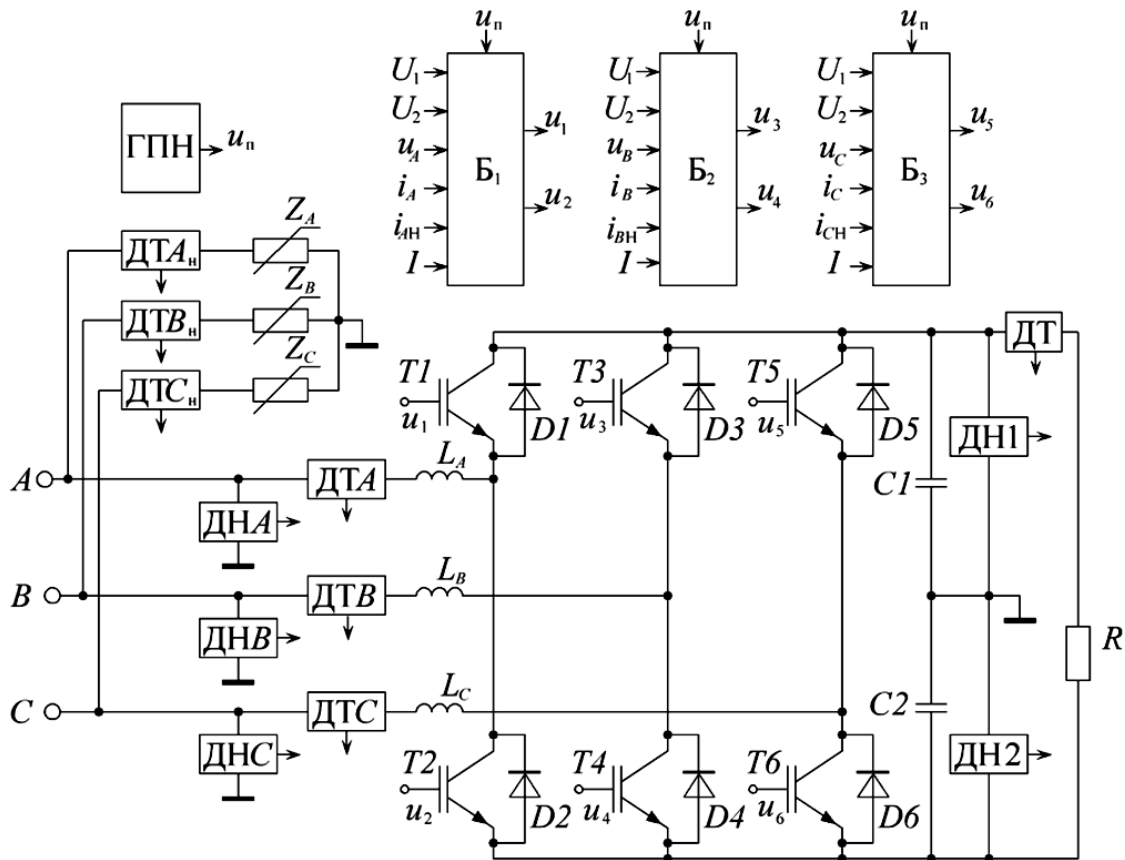


Рис. 1. Схема активного фильтра

IGBT-транзисторы  $T1 - T6$  вместе с обратными диодами  $D1 - D6$  соединены в мостовую схему. Входные зажимы  $A, B, C$  соединены со средними точками трех плеч через дроссели  $L_A, L_B, L_C$  и датчики тока ДТА – ДТС, а также через датчики тока ДТА<sub>н</sub> – ДТС<sub>н</sub> со входными зажимами нелинейной нагрузки. Датчики напряжения ДНА – ДНС подключены между зажимами  $A, B, C$  соответственно и общим проводом. Конденсаторы  $C1, C2$  подключены между плюсовым и минусовым выходными зажимами соответственно и общей точкой. Датчики напряжения ДН1, ДН2 подключены между плюсовым и минусовым выходными зажимами соответственно и общей точкой, т.е. параллельно конденсаторам  $C1, C2$ . Сопротивление  $R$  собственной нагрузки подключено на суммарное напряжение выпрямителя. Выходы датчиков напряжения ДНА – ДНС, ДН1, ДН2 и датчиков тока ДТА<sub>н</sub> – ДТС<sub>н</sub>, ДТА – ДТС соединены со входами блоков управления  $B_1 - B_3$ . Транзисторы и диоды схемы работают в режиме широтно-импульсной модуляции.

Рассмотрим на примере фазы  $A$  работу элементов схемы более подробно. При положительной полуволне напряжения  $u_A$  и открытом транзисторе  $T2$  положительный ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  увеличивается и возрастает энергия магнитного поля дросселя. Транзистор  $T1$  и диод  $D1$  в это время закрыты. Во время паузы, когда  $T2$  закрыт, ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  продолжает течь через диод  $D1$  за счет энергии, накопленной в дросселе, заряжая конденсатор  $C1$ .

При отрицательной полуволне напряжения  $u_A$  и открытом транзисторе  $T1$  отрицательный ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  увеличивается по модулю и возрастает энергия магнитного поля дросселя. Транзистор  $T2$  и диод  $D2$  в это время закрыты. Во время паузы, когда  $T1$  закрыт, ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  продолжает течь через диод  $D2$  за счет энергии, накопленной в дросселе, заряжая конденсатор  $C2$ .

В результате на конденсаторах  $C1, C2$  поддерживается требуемое напряжение, а ток фазы  $A$ , который имеет форму, задаваемую блоком управления, компенсирует токи высших гармоник нелинейной нагрузки.

Принцип работы фильтра следующий. На входные зажимы  $A, B, C$  подается трехфазная система напряжений:

$$u_A = U_m \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$u_B = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad (2)$$

$$u_C = U_m \sin(\omega t - 4\pi/3). \quad (3)$$

Датчики напряжения ДНА – ДНС вырабатывают соответствующие этим напряжениям сигналы. Датчики напряжения ДН1, ДН2 вырабатывают сигналы, соответствующие напряжениям на конденсаторах  $C1, C2$ . Эти сигналы поступают на блоки управления, где сравниваются с требуемыми значениями. Блоки управления формируют внутренние сигналы управления  $u_{c1}, u_{c2}$ . В зависимости от полярности напряжений  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  формируются мгновенные значения токов:

$$i_A^0 = u_{c1}u_A, \quad u_A > 0; \quad i_A^0 = u_{c2}u_A, \quad u_A < 0; \quad (4)$$

$$i_B^0 = u_{c1}u_B, \quad u_B > 0; \quad i_B^0 = u_{c2}u_B, \quad u_B < 0; \quad (5)$$

$$i_C^0 = u_{c1}u_C, \quad u_C > 0; \quad i_C^0 = u_{c2}u_C, \quad u_C < 0. \quad (6)$$

Датчики тока ДТА<sub>н</sub> – ДТС<sub>н</sub> вырабатывают сигналы, пропорциональные токам нелинейной нагрузки. Эти сигналы подаются на блоки управления, где происходит выделение сигналов, пропорциональных токам высших гармоник  $i_{Aн}(t), i_{Bн}(t), i_{Cн}(t)$ . Далее полученные сигналы складываются с токами  $i_A^0, i_B^0, i_C^0$ . Формируются мгновенные значения требуемых токов фильтра:

$$i_{Ac} = i_A^0 - i_{Aн}; \quad (7)$$

$$i_{Bc} = i_B^0 - i_{Bн}; \quad (8)$$

$$i_{Cc} = i_C^0 - i_{Cн}. \quad (9)$$

Эти значения токов сравниваются с истинными значениями фазных токов фильтра  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ , которые поступают от датчиков тока ДТА – ДТС, и вырабатываются широтно-модулированные импульсы, поступающие на управляющие входы IGBT-транзисторов. Генерируются токи, соответствующие токам высших гармоник базовой нелинейной цепи с обратным знаком, происходит компенсация высших гармонических искажений токов, потребляемых из трехфазной сети. В результате потребляемые из сети токи имеют форму, близкую к синусоидальной.

Запишем формулу для относительной длительности импульсов, управляющих транзистором  $T1$ . Допустим, что период импульсов –  $\tau$ , длительность открытого состояния –  $\tau_{и}$ . Тогда время паузы:

$$\tau_{п} = \tau - \tau_{и}.$$

За время импульса ток  $i_A$  получит приращение:

$$\Delta i'_A = \tau_{\text{и}}(u_A - ri_A - u_S - u_1)/L.$$

За время паузы ток  $i_A$  получит приращение:

$$\Delta i''_A = (\tau - \tau_{\text{и}})(u_A - ri_A - u_S - u_2)/L.$$

Изменение тока за весь период:

$$\Delta i_A = (\tau(u_A - ri_A - u_S - u_2) - \tau_{\text{и}}(u_1 - u_2))/L.$$

Разделим уравнение на период импульсов  $\tau$ , получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{di_A}{dt} = (u_A - ri_A - u_S - u_2 - \gamma_{\text{и}}u_0)/L, \quad (10)$$

где  $\gamma_{\text{и}}$  – относительная длительность импульса,  $\gamma_{\text{и}} = \tau_{\text{и}}/\tau$ ;  $u_S$  – падение напряжения на полупроводниковом ключе;  $u_0 = u_1 - u_2$ .

Скорость изменения тока  $i_A$  можно рассчитать согласно принципу комбинированного управления. При невозмущенном движении имеем выражение:

$$\frac{di_{Ac}}{dt} = \frac{di_A^0}{dt} - \frac{di_{AH}}{dt}. \quad (11)$$

При отклонении тока от его требуемого значения следует добавить слагаемое:

$$\frac{di_{A\Delta}}{dt} = k_P(i_A^0 - i_{AH} - i_A). \quad (12)$$

Далее имеем:

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{di_A^0}{dt} - \frac{di_{AH}}{dt} + k_P(i_A^0 - i_{AH} - i_A). \quad (13)$$



Подставляем выражение (13) в равенство (10):

$$\gamma_{\text{и}} = \frac{1}{u_0} \left( u_A - r i_A - u_S - u_2 - L \left( \frac{d i_A^0}{dt} + \frac{d i_{\text{АН}}}{dt} \right) - k_{PL} (i_A^0 + i_{\text{АН}} - i_A) \right). \quad (14)$$

Аналогичные выражения можно получить для фаз *B* и *C*.

Сигналы  $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ , входящие в выражения (4) – (9), могут быть сформированы согласно принципу комбинированного управления. Требуемая амплитуда входных токов при отсутствии погрешности по напряжению цепи постоянного тока может быть получена из условия баланса мощностей:

$$\frac{3}{2} U_m I_m^0 \eta = U_0 I,$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия преобразователя;  $I$  – постоянный ток, созданный преобразователем. Отсюда следует:

$$I_m^0 = \frac{2U_0 I}{3\eta U_m}; \quad I_m^0 = u_{c1} U_m;$$

$$u_{c1} = k_C I; \quad k_C = \frac{2U_0}{3\eta U_m^2}.$$

При наличии отклонения постоянного напряжения  $u_1$  от требуемого значения  $U_{10}$  к сигналу  $u_{c1}$  следует добавить слагаемое согласно закону пропорционального регулятора:

$$u_{c1\Delta} = k_U \Delta U_1.$$

Здесь  $\Delta U_1$  – погрешность регулирования напряжения;  $k_U$  – постоянный коэффициент. Имеем:

$$u_{c1} = k_C I + k_U \Delta U_1, \quad u_A > 0; \quad (15)$$

$$u_{c2} = k_C I - k_U \Delta U_2, \quad u_A < 0. \quad (16)$$

На рис. 2 представлен блок управления, построенный согласно равенству (14).

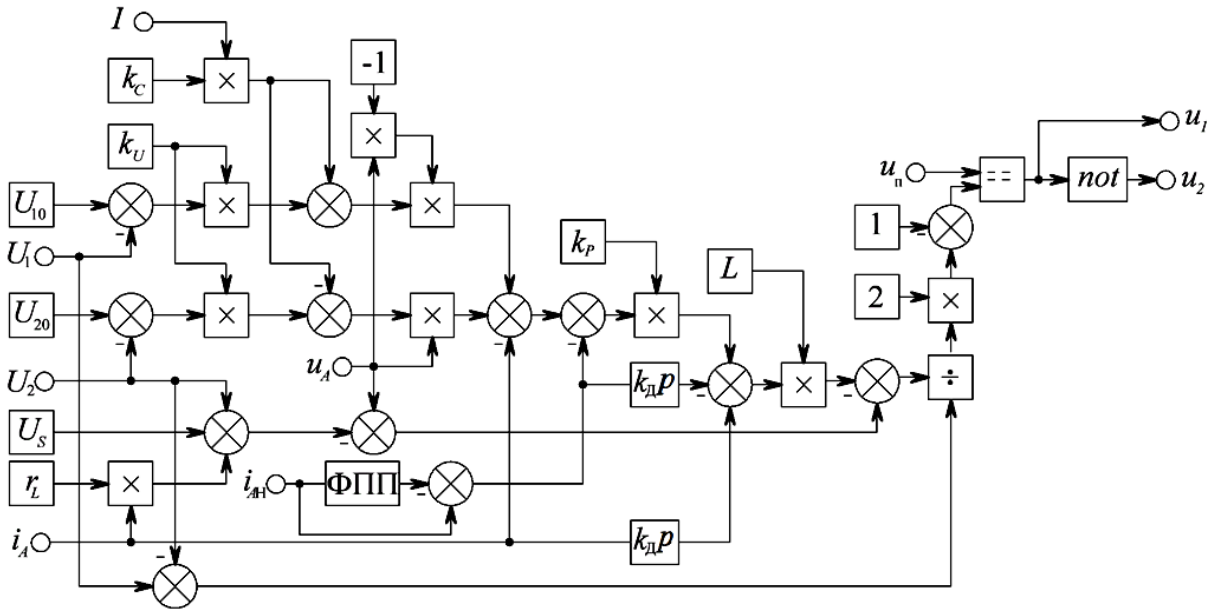


Рис. 2. Схема блока управления

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного алгоритма фильтрации высших гармонических искажений разработана схема активного фильтра, компенсирующего только пятые гармоники токов (рис. 3).

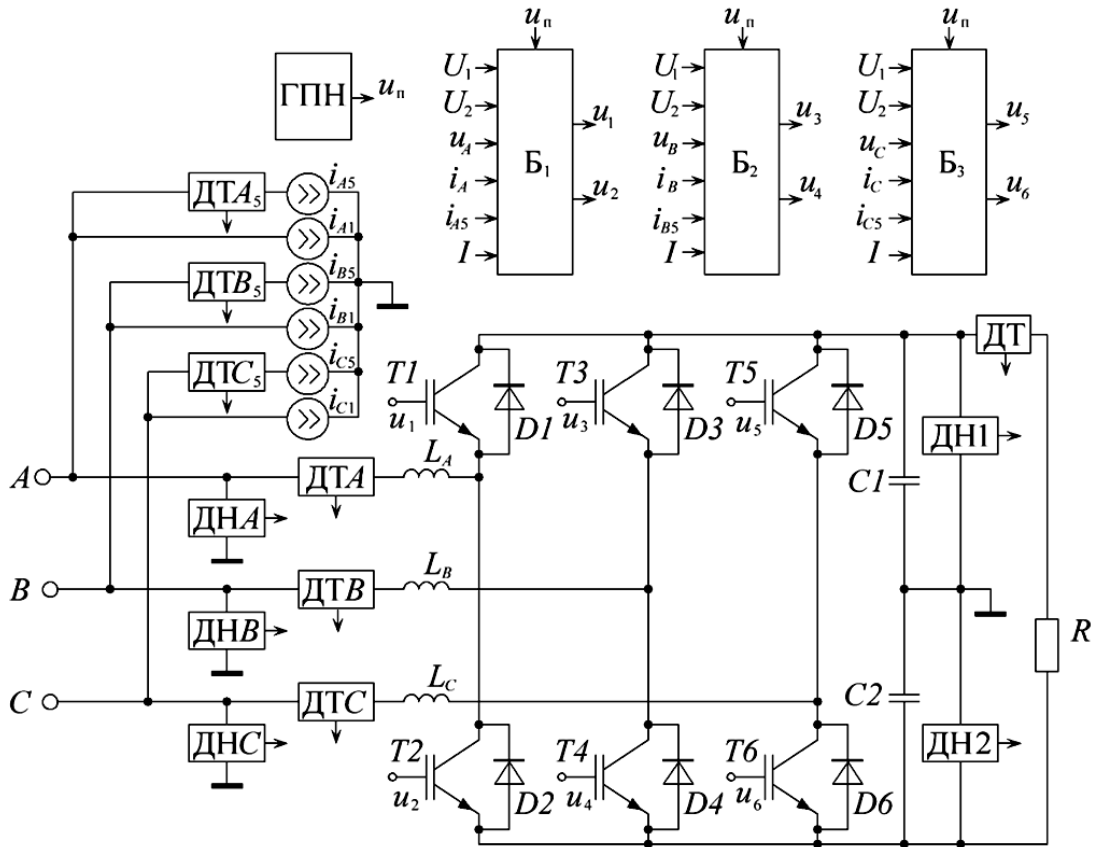


Рис. 3. Схема активного фильтра с источниками тока

На схеме нелинейная нагрузка заменена источниками тока с заранее заданными параметрами. Каждая фаза имеет два источника тока, которые генерируют токи первой и пятой гармоник. Имеются датчики тока ДТА<sub>5</sub> – ДТС<sub>5</sub>, которые вырабатывают сигналы, пропорциональные токам пятой гармоники  $i_{A5}(t)$ ,  $i_{B5}(t)$ ,  $i_{C5}(t)$ . Далее полученные сигналы передаются в блоки управления, где вычитаются из токов  $i_A^0$ ,  $i_B^0$ ,  $i_C^0$ .

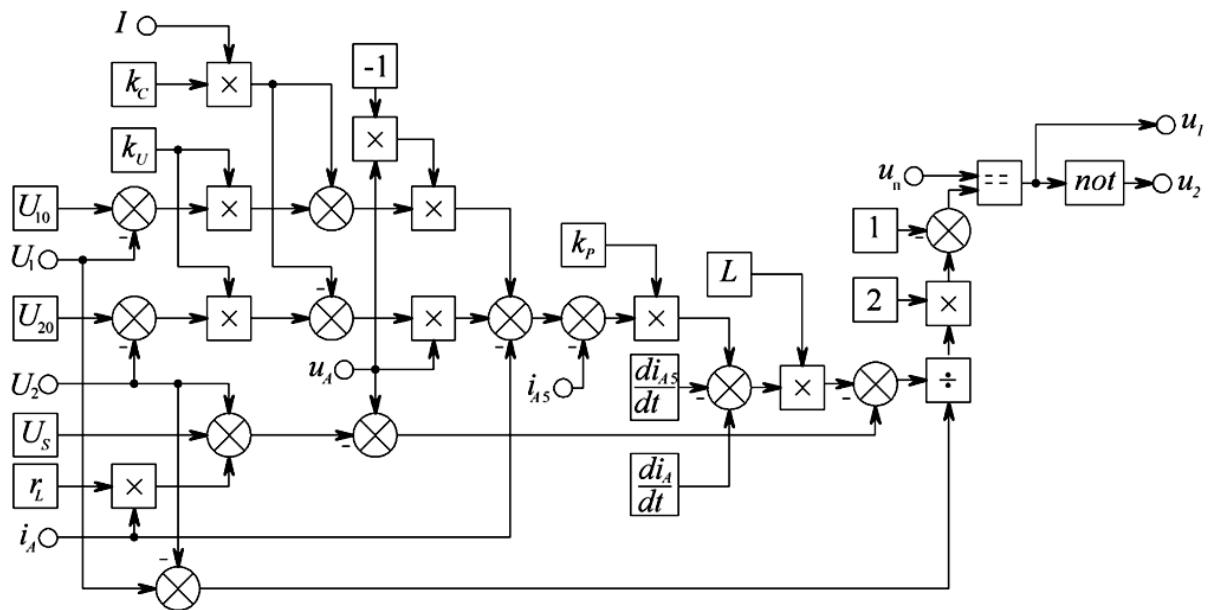


Рис. 4. Схема блока управления

На рис. 4 изображен состав блока управления одной из фаз выше представленной схемы.

В данной схеме значения производных требуемых токов заданы аналитическим способом, отсутствует полосно-пропускающий фильтр. Приведенная схема позволяет перейти к аппаратной реализации активного фильтра. Проверка предложенного алгоритма и схемотехнического решения с помощью компьютерной модели в системе Turbo Pascal подтвердила работоспособность и эффективность данной схемы.

### Источники

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
2. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель с фильтрацией и стабилизацией / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. докл. 1-й Поволжской науч.-практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – С. 295–298.

3. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель со стабилизацией напряжения / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 6. – С. 25–30.

4. Барутсков И.Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / И.Б. Барутсков, С.А. Вдовенко, Е.В. Цыганков // Главный энергетик. – 2011. – № 06. – С. 5–15.

5. Люতারевич А.Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения для улучшения качества электроэнергии / А.Г. Люতারевич, С.Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2010. – № 1(87). – С. 133–136.

### ACTIVE HARMONIC FILTER

AFANASIEV A.YU., GAZIZOV I.F., KUNGURTSEV A.A.

*The circuit of a three-phase active harmonic filter is presented in the article. The filter is based on a three-phase controlled bridge rectifier. It consumes sinusoidal currents from network for its own load power with unitary power factor and compensates the higher current harmonics of the nonlinear load circuit.*

*Keywords: active harmonics filter, rectifier, three-phase network, capacitor, choke, diode, insulated gate bipolar transistor, higher harmonics, voltage, current, power, control unit.*

УДК 621.311.6

### ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ВХОДНЫХ ТОКОВ

АФАНАСЬЕВ А.Ю., КНИТУ–КАИ, Казань, д.т.н., профессор,  
afanasiev\_eo@mail.ru

ГАЗИЗОВ И.Ф., КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант, darik31790@gmail.com

КУНГУРЦЕВ А.А., КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант,  
my21144@gmail.com

*Представлена схема управляемого трехфазного выпрямителя, построенного на базе классической схемы трехфазного преобразователя частоты и выполняющего три функции: выпрямление трехфазного напряжения, фильтрацию входных токов, имеющих синусоидальную форму и единичный коэффициент мощности, и стабилизацию выходного напряжения.*

*Ключевые слова:* выпрямитель, стабилизатор напряжения, трехфазная сеть, конденсатор, дроссель, диод, IGBT-транзистор, напряжение, ток, мощность, блок управления, коэффициент мощности.

Современная система энергоснабжения и производства включает в себя большое количество устройств, использующих полупроводниковую информационную и силовую электронику. Одним из таких устройств является трехфазный выпрямитель, который используется во вторичных источниках питания, преобразователях частоты и т.д. Классическая схема трехфазного выпрямителя по схеме Ларионова имеет ряд недостатков: работа в импульсном режиме, приводящая к появлению высших гармонических искажений в питающей сети, большая масса и габариты фильтров низкой частоты, наличие дополнительных стабилизаторов напряжения [1].

В данной работе представлен управляемый трехфазный выпрямитель, работающий на биполярных транзисторах с изолированным затвором и обратных диодах и выполняющий три функции: выпрямление трехфазного напряжения, фильтрацию входных токов, имеющих синусоидальную форму и единичный коэффициент мощности, и стабилизацию выходного напряжения [2].

Схема выпрямителя приведена на рис. 1.

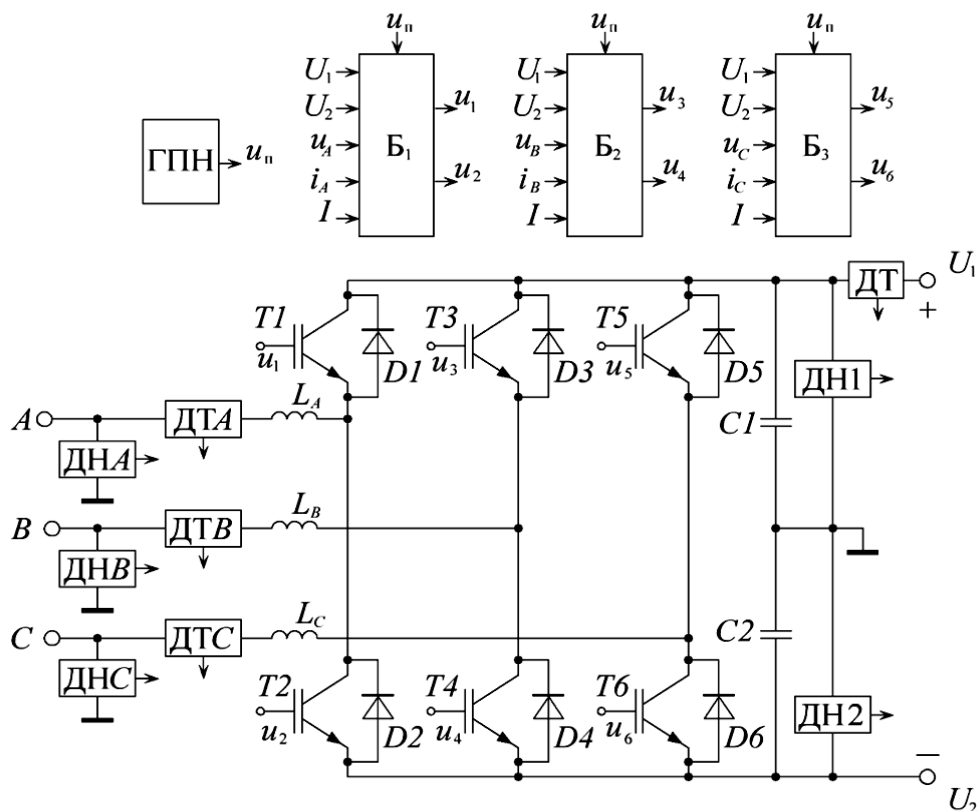


Рис. 1. Схема выпрямителя

Выпрямитель включает в себя IGBT-транзисторы  $T1 - T6$  и диоды  $D1 - D6$ , образующие шесть силовых ключей, дроссели  $L_A, L_B, L_C$ , конденсаторы  $C1, C2$ , датчики напряжения ДНА – ДНС, ДН1, ДН2, датчики тока ДТА – ДТС, генератор пилообразного напряжения ГПН, блоки управления  $B_1 - B_3$ .

IGBT-транзисторы  $T1 - T6$  вместе с обратными диодами  $D1 - D6$  соединены в мостовую схему. Входные зажимы  $A, B, C$  соединены со средними точками трех плеч через дроссели  $L_A, L_B, L_C$  и датчики тока ДТА – ДТС. Датчики напряжения ДНА – ДНС подключены между зажимами  $A, B, C$  соответственно и общим проводом. Конденсаторы  $C1, C2$  подключены между плюсовым и минусовым выходными зажимами соответственно и общей точкой. Датчики напряжения ДН1, ДН2 подключены между плюсовым и минусовым выходными зажимами соответственно и общей точкой, т.е. параллельно конденсаторам  $C1, C2$ . Выходы датчиков напряжения ДНА – ДНС, ДН1, ДН2 и датчиков тока ДТА – ДТС соединены со входами блоков управления  $B_1 - B_3$ .

Выпрямитель работает следующим образом. На входные зажимы  $A, B, C$  подается трехфазная система напряжений:

$$u_A = U_m \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$u_B = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad (2)$$

$$u_C = U_m \sin(\omega t - 4\pi/3). \quad (3)$$

Датчики напряжения ДНА – ДНС вырабатывают соответствующие этим напряжениям сигналы. Датчики напряжения ДН1, ДН2 вырабатывают сигналы, соответствующие напряжениям на конденсаторах  $C1, C2$ . Эти сигналы поступают на блоки управления, где сравниваются с требуемыми значениями. Блоки управления формируют внутренние сигналы управления  $u_{c1}, u_{c2}$ . В зависимости от полярности напряжений  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  формируются мгновенные значения токов:

$$i_A^0 = u_{c1}u_A, \quad u_A > 0; \quad i_A^0 = u_{c2}u_A, \quad u_A < 0; \quad (4)$$

$$i_B^0 = u_{c1}u_B, \quad u_B > 0; \quad i_B^0 = u_{c2}u_B, \quad u_B < 0; \quad (5)$$

$$i_C^0 = u_{c1}u_C, \quad u_C > 0; \quad i_C^0 = u_{c2}u_C, \quad u_C < 0. \quad (6)$$

Эти значения токов сравниваются с истинными значениями фазных токов  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ , которые поступают от датчиков тока ДТА – ДТС, и вырабатываются широтно-модулированные импульсы, поступающие на управляющие входы IGBT-транзисторов.

В результате токи  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  изменяются по законам, близким к синусоидальным и совпадающим по фазе с соответствующими напряжениями. Вследствие этого снижаются несинусоидальные искажения напряжений и потери энергии в линии [3].

На рис. 2 показана схема выпрямителя, соответствующая одной фазе  $A$ . Источник напряжения  $u_A$  подключен к средней точке  $A$  через дроссель  $L_A$  между первым и вторым силовыми ключами, подключенными к конденсаторам  $C1$ ,  $C2$ , вторые зажимы которых соединены с общим (нулевым) проводом  $0$ . Отметим, что конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  являются общими для всех трех фаз.

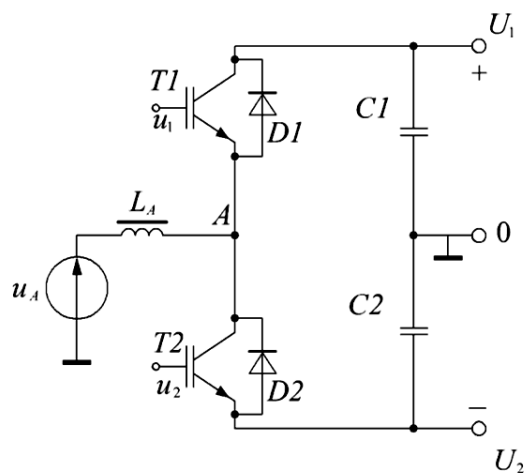


Рис. 2. Схема выпрямителя для фазы  $A$

Выпрямитель работает следующим образом. При положительной полуволне напряжения  $u_A$  и открытом транзисторе  $T2$  положительный ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  увеличивается и возрастает энергия магнитного поля дросселя. Транзистор  $T1$  и диод  $D1$  в это время закрыты. Во время паузы, когда  $T2$  закрыт, ток  $i_A$  дросселя  $L_A$  продолжает течь через диод  $D1$  за счет энергии, накопленной в дросселе, заряжая конденсатор  $C1$ .

При отрицательной полуволне напряжения  $u_A$  и открытом транзисторе  $T1$  отрицательный ток  $i_A$  через дроссель  $L_A$  увеличивается по модулю

и возрастает энергия магнитного поля дросселя. Транзистор  $T2$  и диод  $D2$  в это время закрыты. Во время паузы, когда  $T1$  закрыт, ток  $i_A$  дросселя  $L_A$  продолжает течь через диод  $D2$  за счет энергии, накопленной в дросселе, заряжая конденсатор  $C2$ .

Длительности импульсов регулируются блоками управления. В результате на конденсаторах  $C1$ ,  $C2$  поддерживается требуемое напряжение, а ток фазы  $A$  изменяется по закону, близкому

к синусоидальному. Выпрямитель выполняет дополнительную функцию активного фильтра низкой частоты для сглаживания выпрямленного напряжения, а также функцию стабилизатора напряжения. При этом исключаются искажения напряжения сети из-за высших гармоник тока и снижаются мощность потерь в сети, а также масса, благодаря меньшей емкости конденсаторов, отсутствию фильтра низкой частоты и стабилизатора напряжения.

Запишем формулу для относительной длительности импульсов, управляющих транзистором. Допустим, что период импульсов –  $\tau$ , длительность открытого состояния –  $\tau_{и}$ . Тогда время паузы:

$$\tau_{п} = \tau - \tau_{и}.$$

За время импульса ток  $i_A$  получит приращение:

$$\Delta i'_A = \tau_{и} (u_A - r i_A - u_S - u_1) / L.$$

За время паузы ток  $i_A$  получит приращение:

$$\Delta i''_A = (\tau - \tau_{и}) (u_A - r i_A - u_S - u_2) / L.$$

Изменение тока за весь период:

$$\Delta i_A = (\tau (u_A - r i_A - u_S - u_2) - \tau_{и} (u_1 - u_2)) / L.$$

Разделим уравнение на период импульсов  $\tau$ . При  $\tau \rightarrow 0$  получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{di_A}{dt} = (u_A - r i_A - u_S - u_2 - \gamma_{и} u_0) / L. \quad (7)$$

Здесь  $\gamma_{и}$  – относительная длительность импульса,  $\gamma_{и} = \tau_{и} / \tau$ ;  $u_S$  – падение напряжения на полупроводниковом ключе;  $u_0 = u_1 - u_2$ .

Скорость изменения тока  $i_A$  можно рассчитать согласно принципу комбинированного управления [4]. При невозмущенном движении имеем выражение:

$$\frac{di_A^0}{dt} = \omega I_m^0 \cos(\omega t). \quad (8)$$



Если имеется отклонение тока от требуемого значения, то следует добавить слагаемое:

$$\frac{di_{A\Delta}}{dt} = k_P (i_A^0 - i_A). \quad (9)$$

Далее имеем:

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{di_A^0}{dt} + k_P (i_A^0 - i_A). \quad (10)$$

Подставляем выражение (10) в равенство (7):

$$\gamma_{и} = \frac{1}{u_0} \left( u_A - ri_A - u_S - u_2 - L \frac{di_A^0}{dt} - k_P L (i_A^0 - i_A) \right). \quad (11)$$

Аналогичные выражения можно получить для фаз *B* и *C*.

Сигналы  $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ , входящие в выражения (4) – (6), могут быть сформированы согласно принципу комбинированного управления. Требуемая амплитуда входных токов при отсутствии погрешности по напряжению цепи постоянного тока может быть получена из условия баланса мощностей:

$$\frac{3}{2} U_m I_m^0 \eta = U_0 I,$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия преобразователя;  $I$  – постоянный ток, созданный преобразователем. Отсюда следует:

$$I_m^0 = \frac{2U_0 I}{3\eta U_m}; \quad I_m^0 = u_{c1} U_m;$$

$$u_{c1} = k_C I; \quad k_C = \frac{2U_0}{3\eta U_m^2}.$$

При наличии отклонения постоянного напряжения  $u_1$  от требуемого значения  $U_{10}$  к сигналу  $u_{c1}$  следует добавить слагаемое согласно закону пропорционального регулятора:

$$u_{c1\Delta} = k_U \Delta U_1.$$

Здесь  $\Delta U_1$  – погрешность регулирования напряжения;  $k_U$  – постоянный коэффициент. Имеем:

$$u_{c1} = k_C I + k_U \Delta U_1, \quad u_A > 0; \quad (12)$$

$$u_{c2} = k_C I - k_U \Delta U_2, \quad u_A < 0. \quad (13)$$

На рис. 3 представлен блок управления, построенный согласно равенству (11).

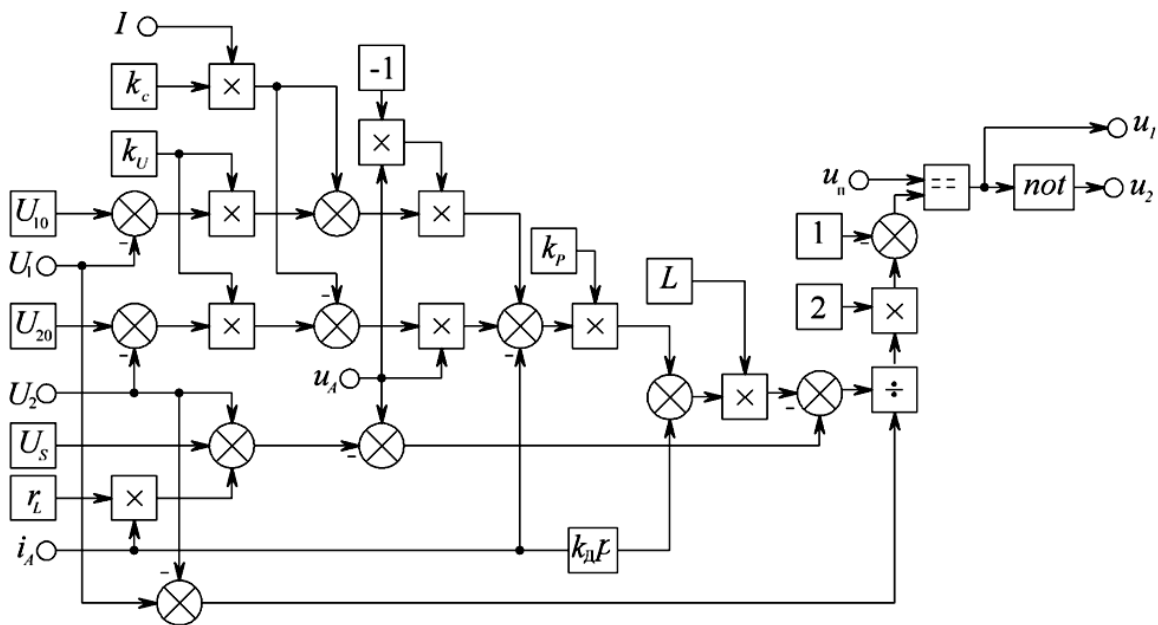


Рис. 3. Схема блока управления

Приведенная схема позволяет перейти к аппаратной реализации выпрямителя. Проверка предложенного алгоритма и схемотехнического решения с помощью компьютерной модели в системе Turbo Pascal подтвердила работоспособность и эффективность данной схемы.

### Источники

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
2. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель с фильтрацией и стабилизацией / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. докл. 1-й Поволжской науч.-практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – С. 295–298.

3. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель со стабилизацией напряжения / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 6. – С. 25–30.

4. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель со стабилизацией напряжения / А.Ю. Афанасьев, М.Р. Гимранов, А.А. Кунгурцев, Р.Д. Мохаммед // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. – Казань, 2015. – № 2. – С. 64–68.

## **RECTIFIER WITH FILTRATION OF INPUT CURRENTS**

AFANASIEV A.YU., GAZIZOV I.F., KUNGURTSEV A.A.

*The article presents a diagram of a three-phase controlled rectifier, built on the basis of the classical three-phase inverter circuit and performs three functions: rectification of the three-phase voltages system, filtering the sine-shaped and unitary power factor input currents and stabilization of the output voltage.*

*Keywords: rectifier, voltage stabilizer, three-phase network, capacitor, choke, diode, insulated gate bipolar transistor, voltage, current, power, control unit, power factor.*

УДК 621.372.54

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK**

Афанасьев А.Ю., КНИТУ–КАИ, Казань, д.т.н., профессор,  
afanasiev\_eo@mail.ru

Газизов И.Ф., КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант, darik31790@gmail.com

Кунгурцев А.А., КНИТУ-КАИ, Казань, магистрант, my21144@gmail.com

*Рассматривается моделирование трехфазного активного фильтра высших гармоник в программе MatLab – Simulink. Фильтр построен на базе схемы управляемого трехфазного выпрямителя с применением IGBT-транзисторов и обратных диодов. Представлена модель активного фильтра. Результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого алгоритма фильтрации и схемотехнического решения.*

*Ключевые слова: активный фильтр высших гармоник, выпрямитель, конденсатор, дроссель, диод, IGBT-транзистор, высшие гармоники, напряжение, ток, мощность, блок управления, регулятор, широтно-импульсная модуляция.*

Использование в энергетике и промышленности силовых выпрямителей, инверторов частоты, конверторов приводит к появлению высших гармоник в питающей сети, что ухудшает качество электроэнергии, увеличивает потери и снижает срок службы оборудования.

В представленной работе описывается моделирование активного фильтра высших гармоник в программе MatLab – Simulink. Фильтр компенсирует высшие гармонические искажения, генерируемые нелинейной нагрузкой, фильтрует собственные входные токи.

Схема активного фильтра представлена на рис. 1.

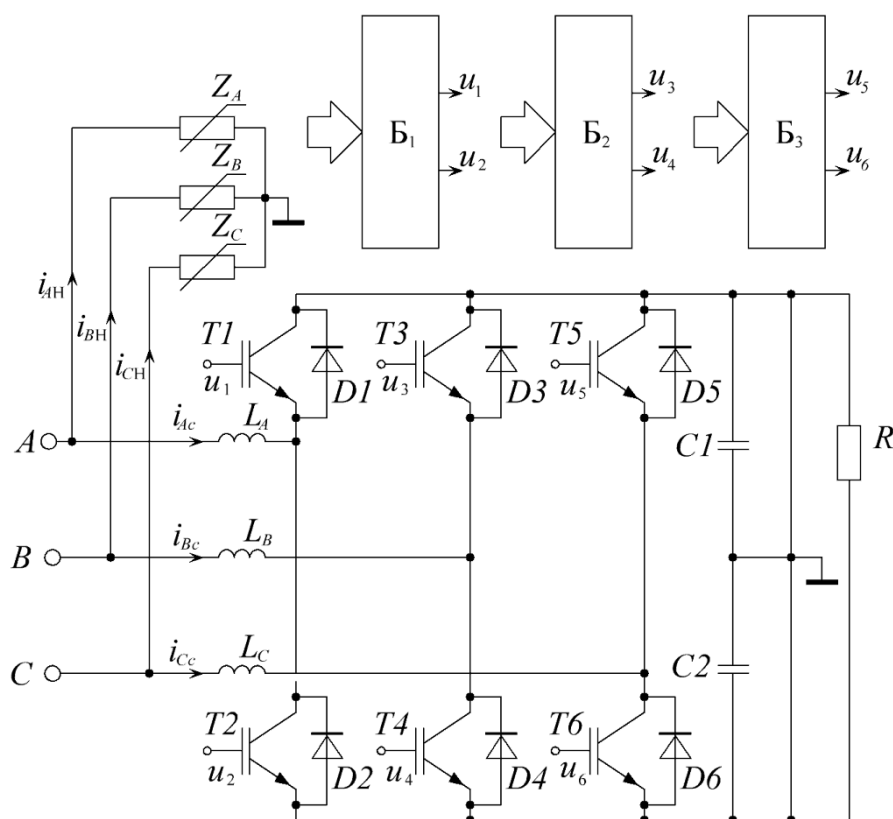


Рис. 1. Схема активного фильтра

К трехфазной сети подключена базовая цепь, содержащая нелинейную нагрузку, генерирующую первые и высшие гармоники токов.

Фильтр должен скомпенсировать высшие гармоники базовой цепи и обеспечить питание собственной нагрузки постоянным напряжением.

Фильтр содержит IGBT-транзисторы  $T1 - T6$ , диоды  $D1 - D6$ , дроссели  $L_A, L_B, L_C$ , конденсаторы  $C1, C2$ , резистор  $R$ , датчики напряжения, датчики тока, генератор пилообразного напряжения, блоки управления  $B_1 - B_3$ .

Блоки управления формируют мгновенные значения синусоидальных токов  $i_A^0, i_B^0, i_C^0$ . Далее сигналы, пропорциональные токам высших гармоник  $i_{Aн}(t), i_{Bн}(t), i_{Cн}(t)$ , вычитаются из токов  $i_A^0, i_B^0, i_C^0$ . Формируются мгновенные значения требуемых токов фильтра:

$$i_{Ac} = i_A^0 - i_{Aн}; \quad (1)$$

$$i_{Bc} = i_B^0 - i_{Bн}; \quad (2)$$

$$i_{Cc} = i_C^0 - i_{Cн}. \quad (3)$$

Вырабатываются широтно-модулированные импульсы, поступающие на управляющие входы транзисторов. Происходит компенсация высших гармонических токов, потребляемых из трехфазной сети. В результате скомпенсированные токи имеют форму, близкую к синусоидальной.

Относительная длительность импульсов, управляющих транзистором  $T1$ :

$$\gamma_{и} = \frac{1}{u_0} \left( u_A - r i_A - u_S - u_2 - L \left( \frac{di_A^0}{dt} + \frac{di_{Aн}}{dt} \right) - k_P L (i_A^0 + i_{Aн} - i_A) \right). \quad (4)$$

Аналогичные выражения можно получить для фаз  $B$  и  $C$ .

Далее представлена схема модели активного фильтра, компенсирующего пятые гармоники, в среде MatLab – Simulink.

Модель фильтра состоит из трехфазного источника напряжения, трехфазного управляемого источника тока, соответствующего нелинейной нагрузке, трех блоков управления, соответствующих трем фазам питающего напряжения, генератора пилообразного напряжения, силового преобразователя на IGBT-транзисторах и диодах, двух конденсаторов, резистора. В модели можно задать значения токов 5-й гармоники, которую нужно скомпенсировать, а также уровни напряжения на конденсаторах.

В качестве генератора токов 1 и 5-й гармоник использован трехфазный управляемый источник тока со следующими параметрами:

- амплитуда тока первой гармоники:  $I_m = 40$  А;
- частота тока первой гармоники:  $f = 50$  Гц;
- амплитуда тока пятой гармоники:  $I_m = 8$  А;
- частота тока пятой гармоники:  $f = 250$  Гц.

Параметры модели активного фильтра следующие:

- амплитуда напряжения сети:  $U_m = 100$  В;
- частота напряжения сети:  $f = 50$  Гц;
- индуктивность дросселей  $L_A - L_C$ : 0,003 Гн;
- емкость конденсаторов  $C1, C2$ : 0,003 Ф;
- начальное напряжение конденсатора  $C1$ :  $U_1 = 120$  В;
- начальное напряжение конденсатора  $C2$ :  $U_2 = -120$  В;
- активные сопротивления  $R_A - R_C$ : 0,1 Ом;
- активное сопротивление  $R$ : 50 Ом.

На рис. 2 показана модель активного фильтра в среде MatLab – Simulink.

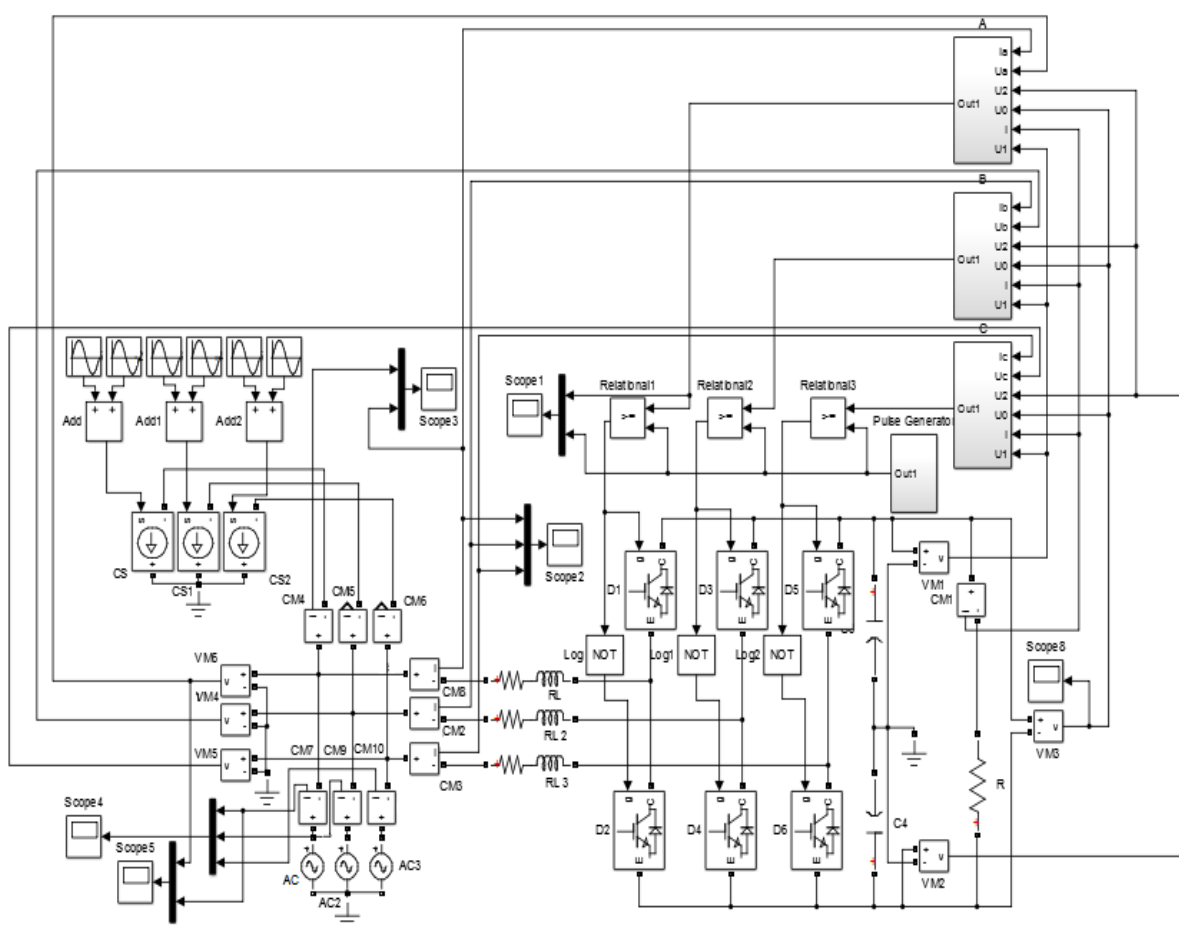


Рис. 2. Модель активного фильтра гармоник

На рис. 3 представлен блок управления, который построен согласно выражению (4).

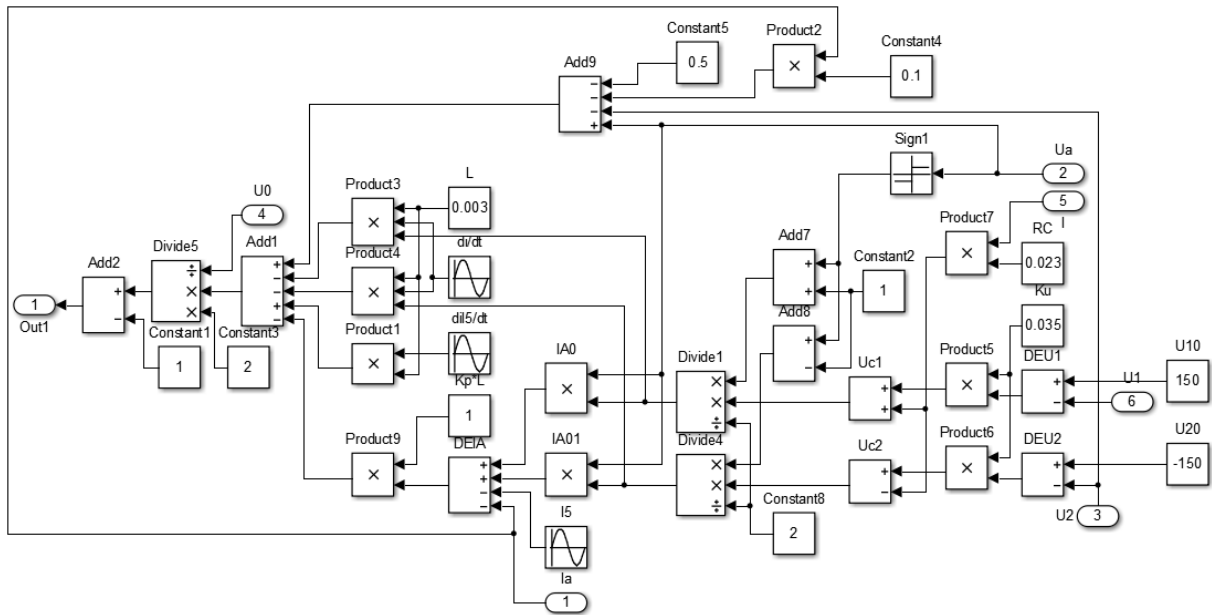


Рис. 3. Блок управления

В результате моделирования получились следующие зависимости.

На рис. 4 показан график напряжения цепи постоянного тока, которое формируется суммой напряжений на конденсаторах. Как видно из графика, в установившемся режиме напряжение постоянно и имеет значение 300 В.

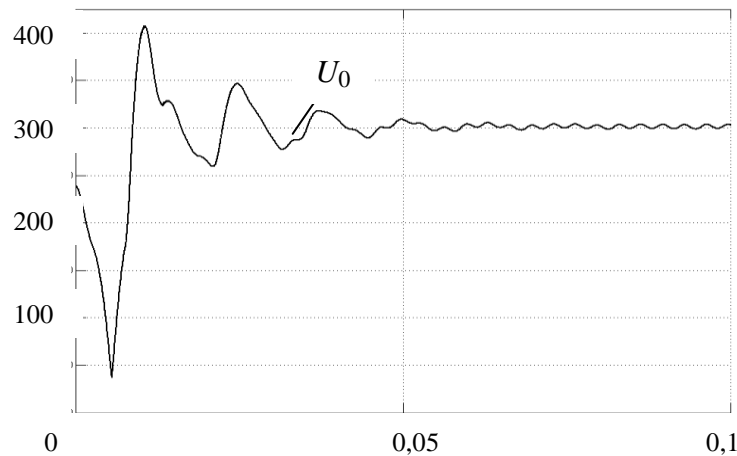


Рис. 4. Напряжение цепи постоянного тока

На рис. 5 представлен график тока нелинейной нагрузки –  $i_{An}$ , график компенсирующего тока –  $i_{Ac}$ .

На рис. 6 представлены графики скомпенсированного тока и напряжения, совпадающих по фазе.

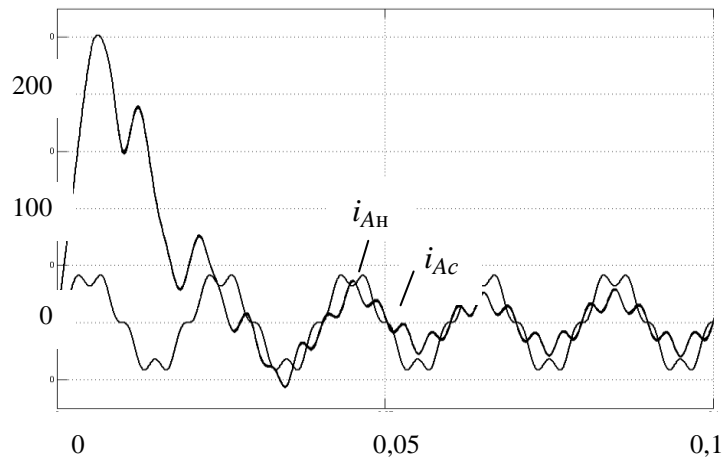


Рис. 5. Ток нелинейной нагрузки, компенсирующий ток

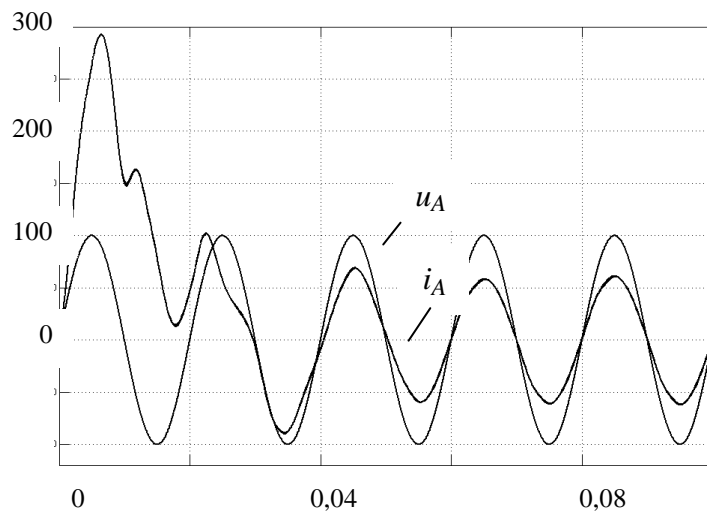


Рис. 6. Скомпенсированный ток и фазное напряжение

На рис. изображены скомпенсированные токи трех фаз.

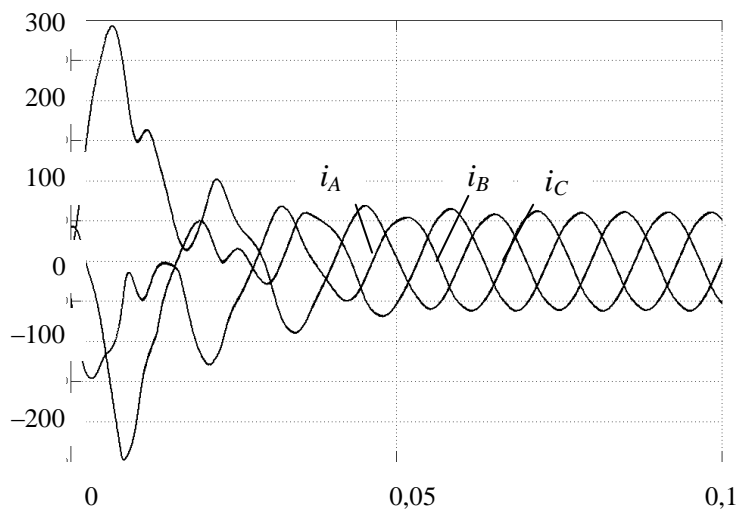


Рис. 7. Скомпенсированные токи трех фаз



Как видно из графиков, предложенная модель компенсирует токи пятой гармоники и, как следствие, форма токов сети близка к синусоидальной. Можно сделать вывод о том, что теория предлагаемого фильтра гармоник подтвердилась.

Результаты моделирования подтвердили возможность компенсации высших гармоник тока и работоспособность схемы при различных нагрузках. Устранение высших гармоник в питающей сети уменьшает искажения напряжений и потери мощности.

### **Источники**

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. Sim Power Systems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона, 2001. – 320 с.
4. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель с фильтрацией и стабилизацией / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. докл. 1-й Поволжской науч.-практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – С. 295–298.
5. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель со стабилизацией напряжения / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 6. – С. 25–30.
6. Барутсков И.Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / И.Б. Барутсков, С.А. Вдовенко, Е.В. Цыганков // Главный энергетик. – 2011. – № 06. – С. 5–15.
7. Лютаревич А.Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения для улучшения качества электроэнергии / А.Г. Лютаревич, С.Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2010. – № 1(87). – С. 133–136.

### **MODELING ACTIVE HARMONIC FILTER IN THE MATLAB – SIMULINK SYSTEM AFANASIEV A.YU., GAZIZOV I.F., KUNGURTSEV A.A.**

*In the article the simulation of the three-phase active harmonic filter in the MatLab – Simulink system is considered. The filter is based on a three-phase*

*controlled bridge rectifier and uses insulated gate bipolar transistors and diodes. The model of the active filter is designed. The simulation results confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed filtering algorithm and circuitry solutions.*

*Keywords: active harmonic filter, rectifier, capacitor, choke, diode, insulated gate bipolar transistor, higher harmonics, voltage, current, power, controller, regulator, pulse width modulation.*

УДК 621.311.6

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ВХОДНЫХ ТОКОВ В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK**

АФАНАСЬЕВ А.Ю., КНИТУ–КАИ, Казань, д.т.н., профессор,  
afanasiev\_eo@mail.ru

ГАЗИЗОВ И.Ф., КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант, darik31790@gmail.com

КУНГУРЦЕВ А.А., КНИТУ–КАИ, Казань, магистрант,  
my21144@gmail.com

*Рассматривается моделирование в системе MatLab – Simulink управляемого трехфазного выпрямителя, выполняющего три функции: выпрямление трехфазного напряжения, фильтрацию входных токов, имеющих синусоидальную форму и единичный коэффициент мощности, и стабилизацию выходного напряжения. Приведена модель управляемого выпрямителя. Полученные в результате моделирования зависимости подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого схемотехнического решения.*

*Ключевые слова: выпрямитель, конденсатор, дроссель, диод, IGBT-транзистор, напряжение, ток, блок управления, коэффициент мощности, широтно-импульсная модуляция.*

Вторичные источники питания обычно выполняют несколько функций: выпрямление трехфазной системы напряжений, сглаживание переменной составляющей, стабилизацию выходного напряжения, ослабление высших гармоник во входных токах выпрямителя [1].

В настоящей работе рассматривается моделирование управляемого трехфазного выпрямителя, работающего на биполярных транзисторах с изолированным затвором и обратных диодах и выполняющего три функции: выпрямление трехфазного напряжения, фильтрацию входных токов, имеющих синусоидальную форму и единичный коэффициент мощности, и стабилизацию выходного напряжения [2].

Схема выпрямителя приведена на рис. 1.

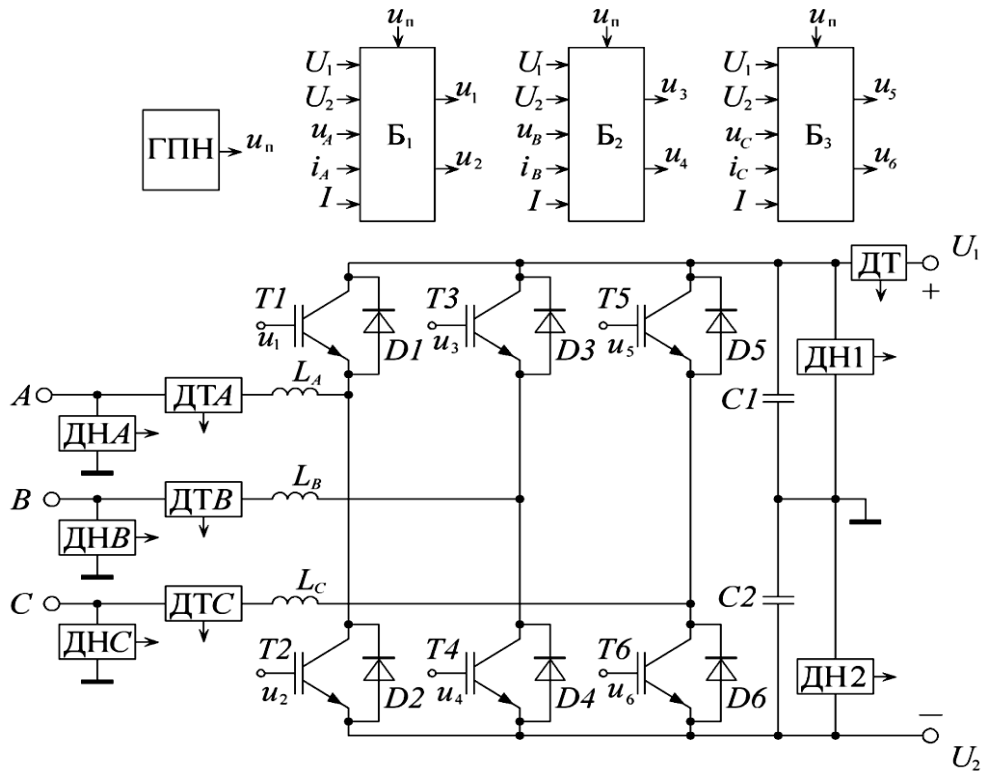


Рис. 1. Схема выпрямителя

Выпрямитель включает в себя IGBT-транзисторы  $T1 - T6$  и диоды  $D1 - D6$ , образующие шесть силовых ключей, дроссели  $L_A, L_B, L_C$ , конденсаторы  $C1, C2$ , датчики напряжения ДНА – ДНС, ДН1, ДН2, датчики тока ДТА – ДТС, генератор пилообразного напряжения ГПН, блоки управления  $B_1 - B_3$ .

Блоки управления формируют внутренние сигналы управления  $u_{c1}, u_{c2}$ . В зависимости от полярности напряжений  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  формируются мгновенные значения токов:

$$i_A^0 = u_{c1}u_A, \quad u_A > 0; \quad i_A^0 = u_{c2}u_A, \quad u_A < 0; \quad (1)$$

$$i_B^0 = u_{c1}u_B, \quad u_B > 0; \quad i_B^0 = u_{c2}u_B, \quad u_B < 0; \quad (2)$$

$$i_C^0 = u_{c1}u_C, \quad u_C > 0; \quad i_C^0 = u_{c2}u_C, \quad u_C < 0. \quad (3)$$

Вырабатываются широтно-модулированные импульсы, поступающие на управляющие входы IGBT-транзисторов.

В результате токи  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  изменяются по законам, близким к синусоидальным и совпадающим по фазе с соответствующими напряжениями. Вследствие этого снижаются несинусоидальные искажения напряжений и потери энергии в линии [3].

Относительная длительность импульсов, управляющих транзисторами  $T1$  и  $T2$ , определяется формулой:

$$\gamma_{и} = \frac{1}{u_0} \left( u_A - r i_A - u_S - u_2 - L \frac{di_A^0}{dt} - k_P L (i_A^0 - i_A) \right). \quad (4)$$

Аналогичные выражения можно получить для фаз  $B$  и  $C$ .

Сигналы  $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ , входящие в выражения (1) – (3), могут быть сформированы согласно принципу комбинированного управления:

$$u_{c1} = k_c I + k_U \Delta U_1, \quad u_A > 0; \quad (5)$$

$$u_{c2} = k_c I - k_U \Delta U_2, \quad u_A < 0. \quad (6)$$

Здесь  $\Delta U_1$  – погрешность регулирования напряжения;  $k_U$  – постоянный коэффициент;  $k_c$  – коэффициент коррекции;  $I$  – постоянный ток, потребляемый нагрузкой.

Моделирование выпрямителя было проведено в системе MatLab – Simulink при следующих параметрах [3]:

- амплитуда напряжения сети:  $U_m = 100$  В;
- частота напряжения сети:  $f = 50$  Гц;
- индуктивность дросселей  $L_A - L_C$ : 0,003 Гн;
- емкость конденсаторов  $C1, C2$ : 0,003 Ф;
- номинальное выходное напряжение:  $U_n = 300$  В;
- начальное напряжение конденсатора  $C1$ :  $U_1 = 125$  В;
- начальное напряжение конденсатора  $C2$ :  $U_2 = -125$  В;
- активные сопротивления  $R_A - R_C$ : 0,1 Ом;
- активное сопротивление нагрузки  $R$ : 30 Ом;
- индуктивность нагрузки  $L$ : 0,001 Гн.

На рис. 2 показана модель выпрямителя в системе MatLab – Simulink [4]

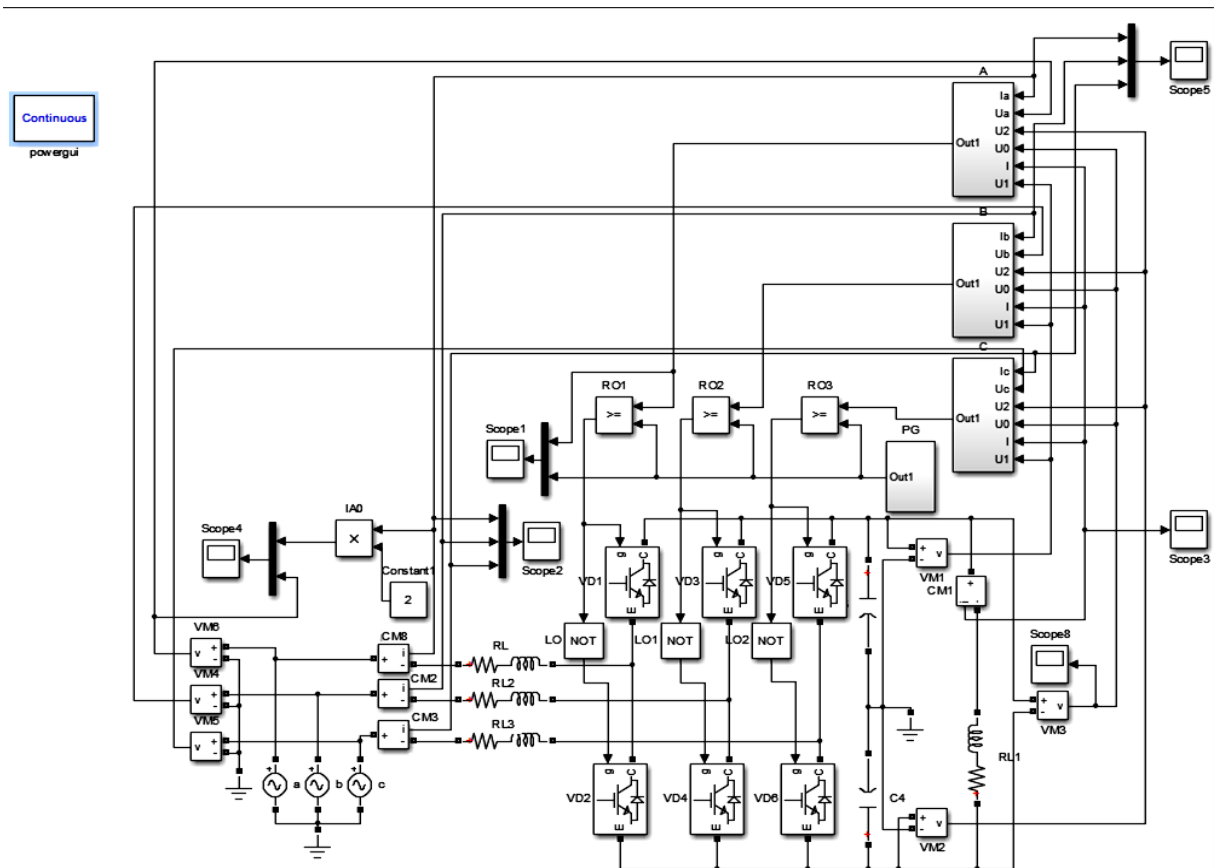


Рис. 2. Модель выпрямителя в системе MatLab – Simulink

Модель выпрямителя состоит из трехфазного источника напряжения, трех блоков управления, соответствующих трем фазам питающего напряжения, генератора пилообразного напряжения, силового преобразователя на шести IGBT-транзисторах и шести диодах, двух выходных конденсаторов и активно-индуктивной нагрузки.

На рис. 3 показан блок управления, построенный согласно равенству (4).

На рис. 4 показана модель генератора пилообразного напряжения. Частота широтно-импульсной модуляции составляет 10 кГц. Амплитуда пилообразного напряжения единичная [5].

В результате моделирования были получены следующие зависимости. На рис. 5 показаны графики входного тока и напряжения, находящихся в фазе.

Из графика видно, что длительность переходного процесса равна 0,03 с, после чего график тока принимает синусоидальную форму.

На рис. 6 показаны графики входных токов выпрямителя.

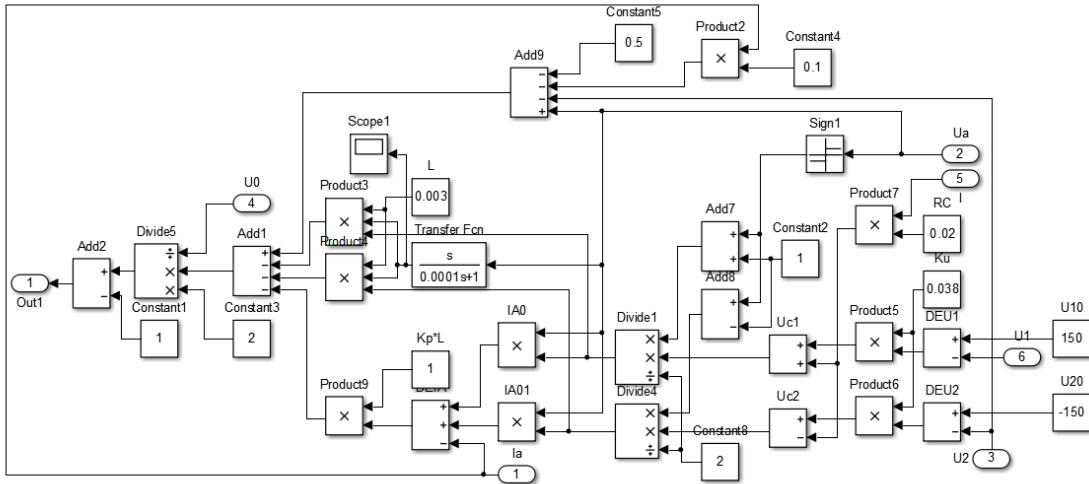


Рис. 3. Блок управления

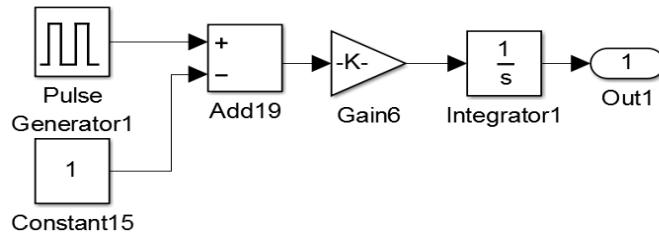


Рис. 4. Модель ГПН

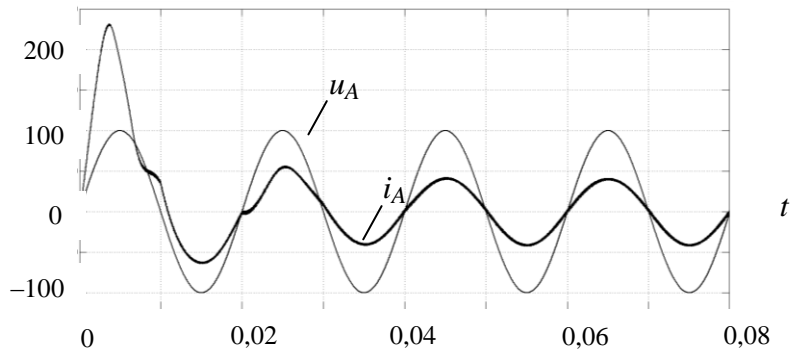


Рис. 5. Входное напряжение и входной ток

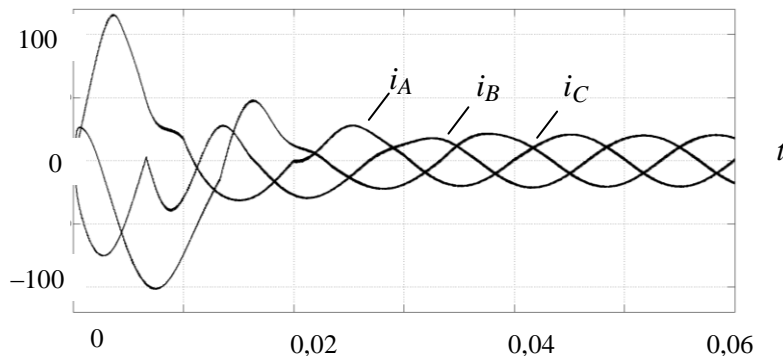


Рис. 6. Входные токи выпрямителя

На рис. 7 представлен график выходного напряжения выпрямителя.

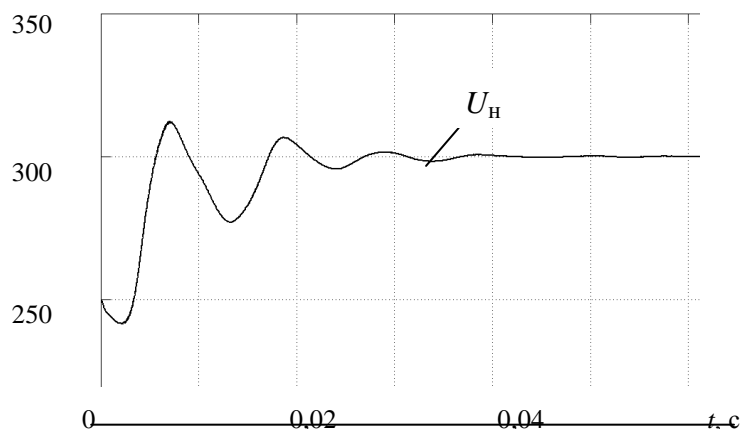


Рис. 7. Напряжение на выходе выпрямителя

Как видно из графика, напряжение на выходе выпрямителя постоянно и равно 300 В. Через 0,03-0,04 с переходные процессы во входной и выводной цепях завершаются. Из приведенных рисунков можно сделать вывод, что теория предлагаемого выпрямителя подтвердилась.

Результаты моделирования подтвердили работоспособность схемы при различных сопротивлениях нагрузки.

### Источники

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
2. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель с фильтрацией и стабилизацией / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. докл. 1-й Поволжской науч.-практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – С. 295–298.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. Sim Power Systems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона, 2001. – 320 с.
5. Афанасьев А.Ю. Выпрямитель со стабилизацией напряжения / А.Ю. Афанасьев, А.А. Кунгурцев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 6. – С. 25–30.

## **SIMULATION RECTIFIER WITH FILTRATION OF INPUT CURRENTS IN THE MATLAB – SIMULINK SYSTEM**

**AFANASIEV A.YU., GAZIZOV I.F., KUNGURTSEV A.A.**

*In the article the simulation of a three-phase controlled rectifier in the MatLab – Simulink system is considered, which performs three functions: rectification of the three-phase voltages system, filtering the sine-shaped and unitary power factor input currents and stabilization of the output voltage. A model of the rectifier is shown in this article. The resulting simulation depending confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed circuitry solutions.*

*Keywords: rectifier, capacitor, choke, diode, insulated gate bipolar transistor, voltage, current, control unit, power factor, pulse width modulation.*

УДК 621.313.33

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ НОВЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**АФАНАСЬЕВ В.Л.**, КубГТУ, Краснодар, студент, buguvix@mail.ru  
**КАРАНДЕЙ В.Ю.**, КубГТУ, Краснодар, к.т.н., доцент, kvu1983@mail.ru

*Создание новых типов управляемых каскадных электрических приводов для нефтяной промышленности подразумевает под собой разработку новых методик расчета, а также алгоритма для создания комплекса прикладных программ автоматизированного проектирования. Так как данный расчет является очень трудоемким процессом, предлагается разбить его на отдельные этапы. В статье представлен метод расчета магнитной системы управляемого каскадного электрического привода, основанный на применении закона Кирхгофа, закона Ома для магнитной цепи и принципа наложения.*

*Ключевые слова: гибридная система, векторное управление, управляемый асинхронный каскадный электропривод, электромагнитный момент, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система.*



### Общие положения

Расчет магнитной системы управляемого каскадного электрического привода производится с применением закона Кирхгофа, закона Ома для магнитной цепи и принципа наложения. Схема замещения приведена на рис. 1. В качестве примера взята двухслойная обмотка на 24 паза. Данный метод подробно описан в статье [5].

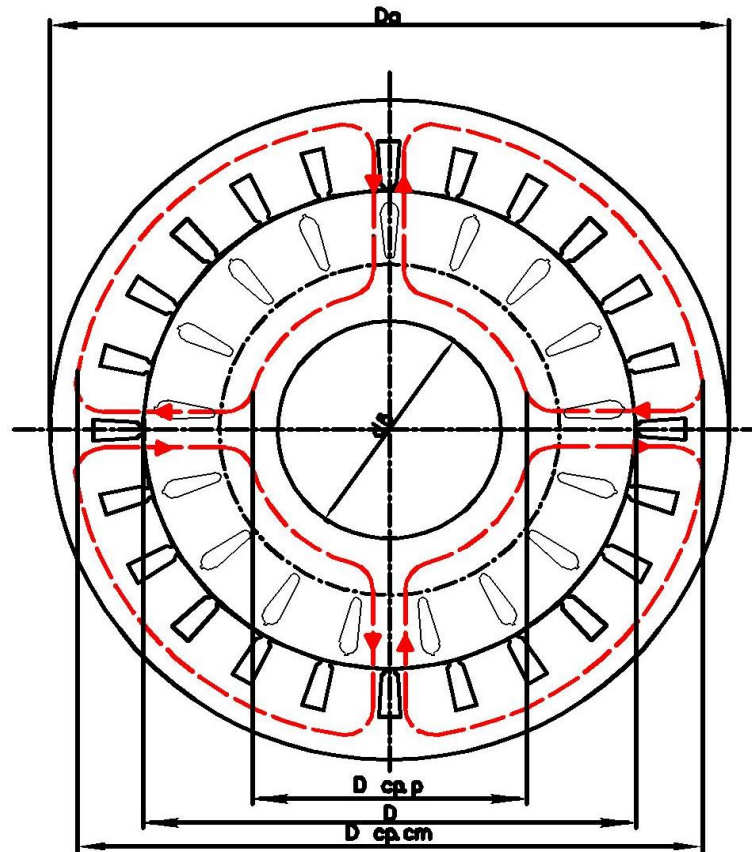


Рис. 1. Основные геометрические размеры асинхронного двигателя управляемого каскадного электрического привода:  $D$  – внутренний диаметр статора;  $D_a$  – внешний диаметр статора;  $\delta$  – воздушный зазор;  $d_B$  – диаметр вала;  $d$  – диаметр ротора;  $D_{ср.ст}$  – диаметр средней линии статора;  $D_{ср.р}$  – диаметр средней линии ротора

При изменении положения ротора изменяются величины магнитных сопротивлений зубцовой зоны статора и ротора, а также воздушного зазора по следующим зависимостям.

Выражение для магнитного потока катушки:

$$\Phi = Iw/R_{\mu}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток, протекающий в катушке;  $w$  – количество витков катушки;  $R_\mu$  – магнитное сопротивление потоку катушки.

Магнитное сопротивление:

$$R_\mu = \frac{l}{\mu_0 \mu S}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина средней силовой линии на данном участке;  $S$  – площадь, сквозь которую протекает магнитный поток;  $\mu$  – магнитная проницаемость данного участка;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [Гн/м];

$$R_{zi}^{(k)} = \frac{2}{\mu_0} \frac{\delta}{nb_{3.c} l_M}, \quad (3)$$

где  $R_{zi}^{(k)}$  – общее магнитное сопротивление зубцовой зоны ротора, статора и воздушного зазора  $i$ -й катушки при  $k$ -м угле сдвига оси поля ротора относительно оси поля статора;  $n$  – коэффициент для каждого сопротивления.

Коэффициент  $n$  показывает изменение магнитного сопротивления.

### Расчет магнитных сопротивлений электрического двигателя

Предлагается следующая математическая модель магнитной системы (рис. 2). Разобьем магнитную систему на отдельные участки, такие как ярмо статора, зубцовая зона статора, воздушный зазор, зубцовая зона ротора, ярмо ротора. Каждый отдельный участок будет обладать собственным значением магнитного сопротивления и магнитной индукции, значение магнитной индукции можно скорректировать, например, методом последовательных приближений. Данное действие позволит повысить точность расчета и увеличить скорость расчета по сравнению с классической теорией. Для увеличения точности также разобьем мнимо участки со сложной геометрией (зубцовая зона статора на 2 отдельных участках, зубцовая зона ротора на 3 отдельных участках – рис. 3).

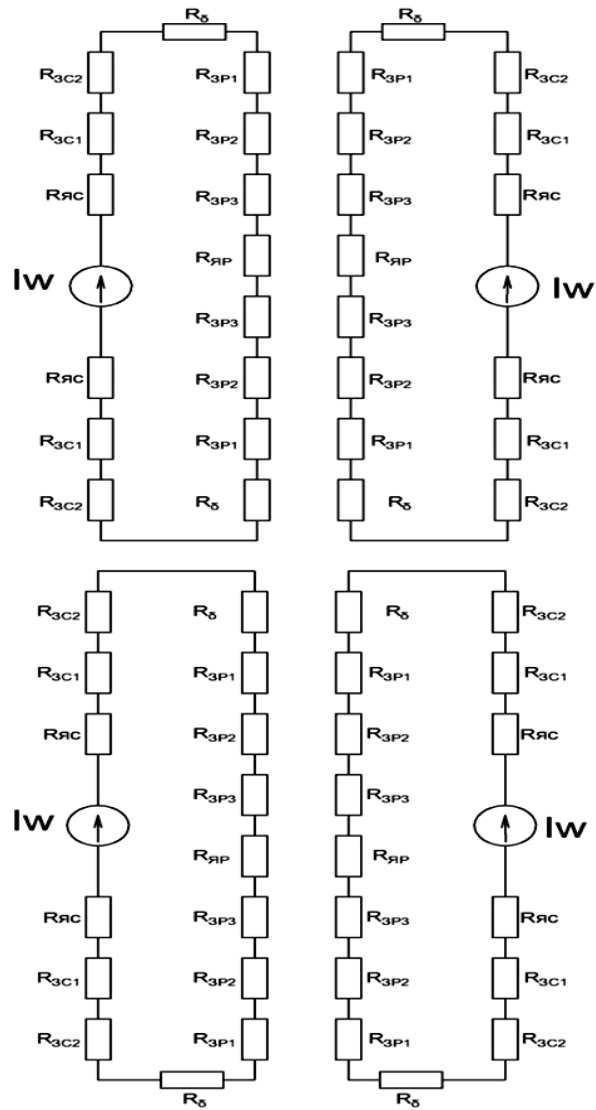


Рис. 2. Схема замещения магнитной системы

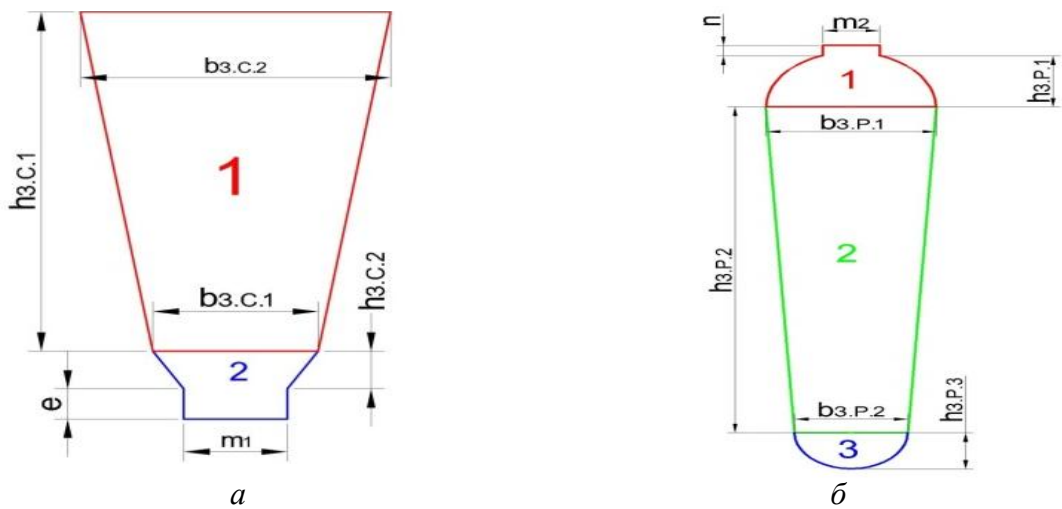


Рис. 3. Схема разбиения участков зубцовой зоны статора (а) и ротора (б)

Ниже приведены формулы для нахождения магнитного сопротивления для зубцовой зоны статора:

$$R_{\mu_{3.c1}} = \frac{h_{3.c2}}{\mu_0 \mu_{3.c} \frac{1}{2} (b_{3.c1} + b_{3.c2}) l_{3.c1}}; \quad (4)$$

$$R_{\mu_{3.c}} = \frac{h_{3.c1}}{\mu_0 \mu_{3.c} \frac{\pi}{8} (b_{3.c1} - m)^2 + m (h_{3.c1} + n)}. \quad (5)$$

Для зубцовой зоны ротора:

$$R_{\mu_{3.p1}} = \frac{h_{3.p1}}{\mu_0 \mu_{3.p} \frac{\pi}{8} b_{3.p1}^2}; \quad (6)$$

$$R_{\mu_{3.p2}} = \frac{h_{3.p2}}{\mu_0 \mu_{3.p} \frac{1}{2} (b_{3.p1} + b_{3.p2}) l_{3.p2}}; \quad (7)$$

$$R_{\mu_{3.p3}} = \frac{h_{3.p3}}{\mu_0 \mu_{3.p} \frac{\pi}{8} b_{3.p3}^2}. \quad (8)$$

### Магнитные сопротивления ярма ротора

Площадь ярма ротора выбирается по самому узкому месту, по которому проходят магнитные силовые линии и происходит передача магнитного потока в зубцовую зону ротора. Аналогично рассчитываем площадь, по которой протекает магнитный поток для остальных частей электрической машины.

$$R_{\mu_{я.p}} = \frac{2\pi \frac{D_{ср.p}}{2p \cdot 2} + d - 2h_{3.p} - D_{ср.p}}{\mu_0 \mu_{я.p} (d - 2h_{3.p} + d_{в}) l_p}, \quad (9)$$

где  $\mu_{я.p}$  – магнитная проницаемость ярма ротора.

Магнитное сопротивление воздушного зазора. Данное сопротивление определим аналогично, как магнитное сопротивление зубцовой части статора из-за пренебрежения потоками рассеяния и выпучивания.

Длина силовой магнитной линии равна величине зазора.

$$R_3 = \frac{2}{\mu_0} \frac{\delta}{5b_{3.c}l_M}, \quad (10)$$

где  $\delta$  – величина воздушного зазора.

Магнитное сопротивление ярма статора:

$$R_{\mu_{я.с}} = \frac{2\pi \frac{D_{ср.с}}{2} + D_a - 2h_{3.c} - D_{ср.с}}{\mu_0 \mu_{я.с} (D_{ср.ст} - 2h_{3.c} - D) l_\delta}, \quad (11)$$

где  $\mu_{я.с}$  – магнитная проницаемость ярма статора.

Магнитный поток, приходящийся на один полюс, равен:

$$0,25\Phi_{кг} = \frac{Iw}{R_{я.с} + R_{3.c1} + R_{3.c2} + R_\delta + R_{3.p1} + R_{3.p2} + R_{3.p3} + R_{я.p}}. \quad (12)$$

Зная значение магнитного потока, приходящегося на один полюс, можно приступить к построению картины потокораспределения исследуемого объекта.

Используя распространенную схему обмотки, применим принцип наложения. Строя картину потокораспределения от каждой из фаз, затем путем последовательного и параллельного сложения участков получим реальную картину потокораспределения. Задаваясь разным углом сдвига трехфазной системы, можно построить картину потокораспределения в разные моменты времени.

### **Разработка алгоритма программы**

Разработан алгоритм программы для расчета распределения потока обмотки статора асинхронного двигателя – компонента управляемого каскадного электрического привода. Для описания алгоритма выбираем двухслойную обмотку на двадцать четыре паза. Этот алгоритм рассчитан на получение картины распределения потока обмотки и, соответственно, получение графического изображения.

Ниже он представлен в виде блок-схемы для кнопок «Анимация» (рис. 4) и «Операция» (рис. 5).

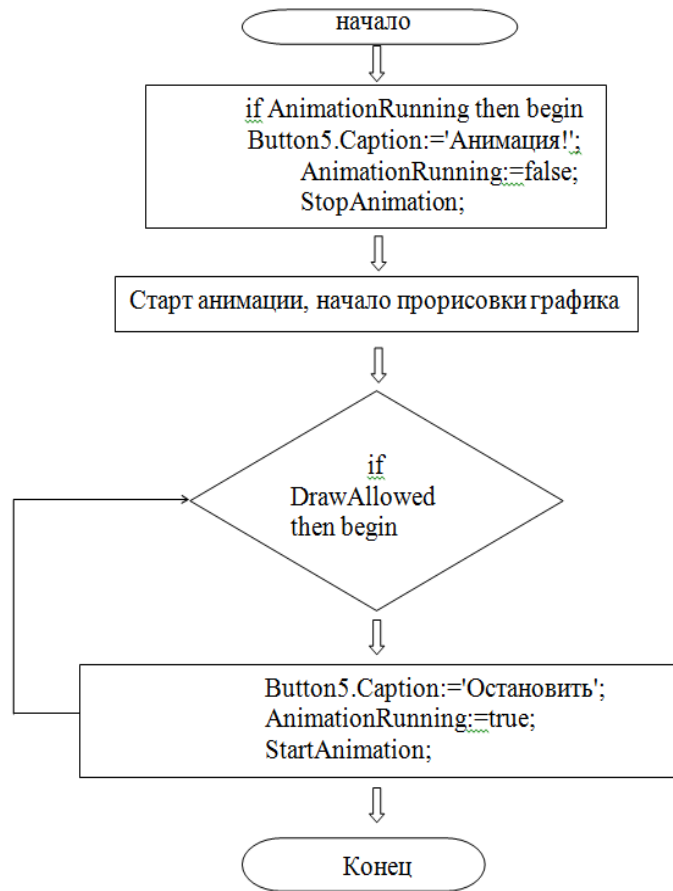


Рис. 4. Блок-схема кнопки «Анимация»

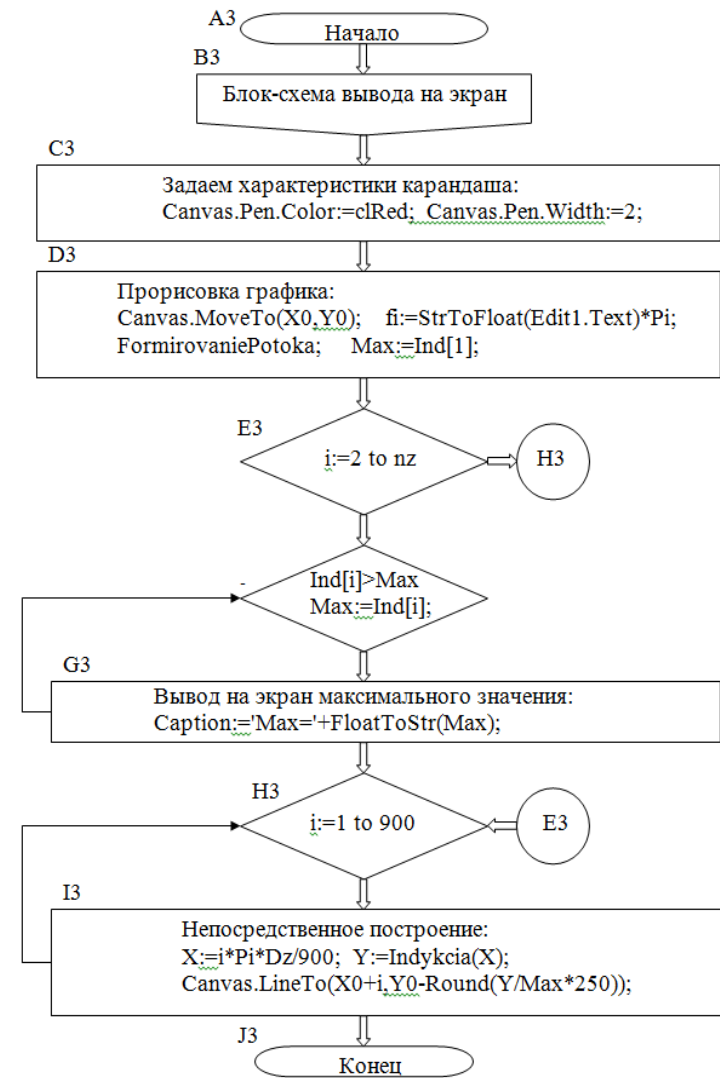


Рис. 5. Блок-схема кнопки «Операция»

## Интерфейс разработанной программы

Программа предусматривает введение с интерфейса значения угла поворота трехфазной системы с точностью пять знаков после запятой (рис. 6). В соответствии с заданным вручную, картина поля изменится в пространстве и времени по сравнению с первоначальной. Но программа также предусматривает получение псевдоанимации. С шагом полтора градуса можно проследить изменения картины поля, не вводя значение угла поворота и не стирая полученную картинку.

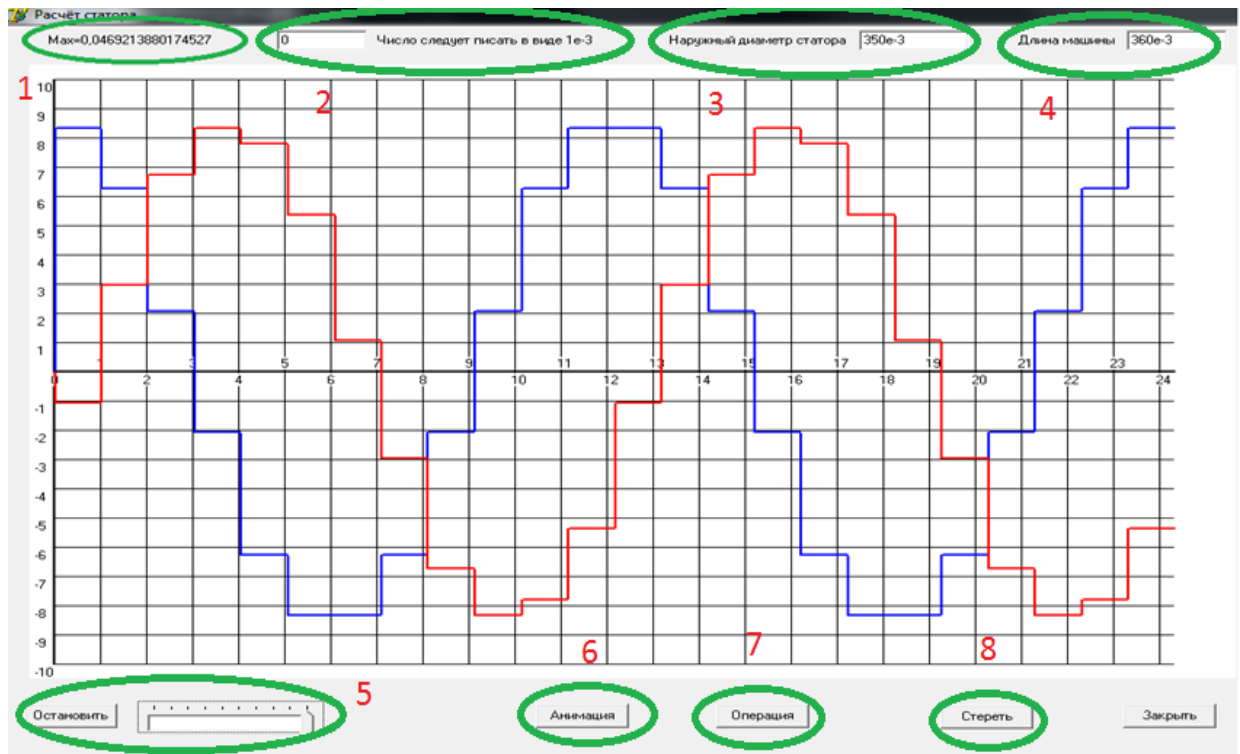


Рис. 6. Интерфейс программы

При выводе на экран картины потокораспределения под определенным, заданным углом сдвига построенная картина потокораспределения имеет синий цвет. Максимальное значение магнитной индукции одной катушечной группы – 1. При сдвиге магнитной системы значение магнитной индукции пересчитывается в соответствии с углом сдвига трехфазной системы напряжений. Окна, где указываются основные геометрические размеры двигателя, необходимые при построении картины потокораспределения, – 3, 4. Кнопка «Анимация» (6) позволяет вывести на экран картину потокораспределения с шагом в  $1,5^\circ$ . Кнопка «Операция» (7) позволит вывести картину потокораспределения с заданным углом сдвига, выведенная картина потокораспределения имеет

красный вид. Кнопка «Стереть» (8) позволяет очистить экран от картины потокораспределения. Кнопка «Остановить» (5) позволяет выводить и останавливать автоматическое построение картины потокораспределения, также можно регулировать скорость построения.

Как видно, картина потокораспределения имеет ступенчатый вид. В дальнейшем расчет параметров производится с учетом ступенчатости, без разложения полученной кривой в ряды.

### **Выводы**

В данной статье представлен новый подход к расчету магнитной системы управляемого каскадного электрического привода, позволяющий увеличить точность расчета по сравнению с классической теорией, а также уменьшить сложность расчетов. Создан алгоритм и написана программа, которая является частью автоматизированного программного комплекса для расчета управляемых каскадных электрических приводов. На данные программные продукты и методики расчетов имеются патенты и свидетельства на ЭВМ.

### **Источники**

1. Пат. РФ № 2402857. Управляемый каскадный электрический привод / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 27.10.2010.

2. Пат. РФ № 2461947. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 20.09.2012.

3. Пат. РФ № 2483415. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, О.Б. Попова. – Зарегистр. 11.03.2013.

4. Пат. РФ № 2370869. Токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 30.06.2008.

5. Karandey V.Yu. Intelligence amplification in distance learning through the binary tree of question-answer system / V.Yu. Karandey, O.B. Popova, B.K. Popov // Procedia-social and Behavioral Science. – 2015. – Vol. 214. – P. 711–719.

6. Karandey V.Yu. Intelligence amplification via language of choice description as a mathematical object (binary tree of question-answer system) / V.Yu. Karandey [et al.] // Procedia-social and Behavioral Science. – 2015. – Vol. 214. – P. 897–905.



7. Karandei V.Yu. New methods and evaluation criteria of research efficiency / V.Yu. Karandey [et al.] // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. – 2015. – Vol 6, No 6, S 5. – P. 212–217.

8. Карандей В.Ю. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>.

9. Карандей В.Ю. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>.

10. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрией / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>.

11. А.с. № 2015615828. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / В.Ю. Карандей, А.В. Базык, В.Л. Афанасьев. – Зарег. 25.05.15.

12. А.с. № 2015615826. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, А.В. Базык. – Зарег. 25.05.15.

13. А.с. № 2015615827. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потокораспределения / В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.05.15.

14. Карандей В.Ю. Математическое моделирование каскадных асинхронных электроприводов: монография: в 3 т. Т. 1. Математическое моделирование магнитных систем электропривода / В.Ю. Карандей. – Краснодар: Юг, 2014. – 142 с.

15. А.с. № 2008614047. Программа для расчета магнитной системы ротора методом магнитных цепей / Б.К. Попов, В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.08.08.

16. А.с. № 2008614048. Программа для расчета токов статора и ротора в каскадном электрическом приводе / Б.К. Попов, В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.08.08.

17. Попов Б.К. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>.

УДК 621.313.33

## **РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

АФАНАСЬЕВ В.Л., КубГТУ, Краснодар, студент, [buguvix@mail.ru](mailto:buguvix@mail.ru)  
КАРАНДЕЙ В.Ю., КубГТУ, Краснодар, к.т.н., доцент, [kvy1983@mail.ru](mailto:kvy1983@mail.ru)

*В последнее время нефтяное оборудование с использованием электрических приводов становится наиболее популярным, благодаря ряду преимуществ перед гидравлическими системами. Электродвигателями оборудуются как импортные, так и отечественные буровые установки, которые имеют силовую часть из электрических приводов. Более перспективным является развитие оборудования с применением усовершенствованных электроприводов. В статье приведен обзор и сделаны предположения о возможном улучшении данных устройств, например, путем применения каскадных управляемых асинхронных двигателей, что позволит улучшить характеристики оборудования.*

*Ключевые слова: гибридная система, векторное управление, управляемый асинхронный каскадный электропривод, электромагнитный момент, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система.*

## Система верхнего привода буровой вышки

Системы верхнего привода (СВП) являются принципиально новым типом механизмов буровых установок, обеспечивающих выполнение целого ряда технологических операций. Технологически верхний привод представляет собой подвижной вращатель с сальником-вертлюгом, оснащенный комплексом средств механизации СПО – силовой вертлюг.

СВП обеспечивает выполнение следующих технологических операций: вращение бурильной колонны при бурении, проработке и расширении ствола скважины; свинчивание, докрепление бурильных труб; проведение спуско-подъемных операций с бурильными трубами и т.д.

### Преимущества и недостатки электрических приводов СВП

Электрические версии ВСП могут питаться как от источника электроэнергии буровой площадки, так и от автономного дизель-генератора.

Основные преимущества СВП с электрическим приводом: малая удельная масса подвесной части и, следовательно, минимальный износ талевого каната; высокая удельная мощность привода:  $N_{уд}$  (отношение выходной мощности к массе подвесной части) составляет 66 кВт/т; компактность подвесной части; бесступенчатое (частотное) регулирование скорости вращения вала вертлюга от 0 до 180 об/мин; реверсивность; автоматическое изменение момента от минимального до номинального значений при постоянной заданной скорости вращения выходного вала; свобода компоновки подвесной части.

Основными недостатками СВП с электрическим приводом являются: несоответствие максимума мощности СВП скоростным режимам работы отечественного бурового инструмента (пик мощности смещен относительно рабочих скоростей порядка 60–100 об/мин в сторону 200...250 об/мин), существенное недоиспользование мощности привода (50–72 %) в диапазоне частот 60–100 об/мин; низкий коэффициент использования мощности; отсутствие саморегулирования скорости вращения выходного вала в зависимости от нагрузки на рабочем инструменте и, как следствие, снижение производительности привода; отсутствие самоторможения привода и возможность генерации тока при возникновении эффекта «пружины» в случае прихвата бурильной колонны

и ее обратном вращении, разрушающего электронную систему управления СВП; необходимость применения многоступенчатых механических редукторов в приводе электродвигателей для снижения частоты вращения выходного вала, что приводит к снижению надежности, усложнению и повышению стоимости конструкции СВП.

Наиболее известные зарубежные производители систем верхнего привода (Varco, Tesco, Canrig, National Oilwell, Bentec и др.) предлагают СВП как в гидравлическом, так и в электрическом (постоянного и переменного тока) исполнении. Номенклатура СВП, производимых этими компаниями, широка и используется на буровых российских компаний «Черноморнефтегаз», «Роснефть», «Уренгойгазпром», «Газпром», «ЛУКОЙЛ», «Сибнефть», «БК-Евразия» и др.

Рассмотрим, например, систему верхнего привода National Oilwell TDS-10S (табл. 1). Американская компания National Oilwell Varco – мировой лидер в разработке, производстве и продаже оборудования и комплектующих для применения в сфере бурения скважин и производства нефти и газа, технического обеспечения и надзора, предоставляющая также услуги по организации цепи поставок для крупных организаций нефтегазовой индустрии.

Таблица 1.

## Характеристики Oilwell Varco TDS-10S

Характеристика	Значение
Производитель	National Oilwell Varco
Наименование	TDS-10S
Тип	СВП
Грузоподъемность, не менее, короткая тонна	386
Грузоподъемность, не менее, т	250
Привод	Электрический
Максимальный крутящий момент, Н · м (кг · м)	27115 (20000)
Максимальная скорость (частота) вращения выходного вала, рад/с (об/мин)	182
Выходная мощность привода, кВт (л.с.)	350
Исполнение для условий эксплуатации при температуре окружающего воздуха, °С	от –20 до +45
Примечание	Portable

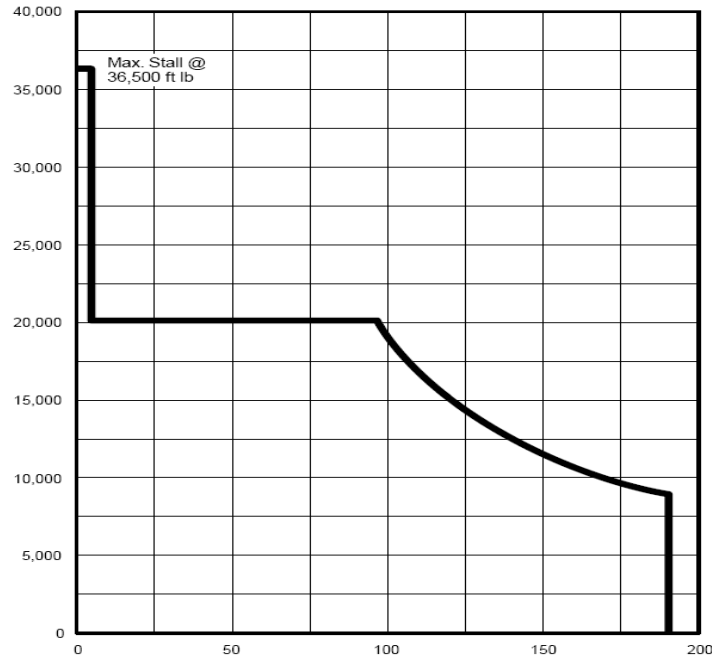


Рис. 1. Моментные характеристики Oilwell Varco TDS-10S

Данные устройства СВП только набирают популярность и имеют большие возможности в разработке и проектировании и модернизации.

### **Насосное оборудование в нефтяной промышленности**

Нефтяные насосы предназначены для работы с нефтью и нефтепродуктами: мазутом, сжиженными углеродными газами, водой с примесями, жидкостями высокого уровня вязкости и т.п. Такие насосы обеспечивают надежность и безопасность работ, а также эффективность процесса перекачивания.

Нефтяные насосные установки отличает от прочих агрегатов способность функционировать в особых условиях эксплуатации. Так, в процессе нефтепереработки на узлы и прочие элементы насоса оказывают воздействие такие вещества, как углеводороды, а также широкий диапазон рабочих давлений и температур. Одним из специфических факторов работы данных агрегатов является высокий уровень вязкости перекачиваемого вещества (нефть до 2000 сСт). Такие насосные установки производятся в различных климатических исполнениях, так как работают при самых разных погодных условиях (начиная от Северного моря и заканчивая ОАЭ, а также пустынями США).

Нефтяной насос должен быть достаточно мощным, так как в процессе перекачки и переработки нефти агрегат поднимает ее

со значительных глубин нефтяных скважин. На эксплуатационные характеристики скважин в значительной степени влияет вид энергии, который используется нефтяным оборудованием, поэтому определенный тип привода насосной установки устанавливается с учетом условий эксплуатации. Так, нефтяной насос может быть оснащен следующими типами приводов: механическим, электрическим, гидравлическим, пневматическим, термическим.

Электрический привод, при условии наличия электропитания, наиболее удобен и дает наиболее широкий диапазон характеристик в процессе перекачки нефти. В условиях, когда электропитание недоступно, нефтяные насосы могут оснащаться газотурбинными двигателями либо двигателями внутреннего сгорания. Пневматические приводы устанавливаются на центробежные нефтяные насосы в случаях, когда есть возможность использовать энергию природного газа (высокого давления) либо энергию попутного газа, что значительно повышает уровень рентабельности насосной установки.

Примером данных устройств являются насосы для перекачки бензина АИ-76, АИ-92, АИ-95 фирмы ENCE Engineering, обладающие следующими характеристиками силовой части (табл. 2).

Таблица 2

#### Характеристики силовой части насоса

Характеристика	Значение
Размер рамы	400 LM
Мощность	400 кВт
Напряжение	6000 В
Степень защиты	IP 56
Исполнение	IM B3
Частота вращения	992 (1000) об/мин
Частота	50 Гц

#### Предложение по модернизации

Предлагается вместо одиночных электрических двигателей применять управляемый каскадный электрический привод [1]. Данный тип устройств относится к каскадным электрическим приводам вращательного движения, состоящим из двух электродвигателей, преимущественно асинхронных, и может найти применение при создании приводов с регулируемой частотой вращения от 0 до двойной номинальной при

постоянном моменте или приводах с удвоенным моментом при постоянной номинальной скорости вращения, в том числе реверсивных, что позволит отойти от использования редукторов. Также данный тип приводов обладает меньшими массогабаритными и энергетическими показателями, более гибкими характеристиками управления.

Для расширения диапазона регулирования каскадного электрического привода необходимо обеспечить получение больших скоростей вращения, близких к двойной номинальной, при постоянном значении величины момента или получение удвоенного момента при постоянной скорости вращения.

### Принцип работы предлагаемого устройства

На рис. 2 изображен данный прототип. Для получения удвоенного значения момента при одинаковой частоте вращения необходимо произвести управление фрикционными муфтами в указанном порядке. Подаем питание на муфты 1 и 5 и отключаем от питания муфту 2. При этом ротор 8 вращается на валу 4, а статор 12 остается неподвижным, так как фрикционная муфта 5 тормозит корпус статора 12. При помощи фрикционной муфты 1 происходит зацепление ротора 14, вращающегося на валу 10. В итоге получаем удвоенное значение момента на валу 10 от двух асинхронных двигателей при одинаковой скорости вращения.

Для получения удвоенного значения скорости вращения при одинаковой величине вращающего момента необходимо произвести управление фрикционными муфтами в указанном порядке. Подаем питание на фрикционную муфту 2 и отключаем муфты 1 и 5. При этом ротор 8 вращается на валу 4 и передает крутящий момент и скорость на статор 12 с помощью муфты 2. Ротор 14 вращается с асинхронной скоростью относительно статора 12. В итоге получаем на валу 10 удвоенное значение скорости вращения при одинаковой величине вращающего момента.

Получение плавных изменений, а также малых значений скорости и реверс осуществляются следующим образом. При изменении напряжения питания  $U$  на каждом из двигателей привода можно изменять наклон характеристики каждого двигателя  $n = f(M, U)$ . Соответственно, возможно управлять наклоном рабочей характеристики  $n = f(M)$  всего привода. При одинаковой синхронной частоте вращения двигателей эта характеристика проходит через точку  $M = 0, n = 0$  (рис. 3). При различных значениях синхронных частот вращения двигателей характеристика проходит через точку  $M = 0, n = n_{cI} - n_{cII}$  (рис. 3).

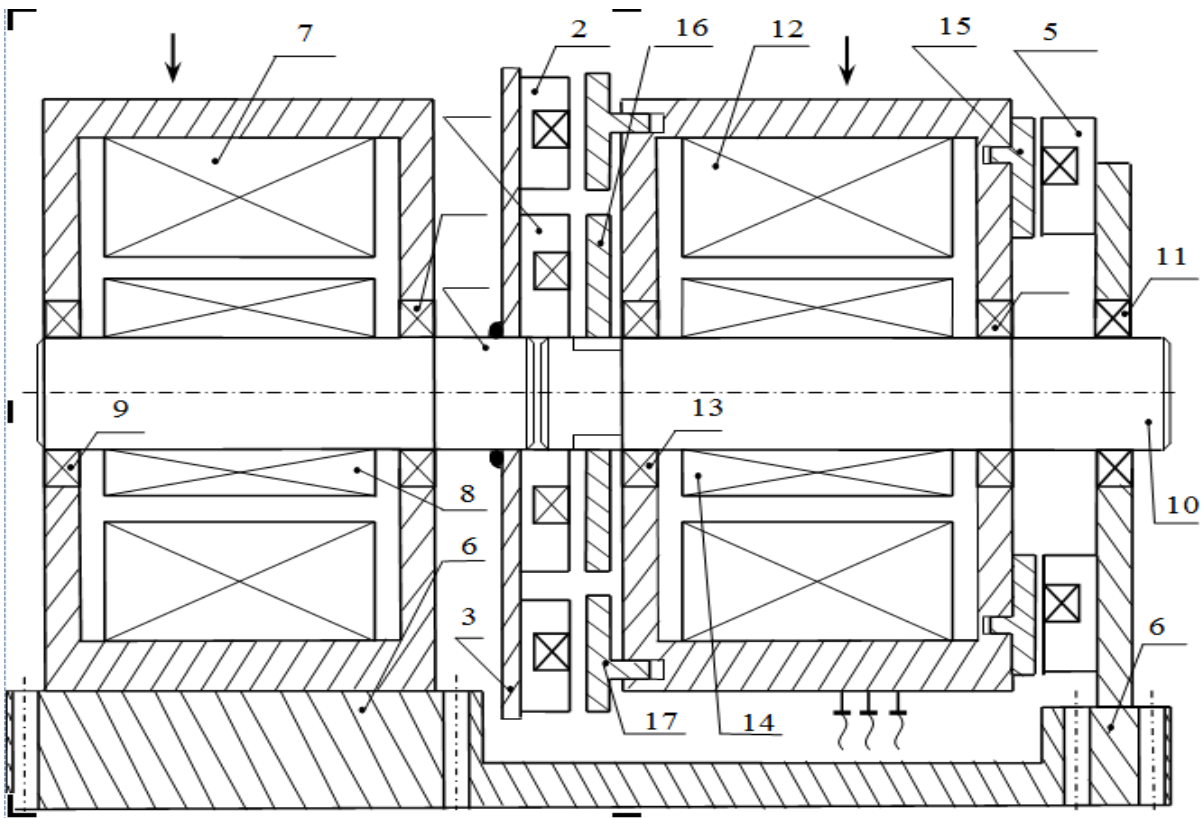


Рис. 2. Принципиальная схема прототипа

На рис. 3 показаны стандартные характеристики асинхронного двигателя в зависимости от относительной величины питающего напряжения.

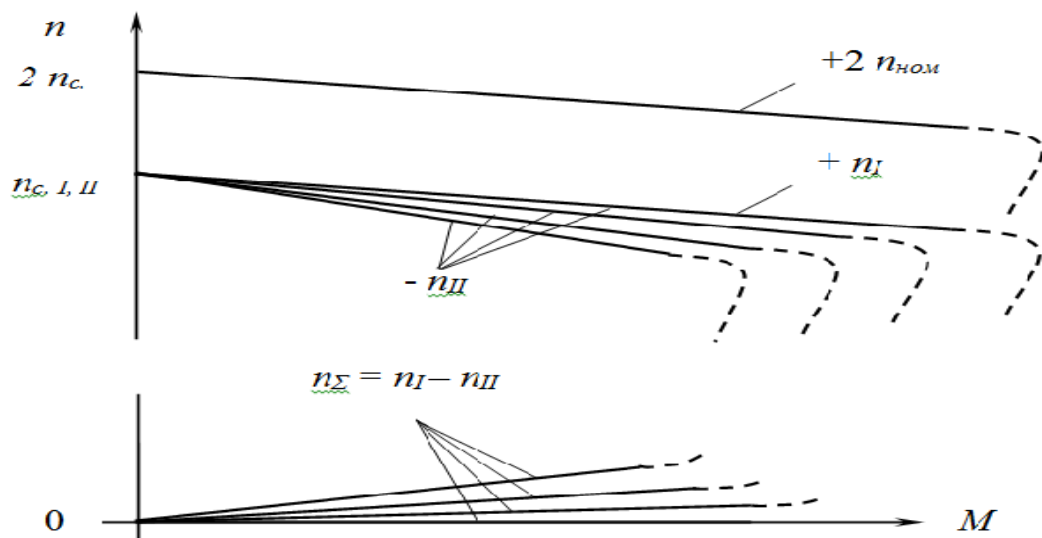


Рис. 3. Рабочая характеристика  $n = f(M)$  всего привода



На рис. 3–5 показан принцип формирования суммарной характеристики привода. Следует отметить, что активное сопротивление ротора влияет на жесткость характеристик, т.е. на их наклон.

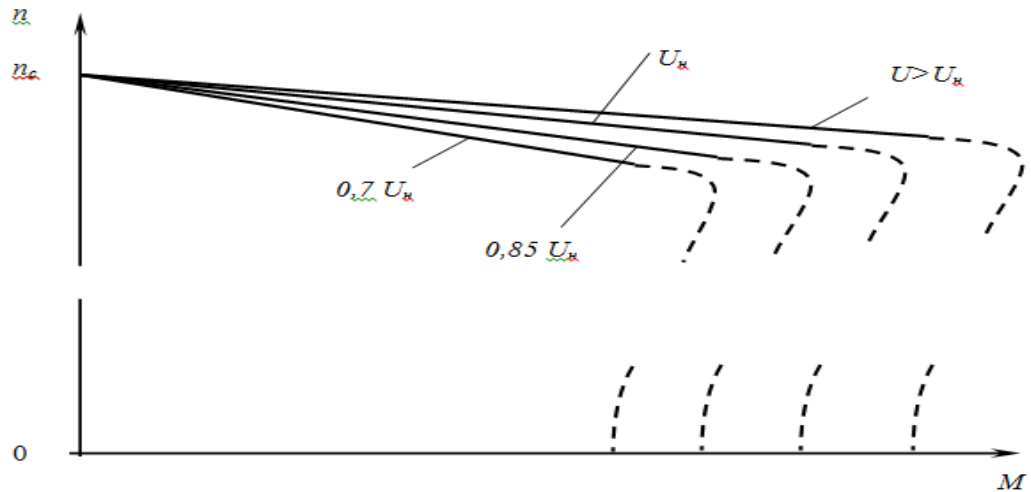


Рис. 4. Типовые характеристики асинхронного двигателя

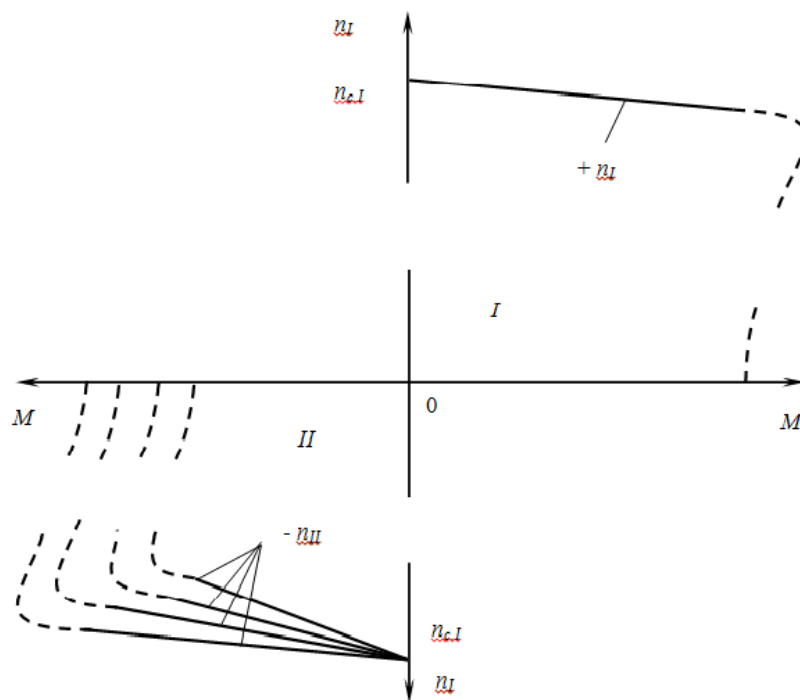


Рис. 5. Характеристика для каскада из двух двигателей

Если частоты вращения двигателей привода одинаковы, то результирующие характеристики привода проходят через точку  $M = 0$ ,  $n = 0$  с любым наклоном (рис. 3). Если наклон нулевой, то привод собственно превращается в упор, препятствующий повороту приводимого устройства под действием внешнего момента.

Если значения частот двигателей привода различны, то результирующая характеристика проходит через точку  $M = 0$ ,  $n = n_{cI} - n_{cII}$ , а наклон суммарной характеристики определяется наклоном характеристик двигателей. Результирующая характеристика может быть с положительным наклоном, отрицательным (падающая характеристика) или с нулевым наклоном (абсолютно жесткая характеристика), в последнем случае привод вращается с частотой  $n_c = n_{cI} - n_{cII}$ .

Из графиков, приведенных на рис. 4, 5, видно, что привод может развивать максимальный крутящий момент при малых частотах вращения. Следует заметить, что этот момент близок к моменту, развиваемому двигателями при номинальных значениях напряжения.

Привод допускает осуществление реверса без переключения фаз. Это можно сделать путем соответствующего изменения величин напряжений на двигателях I и II. Управление частотой вращения привода осуществляется, например, предложенной нами схемой автоматического регулирования устройствами, представленной на рис. 6.

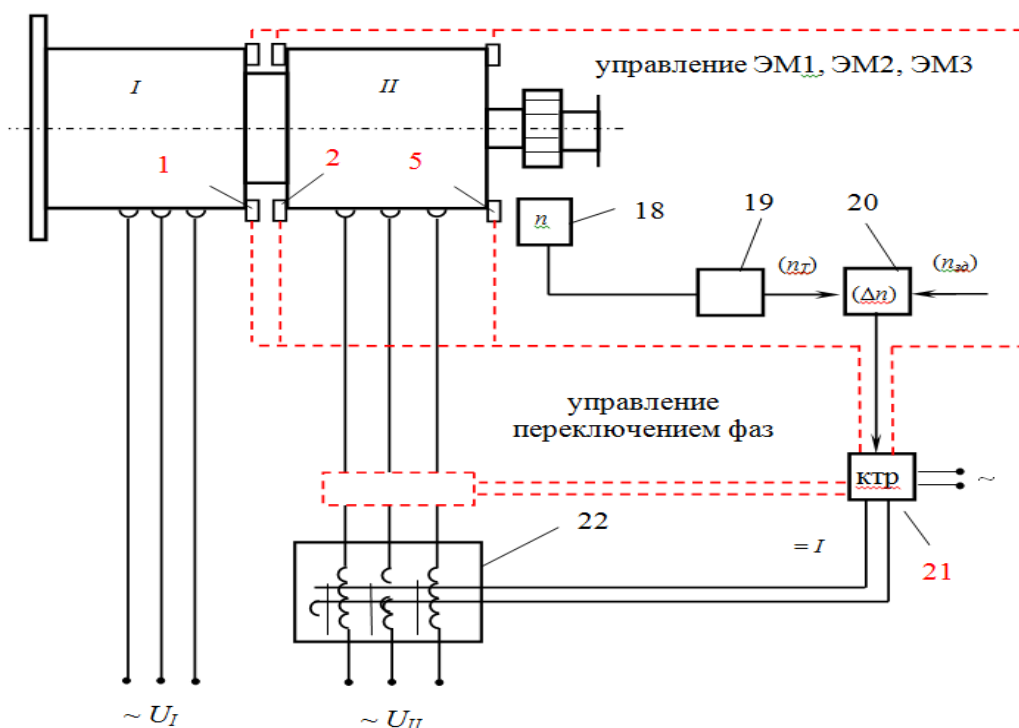


Рис. 6. Принципиальная схема управления приводом

Система состоит из датчика 18 частоты вращения выходного элемента привода с преобразователем 19 текущей частоты  $n_T$  вращения в нормированный сигнал. Элемент 20 сравнивает сигналы, пропорциональные заданному  $n_{зад}$  и текущему  $n_T$  значениям частот вращения.

Контроллер 21 вырабатывает управляющее воздействие по заданному закону регулирования (пропорциональному, интегральному, дифференциальному или их сочетаниям), осуществляет управление переключением фаз питания одного и пар полюсов одного из двигателей, а также вырабатывает управляющие сигналы на электромагнитные муфты 1, 2 и 5. Устройство 22 преобразует управляющее воздействие в изменение напряжения питания двигателя (например, с помощью магнитных усилителей).

Таким образом, в данной работе проведен анализ систем, применяемых в нефтяной промышленности. Проанализированы преимущества и недостатки данных устройств, выявлены места, где есть смысл произвести модернизацию силовой части, в данном случае электродвигателя. Выдвинуто и обосновано предложение применения каскадных управляемых систем.

#### Источники

1. Пат. РФ № 2402857. Управляемый каскадный электрический привод / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 27.10.2010.
2. Пат. РФ № 2461947. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 20.09.2012.
3. Пат. РФ № 2483415. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, О.Б. Попова. – Зарегистр. 11.03.2013.
4. Пат. РФ № 2370869. Токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов. – Зарегистр. 30.06.2008.
5. Karandey V.Yu. Intelligence amplification in distance learning through the binary tree of question-answer system / V.Yu. Karandey, O.B. Popova, B.K. Popov // *Procedia-social and Behavioral Science*. – 2015. – Vol. 214. – P. 711–719.
6. Karandey V.Yu. Intelligence amplification via language of choice description as a mathematical object (binary tree of question-answer system) / V.Yu. Karandey [et al.] // *Procedia-social and Behavioral Science*. – 2015. – Vol. 214. – P. 897–905.
7. Karandei V.Yu. New methods and evaluation criteria of research efficiency / V.Yu. Karandey [et al.] // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. – 2015. – Vol 6, No 6, S 5. – P. 212–217.

8. Карандей В.Ю. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>.

9. Карандей В.Ю. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>.

10. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрией / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>.

11. А.с. № 2015615828. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / В.Ю. Карандей, А.В. Базык, В.Л. Афанасьев. – Зарег. 25.05.15.

12. А.с. № 2015615826. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, А.В. Базык. – Зарег. 25.05.15.

13. А.с. № 2015615827. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потокараспределения / В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.05.15.

14. Карандей В.Ю. Математическое моделирование каскадных асинхронных электроприводов: монография: в 3 т. Т. 1. Математическое моделирование магнитных систем электропривода / В.Ю. Карандей. – Краснодар: Юг, 2014. – 142 с.

15. А.с. № 2008614047. Программа для расчета магнитной системы ротора методом магнитных цепей / Б.К. Попов, В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.08.08.

16. А.с. № 2008614048. Программа для расчета токов статора и ротора в каскадном электрическом приводе / Б.К. Попов, В.Ю. Карандей. – Зарег. 25.08.08.

17. Попов Б.К. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>.

## **DEVELOPMENT OF NEW TYPES OF ELECTRIC DRIVES FOR FUEL AND ENERGY COMPLEX**

AFANASYEV V.L., KARANDEY V.YU.

*Lately the oil equipment with use of electric drives becomes the most popular. As they possess a number of benefits, in comparison with hydraulic systems. Electric motors equip both import, and domestic drilling rigs. These installations have a power part from electric drives. More perspective is development of the equipment using advanced electric drives. The overview and possible improvement of these devices, for example, by use of the cascade managed asynchronous engines is provided in this article what to allow to improve characteristics of the equipment.*

*Keywords: hybrid system, vectorial control, controlled asynchronous cascade electric drive, electromagnetic moment, electromechanical conversion of energy, electromagnetic system.*

УДК 621

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЕКЦИОННЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ЧЕРЕЗ GSM-МОДУЛЬ**

АХМЕТДИНОВ И.Р., филиал ОАО «Сетевая компания» «Бугульминские электрические сети», электромонтер СССДТУ

В настоящее время в филиале ОАО «Сетевая компания» «Бугульминские электрические сети» управление секционными выключателями выполняется с выездом на место установки, на что

затрачивается много времени и средств (горючее, рабочая сила). Отсутствует мобильная версия ОИК, диспетчер, т.е. начальник или мастер РЭС, получает оперативную информацию либо находясь в кабинете, либо по звонку диспетчера. В данной работе предложено автоматизировать управление секционными выключателями через GSM-модуль, а также представлен прототип приложения, предоставляющего пользователю контроль за секционными выключателями, их состоянием и выполнением команд управления.

Была поставлена цель: выбор оборудования и разработка аппаратно-программного обеспечения для дистанционного управления секционным выключателем.

Для решения необходимо выполнение следующих задач:

- улучшение качества обслуживания потребителя;
- оперативный контроль электрооборудования;
- дистанционное управление секционными выключателями;
- снижение времени простоя оборудования;
- уменьшение эксплуатационных затрат (времени персонала, ГСМ);
- использование современных технологий управления процессами передачи электроэнергии.

В качестве среды для разработки использовалась Android Studio, предоставляющая интегрированные инструменты для разработки и отладки приложений для платформы Android. Базовым языком является Java.

Arduino – аппаратно-программная среда управления микроконтроллером, разработанная на языке программирования C/C++.

При реализации проекта использовался GSM/GPRS-модуль – приемопередатчик, использующий сети операторов мобильной связи для передачи и приема информации.

В качестве контроллера применялся миниатюрный компьютер с набором входов и выходов, работающий по заранее написанной программе.

Программа работает таким образом: диспетчер районных сетей имеет доступ ко всей базе данных. Для данного лица определяется пароль доступа к базе данных.

Оператор заносит в базу данных сведения о секционных выключателях, а также о состоянии каждого выключателя (включен или выключен).

Диалог пользователя с программным комплексом осуществляется посредством экранных форм и диалоговых окон.

При правильном вводе пароля появляется главное окно программы, которое позволяет получать сведения о секционных выключателях, а также о состоянии определенного выключателя (включен или выключен).

Диспетчер районных сетей принимает решение о выполнении переключения путем подачи диспетчерской команды на секционный выключатель, нажимая на нужную надпись в приложении. При нажатии на кнопку вкл/откл автоматически отправляется кодированная смс-команда на GSM-модуль.

GSM-модуль представляет собой беспроводное коммуникационное устройство (модем) для приема/передачи данных в сетях мобильной связи. Он установлен в любом мобильном телефоне, благодаря ему возможно голосовое общение, прием сообщений, выход в интернет.

Микроконтроллер Arduino, свою очередь, определяет, какая команда пришла от GSM-модуля в виде кодированной смс, и принимает решение о включении промежуточного реле на 3 с, тем самым имитируя нажатие кнопки управления секционным выключателем.

Для обратной связи о состоянии секционного выключателя к его релейной защите подключено 2 провода от микроконтроллера Arduino, при замыкании и размыкании которых автоматически подается команда на GSM-модуль, а он в свою очередь отправляет ее на планшет, на котором установлено данное приложение.

В настоящее время разработаны:

- 1) двойная степень защиты от несанкционированного доступа:
    - кодирование команды на выполнение операции;
  - проверка номера абонента, от которого пришла команда;
  - 2) обратная связь с контролем правильности выполнения команды.
- В ближайшее время планирую реализовать:
- разграничение доступа пользователей к ресурсам;
  - разработку web-приложения для управления оборудованием.

Экономический эффект был рассчитан для действующего оборудования с удалением от РЭС на 12 км. Экономически намного выгоднее будет устанавливать его в удаленных местах, что позволит значительно снизить транспортные затраты, затраты на заработную плату.

При расчете не учитывались факторы репутационной составляющей, а также недоотпуска электроэнергии. В нашем случае на данном фидере запитаны 2 населенных пункта с населением 800 человек и фабрика дверей. Мощность потребления электроэнергии составляет 520 кВт/ч.

В результате внедрения автоматизированного управления секционными выключателями через GSM-модуль удалось реализовать следующие цели и задачи:

- время реакции при изменении схемы питания – несколько минут;
- получен оперативный контроль за электрооборудованием;
- реализовано дистанционное управление секционными выключателями;
- снижено время простоя оборудования;
- уменьшились затраты на управление переключением секционного выключателя;
- использование современных технологий управления процессами передачи электроэнергии.

Даная схема внедрена и успешно используется в Бугульминском РЭС, в кольце Ф31-04 и Ф31-06 с июня 2016 года.

УДК 621

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ОТОПЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПАО «ТАТНЕФТЬ» ПРОГРАММИРУЕМЫМИ ТЕРМОСТАТАМИ**

АХМЕТЗЯНОВ Д.А., инженер по наладке и испытаниям,

ООО «Диагностика-ЭнергоСервис»

ИЛЬЯСОВА Л.Н., БИЛАЛОВ Ф.Ф., АХУНОВ Т.Р., ЯББАРОВ Р.Р.,

ООО «ТаграС-ЭнергоСервис»

ГАБИТОВ Б.Ф., НГДУ «Азнакаевскнефть»

Системы теплоснабжения являются крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов в стране. От нормального функционирования этих систем зависят условия теплового комфорта в отапливаемых зданиях, самочувствие людей, производительность труда и т.д. Выпуск качественной продукции на ряде промышленных предприятий требует строгого соблюдения нормируемых параметров микроклимата. Эффективность предприятий также в большой степени определяется температурно-влажностными режимами в помещениях, обеспечиваемыми работой систем теплоснабжения. Таким образом, проблема повышения качества, надежности, экономичности теплоснабжения имеет государственное значение.



Режимы теплоснабжения, а следовательно, и производства тепловой энергии зависят, как известно, от большого количества факторов: условий погоды, теплотехнических качеств отапливаемых зданий и сооружений, характеристик тепловой сети и источников энергии и др. При выборе этих режимов нельзя не учитывать функциональные взаимосвязи системы теплоснабжения с другими системами инженерного обеспечения: электро-, газо-, водоснабжения.

Внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами в практику теплофикации и централизованного теплоснабжения позволяет резко повысить технический уровень эксплуатации этих систем и обеспечить значительную экономию топлива. Кроме экономии топлива, автоматизация рассматриваемых систем позволяет улучшить качество отопления зданий, повысить уровень теплового комфорта и эффективность промышленного и сельскохозяйственного производства в отапливаемых зданиях и сооружениях, а также надежность теплоснабжения при уменьшении численности обслуживающего персонала.

Первым шагом на пути к автоматизации отопления является покупка соответствующего оборудования. Выбирая котел, необходимо обратить внимание на то, есть ли в его функционале возможность взаимодействия с интеллектуальным интерфейсом. Многие современные котлы могут автоматически реагировать на изменения различных факторов (перепады давления в трубопроводе или напряжения в сети, жесткость воды), что делает их работу более эффективной и безопасной. Электронная регулировка мощности котлов уже стала обычным делом для известных торговых марок. Благодаря непрерывной модуляции пламени оборудование работает значительно экономнее. Добиться полной автоматизации работы котла можно при помощи цифровых приборов, встраиваемых в систему.

Применение системы автоматического программного регулирования отопления позволяет осуществлять дальнейшее совершенствование режима отопления, например снижать температуру воздуха в жилых зданиях в ночное время или отпуск теплоты на отопление промышленных и административных зданий в нерабочее время, что обеспечивает дополнительную экономию теплоты и создание комфортных условий.

При определении тепловой нагрузки систем отопления учитывают особенности теплового режима помещений. В помещениях с постоянным тепловым режимом, к которым относятся промышленные, жилые и общественные здания, сельскохозяйственные постройки, тепловую нагрузку определяют из теплового баланса.

В помещениях с переменным режимом при определении тепловой нагрузки различают два периода – рабочий и нерабочий. В нерабочее время необходимость в отоплении может отсутствовать.

Во всех случаях при расчете мощности систем отопления необходимо учитывать минимальные почасовые тепловыделения. Кроме того, системы отопления должны обеспечивать нормируемые параметры воздуха к началу рабочего периода. Отопление, рассчитанное только на период нерабочего времени, называют дежурным отоплением.

Чтобы наладить систему автоматического поддержания оптимальной температуры, используют специальные контроллеры и датчики, расположенные как внутри, так и снаружи помещения, например программируемый терморегулятор (термостат) Imit Blue (рис. 1, 2), представляющий собой цифровой недельный программатор, который позволяет запрограммировать систему отопления на желаемую температуру воздуха в помещении на протяжении дня, ночи и недели или устанавливать любую температуру на конкретный промежуток времени на каждый день и на каждую ночь. Управление термостатом осуществляется ручкой установки температуры со шкалой от 0 до 35 °С. От наличия термостата зависит, насколько эффективно будет использоваться потребление энергоресурсов котлом отопления для создания комфортной температуры в помещении – до 20 % объема потребляемых энергоносителей можно экономить, применяя такого рода автоматику. Терморегулятор имеет еще одно название: термостат – устройство для автоматического поддержания температуры на заданном уровне.



Рис. 1. Программируемый хронотермостат фирмы Imit Blue

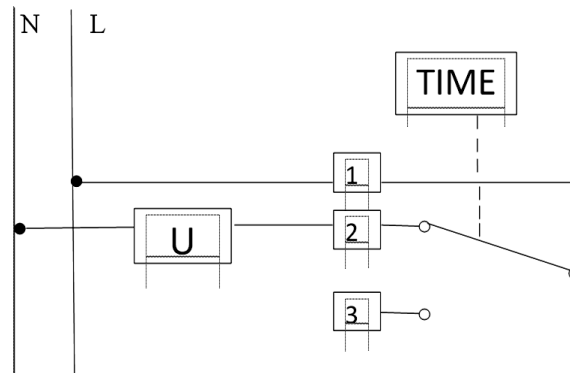


Рис. 2. Схема устройства терморегулятора

Принцип работы термостата основан на включении или отключении котла отопления. Прибор контролирует нагревание теплоносителя или окружающего воздуха. Чувствительный элемент устанавливается с обеспечением теплового контакта на конструкцию, температуру которой необходимо контролировать (рис. 3, 4).

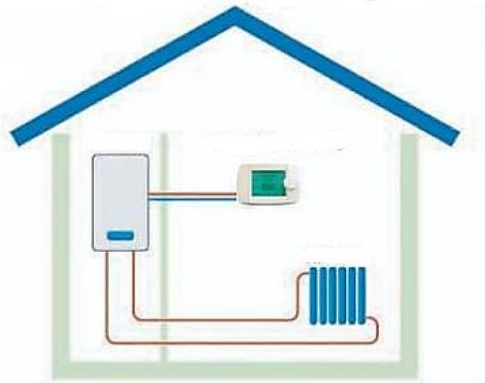


Рис. 3. Схема установки термостата

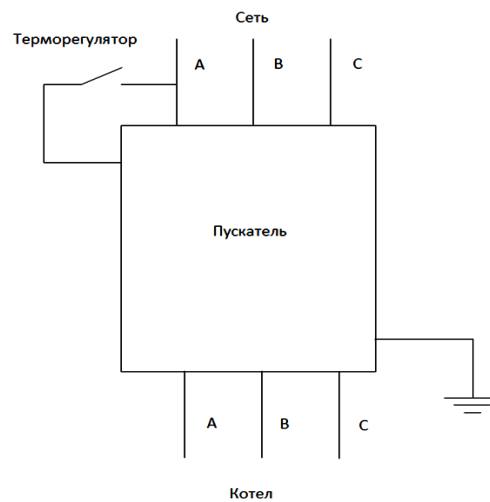


Рис. 4. Принципиальная схема соединения термостата и котла

Исполнительный элемент устанавливается в систему, подающую топливо. Связываются элементы термостата между собой обычно либо электрической цепью, либо механической тягой. При изменении состояния чувствительного элемента вырабатывается сигнал, воздействующий через связь на исполнительный элемент, который перекрывает подачу электричества и, используя встроенный или внешний датчик, отправляет сигнал на отключение или включение автоматическому блоку котла отопления (рис. 5).

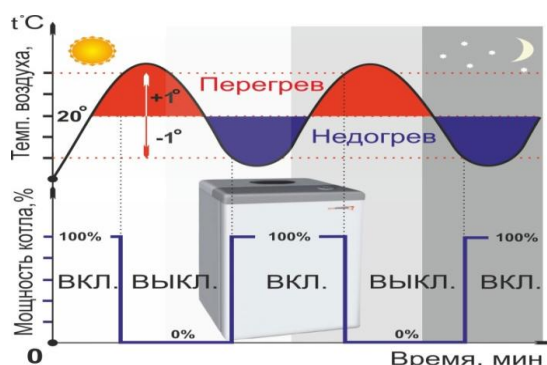


Рис. 5. Принцип работы программируемого термостата

Если температура теплоносителя или воздуха поднимается чуть выше заданного значения, то поступает сигнал отключения, а после ее опускания ниже установленного уровня сигнал подается на включение отопительного оборудования. Устройства очень просты в управлении и, несмотря на это, являются надежным средством управления климатом. Преимуществом использования такой отопительной системы является экономия энергоресурсов.

По функциональному своему назначению терморегуляторы делятся на ручные и программируемые. По исполнению терморегуляторы бывают беспроводные и проводные. В зависимости от требования к питанию — напряжение питания постоянного тока; батарейки AAA; напряжение питания переменного тока. По степени защиты корпуса от внешних воздействий: взрывозащищенное исполнение (NEMA-7 и -9) — исключит повреждение корпуса и выход из строя прибора; общепромышленное исполнение корпуса (IP-66). По типу выходного сигнала: быстродействующий переключатель SPDT (однополюсный на 2 направления), визуальная индикация 1 А при 24 В переменного тока 50/60 Гц. По диапазону измерения: в положительном диапазоне; с диапазоном работы в отрицательных температурах.

В 2015 г. специалистами ООО «Диагностика-ЭнергоСервис» были внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию программируемые термостаты Imit Blue с целью снижения затрат на электропотребление на нужды обогрева бригадных домов и сушильных помещений НГДУ «Азнакаевскнефть» (рис. 6).



Рис. 6. Установленные термоконтроллеры в НГДУ «Азнакаевскнефть»

Для реализации проекта выполнено следующее:

- произведен монтаж 107 термоконтроллеров и 44 приборов учета в бригадных домах и сушильных помещениях ДНС для регулирования работы электрических котлов в зависимости от температуры в помещениях;
- произведено обучение персонала бригадных домов по корректной эксплуатации;
- распоряжением по цехам назначены ответственные за исправное состояние термоконтроллеров.

После установки данного оборудования экономия электроэнергии составила 679 тыс. кВт·ч на 1601 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости – 1,39 года при капитальном вложении 1744,1 тыс. руб. (таблица).

Перечень объектов монтажа термоконтроллеров и приборов учета

Цех	Количество объектов монтажа	Расход электроэнергии за 2015–2016 гг., тыс. кВт·ч		Экономия электропотребления	
		расчетный	фактический	тыс. кВт·ч	тыс. руб. / отопительный сезон
ЦДНГ-1	8	193	138	54	128,39
ЦДНГ-2	11	267	178	89	209,09
ЦДНГ-3	13	204	155	50	117,16
ЦДНГ-4	11	225	177	48	114,02
ЦДНГ-5	12	269	210	60	140,72
ЦДНГ-6	9	152	104	48	112,39
ЦДНГ-7	4	153	106	47	111,89
Азн. ЦППД	17	524	319	205	484,09
Акт. ЦППД	11	191	113	78	183,62
Итого, кВт·ч		2178	1500	679	1601,36

Эффективное управление отоплением является жизненно важной частью рациональной работы котла и системы отопления. Грамотное использование элементов управления снизит потребление энергии агрегатом при создании комфортной температуры, избегая перегрева помещений.

УДК 62-83:621.798

## **ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯТОРАМИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА**

БЫЧКОВ Е.В., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, к.т.н., доцент  
КРЮКОВ О.В., АО «Гипрогазцентр», д.т.н., доцент,  
o.kryukov@ggc.nnov.ru

*Рассмотрены особенности функционирования электрооборудования компрессорных станций в условиях многофакторного воздействия случайных возмущений. Представлена методика реализации предиктивного управления электроприводами в рамках АСУ ТП, обеспечивающая учет и компенсацию возмущений различного характера. Приведен пример расчета регрессионных уравнений для управления аппаратами воздушного охлаждения газа и результаты статистических исследований методами теории планирования эксперимента.*

*Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, аппараты воздушного охлаждения, вентилятор, предиктивное управление, регрессионные алгоритмы, стабилизация выходных параметров.*

Центральными технологическими установками компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов (МГ) являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА) [1, 2], обеспечивающие восстановление штатных параметров давления природного газа в трубопроводах после его транспорта по линейным участкам МГ путем компримирования на входе с КС, и аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа [3, 4], предназначенные для снижения температуры газа, нагретого после компримирования, путем теплообмена с окружающим воздухом до требуемых значений. Данные установки являются главными потребителями электроэнергии на КС (до 70 % расхода электроэнергии на газотурбинной КС), а мощность, потребляемая АВО, достигает сотен киловатт. Поэтому анализ энергосберегающего частотно-регулируемого привода (ЧРП) АВО является актуальным [5, 6].

Предложена новая методология разработки и оптимизации системы инвариантного управления автоматизированного ЧРП [7 8], в том числе и вентилятора АВО газа [9, 10].

Величина температуры охлажденного газа на выходе АВО существенно влияет на производительность газопровода, работу всех систем КС и состояние трубопроводов. Поэтому точная стабилизация температуры охлажденного газа в условиях реализации графика газоподачи и изменений нескольких случайных возмущающих воздействий определяет эффективность функционирования в целом МГ. Современная интеллектуальная система управления ЧРП АВО газа решает следующие задачи [11, 12]: автоматическое поддержание заданной температуры газа на выходе АВО; контроль состояния электродвигателей и подводящих кабельных линий; защита электродвигателей; плавный пуск электродвигателей вентиляторов АВО; отказ от сезонной переустановки углов атаки лопастей вентиляторов; дистанционное управление вентиляторами АВО; отображение полной информации о работе установок охлаждения газа на дисплее оператора компрессорного цеха.

В настоящее время на КС ПАО «Газпром» реализованы два основных способа управления АВО – дискретное и частотное регулирование. Дискретное регулирование в последнее время оснащается устройствами плавного пуска. Применение современного интеллектуального ЧРП для управления производительностью вентиляторов АВО позволяет обеспечить:

- автоматическое поддержание требуемой температуры газа на выходе АВО с высокой точностью (не ниже 0,2 °С – в большей степени определяется точностью показаний приборов) за счет плавного регулирования производительности вентиляторов (изменение частоты тока двигателя в заданном диапазоне: для 2АВГ-75 – от 50 до 10 Гц) без вмешательства оператора;

- плавный пуск или подхват электродвигателей, в том числе и из состояния авторотации, без забросов по току, по гибкому алгоритму, изменением амплитуды и частоты тока обеспечивающему оптимальный момент на валу без превышения номинального значения тока двигателя (время плавного пуска задается в ПЧ в диапазоне от 0 до 360 с);

- отсутствие необходимости проведения сезонных операций по переустановке углов атаки лопастей вентиляторов; лопасти одновременно устанавливаются на оптимальный угол атаки, регулировка интенсивности обдува АВО производится за счет изменения частоты вращения рабочих колес вентиляторов;

- обеспечение дополнительной защиты каждого двигателя и ПЧ за счет постоянного мониторинга его работы; исключается превышение номинального тока, постоянно контролируются параметры цепи «двигатель – питающий кабель» на отсутствие коротких замыканий;
- постоянный мониторинг параметров двигателей, включая потребляемую мощность и момент;
- отсутствие эффекта рециркуляции охлаждающего воздуха между секциями АВО;
- не требуется система компенсации реактивной мощности;
- значительная экономия электроэнергии при работе АВО с неполной нагрузкой за счет постоянного использования всей теплообменной поверхности АВО, что приводит к среднегодовой экономии электроэнергии на уровне 25–40 % по сравнению с дискретным регулированием.

Новые системы с ЧРП вентиляторов различаются по своему построению: комбинированное, групповое и индивидуальное управление. Коррекцию воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы автоматизированного ЧРП вентилятора АВО газа наиболее целесообразно организовать с применением инвариантной САУ, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект. Для этого все основные влияющие возмущения после формализации вводятся в предиктивный закон управления ЧРП, обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию конкретного агрегата в структуре матрицы АВО газа в зависимости от размещения их на площадке КС. Приведены варианты оригинальной структуры САУ температуры.

Для проверки адекватности разработанных предиктивных алгоритмов управления и стабилизации температуры газа средствами ЧРП вентилятора АВО производилось моделирование процессов в пакете Simulink. Параметры каналов управления ЧРП и обратной связи по температуре газа задаются индивидуально под конкретные реализации КС. Передаточные функции всех динамических звеньев прямого канала управления соответствуют выражениям, полученным при математическом описании АВО, а параметры цепи обратной связи по температуре охлажденного газа приведены в докладе. Для имитации действия возмущений на сам аппарат охлаждения в компьютерную систему введены два функциональных блока преобразований, обеспечивающие приращение к температуре газа при изменении метеорологических и технологических условий теплообменного охлаждения в установках.



Результаты моделирования подтверждают корректность реализации проектов автоматизации АВО с ЧРП вентиляторов. Например, временные диаграммы при линейном изменении возмущений, действующих на вентиляторы АВО с ЧРП, соответствуют физическим процессам охлаждения на КС. Линейность приложенных внешних воздействий характерна для стохастических возмущений, свойственных метеорологическим факторам, заметно изменяющимся в течение времени порядка минут, часов. Технологические возмущения более динамичны, однако их инерционность из-за теплотехнических и гидродинамических свойств АВО также не сравнима с инерционностью электромеханической части ЧРП, реагирующей на несколько порядков быстрее.

Считывание данных с внешних датчиков АСУ АВО происходит с определенной дискретностью, которая определяется технической целесообразностью, с одной стороны, и насыщенностью пакета ПО АСУ ТП конкретными функциональными возможностями и сервисными продуктами мониторинга всех систем АВО, с другой. Ступенчатость воздействий, представленная на графиках в докладе, наглядно отображает эту дискретность съема информации и расчета заданной скорости вращения вентилятора.

Следовательно, в результате проведенных исследований по моделированию процессов в замкнутых САР температуры газа средствами ЧРП АВО можно констатировать:

1. Разработана адекватная компьютерная модель для расчета частоты вращения вентилятора АВО. Оптимальной по точности и простоте реализации на компьютере является линейная модель.

2. Для стабилизации технологического параметра КС – температуры охлажденного газа – разработана методика синтеза предикативного регулятора САУ с выбором структуры регулятора и его расчетом.

3. Создана имитационная модель системы охлаждения газа с помощью АВО, которая подтверждает адекватность методики расчетов и построения САР температуры газа на КС.

Исследование режимов и особенностей функционирования АВО газа, как наиболее характерных механизмов с вентиляторной нагрузкой, в реальных условиях показывает, что рациональное применение автоматизированного ЧРП вентиляторов с инвариантными АСУ позволяет обеспечить высокие показатели транспорта газа, энергосбережения и ресурсосбережения, повысить надежность, долговечность работы оборудования и удобство обслуживания с удаленного диспетчерского поста компрессорной станции.

### Источники

1. Крюков О.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

2. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations / O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135–140.

3. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.

4. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: Труды 10-й МНТК / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2015. – С. 368–386.

5. Крюков О.В. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В. Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды 4-й ВНКП / под общ. ред. В.Ю. Островлянича. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

6. Milov V.R. Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72(5). – P. 1095–1101.

7. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: Труды 9-й Междунар. конф. SICPRO-2012 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2012. – С. 222–236.

8. Крюков О.В. Электрооборудование и автоматизация водоборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография / О.В. Крюков, Н.В. Киянов. – Н. Новгород, 2007. – 260 с.

9. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

10. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин / О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

11. Серебряков А.В. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: Тр. конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб., 2012. – С. 467–469.

12. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.

### **PREDICTIVE CONTROL OF FANS OF AIR COOLERS OF GAS BYCHKOV E.V., KRYUKOV O.V.**

*Features of functioning of electric equipment of compressor stations in the conditions of multiple-factor impact of casual indignations are considered. The technique of realization of predictive control of electric drives within industrial control system providing the account and compensation of indignations of various character is presented. The example of calculation of the regression equations for control of air coolers of gas and results of statistical researches is given by methods of the theory of planning of an experiment.*

*Keywords: frequency and adjustable electric drive, air coolers, fan, predictive management, regression algorithms, stabilization of output parameters.*

УДК 536.2.01

### **ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

**ВАРЕНОВ А.А., ГОРИН В.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., МАЛЕВ Н.А.  
КГЭУ, Казань**

*Применение автоматического управления объектами теплоэнергетики позволяет повысить надежность и экономичность работы оборудования, улучшить качественные показатели технологических процессов. Для развития и успешной эксплуатации*

*систем автоматического управления исключительное значение имеют теоретические и экспериментальные исследования в области физического и математического моделирования. В работе рассматривается математическая модель системы отопления индивидуального дома с точки зрения ее анализа, а также синтеза управляющего алгоритма.*

*Ключевые слова: автоматическое управление, математическое моделирование, система отопления, комбинированное управление.*

Руководством страны обозначены стратегические направления приоритетного развития, в котором энергоэффективность и сбережение ресурсов в любом технологическом процессе являются первостепенными. Характерным для современной жизни является малоэтажное жилищное строительство с автономными системами жизнеобеспечения, в которых предусматривается автоматизация этих инженерных систем. Известно, что наибольшие затраты на содержание жилья – это отопление дома. И здесь, наряду с традиционными способами уменьшения тепловых потерь за счет выбора строительных материалов и конструкций, важную роль играют средства управления климатом в жилых помещениях дома.

На прошедшей в 2015 году конференции докладывалась разработанная математическая модель системы отопления индивидуального дома, доведенная до структурной схемы динамической модели, которая является основным инструментом для синтеза погодозависимой системы автоматического поддержания режима. Основной управляемой координатой в модели является температура в доме, которая зависит как от эффективности нагревания теплоносителя, так и от тепловых потерь через элементы конструкции дома. В докладе рассматриваются вопросы анализа системы отопления как объекта управления и синтеза погодозависимой системы управления этим объектом для достижения высокой энергоэффективности и уменьшения расхода газа.

Сложность математической модели объекта управления потребовала использования метода идентификации систем, что позволило получить инженерные зависимости для проведения моделирования. Алгоритм управления базируется на использовании комбинированного закона управления, учитывающего информацию не только о задающем воздействии (уставке), но и о возмущающих воздействиях, вызывающих отклонение управляемой величины.

## **AUTOMATIC CONTROL PROBLEMS THERMAL ENERGY FACILITIES**

VARENOV A.A., GORIN V.A., POGODITSKY O.V., MALEV N.A.

*The use of automatic control of power system objects can improve the reliability and efficiency of the equipment, improve the quality parameters of technological processes. Exceptional importance theoretical and experimental research in the field of physical and mathematical modeling for the development and successful operation of the automatic control systems. In this paper the mathematical model of individual house heating system in terms of its analysis and synthesis of control algorithm.*

*Keywords: automatic control, mathematical modeling, heating system, combined control.*

УДК 621.311.24:656.56

## **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ ДЛЯ ВДОЛЬТРАССОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

ВАСЕНИН А.Б., АО «Гипрогазцентр», инженер,  
КРЮКОВ О.В., АО «Гипрогазцентр», д.т.н., доцент,  
o.kryukov@ggc.nnov.ru

*Рассмотрено современное состояние развития автономных систем электроснабжения, включая объекты газотранспортных систем. Обосновано использование комбинированных генераторных комплексов с альтернативными источниками электроэнергии на базе ветроэнергетических установок. Предложены варианты структур электросетей для питания вдольтрассовых потребителей. Проанализированы энергоэффективные инвариантные системы на базе комбинированных установок. Получены прогнозируемые объемы выработки электроэнергии возобновляемыми энергоисточниками.*

*Ключевые слова: магистральный газопровод, вдольтрассовый потребитель, энергоэффективность, инвариантная система, автономная система электроснабжения, ветроэнергетическая установка.*

Активное расширение газотранспортных систем России и переориентация на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона привели к значительному росту темпов и объемов нового строительства объектов добычи, транспорта, переработки и подземного хранения газа [1, 2].

Повышение конкурентоспособности транспорта природного газа, снижение его энергоемкости и себестоимости напрямую связаны с модернизацией существующих систем электроснабжения (СЭС) [3, 4]. Вопрос эффективного и надежного электропитания основных технологических агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов (МГ) и вдольтрассовых потребителей (ВТП) является одним из наиболее важных и актуальных для газовой промышленности [5, 6]. Ежегодно ПАО «Газпром» использует на нужды газотранспортных предприятий более 12 млрд кВт·ч электроэнергии с динамикой роста на 20–30 %. ВТП МГ потребляют относительно небольшую мощность, но надежность СЭС этих объектов должна обеспечиваться, в соответствии с СТО Газпром 2-6.2-149-2007, по 1 и 2 категории. Традиционные типовые проекты СЭС не всегда сегодня обеспечивают требуемую категорию надежности энергопитания, и поэтому для обеспечения штатной работы СЭС требуются новые технические решения с использованием альтернативных автономных источников и комбинированных схем электроснабжения [7, 8].

В настоящее время экономический потенциал альтернативных источников электроэнергии (включая возобновляемые) в России велик и составляет, по самым скептическим прогнозам, около 30 % от всего объема потребления энергетических ресурсов. Доля возобновляемых источников энергии в России сегодня составляет 0,6–0,8 % объема внутреннего энергопотребления, а в промышленно развитых странах достигает 5–30 %. В то же время годовой энергетический потенциал России в 2000 раз превышает ее сегодняшней объем производства. Как правило, это те районы, где трудно решаются вопросы энергоснабжения (побережья Северного Ледовитого и Тихого океанов, отдаленные сельские районы): с низкой плотностью нагрузки, большим числом мелких распределенных потребителей (включая объекты газодобычи и транспорта газа), подключение которых к центральным сетям не рентабельно. Здесь целесообразно применение автономных энергетических источников (АИЭ), которые экономят углеводородное топливо и улучшают экологию. Известно, что одна АИЭ мощностью 20 кВт экономит 6 т.у.т. при потребности их по стране до 50 тыс. шт./г. Кроме того, при ожидаемом повышении цен на природный газ целесообразность использования его в качестве топлива снижается даже для газотранспортных предприятий.

Основными ВТП (линейными потребителями) электроэнергии МГ являются: установки электрохимической защиты, контролируемые пункты

линейной телемеханики, оборудование радиорелейной связи, газо-измерительные станции, узлы запуска/приема очистных устройств, газораспределительные станции, узлы редуцирования газа, дома операторов и обходчиков. Суммарная мощность этих потребителей по разным газотранспортным предприятиям составляет 0,25÷9 МВт, а протяженность ЛЭП – 150÷4800 км. Подобный разброс параметров предполагает при проектировании СЭС каждого участка индивидуальный подход к формированию АИЭ.

Структура автономных СЭС ВТП определяется особенностями [9, 10]:

- значительная длина МГ и рассредоточенность ВТП по трассе;
- удаленность ВТП от централизованных электросетей;
- малые электрические нагрузки линейных потребителей (2–40 кВт).

Надежность СЭС линейных потребителей является главным фактором, обеспечивающим стабильное и безаварийное состояние газотранспортных систем [11, 12]. Современные СЭС линейных потребителей МГ проектируются в соответствии с тремя возможными видами.

1. Централизованное электроснабжение от вдольтрассовых ВЛ 6 (10) кВт с питанием от КС или внешних источников: отличается относительно высокой надежностью, гибкостью и ресурсом до 50 лет, но имеет недостаток – высокую стоимость строительства, подключения и эксплуатации ЛЭП.

2. Независимое (автономное) электроснабжение с питанием от электростанций собственных нужд (ЭСН) с энергоисточниками на основе топливного газа: требует существенно меньших капитальных затрат, но обладает зависимостью от наличия топливного газа в трубопроводе.

3. Автономные энергоисточники: именно комбинированная СЭС наиболее предпочтительна сегодня для линейных потребителей, так как обладает достаточной надежностью и гибкостью, обеспечивая независимую от газа работу всех установок и сохраняя оптимум протяженности ЛЭП.

Анализ состояния СЭС линейной части МГ показывает, что более 75 % существующих ЛЭП и трансформаторных подстанций выработали ресурс и морально устарели; более 70 % объектов ВТП МГ выполнено по 3-й категории и не соответствует нормативам; отсутствие современных средств защиты и автоматики приводит к проблемам перевода на резервные источники; более 80 % случаев отказа ВТП и питающих ЛЭП связано с ненадежностью СЭС.

Статистика повреждений существующих СЭС показывает, что основными факторами, влияющими на надежность, являются повреждения в центральных сетях и обрывы ЛЭП системных поставщиков электроэнергии. Это является дополнительным стимулом к скорейшему освоению ЭСН на базе новых АИЭ с различными источниками электропитания.

Авторами на примере таких крупных проектов строительства, как МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток», «Сила Сибири», «Починки – Грязовец», «Ямал – Европа», выполненных АО «Гипрогазцентр», проанализировано состояние СЭС линейных потребителей МГ.

В соответствии с действующими нормативными документами, новые АИЭ для СЭС должны обеспечивать: блочно-комплектное исполнение заводской готовности, обеспечение потребителей электроэнергией по ГОСТ 13109-97, мощностной ряд 1, 2, 4, 8, 16, 30, 60, 100 кВт, ряд номинальных напряжений 24, 48 В постоянного тока, 230 В переменного тока 50 Гц, обеспечение длительного питания ВТП в диапазоне мощностей 10:1 и пр. САУ АИЭ должна обеспечивать: устойчивую работу СЭС ВТП, оптимальное регулирование параметров электроэнергии, длительную параллельную работу агрегатов СЭС, рациональное распределение мощностей АИЭ, адаптивное управление системами собственных нужд, оперативный мониторинг состояния.

Проанализированы параметры новых, наиболее эффективных для ВТП типов АИЭ:

– микротурбинные установки на базе высокоскоростных газовых турбин, обеспечивающих работу СЭС при набросах нагрузки, большой ресурс, надежность и работу при низких нагрузках;

– агрегаты на топливных элементах, преобразующих химическую энергию (в том числе водорода) в электроэнергию и обладающих высоким КПД, надежностью и простотой эксплуатации;

– ветроэнергетические установки с разными осями вращения, с коэффициентом использования ветрового потока до 0,593 и низким уровнем шумовибрационных характеристик;

– солнечные батареи модульного исполнения с высоким КПД преобразования солнечного света;

– турбодетандерные установки, вырабатывающие электроэнергию за счет энергии газа на стадии его передачи из МГ с давлением 30–75 кгс/см<sup>2</sup> в сеть потребителя с давлением 1–12 кгс/см<sup>2</sup>;

– каталитические термоэлектрические установки с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую с использованием полупроводниковых термоэлементов;



– двигатели Стирлинга – поршневые агрегаты с экономичным отводом тепла от источника с низкими шумовибрационными характеристиками и малой токсичностью отработанных газов;

– паротурбогенераторы (преобразователи энергии «ормат») – полностью автономные АИЭ мощностью 0,2–3,2 кВт для непрерывной генерации напряжения без технического обслуживания.

Примеры практического использования перечисленных энергоисточников уже имеются на различных линейных участках МГ России. Наибольшей популярностью и перспективами массового применения среди рассмотренных выше АИЭ пользуются автономные генераторные комплексы на основе ветроэнергетических установок в сочетании с преобразователями энергии «ормат». Это обусловлено высоким уровнем проработки технологических и конструкторских решений данных электроэнергетических систем как у нас в стране, так и в мировой практике, для питания объектов, аналогичных линейным потребителям МГ. Приведены варианты оригинальной структуры комбинированных СЭС с АИЭ и нейро-нечеткие алгоритмы, по которым представлены результаты компьютерного моделирования и получено несколько патентов на изобретения.

### Источники

1. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: Труды 10-й МНТК / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2015. – С. 368–386.

2. Milov V.R. Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72(5). – P. 1095–1101.

3. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин / О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

4. Серебряков А.В. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: Тр. конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб., 2012. – С. 467–469.

5. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: Труды 9-й Междунар. конф. SICPRO-2012 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2012. – С. 222–236.

6. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

7. Крюков О.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

8. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations / O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135–140.

9. Крюков О.В. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В. Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды 4-й ВНИК / под общ. ред. В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

10. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.

11. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.

12. Крюков О.В. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок / О.В. Крюков, А.В. Серебряков, А.Б. Васенин // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 549–552.

## **EXTREME METHODS OF MANAGEMENT OF VEU FOR ALONG-ROUTE CONSUMERS**

VASENIN A.B., KRYUKOV O.V.

*The current state of development of autonomous systems of power supply, including objects of gas transmission systems is considered. Use of the combined generating complexes with alternative sources of the electric power on the basis of wind power installations is proved. Options of structures of power supply networks for food of along-route consumers are offered. Energy efficient invariant systems on the basis of the combined installations are analyzed. The predicted power generation volumes are received by renewable power sources.*

*Keywords: main gas pipeline, along-route consumer, energy efficiency, invariant system, autonomous system of power supply, wind power installation.*

УДК 621.365

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

ВАСИНКИНА Е.Ю., СГТУ им. Ю.А. Гагарина, аспирант,  
vasinkina1987@mail.ru

ОГУРЦОВ К.Н., СГТУ им. Ю.А. Гагарина, к.т.н., доцент,  
docento77@rambler.ru

*Оцениваются вредные факторы, возникающие в процессе жизнедеятельности человека, исследуются методы ослабления электромагнитного излучения. Полученные материалы предлагается использовать при защите от электромагнитных излучений в жилых и производственных помещениях.*

*Ключевые слова: дисперсная фаза, дисперсная система, электромагнитное излучение, алюмосиликат, герметик, графит.*

В настоящее время человек часто подвергается воздействию электромагнитных полей. Токи высокой частоты широко применяются в промышленности, связи, радиовещании, на транспорте, в пищевой промышленности, металлургии, а также в медицине (высокочастотная терапия). Постоянное воздействие электромагнитных полей может привести к необратимым изменениям в здоровье человека [1]. При этом нормы допустимых значений мощности электромагнитных излучений устанавливаются для конкретных устройств и не учитывают возможное наложение полей от нескольких источников электромагнитного излучения [2].

Технологии, адаптированные под современные требования к безопасности для уменьшения излучения непосредственно от самого источника, позволяют находить новые средства защиты от электромагнитного излучения. Для этого необходимо создавать новые материалы, которые станут средствами защиты от электромагнитных полей.

Для создания таких материалов и оценки их использования в качестве поглотителя электромагнитной энергии в работе проведены эксперименты по созданию поглощающих дисперсных систем. В качестве поглощающих материалов в работе используются композиционные материалы с электропроводящими дисперсными системами, дисперсной фазой в которых служит графит, а в качестве твердотельной среды – алюмосиликат и герметик.

Для исследования поглощающей способности дисперсных систем были изготовлены образцы с разным процентным содержанием графита и силикона (рис. 1), измерены диэлектрические свойства полученных материалов, исследовано влияние поглощающих экранов на плотность потока СВЧ-излучения на рабочем месте.



Рис. 1. Образцы дисперсных систем из графита и силикона

Измерение плотности потока СВЧ электромагнитного излучения осуществлялось вблизи СВЧ электротехнологической установки резонаторного типа (бытовая СВЧ-печь), работающей на частоте 2450 МГц. СВЧ-излучение улавливалось приемной антенной, из которой энергия поступала через волноводно-коаксиальный переход на термистор термисторной головки и нагревала его, от чего менялось сопротивление термистора. Термистор с помощью низкочастотного кабеля был включен в одно из плеч моста измерительного блока. Регулировка моста давала возможность измерить СВЧ-мощность, подающуюся в антенну.

Для исследования влияния экранов на уровень излучения в работе были проведены эксперименты с использованием дисперсных твердофазных систем, которые в процессе измерения уровня излучения располагались между работающей СВЧ-печью и антенной.

Плотность потока мощности  $W$ , мкВт/см<sup>2</sup>, определялась по формуле:

$$W = \frac{P_{\text{изм}}}{\eta S},$$

где  $P_{\text{изм}}$  – показания измерения мощности, отсчитанные по шкале прибора мкВт;  $S$  – действующая площадь антенны, см<sup>2</sup>;  $\eta$  – КПД термисторной головки.

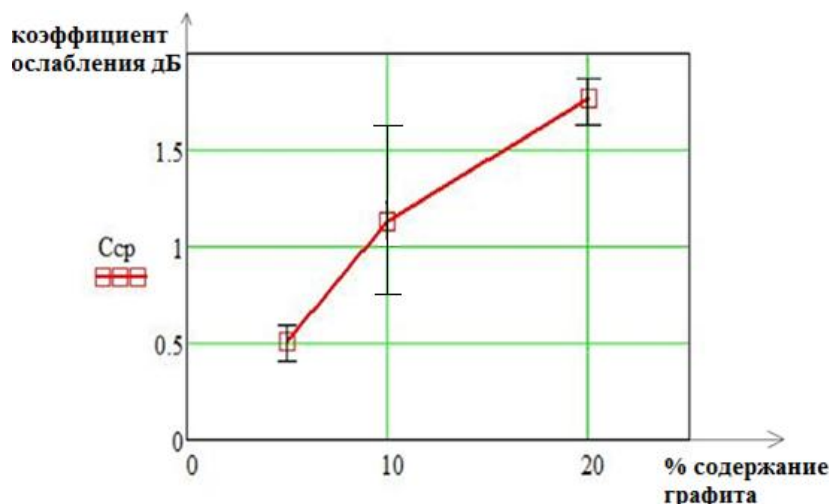


Рис. 2. Коэффициент ослабления

Границы доверительного интервала для ослабления образца с 5 %-м содержанием графита в силиконе составили  $0,473 < C < 0,547$  (рис. 2). Среднеквадратичное отклонение равно  $\sigma_C = 0,03$  дБ.

Границы доверительного интервала для ослабления образца с 10 %-м содержанием графита в силиконе составили  $0,672 < C < 1,596$  (рис. 2). Среднеквадратичное отклонение равно  $\sigma_C = 0,372$  дБ.

Границы доверительного интервала для ослабления образца с 20 %-м содержанием графита в силиконе составили  $0,473 < C < 0,547$  (рис. 2). Среднеквадратичное отклонение равно  $\sigma_C = 0,03$  дБ.

Для создания объемных образцов поглощающих нагрузок были изготовлены образцы твердофазных дисперсных систем, состоящие из алюмосиликата с графитовыми включениями с разным процентным соотношением, в которых размер частиц графита составил от 100 до 10 мкм, а размеры частиц алюмосиликата – от 1 до 10 мкм (рис. 3).

Для этого алюмосиликат смешивался с графитом в разных процентных соотношениях и затворялся водой.

Были проведены измерения диэлектрических свойств образцов. Измерения диэлектрических свойств образцов осуществлялись в лаборатории кафедры АЭУ на СВЧ-установке с двойным волноводным тройником методом полного заполнения сечения волновода.

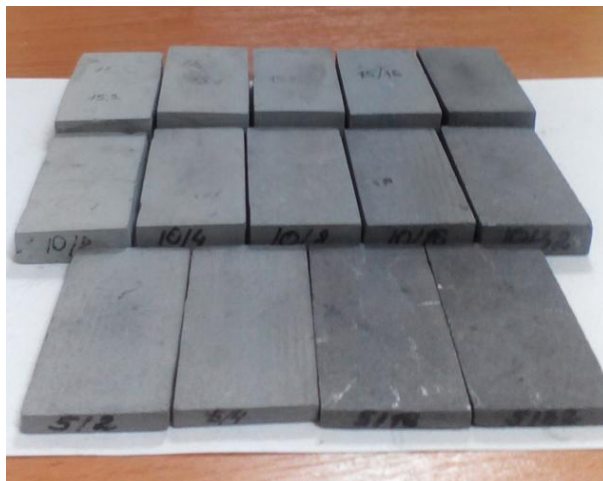


Рис. 3. Поглощающие нагрузки на базе алюмосиликата и графита

В зависимости от состава поглощающего элемента были получены значения диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость образцов с максимальным процентным содержанием графита незначительно превышала таковую образцов с меньшим содержанием графита, что позволяет нам сделать вывод об эффективности материала (табл. 1).

Таблица 1

#### Результаты вычислений проницаемости

Содержание графита, г	$\epsilon'$	$\epsilon''$
0	11,645	0,1938
4	13,14	0,12
16	26,15	0,049
32	52,45	0,404

В жилых помещениях бытовые приборы, работающие с использованием электрического тока промышленной частоты 50 Гц, напряжением 220 В, являются источниками электромагнитных излучений и электромагнитных полей. Наиболее высокие уровни электромагнитного излучения и электромагнитных полей генерируются мощными электроприборами, такими как СВЧ-печи, аэрогрили, электро- и индукционные плиты, холодильники с системой «без инея», кухонные вытяжки, телевизоры, мобильные телефоны. Зачастую все выше перечисленные приборы располагаются в одной комнате, что приводит к наложению электромагнитных полей.

По данным Центра электромагнитной безопасности определены зоны риска некоторых электробытовых приборов (табл. 2).

Таблица 2

## Зоны риска некоторых электробытовых приборов

Электробытовые приборы	Безопасное расстояние (не менее)
Холодильник	1,2 м от дверцы, 1,5 м от задней стенки
Утюг	23 см от ручки
Телевизор	1,1 м от экрана, 1,2 м от боковой стенки
Электронагреватель	30 см от спирали
Торшер, две лампы по 75 Вт	3 см от провода
Электродуховка	4 см от передней стенки
Аэрогриль	1,4 м

При наложении полей от нескольких источников электромагнитного излучения наблюдается превышение норм, установленных санитарно-эпидемиологическим надзором.

Нами было исследованы диэлектрические свойства дисперсных систем. В результате проделанной работы можно сделать вывод, что даже небольшое добавление проводящих дисперсных сред в состав дисперсных систем позволяет изменять их свойства и создавать поглощающие электромагнитное излучение материалы.

Таковыми дисперсными системами могут быть как специальные элементы, входящие в состав электротехнического оборудования, элементы одежды, так и элементы жилых помещений. Квартирные перегородки и даже несущие стены не служат защитой от электромагнитного поля. В связи с этим необходимо учитывать и то, что источники электромагнитного поля установлены у соседей за стеной. Полученные в работе материалы могут быть использованы в качестве поглощающих элементов бытовых и промышленных электротехнологических установок. Кроме того, проведенные исследования позволяют говорить о том, что добавка проводящих дисперсных сред в краски, грунтовки, сухую штукатурку и обои для перегородок и несущих стен жилого помещения позволит ослабить электромагнитное поле в жилых и промышленных помещениях до допустимых норм.

### Источники

1. Огурцов К.Н. Анализ вредных факторов, влияющих на организм человека при работе электротехнологических установок / К.Н. Огурцов, Е.Ю. Васинкина // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. – 2015. – № 1.

2. Метод увеличения равномерности распределения СВЧ-мощности от нескольких рупорных антенн по поверхности нагреваемого объекта / К.Н. Огурцов [и др.] // Антенны. – 2015. – № 2(213). – С. 31–34.

### RESEARCH METHODS OF ELECTROMAGNETIC FIELD WEAKENING INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL PREMISES

VASINKINA E.YU., OGURTSOV K.N.

*This article is to assess the hazards arising in the course of human life, the study of new electromagnetic radiation mitigation techniques and offer the materials obtained as a protection against electromagnetic interference in a residential industrial buildings.*

*Keywords: disperse phase, dispersion, electromagnetic radiation, aluminosilicate sealant graphite.*

УДК 681.521.2/681.525

### ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА КРУИЗ-КОНТРОЛЯ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

ГАЙНУТДИНОВ Ф.А., КНИТУ–КАИ, магистрант, look1011@bk.ru

ДУДКА Н.А., КНИТУ–КАИ, доцент, к.т.н.

*В настоящее время ведутся интенсивные разработки интеллектуальных транспортных систем, одним из направлений которых являются интеллектуальные транспортные средства (ИТС). На сегодня они подразделяются на следующие виды: Smart Pilot – «умные помощники» для водителей автомобилей; Air Pilot – автомобили с дистанционным управлением; Robo Pilot – автомобили, движущиеся без участия водителя.*



*К «умным помощникам» можно отнести систему круиз-контроля, или адаптивного круиз-контроля, которая широко используется в легковых автомобилях. Фирма Daimler уже изготовила и испытала Air Pilot с элементами Smart Pilot в грузовом автомобиле. К отечественной разработке с отдельными элементами вышеуказанных видов ИТС можно отнести беспилотный КамАЗ. В ИТС КамАЗа используются видеокамеры переднего, бокового и заднего обзора и 2D-лидар, размещенный на переднем бампере автомобиля. Выбор такого набора датчиков ограничивает использование автомобиля в ночное время суток, т.е. ограничивает в целом его эффективное использование.*

*Ключевые слова: интеллектуальные транспортные средства, интегрированная система круиз-контроля, алгоритмы обработки изображений.*

В целях расширения возможностей применения Smart Pilot для автомобиля КамАЗ предлагается использовать интегрированную систему круиз-контроля. В систему включаются следующие датчики (приборы): стереоскопическая система, лидар, тепловизор. Стереоскопическая система и тепловизор совместно работают в светлое время суток, лидар и тепловизор – в ночное время суток. Основная задача предлагаемого круиз-контроля – удерживание траектории движения автомобиля на крайней правой полосе дороги в автономном, полуавтономном или сигнальном режиме работы. При этом в получаемой от датчиков информации для этих целей используется не весь, а ограниченный объем данных. Задача обработки этих данных – определение границы между асфальтным покрытием дороги и придорожным покрытием.

Для определения и оценки точности разграничения покрытий проводились натурные испытания с последующим моделированием процессов на основе использования программного обеспечения MatLab. В качестве тепловизора применялся тепловизор Fluke Ti32 и использовались параметры стереокамеры ZED. Натурные испытания получения соответствующих изображений проводились в зимнее и летнее время года на трассе М7, в районе развязки на Пестрецы Республики Татарстан.

Обработка интегрированных результатов показаний датчиков показала, что точность определения границы различных покрытий может

достигать от 0,05 до 0,50 м. С учетом этого в системе координат, привязанной к автомобилю, на траектории его движения имеется возможность задания соответствующего габарита для удержания автомобиля на трассе во время его перемещения по заданному маршруту.

Использование интегрированных систем круиз-контроля может обеспечить движение автомобиля в одном из режимов работы по заданному маршруту.

### **Анализ существующих систем круиз-контроля для использования в грузовом автомобиле**

На сегодняшний день фирма Daimler уже изготовила и испытала Air Pilot с элементами Smart Pilot в грузовом автомобиле.

Daimler продемонстрировала свое видение того, какими должны быть перевозки будущего, перекрыв автобан A14 под Магдебургом. Их новейшая разработка называется Future Truck 2025, и в названии использован год, когда немцы планируют запустить ее в производство. Этот грузовик внешне практически никак не отличается от современников, но он способен в беспилотном режиме ехать по шоссе на скорости до 85 км/ч.

К отечественной разработке с отдельными элементами вышеуказанных видов ИТС можно отнести беспилотный КамАЗ.

Первый беспилотный автомобиль был создан в специальном подразделении предприятия КамАЗ на базе модели 5350. Он оснащен автоматической трансмиссией, электроприводами управления рулевой тяги, тормозных систем, видеокамерами переднего, бокового и заднего обзора и 2D-лидаром, размещенным на переднем бампере автомобиля.

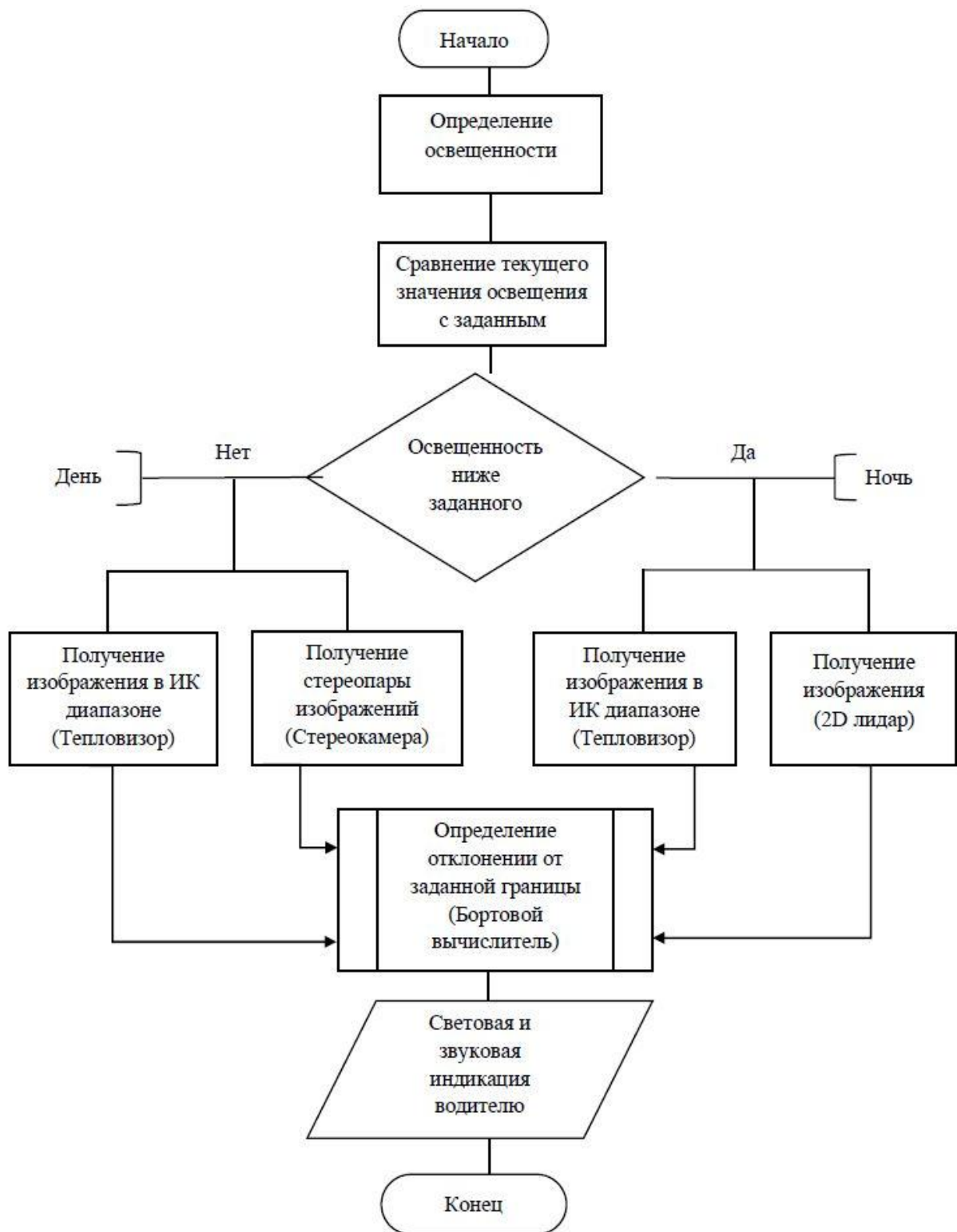


Рис. 1. Алгоритм функционирования круиз-контроля



Рис. 2. Алгоритм функционирования бортового вычислителя

## **Моделирование процессов обнаружения границы подстилающей поверхности трассы**

На основе использования операторов Собеля и Робертса в программе MatLab определяются контуры изображения для обнаружения границы между асфальтным покрытием дороги и придорожным покрытием, относительно этой границы задается габарит движения автомобиля, от точности определения границы будет зависеть и точность удержания габаритов автомобиля на заданной траектории (рис. 1, 2).

Проведенные исследования показали, что предлагаемая интегрированная система круиз-контроля на основе комплексирования оптических и тепловых систем сможет обеспечить удержание траектории движения автомобиля на крайней правой полосе дороги в сигнальном режиме работы.

Предварительная обработка интегрированных результатов показаний датчиков продемонстрировала, что точность определения границы различий покрытий может достигать от 0,05 до 0,50 м. С учетом этого в системе координат, привязанной к автомобилю, на траектории его движения имеется возможность задания соответствующего габарита для удержания автомобиля на трассе во время его перемещения по заданному маршруту.

Дальнейшее совершенствование системы адаптивного круиз-контроля позволяет реализовать движение автомобиля в автономном и полуавтономном режиме работы.

Предложенный вариант адаптивной системы круиз-контроля впервые рассматривается в разработках ИТС в Российской Федерации.

### **Источники**

1. McCormack P. LIDAR System Design for Automotive / Industrial / Military Applications. – National Semiconductor Corporation, 2006.
2. Nagappan S. Adaptive Cruise Control: Laser Diodes as an Alternative to Millimeter-Wave Radars // Ward's Auto Electronics. – 2005. – September/October.
3. [http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/sparcle/sparcle\\_tutorial\\_clr.html](http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/sparcle/sparcle_tutorial_clr.html).
4. US Patent 7,009,500. Method for operating a pre-crash sensing system in a vehicle having a countermeasure system using stereo cameras. – March 2006 (Rao, et al., Ford Global Technologies, LLC).

5. US Patent 6,831,591. Radar device for a vehicle. – Dec 2004 (Horibe, Omron Corporation).

6. US Patent 6,700,529. Radar device for automobile. – March 2004 (Matsuura, Omron Corporation).

7. US Patent 7,158,218. Vehicular radar device. – Jan 2007 (Arita, et al., Omron Corporation).

8. Певцов Е. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер / Е. Певцов, В. Чернокожин // Электронные компоненты. – 2001. – № 1/2.

9. Волков В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения / В.Г. Волков, А.В. Ковалев, В.Г. Федчишин // Специальная техника. – 2001. – № 6/7.

10. US Patent 4,740,702. Cryogenically cooled radiation detection apparatus. – April 26, 1988 (Huang, et al., Nicolet Instrument Corporation).

11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М: Техносфера, 2005 – 1007 с.

12. Кудрявцев Л.В. Краткий курс математического анализа / Л.В. Кудрявцев. – М.: Наука, 1989 – 736 с.

13. Анисимов Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений / Б.В. Анисимов. – М.: Высш. школа, 1983 – 295 с.

## **INTEGRATED SYSTEM CRUISE CONTROL THE TRUCK**

**GAYNUTDINOV F.A., DUDKA N.A.**

*Currently, the intensive development of intelligent transport systems, one of which is the development of intelligent transport vehicles (TV). they are divided into the following types: SmartPilot – "intelligent assistants" for drivers of vehicles; AirPilot – vehicles with remote control; RoboPilot – the cars moving without a driver "Intelligent assistants" can include a system of cruise control, or adaptive cruise control, which is widely used in passenger cars. The Daimler company has already manufactured and tested AirPilot with the elements of the SmartPilot in a truck. To the domestic development and certain elements of the above types of the its include an unmanned KAMAZ. In ETS KAMAZ used the camcorder front, side and rear view and a 2D lidar, placed on the front bumper of the car. Using this set of sensors limits the use of the car in night time, i.e. generally limits its effective use.*

*Keywords: intelligent vehicle is an integrated system the cruise control, the image processing algorithms.*

УДК621.03.01(075.8)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО RC-ФИЛЬТРА ВТОРОГО ПОРЯДКА

ГАТАУЛЛИН И.А., КНИТУ–КАИ, бакалавр, scainet7@mail.ru  
СМИРНОВА С.В., КНИТУ–КАИ, доцент, к.т.н., sv.smirnova@gmail.com

*Представлено схемотехническое моделирование RC-фильтра второго порядка для схемы разрабатываемого устройства, измеряющего силу удара в спортивных единоборствах.*

*Ключевые слова: активный фильтр, полоса пропускания, устройство, датчик-акселерометр.*

Задача работы состоит в том, чтобы смоделировать низкочастотный RC-фильтр для устройства, измеряющего силу удара в спортивных единоборствах. Входными параметрами для фильтра в схеме устройства являются выходные сигналы, поступающие от датчиков-акселерометров. Датчик-акселерометр является 3-осевым датчиком с аналоговым выходом, т.е. он перекрывает все трехмерное пространство. Измерительным элементом внутри датчика являются переменные конденсаторы, обкладки которых двигаются под воздействием внешней силы.

Сигналы, снимаемые с датчиков-акселерометров, – значения ускорений по трем осям  $ax$ ,  $ay$ ,  $az$ . Эти параметры, в свою очередь, фильтруются RC-цепью, т.е. на каждом канале стоит фильтр низкой частоты. Далее выходные сигналы с фильтров в виде напряжений усиливаются и преобразуются в цифровую величину аналого-цифровым преобразователем.

RC-фильтр – это электрическая цепь, которая пропускает частотный спектр ниже или выше определенной частоты (в зависимости от задачи) и подавляет, соответственно, сигнал выше или ниже этой частоты. Фильтры в зависимости от схемотехнического выполнения делятся на активные и пассивные. Активные фильтры отличаются от пассивных наличием активного элемента, например операционного усилителя. Возможно два вида включения RC-цепочки: интегрирующее и дифференцирующее (фильтр низких частот и фильтр высоких частот – рис. 1).

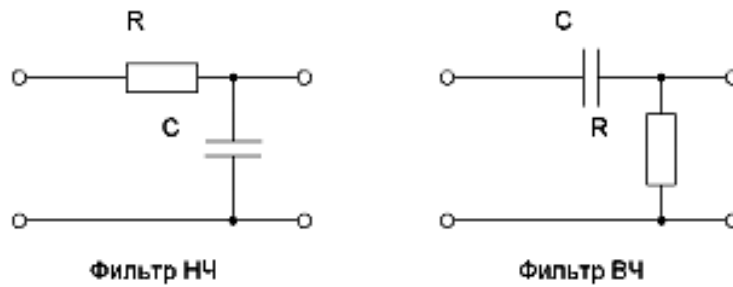


Рис. 1. Виды включения RC-цепочки

Порядок RC-фильтров определяется крутизной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), например (рис. 2): простейший RC-фильтр нижних частот первого порядка имеет АЧХ 20 дБ на декаду, два включенных друг за другом RC-фильтра образуют фильтр второго порядка с АЧХ 40 дБ на декаду и т.д.

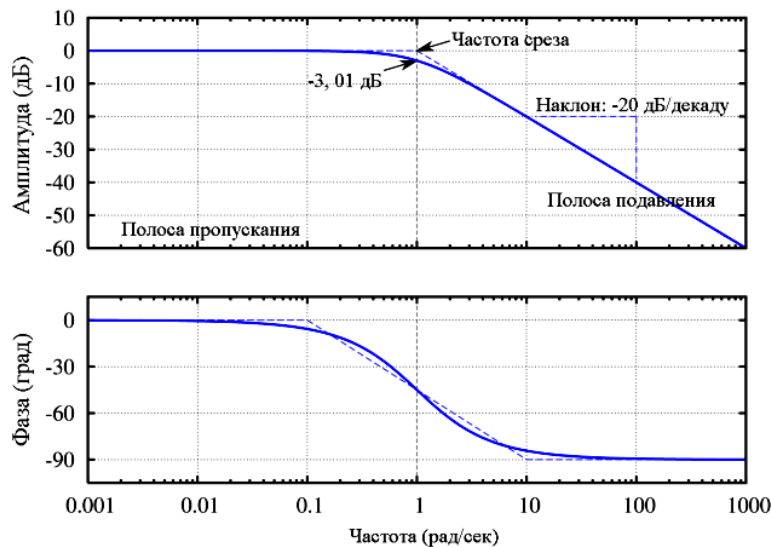


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ фильтра

Еще одной основной характеристикой фильтров является фазочастотная характеристика (ФЧХ). Фазочастотная характеристика определяется функцией  $j(\omega)$ , которая описывает изменение выходной фазы гармонического сигнала относительно ее входного значения в зависимости от изменения частоты <sup>\*</sup>.

\* Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2007. – Т. 2. – 942 с.



Схема фильтрации разработана в программе Multisim (рис. 3).

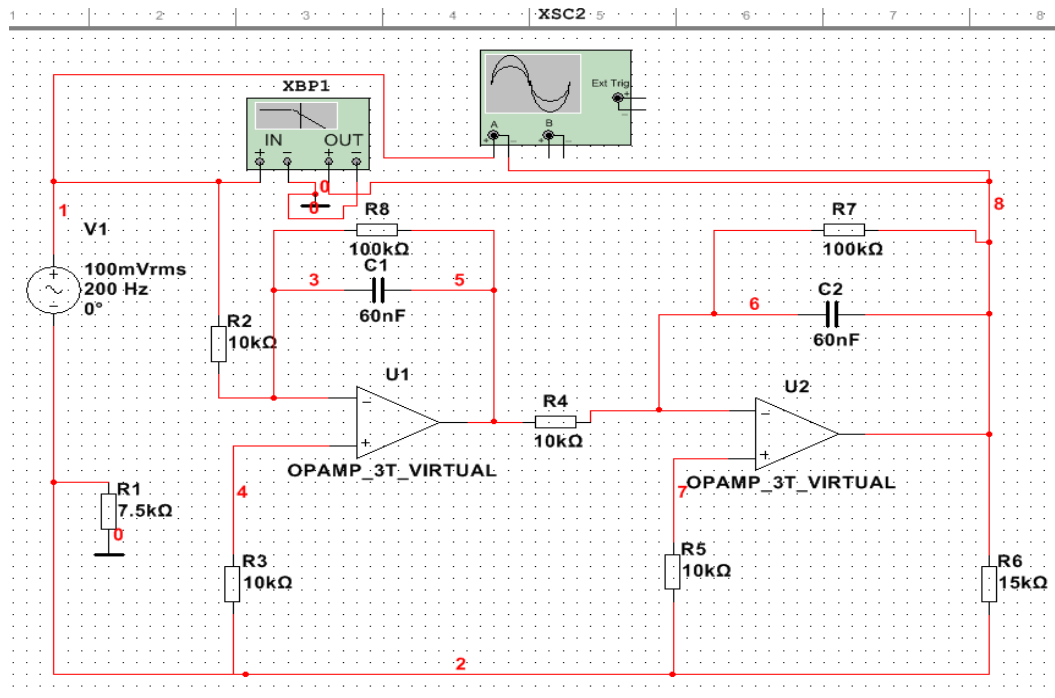


Рис. 3. Схема фильтрации

Смоделировав данную на рис. 3 схему, получили идеальную АЧХ (рис. 4), имеющую полосу пропускания от 27,2 до 3,46 кГц,  $\Delta f = 3,43$  кГц. Именно эти значения частот полезного сигнала требуется пропускать, уровень сигнала по амплитуде варьируется от 200 мВ до 5 В.

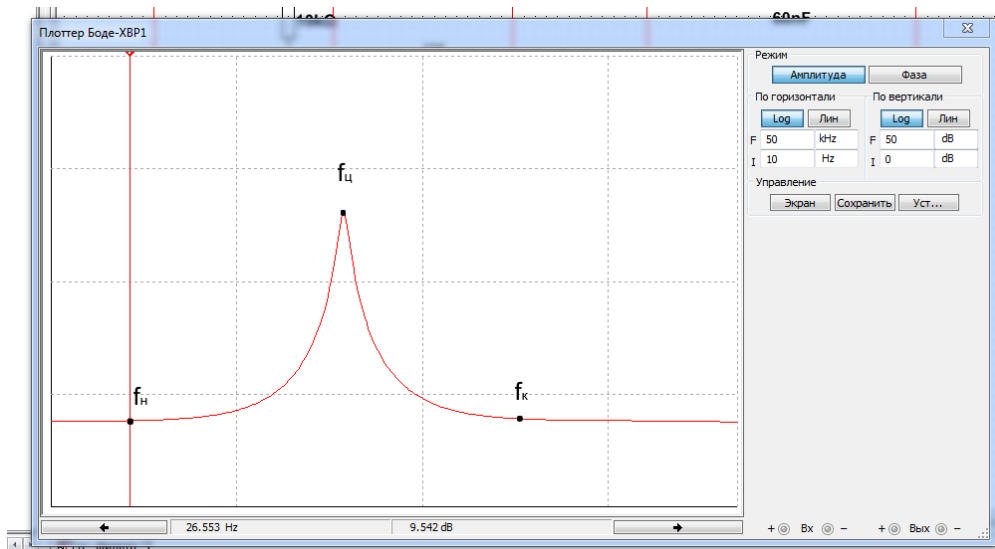


Рис. 4. АЧХ фильтра второго порядка

Заменяя виртуальные элементы на реальные и выбрав операционный усилитель (ОУ) MC1456P1, разработали модель фильтра низких частот (рис. 5, 6).

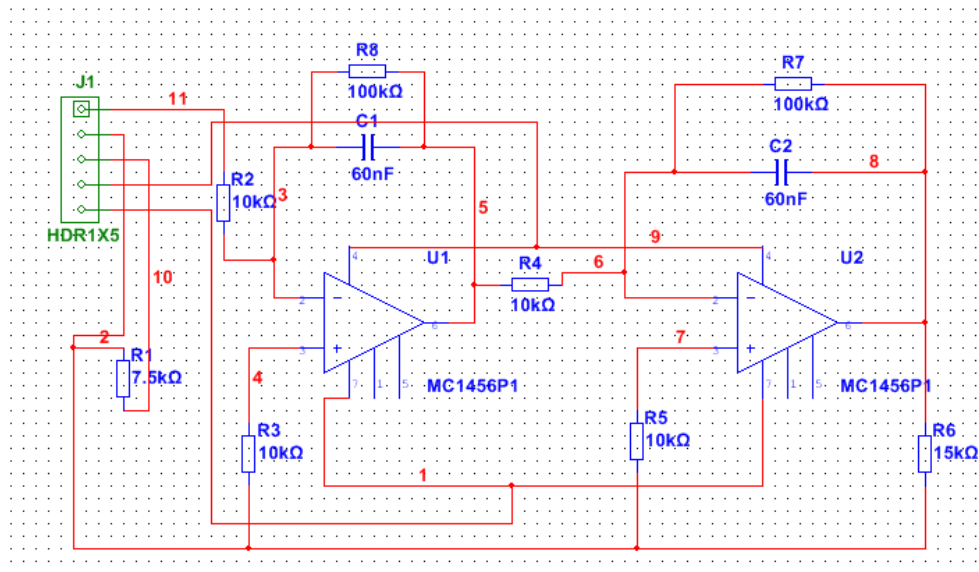


Рис. 5. Модель фильтра

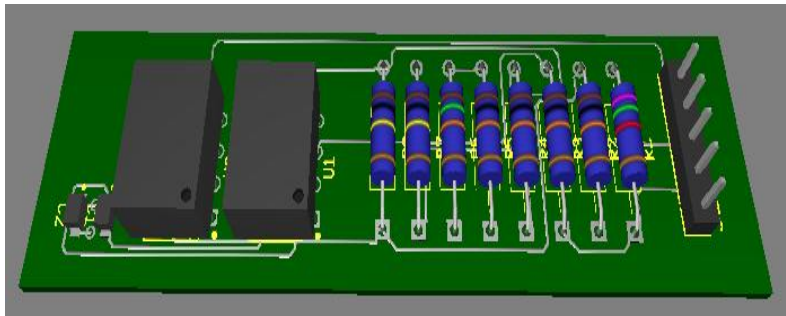


Рис. 6. Плата фильтрации

Таких плат потребуется в устройстве 9 штук. Далее требуется собрать данную схему реально, подключить реальные датчики-акселерометры, провести эксперименты.

## MODELING AND APPLICATION OF ACTIVE RC-FILTER OF THE SECOND-ORDER

GATAULLIN I.A., SMIRNOVA S.V.

*This article presents a circuit simulation RC-filter of the second order for the scheme developed device, which measures the force of impact in combat sports.*

*Keywords: active filter, bandwidth, device, sensor, accelerometer.*

УДК 621

## ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВИБРОДИАГНОСТИКА

ГИЛЬВАНОВ Д.Р., бакалавр, denisgilvanov17@gmail.com

*Рассматривается актуальная проблема разработки и усовершенствования методов и средств диагностирования технического состояния электродвигателей на основе контроля параметров рабочих режимов. Проанализированы характеристики анализатора CSI-2140 и дано экономическое обоснование проведения вибродиагностики оборудования предприятия на примере токарно-фрезерного цеха.*

*Ключевые слова: вибродиагностика, повреждения АД, требования диагностики, методы диагностики, анализатор, выбор анализатора, характеристики и преимущества анализатора CSI-2140, экономическое обоснование.*

Около 40 % электроэнергии, вырабатываемой в мире, потребляется электроприводом, основным видом которого является асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Такая широта распространения объясняется простотой производства и эксплуатации, а также следующим рядом преимуществ:

- приблизительно постоянной скоростью при разных нагрузках;
- возможностью кратковременных механических перегрузок;
- простотой конструкции;
- простотой пуска и легкостью его автоматизации.

Однако главной проблемой использования АД является их высокая повреждаемость, которая, согласно статистике, распределяется следующим образом:

- повреждения элементов статора – 38 %;
- повреждения элементов ротора – 10 %;
- повреждения элементов подшипников – 40 %;
- другие повреждения – 12 %.

Внезапный выход из строя двигателя может привести к авариям и длительным простоям производства, что в свою очередь приводит к прямым финансовым потерям, которые вызваны нарушением технологического процесса и затратами на восстановление и ремонт

электродвигателя. В связи с этим вопрос диагностики АД весьма актуален. Процесс автоматизации управления технологическими процессами путем использования диагностики технического состояния оборудования в рабочих режимах позволяет свести к минимуму ущерб от этих последствий за счет выявления дефектов на ранней стадии развития.

В настоящее время особое внимание начали уделять контролю оборудования по состоянию, а не по системе планово-предупредительных ремонтов. Это стало возможным благодаря использованию методов и средств контроля и анализа текущего технического состояния. Преимущество данного подхода заключается в том, что ремонт производится только для того оборудования, которому он необходим, оценка состояния производится в процессе эксплуатации, без каких-либо разборок и ревизий, на базе контроля и анализа соответствующих параметров. Также этот подход является источником существенного повышения конкурентоспособности, рентабельности и прибыльности предприятия. Этому способствует развитие микропроцессорной и компьютерной техники. Затраты на техническое обслуживание электродвигателей снижаются на 50–75 % по сравнению с обслуживанием по системе планово-предупредительных ремонтов.

Для введения технологии обслуживания по состоянию необходима полная диагностика объекта, причем желательно выявлять все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа, чтобы подготовиться к ремонту.

Таким образом, из всего вышперечисленного видна актуальность проблемы разработки и усовершенствования методов и средств диагностирования технического состояния электродвигателей на основе контроля параметров рабочих режимов.

Обзор существующих методов технической диагностики электродвигателей показал, что в настоящее время отсутствует единая концепция диагностирования и контроль технического состояния в основном осуществляется во время проведения плановых ремонтов, что не позволяет обнаружить дефекты в начальной стадии развития и предотвратить значительное повреждение электродвигателей или же их полный выход из строя. Но более эффективным и удобным в эксплуатации является диагностирование в рабочем режиме, то есть без отключения электрооборудования. К этому методу диагностирования и необходимо переходить для повышения ресурса и надежности электрооборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями.

## Существующие методы и средства технической диагностики электродвигателей

В настоящее время двигатели переменного тока пользуются большим спросом среди большинства современных производственных предприятий. Российский и зарубежный опыт показывает, что они используют 80 % всей вырабатываемой в стране электроэнергии, поэтому стабильность их работы играет большую роль в крупной промышленности. Периодическая диагностика состояния оборудования помогает своевременно выявить возникающие неисправности.

АД на практике показывают свою выносливость и простоту по относительно низкой стоимости. Однако в процессе эксплуатации могут возникать повреждения элементов двигателя, что приводит к преждевременному выходу его из строя.

Основными источниками развития повреждений АД являются:

- перегрузка или перегрев статора электродвигателя – 31 %;
- межвитковое замыкание – 15 %;
- повреждения подшипников – 12 %;
- повреждение обмоток статора или изоляции – 11 %;
- неравномерный воздушный зазор между статором и ротором – 9 %;
- работа электродвигателя на двух фазах – 8 %;
- обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке – 5 %;
- ослабление крепления обмоток статора – 4 %;
- дисбаланс ротора электродвигателя – 3 %;
- несоосность валов – 2 %.

Идеальный современный способ диагностирования электродвигателей должен отвечать следующим требованиям:

- высокая достоверность и точность выявления неисправностей и повреждений электродвигателя;
- возможность обнаружения всех или значительной части электрических и механических повреждений электродвигателя и связанных с ним механических устройств;
- проведение диагностических измерений дистанционно, что актуально в тех случаях, когда доступ к оборудованию затруднен;
- низкая трудоемкость диагностических работ (измерений) и простота проведения измерений;
- возможность проведения аналитической обработки полученных результатов измерений за короткое время, с применением вычислительных и программных средств.

Самым распространенным методом диагностики электродвигателей в настоящее время является вибродиагностика, основанная на измерении и анализе вибраций корпуса двигателя. Комплекс параметров вибрации практически полностью характеризует техническое состояние работающего агрегата и позволяет прогнозировать возникновение неисправностей и аварий АД и электромеханического оборудования.

## 2. Классификация объектов контроля и методов вибродиагностики

Объект контроля	Современные методы диагностики	Основные диагностические признаки
Элементы конструкции: стержни, балки, диски и т.д. демпфирующие элементы, пружины и т.д.	Простукивание; динамическое нагружение	Изменение собственных частот $\Delta\omega_0$ ; добротности $Q$ ; декремента колебаний $\delta$
	Возбуждение нелинейных колебаний	Изменение жесткости $\Delta C$ ; декремента колебаний $\delta$ ; интенсивности силы $\sigma$ сухого трения
Многослойные конструкции, обшивки и т.д.	Локальные свободные колебания	Изменение собственных частот $\Delta\omega_0$ ; импеданса $\Delta Z$
Корпус работающего механизма, трубопроводы, двигатели внутреннего сгорания	Анализ сигнатуры колебаний Сличение спектров Компарирование	Превышение шума над пороговым уровнем $\Delta S = S_c - S_{ст}$ $\Delta A = A_c - A_{порог}$
	Выделение корреляционных функций	Изменение корреляционных и передаточных параметров
Механизм роторного действия, зубчатые передачи и т.д.	Спектральный анализ	Изменение спектральных составляющих сигнала $\Delta S_n$ ; появление комбинационных частот $\Delta\omega = n\omega_0 \pm m\omega_b$
	Кепстральный анализ	Изменение временных характеристик кепстра $\Delta t$
Объект сложной конструкции, летательные аппараты	Экстремальная фильтрация; динамическое нагружение	Изменение амплитуд $\Delta A$ и форм колебаний $\Delta A_n$ ; собственных частот $\Delta\omega_0$ ; подвижности $Y$ ; добротности резонанса $Q_p$
<p>Примечание. <math>S_c, S_{ст}</math> – спектры исследуемого и эталонного сигналов соответственно; <math>A_c, A_{порог}</math> – уровни исследуемого и допустимого сигналов; <math>\omega_b</math> – циклическая частота возбуждения.</p>		

Наиболее распространенными группами методов вибродиагностики АД являются:

- диагностика АД по среднеквадратичному значению вибросигнала;
- вибродиагностика АД с помощью фазовых портретов (траекторий колебаний);
- спектральный анализ;
- спектральный анализ огибающей;
- кепстральный анализ;
- ультразвуковая дефектоскопия и акустическая диагностика;
- специальные диагностические параметры;
- вейвлет-анализ;
- статистические методы обработки сигналов вибрации;
- диагностика на основе нейронных сетей (таблица).

Сложность задач вибрационной диагностики состоит, во-первых, в выборе контролируемых параметров, отвечающих за текущее и прогнозируемое состояние оборудования и его отдельных узлов, а во-вторых – в определении зон допустимых изменений этих параметров при разном состоянии оборудования. Для оборудования введены допуски на вибрацию, контроль которой входит в регламент технического обслуживания.

Сложности такой контроль не представляет и выполняется либо периодически, либо постоянно, с помощью стационарных систем вибрационного контроля. Допуски на вибрацию вращающегося оборудования не зависят от частоты его вращения. В то же время его вибрация даже при отсутствии дефектов растет в простейшем случае квадратично с ростом частоты вращения. Поэтому связать пороги допустимой вибрации высокооборотного оборудования с его техническим состоянием практически невозможно. Вибрация может превысить их и при бездефектном состоянии оборудования или не выйти из допуска в предаварийном состоянии. Для того чтобы связать вибрационное и техническое состояние оборудования, необходимы более сложные, чем для вибрационного контроля, технические средства, специалисты и накопленные статистические данные (для определения порогов дефектов). В частности, приходится особое внимание уделять таким свойствам вибрации, а точнее колебательных сил, как их модуляция во времени. Можно обойтись и без специалистов, и без накопления статистических данных, а использовать адаптированные к определенным видам оборудования автоматизированные системы вибрационной диагностики. Тогда у производителей систем диагностики должны быть базы данных по диагностике идентичного оборудования или технические решения, позволяющие автоматически устанавливать и корректировать пороги дефектов по мере накопления собственной базы данных

заказчиком. Похожая ситуация имеет место и при контроле тока электродвигателя и температуры отдельных узлов оборудования.

Из сказанного следует, что задачу оптимизации контролируемых параметров лучше проводить в соответствии с рекомендациями разработчиков международных стандартов ISO, но с учетом специфического состояния эксплуатируемого российскими предприятиями оборудования и качества подготовки обслуживающего оборудование персонала.

### Выбор анализатора

Всем известно, что сбор и анализ данных вибрации играет важную роль для профилактического техобслуживания и программы обеспечения надежности. Анализатор CSI-2140 производства компании Emerson выводит измерение вибрации на новый уровень, позволяя одновременно по четырем каналам собирать данные о вибрации и фазе колебаний, а также использовать уникальные возможности определения пиковых значений для своевременного выявления износа подшипников и редукторов.

В основу модели CSI-2140, разработанной для решения самых сложных эксплуатационных задач, лег опыт наших пользователей, таких же, как и вы. В дополнение к самой высокой скорости сбора данных на рынке, эргономичная конструкция анализаторов CSI-2140 предназначена для комфортного управления одной рукой и в течение всего дня.

### Характеристика анализатора CSI-2140

Диагностика подшипников, насосов, электродвигателей, редукторов и другого динамического оборудования теперь стала еще проще и эффективнее с помощью нового виброанализатора CSI-2140 и пакета программ VibView, MotorView и технологии PeakVue (рисунок).

Состояние	Остаток ресурса подшипника	Вибрация (мм/с)	PeakVue (g)
0	20-100%	3,75	0
1	<20%	3,75	4
2	<10%	5,10	8
3	<5%	6,25	12
4	<1%	11,25	25
Поломка	0	>7,5	>40

Зависимость вибрации от состояния электродвигателя



## **Уникальные возможности анализатора CSI-2140**

1. Легкий и простой сбор данных, а также расширенный анализ вибрации в одной системе.
2. Быстрый сбор данных за счет 4 каналов и встроенного пакета для диагностики подшипников, электродвигателей, насосов и редукторов.
3. Экспертная вибродиагностика, встроенная в анализатор, позволяет на месте определить дефекты.
4. Искробезопасное и эргономичное исполнение анализатора с тактильным ярким цветным дисплеем.
5. Беспроводной обмен измеренных данных с программой VibView.

## **Преимущества анализатора CSI-2140**

Диагностику подшипников, насосов, редукторов, электродвигателей и прочего оборудования возможно выполнять и одноканальными системами, но именно 4-канальный анализатор CSI-2140 позволяет перейти на проактивную форму технического обслуживания и добиться минимального количества незапланированных аварийных остановов. Виброанализаторы CSI-2140 на 30 % быстрее осуществляют сбор данных по сравнению с анализаторами CSI предыдущего поколения. Четыре канала вибрации и один канал тахометрический позволяют произвести еще быстрее сбор необходимых данных при диагностике. Например, вы можете одновременно (параллельно) получить орбиты вращения вала в обеих опорах машины с подшипниками скольжения. Два канала задействованы на одну опору, а два других – на вторую опору. Вы можете обвязать четырьмя каналами машину в режиме «разгон» или «выбег».

Сбор данных по 4 каналам обеспечивает большие возможности для диагностики. С использованием дополнительных возможностей расширенной диагностики и более глубоких диагностических тестов можно получить дополнительные данные и диагностические инструменты, позволяющие выявлять коренные причины самых сложных проблем с оборудованием.

## **Экономическое обоснование проведения вибродиагностики**

Расчет экономической эффективности закупки и проведения вибродиагностики на предприятии. Для примера возьмем средний токарно-фрезерный цех:

- количество электроприемников  $n_{\text{э}}$ : 56 шт.;
- стоимость анализатора  $C_{\text{а}}$ : 1 500 000 руб.;
- средний период капитального ремонта электродвигателей  $t_{\text{ср}}$ : 1 год;
- средняя стоимость капитального ремонта электродвигателя  $C_{\text{к}}$ : 15 000 руб.;
- средняя стоимость технического ремонта  $C_{\text{т}}$ : 5 000 руб.;
- затраты на обслуживание без виброанализатора за год  $Z_1$ :

$$n_{\text{э}} \cdot C_{\text{к}} = 56 \cdot 15\,000 = 840\,000 \text{ руб.};$$

- затраты на обслуживание с внедрением виброанализатора за год  $Z_2$ :

$$n_{\text{э}} \cdot C_{\text{т}} + C_{\text{а}} = 56 \cdot 5\,000 + 1\,500\,000 = 280\,000 + 1\,500\,000 = 1\,780\,000;$$

- средняя окупаемость виброанализатора  $Z_2/Z_1$ :

$$1\,780\,000/840\,000 = 2,12 \text{ года.}$$

При использовании данного виброанализатора затраты на техническую эксплуатацию окупаются в течение 2,12 года за счет значительного снижения расходов на ремонт электрооборудования за год использования.

### Источники

1. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vibrocenter.ru/book2012.htm>, свободный.

2. Лукьянов А.В. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс] / А.В. Лукьянов, Ю.С. Мухачев, И.О. Бельский. – Режим доступа: [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/number\\_22/61-69.pdf](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number_22/61-69.pdf), свободный.

3. Васьковский Ю.Н. Диагностика комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя индукционным методом [Электронный ресурс] / Ю.Н. Васьковский, М.А. Коваленко. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-kombinirovannyh-defektov-rotora-asinhronnogo-dvigatelya-induktsionnym-metodom>, свободный.

УДК 004.9

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ СТЕНД**

ГИМАЗЕТДИНОВ А.А., КГЭУ, студент, Da\_aidar@mail.ru

ИМАМИЕВ А.Р., КГЭУ, студент, Airat-imamiev@yandex.ru

ШАКИРОВ А.Р., КГЭУ, студент, a.d.r.729@mail.ru

ШАРАФУТДИНОВА Г.Р., КГЭУ, студент 89870602664@mail.ru

*Представлен автоматизированный информационный стенд – демонстра-ционный стенд, разрабатываемый на базе мультимедийного информационного оборудования, который предполагается использовать в рекламных целях, с применением датчиков для улучшения предоставляемого контента.*

*Ключевые слова: информационный стенд, мультимедийное оборудование, платы сбора и обработки данных, проекционный материал, многофакторный анализ, одноплатный ПК.*

Данный стенд предполагается использовать в информационно-рекламных целях (преимущественно в магазинах и торговых центрах). Также этот стенд возможно использовать при масштабных презентациях на выставке (может служить как простой информационный стенд или использоваться для завлечения новых посетителей), при оформлении музейных экспозиций и т.д.

Аналогом является «Интерактивный промоутер» (патент РФ № 108190 U1, МПК G09F13/00, 10.09.2011). Прототип – «Виртуальный промоутер» (патент РФ № 108193 U1, МПК G09F19/00, 21.03.2011).

Прототип имеет несколько серьезных недостатков при использовании в информационно-рекламных целях. Главный недостаток – это ограниченный функционал, не позволяющий выполнять многофакторный анализ окружающей обстановки и на основе проведенного анализа управлять сменой контента (для анализа окружающей обстановки могут использоваться такие факторы, как наличие людей, с какой стороны они подходят, информация о наличии товара или услуги, предоставляемой компанией).

Вторым недостатком является наличие источника цифрового сигнала, в качестве которого используют ПК, неттоп, ноутбук, dvd-плеер, медиаплеер, являющиеся дорогостоящим и габаритным оборудованием. Этот недостаток будет решаться за счет использования одноплатного ПК, что удешевит проект и поможет уменьшить габариты проектора.

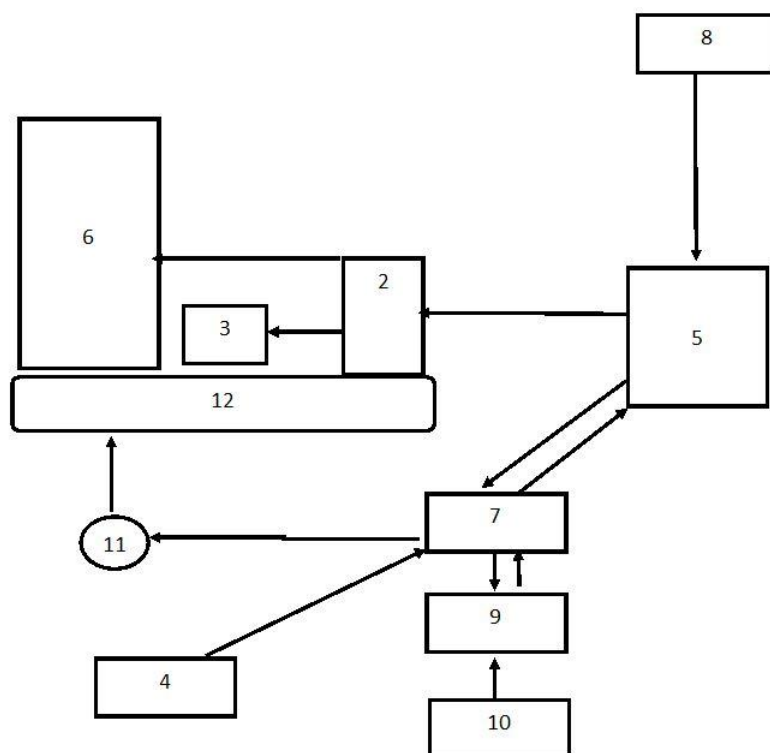
Еще одним недостатком является использование прототипом проекционной пленки, что представляется нерациональным по следующим причинам:

- дороговизна пленки;
- нерациональный расход: пленка продается прямоугольной формы, и после вырезания из нее нужной фигуры остаются лишние куски, которые нигде невозможно применить;
- при небольших повреждениях приходится переклеивать всю пленку (в нашем проекте возможно закрасить поврежденный участок с минимальным использованием проекционной краски без потери качества изображения).

В представленном проекте данные характеристики достигаются использованием в стенде следующего оборудования:

- платы сбора и обработки данных;
  - платы удаленного доступа;
  - платы распознавания звука и микрофона;
  - двигателя с платформой, на которой установлены экран, проектор и звуковоспроизводящая аппаратура,
- а также заменой проекционной пленки проекционной краской.

Принципиальная блок-схема предлагаемого автоматизированного информационного стенда приведена на рисунке.



Блок-схема автоматизированного информационного стенда: 1 – экран; 2 – проектор; 3 – звуковоспроизводящая аппаратура; 4 – блок датчиков; 5 – блок управления (одноплатный компьютер); 6 – проекционный материал; 7 – плата сбора и обработки данных; 8 – плата удаленного доступа; 9 – плата распознавания звука; 10 – микрофон; 11 – двигатель; 12 – платформа

Рассмотрим работу автоматизированного информационного стенда на примере использования в конференции.

Представим, что стенд стоит на входе и выходе помещения, где проходит конференция. Он сможет информировать посетителей о погодных условиях или условиях в помещении, где проводится конференция, предоставлять информацию посетителям об их посадочных местах, о расписании конференции, расположении объектов на конференции и т.д. Стенд имеет блок датчиков 4 (ими могут быть датчик температуры, датчик влажности, датчик движения, датчик штрих-кодов, напечатанных на входных билетах, и другие датчики по желанию заказчика стенда), подключенный к плате 7, которая производит сбор и обработку данных, после чего выдает управляющий сигнал на блок 5 в зависимости от анализа данных, поступивших с блока датчиков 4, а также с данных платы распознавания звука 9, который подключен к микрофону 10. В зависимости от показаний датчиков, стенд также управляет положением двигателя 11, который механически связан с платформой 12 с закрепленными на ней проектором, звуковоспроизводящим оборудованием 3 и экраном 1, на который нанесен проекционный материал 6. Блок 5 управления формирует сигнал (фото, видео, со звуком и без звука) и посылает его на проектор 2 в зависимости от управляющего воздействия платы 7 сбора и обработки данных или платы 8 удаленного доступа. Если в зоне присутствия датчиков 4 нет движения, на экран 1 с помощью проектора 2 проецируется статическое изображение виртуального гида.

В случае наличия движения срабатывает датчик движения из блока 4, который определяет присутствие человека, плата 7 подает сигнал в двигатель 11 для перемещения платформы 12, которая поворачивает экран с динамическим изображением виртуального гида в сторону человека. В это же время плата 7 формирует сигнал на блок управления 5, в котором выбирается контент (видео-ролик со звуковым сопровождением). Плата 9 оцифровывает звук, получаемый через микрофон 10, анализирует речь и, если находит совпадение со словами, имеющимися в своей базе (например, температура, погода, время, счет и др.), формирует сигнал для платы 7, а та, в свою очередь, формирует сигнал для блока 5 управления. Блок 5 управления дополняет контент звуковым сопровождением, отвечающим на запрос посетителя (например, об окружающей температуре). После окончания воздействия на датчики блока 4 блок управления 5 вновь формирует статичное изображение

виртуального гида. С помощью платы 8 удаленного доступа можно также управлять всеми процессами автоматизированного информационного стенда.

Перспективы внедрения достаточно высоки. Во-первых, стенд является универсальным, что позволяет найти ему широкий спектр применения. Во-вторых, предлагаемый проект выведет рекламные стенды на новый уровень взаимодействия с посетителем. В-третьих, повысится зрелищность мероприятий.

### **AUTOMATED INFORMATION BOOTH**

**GIMAZETDINOV A.A., IMAMIEV A.R., SHAKIROV A.R.,  
SHARAFUTDINOVA G.R.**

*Automated information stand is a display stand, designed on the basis of the multimedia information equipment to be used for promotional purposes, using sensors to improve the provided content.*

*Keywords: bulletin board, multimedia equipment, board data collection and processing, projection material, multivariate analysis, single-board PC.*

УДК 621.313.333.2

### **ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ УЭЦН**

**ГЛАЗЫРИН А., ТПУ, к.т.н., доцент, asglazyrin@tpu.ru  
СЛЕПНЕВ И.Г., ТПУ, магистрант, slepnev.i@mail.ru**

*Рассмотрены актуальность и основные вопросы построения бездатчиковых систем управления установками электроцентробежных насосов для механизированной добычи нефти. Предложена и детально описана структура векторной системы управления погружным электродвигателем с наблюдателем состояния.*

*Ключевые слова: ПЭД, УЭЦН, бездатчиковый асинхронный электропривод, наблюдатель состояния, ресурсосберегающая эксплуатация, энергооптимальные режимы.*

## Обоснование актуальности разработки систем «бездатчикового» управления микропроцессорных асинхронных электроприводов установок электроцентробежных насосов

В настоящее время Российская Федерация является одним из мировых лидеров по нефтедобыче. При этом эксплуатация добывающих скважин происходит в осложненных условиях, к основным из которых следует отнести [1]:

- высокую обводненность продукции скважин в результате интенсивной эксплуатации;
- высокий процент малодебетных скважин;
- повышенное содержание парафинов и асфальтенов;
- наличие механических примесей;
- наличие сероводорода, вызывающего коррозию погружного оборудования;
- наличие в ряде случаев существенной кривизны ствола скважины.

Вышеприведенные факторы привели к тому, что в настоящее время наиболее распространенным способом механизированной добычи нефти является подход (рис. 1), основанный на применении установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [2].

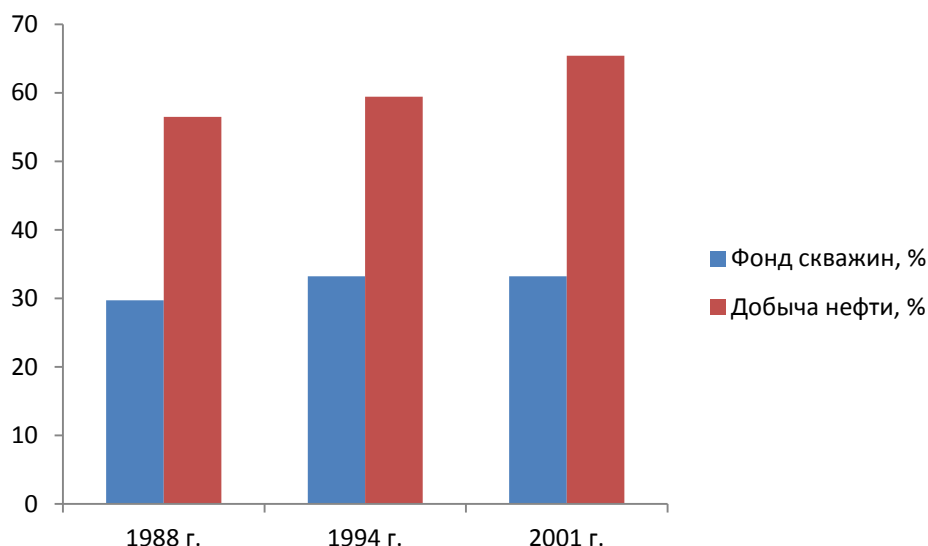


Рис. 1. Рост удельного содержания УЭЦН в фонде скважин и рост удельной добычи нефти на основе УЭЦН за период с 1988 по 2001 гг.

В состав УЭЦН входит как погружное, так и наземное оборудование, в том числе: центробежный насос (ЦН), погружной электродвигатель (ПЭД), кабельная линия, колонны насосно-компрессорных труб (НКТ),

оборудование устья скважины, станция управления, выходной фильтр, повышающий трансформатор.

Для повышения экономической эффективности функционирования нефтедобывающих скважин одной из главных целей управления должна являться ресурсосберегающая эксплуатация УЭЦН и, прежде всего, ПЭД [3–5].

Согласно исследованиям проф. В.А. Ведерникова из Тюменского государственного нефтегазового университета, одним из основных факторов, положительно влияющих на сохранение ресурса как самого ПЭД, так и его наиболее уязвимых элементов, таких как изоляция статорных обмоток, является поддержание постоянства магнитной нагрузки ПЭД [4].

Полеориентированный (векторный) способ управления асинхронным электроприводом позволяет как обеспечить постоянство магнитной нагрузки ПЭД, так и реализовать энергооптимальные режимы управления [6, 7].

Для реализации векторного способа управления ПЭД требуется либо непосредственно измерять компоненты вектора потокосцепления ротора, что нецелесообразно, либо, что более предпочтительно, косвенно программно оценивать магнитное состояние ротора на основе анализа мгновенных значений проекций векторов токов и напряжений статора и цифровой настраиваемой модели ПЭД. Второй подход в настоящее время в мире получил обозначение *Sensorless Induction Motor Drive*, или, по-русски, «бездатчиковый асинхронный электропривод» (БАЭП) [8, 9].

### **Критический анализ БАЭП ведущих мировых производителей**

В рамках реализации официально утвержденного [10] плана мероприятий по импортозамещению в отрасли нефтегазового машиностроения Российской Федерации отечественные производители УЭЦН имеют возможность использовать широкий спектр отечественных комплектующих, таких как погружные ЦН, ПЭД, кабельные линии, силовые электронные компоненты, цифровые сигнальные процессоры серии *Motor Control*, например *K1921BK01T*.

Ведущие мировые производители асинхронных электроприводов, ориентирующиеся на широкий спектр потребителей, интегрируют метод вычисления искомых переменных на уровень системы управления. При этом базовое программное обеспечение систем управления выполнено в варианте, недоступном для трансформации конечными потребителями



или другими фирмами, т.е., по сути, является «закрытым». С точки зрения «выживаемости» в условиях современного рынка данная ситуация выглядит очевидной, но с точки зрения совершенствования электроприводов вне фирм производителей – практически не решаемой [11].

Выполним критический анализ перспективности использования БАЭП ведущих мировых производителей, реализованных в серийных изделиях в качестве прототипов для изготовления отечественных аналогов в сфере нефтегазового машиностроения (таблица).

#### Критический анализ БАЭП ведущих мировых производителей

Производитель / тип БАЭП	Критические замечания по всем рассмотренным типам БАЭП
Mitsubishi / FR-D700	1. Программное обеспечение систем управления является закрытым для конечного производителя, представляет собой know-how фирм-производителей
Omron / Varispeed F7	2. Преимущественно при идентификации используются классические методы холостого хода и короткого замыкания
Siemens / Simovert	3. Идентификация параметров осуществляется с использованием методов активного эксперимента
Delta Electronics / VFD-B	4. В БАЭП Mitsubishi / FR-D700 заявлена коррекция изменяющихся в процессе работы параметров
Control Techniques / Unidrive SP	5. Структурные схемы, схемы замещения и базовые математические модели не приводятся даже в подробной технической документации на БАЭП
Danfoss / VLT Automation Drive	6. Особенности алгоритмов идентификации, математические методы и идентификационные модели не доводятся до конечного пользователя
Danfoss / FC300	7. Для всех преобразователей режим идентификации параметров реализуется специальным программным модулем, иницируемым, как правило, при вводе БАЭП в эксплуатацию
KEB / Combivert	8. Исходными данными для параметрической идентификации в большинстве случаев являются паспортные данные АД

Большинство производителей вообще не заявляет в технической документации такие важные параметры, как полоса пропускания

и диапазон регулирования скорости. В таких случаях для получения достоверной и подробной информации необходимо провести стендовые испытания. Нередко при проведении испытаний заявленные параметры оказываются завышенными, что со стороны фирмы-производителя оправдано условиями рынка. Основываясь на вышеизложенных данных и в рамках плана мероприятий по импортозамещению, можно сказать, что разработка отечественного, надежного и доступного для пользователя наблюдателя состояния для УЭЦН является своевременной и актуальной.

### **Подход к построению микропроцессорных асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния для УЭЦН**

Одним из самых распространенных и эффективных способов управления ПЭД является векторный с ориентацией по полю ротора [12–13]. Подобная система позволяет организовать двухканальное управление асинхронным двигателем, являющимся сложным нелинейным динамическим объектом. Одновременно с простотой структуры векторное управление позволяет получить высокие показатели качества работы электропривода, как в статике, так и в динамике, по сравнению со скалярным способом управления асинхронным электроприводом по схеме ПЧ–АД. Исследованию систем бездатчиковых асинхронных электроприводов посвящены работы отечественных и зарубежных ученых [14–15]. Векторная система управления АД с наблюдателем состояния без использования алгоритмов идентификации параметров представлена на рис. 2 [16].

В представленной структуре двигатель  $M$  управляется посредством двухзвенного преобразователя частоты, состоящего из выпрямителя трехфазного сетевого напряжения и инвертора, созданного на базе полностью управляемых силовых ключей – транзисторов. Регулирование открытия и закрытия ключей производится через блок драйверов четырехконтурной векторной системой управления, включающей в себя два внешних контура регулирования – потокосцепления и угловой частоты вращения ротора двигателя – и два внутренних контура проекций вектора тока статора на оси двухфазной системы координат.

В качестве обратных связей для внешних контуров используются выходные сигналы  $\hat{\omega}$  и  $\hat{\psi}_r$  наблюдателя состояния, который также рассчитывает угол поворота вектора потокосцепления ротора  $\hat{\theta}_{\psi_r}$ , необходимый для работы преобразователей координат (ПК).

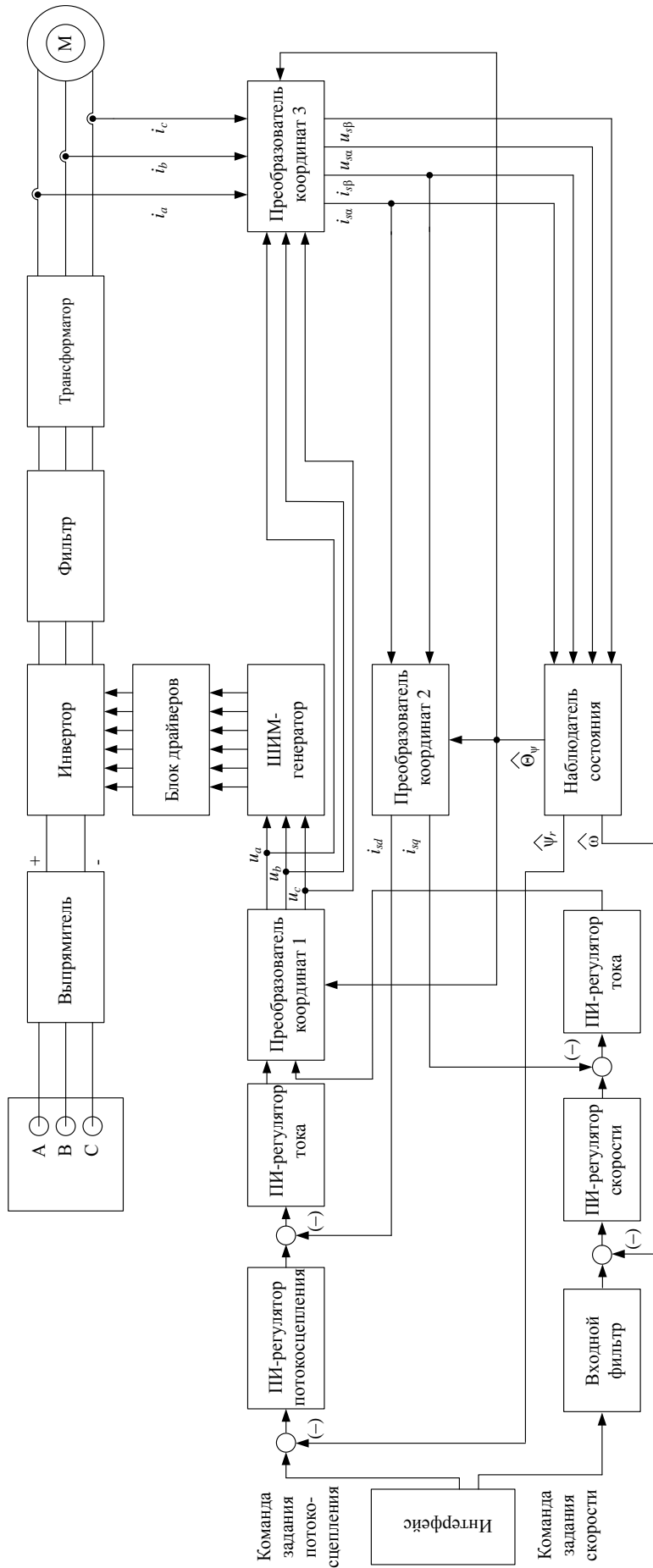


Рис. 2. Структура векторной системы управления ПЭД с наблюдателем состояния

ПК осуществляют переход из естественной системы координат  $A-B-C$  в двухфазную неподвижную  $\alpha-\beta$  (ПК-3), в двухфазную вращающуюся  $d-q$  (ПК-2), в которой функционируют регуляторы, а также из вращающейся в естественную (ПК-1).

Бездатчиковая система управления предполагает измерение статорных токов  $i_a, i_b, i_c$  двигателя, а также расчет напряжений  $u_a, u_b, u_c$  на основании информации о выходных сигналах  $u_{sd}$  и  $u_{sq}$  регуляторов проекций тока статора.

Для расчета переменных состояния двигателя наблюдатель использует математическую модель двигателя в двухфазной неподвижной системе координат, поэтому входными переменными для идентификатора являются статорные напряжения  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  и токи  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  двигателя.

Таким образом, показано, что электроприводный способ механизированной добычи нефти в России не только является преобладающим в настоящее время, но и останется таким в ближайшем будущем.

Выявлено, что бездатчиковое полеориентированное (векторное) управление ПЭД является наиболее предпочтительным для обеспечения ресурсосберегающей эксплуатации УЭЦН.

Разработка отечественного, надежного и доступного для пользователя наблюдателя состояния для УЭЦН является своевременной и актуальной.

Предложена и подробно описана структура векторной системы управления ПЭД с наблюдателем состояния.

### Источники

1. Нагиев А.Т.О. Разработка и исследование технологии добычи нефти при применении интенсивных методов воздействия на пласт: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Т.О. Нагиев. – Тюмень, 2006. – 24 с.

2. Ивановский В.Н. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский [и др.]. – М: Нефть и газ, 2002. – 824 с.

3. Сушков В.В. Разработка системы технических обслуживаний и ремонтов электрооборудования нефтегазодобывающих предприятий Западной Сибири по фактическому состоянию: дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Сушков. – Омск, 2000. – 418 с.

4. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Ведерников. – Тюмень, 2006. – 276 с.

5. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Сипайлов. – Томск, 2009. – 196 с.

6. Зюзев А.М. Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Зюзев. – Екатеринбург, 2004. – 347 с.

7. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук / В.Н. Поляков. – Екатеринбург, 2009. – 510 с.

8. Bose V.K. Modern power electronics and AC drives / V.K. Bose. – Prentice-Hall Inc., 2002. – 711 p.

9. Ланграф С.В. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 61–64.

10. Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли нефтегазового машиностроения Российской Федерации: Приказ Министра промышленности и торговли РФ № 645 от 31 марта 2015 года [Электрон. ресурс]. – Доступен на сайте Министерства промышленности и торговли РФ.

11. Андреев М.А. Параметрическая идентификация асинхронного электропривода в режиме реального времени: дис. ... канд. техн. наук / М.А. Андреев. – Вологда, 2010. – 138 с.

12. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО ИГЭУ, 2008. – 298 с.

13. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

14. Kubota H. DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor / H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1993. – Vol. 29(2). – pp. 344 – 348.

15. Виноградов А.Б. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, С.В. Журавлев // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 46–52.

16. Пат. № 2438229 РФ, МПК H02P 21/13 (2006.01), H02P 27/08 (2006.01). Устройство управления асинхронным двигателем / Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, А.С. Глазырин, С.В. Ланграф, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев. – № 2010131978; опубл. 27.12.2011, бюл. № 36. – 6 с.

## DEVELOPMENT METOD OF MOCROPROCESSOR-BASED SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVE FOR ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP

GLAZYRIN A.S., SLEPNEV I.G.

*Discussed actual and the main issues of building sensorless control system of electrical submersible pumps for artificial lift oil. Proposed and described in detail the structure of the field-oriented submersible induction motor control system with a state observer.*

*Keywords: submersible induction motor, electrical submersible pump, sensorless induction motor drive, state observer, resource-saving exploitation, energy optimal regimes.*

УДК 621.314

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ГРАЧЕВА Е.И., КГЭУ, д.т.н., доцент, grachieva@bk.ru

НГУЕН Т., КГЭУ, аспирант

СЕРПИОНОВА Т.А., КГЭУ, магистрант, mega.pionova@mail.ru

*Представлен альтернативный путь моделирования, основанный на задании конвективного потока при помощи коэффициента теплоотдачи.*

*Ключевые слова: силовой трансформатор, моделирование, тепловая модель, теплоотдача.*

Математическое моделирование тепловых процессов в силовом трансформаторе может быть основано на применении метода термоэлектрических аналогий.

Любой процесс теплопередачи может быть описан следующим уравнением энергетического баланса:

$$Qdt = CdT + \frac{T-T_0}{R} dt, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты;  $C$  – теплоемкость;  $T$  – температура;  $R$  – термическое сопротивление;  $T_0$  – начальная температура;  $t$  – время. Уравнение (1) может быть показано в виде:

$$Q = C \frac{dT}{dt} + \frac{T-T_0}{R}. \quad (2)$$

Рассмотрим простую электрическую цепь (рис. 1).

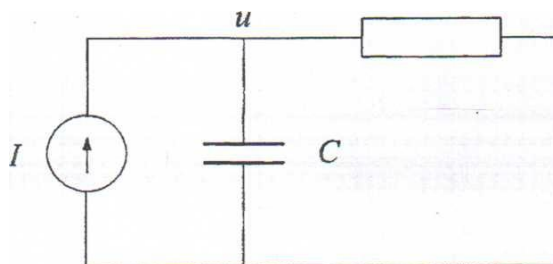


Рис. 1. Электрическая цепь

Используя 1-й закон Кирхгофа и закон Ома, можем записать:

$$i = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R}, \quad (3)$$

где  $i$  – электрический ток;  $C$  – электрическая емкость;  $u$  – электрическое напряжение;  $R$  – электрическое сопротивление.

Сравнение (2) и (3) приводит к следующей известной аналогии между тепловыми и электрическими процессами и величинами (таблица).

Тепловые параметры		Электрические параметры	
Количество теплоты	$Q$	Ток	$I$
Температура	$T$	Напряжение	$u$
Термическое сопротивление	$R$	Сопротивление	$R$
Теплоемкость	$C$	Емкость	$C$

Применительно к трансформатору его тепловой режим будет описываться совокупностью нелинейных термоэлектрических схем. Нелинейность этих схем следует из того факта, что термодинамические, механические, гидродинамические и электрические характеристики материалов, применяемых при конструировании силовых трансформаторов, являются функциями их температуры. Учет этих зависимостей будет моделироваться путем введения в термоэлектрическую схему нелинейных электрических элементов.

Тепловой процесс, происходящий в масле, представляет собой конвективную теплоотдачу. Существует два альтернативных пути для моделирования этого процесса. Первый состоит в том, что совместно решаются задача теплопереноса в комбинации с задачей моделирования поля скоростей трансформаторного масла. В этом случае режим неизотермического потока моделируется с помощью уравнений Навье – Стокса, описывающих связь скорости жидкости  $u$  и давления  $p$ , как

$$\rho(u\nabla u) = \nabla \left[ -\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2\mu}{3} - k\right)(\nabla u)I \right] + (\rho - \rho_0)g; \quad (4)$$

$$\nabla(pu) = 0.$$

Из-за нагрева жидкости происходят отклонения локальной плотности  $\rho$  по сравнению с плотностью на входе  $\rho_0$ . В результате возникает местная выталкивающая сила, выраженная как  $(\rho - \rho_0)g$ . Модель также рассматривает вязкость как зависящую от температуры.

Режим теплопереноса основан на уравнении баланса энергии, учитывающего скорость теплоносителя:

$$\nabla(-k\nabla T) = Q - \rho C_p T u \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где  $k$  – теплопроводность;  $C_p$  – удельная теплоемкость и  $Q$  – тепловая мощность. Данный подход приводит к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных и дает достаточно высокую точность решения при применении метода конечных элементов.

Второй метод основан на задании конвективного потока при помощи коэффициента теплоотдачи  $h$ . Эффективность данного подхода зависит от точности задания  $h$ .

В работе рассматривается второй подход, так как основной задачей моделирования теплового режима трансформатора является оценка температуры наиболее нагретой точки обмотки в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора, гармонического состава тока нелинейной нагрузки, температуры окружающей среды, а не получение полной картины температурного поля внутренней части трансформатора, что, безусловно, является важным, например, при его конструировании.

Нелинейное термическое сопротивление трансформаторного масла  $R_{M-BH}$  может быть описано следующим соотношением:

$$R_{M-BH} = 1/(hS) = \Delta T_M/Q, \quad (6)$$



где  $h$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – площадь;  $\Delta T_M$  – температурный градиент масла;  $Q$  – тепло, генерируемое соответствующими потерями в трансформаторе.

В соответствии положениями теории теплопередачи, естественная конвекция потока масла вдоль вертикальных, наклонных и горизонтальных плоскостей и цилиндров может быть достаточно точно описана известной эмпирической зависимостью:

$$\text{Nu} = C[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]^n, \quad (7)$$

где  $C$  и  $n$  – эмпирические константы, равные 0,59 и 0,25 соответственно для ламинарного течения и 0,10 и 0,33 для турбулентного течения;  $\text{Nu}$ ,  $\text{Gr}$ ,  $\text{Pr}$  – числа Нуссельта, Грасгофа и Прандтля, определяемые по формулам:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k}; \quad \text{Gr} = \frac{L^3 \rho_M^2 g \beta (\Delta T_M)}{\mu^2}; \quad \text{Pr} = \frac{C_M \mu}{k}, \quad (8)$$

где  $L$  – характерный размер;  $h$  – коэффициент теплопередачи;  $k$  – коэффициент теплопроводности масла;  $g$  – гравитационная постоянная;  $\rho_M$  – плотность масла;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения масла;  $C_M$  – теплоемкость масла;  $\mu$  – вязкость масла;  $\Delta T_M$  – температурный градиент масла.

Число Нуссельта характеризует соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности (в условиях неподвижной среды).

Число Грасгофа определяет процесс теплообмена при свободном движении в поле гравитации и является мерой соотношения архимедовой (подъемной) силы, вызванной неравномерным распределением плотности в неоднородном поле температур и силами межмолекулярного трения.

Число Прандтля характеризует влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу.

Подставим (8) в (7), тогда

$$\frac{hL}{k} = C \left[ \frac{L^3 \rho_M^2 g \beta (\Delta T_M)}{\mu^2} \cdot \frac{C_M \mu}{k} \right]^n,$$

откуда находим, что

$$h = \frac{k}{L} C \left[ \frac{L^3 \rho_M^2 g \beta (\Delta T_M) C_M \mu}{\mu^2 k} \right]^n = C \left[ \left( \frac{k}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{L^3 \rho_M^2 g \beta (\Delta T_M) C_M}{\mu k} \right]^n = C \left[ \frac{L^{\frac{3n-1}{n}} \rho_M^2 g \beta (\Delta T_M) C_M}{\mu k^{\frac{n-1}{n}}} \right]^n. \quad (9)$$

Анализ изменения параметров трансформаторного масла показывает, что наибольшую скорость изменения при вариации температуры имеет вязкость масла, поэтому (9) запишем в другом виде:

$$h = \left( \frac{\Delta T_M}{\mu} \right)^n \left[ C^{\frac{1}{n}} L^{\frac{3n-1}{n}} \rho_M^2 g \beta C_M k^{\frac{1-n}{n}} \right]^n. \quad (10)$$

Параметры  $\mu$ ,  $C_M$ ,  $\rho_M$ ,  $k$ , входящие в (10), зависят от температуры трансформаторного масла  $T_M$ . Эмпирические зависимости имеют вид:

$$\mu = 0,13573 \cdot 10^{-5} \left( e^{\frac{2793,3}{273+T_M}} \right), \quad \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad (11)$$

$$C_M = 1960 + 4,005 \cdot T_M, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}; \quad (12)$$

$$\rho_M = 887 - 0,659 T_M, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (13)$$

$$k = 0,124 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot T_M, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}. \quad (14)$$

Коэффициент объемного расширения масла  $\beta$  практически не зависит от температуры и равняется  $8,6 \cdot 10^{-4}$ ,  $1/\text{°C}$ .

Тепловая модель верхней части трансформаторного масла может быть представлена следующей термоэлектрической схемой (рис. 2).

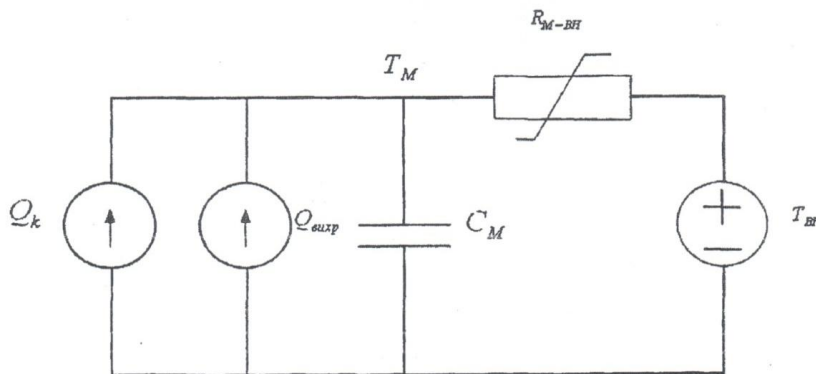


Рис. 2. Термоэлектрическая схема верхней части трансформаторного масла

Дифференциальное уравнение, соответствующее данной схеме, записывается в виде:

$$Q_k + Q_{\text{вихр}} = C_M \frac{dT_M}{dt} + \frac{T_M - T_{\text{ВН}}}{R_M - \text{ВН}}. \quad (15)$$

Подставляя (16) в (15), получаем:

$$Q_k + Q_{\text{вихр}} = C_M \frac{dT_M}{dt} + \frac{T_M - T_{\text{ВН}}}{\frac{1}{hS}}. \quad (16)$$

Так как  $\Delta T_M = T_M - T_{\text{ВН}}$ , а  $h$  определяется соотношением (10), то

$$Q_k + Q_{\text{вихр}} = C_M \frac{dT_M}{dt} + \frac{T_M - T_{\text{ВН}}}{\frac{1}{\left(\frac{T_M - T_{\text{ВН}}}{\mu}\right)^n \left[ C^n L^{\frac{1}{n}} \frac{3n-1}{n} \rho_M^2 g \beta C_M k^{\frac{1-n}{n}} \right]^n S}},$$

откуда

$$\begin{aligned} & \frac{1}{S} \left( \frac{\mu}{C^n L^{\frac{1}{n}} \frac{3n-1}{n} \rho_M^2 g \beta C_M k^{\frac{1-n}{n}}} \right)^n (Q_k + Q_{\text{вихр}}) = \\ & = \frac{1}{S} \left( \frac{\mu}{C^n L^{\frac{1}{n}} \frac{3n-1}{n} \rho_M^2 g \beta C_M k^{\frac{1-n}{n}}} \right)^n C_M^{1-n} \frac{dT_M}{dt} + (T_M - T_{\text{ВН}})^{1+n}. \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнение (17) может быть переписано в форме Коши:

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{1}{C_M} (Q_k + Q_{\text{вихр}}) - \frac{S C_M^{1-n}}{\mu^n} \left( \frac{\mu}{C^n L^{\frac{1}{n}} \frac{3n-1}{n} \rho_M^2 g \beta C_M k^{\frac{1-n}{n}}} \right)^n (T_M - T_{\text{ВН}})^{1+n}, \quad (18)$$

которое совместно с соотношениями (11) – (14) представляют собой математическую модель динамики температуры верхней части трансформаторного масла при естественной конвекции. Последнее уравнение можно путем введения новых переменных переписать в виде:

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{1}{\mu^n \tau_M} \left( \frac{I + RP_{\Sigma} K^2}{I + R} \mu^n \Delta T_M - \frac{(T_M - T_{\text{ВН}})^{1+n}}{T_M^n} \right), \quad (19)$$

где  $I$  – ток нагрузки;  $R$  – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого тока;  $K$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\mu$  – вязкость масла, зависящая от температуры;  $\tau_M$  – постоянная времени верхней части

масла;  $T_M$  – температура масла;  $T_{ВН}$  – температура воздуха;  $n$  – эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора;  $P_\Sigma$  – суммарные потери, определяемые по формуле:

$$P_\Sigma = P_k \left( \frac{T_e + T_k}{T_{e\text{ном}} + T_k} \right) + P_{\Sigma 1} \left( \frac{T_e + T_k}{T_{e\text{ном}} + T_k} \right),$$

$$T_e = \frac{T_{об1} + T_{об2}}{2}, \quad (20)$$

где  $P_k$  – потери короткого замыкания;  $P_{\Sigma 1}$  – потери на гистерезис и вихревые токи;  $T_k$  – корректирующий коэффициент, равный 225 для алюминия и 235 для меди.

Тепловая модель наиболее нагретой точки верхней части обмотки может быть представлена следующей термоэлектрической схемой (рис. 3).

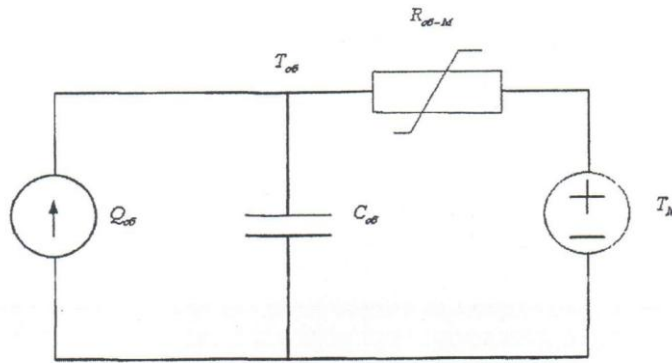


Рис. 3. Термоэлектрическая схема наиболее нагретой точки верхней части обмотки

Нелинейное термическое сопротивление  $R_{об-М}$  может быть представлено в виде:

$$R_{об-М} = R_{об} + R_{из} + R_{из-М}, \quad (21)$$

где  $R_{об}$  – термическое сопротивление проводника обмотки;  $R_{из}$  – термическое сопротивление изоляции обмотки;  $R_{из-М}$  – термическое сопротивление системы «изоляция обмотки – масло». Используя положения теории теплопередачи, можно показать, что:

$$R_{об-М} = \frac{1}{hS}, \quad (22)$$

$$h = \left( \frac{\Delta T_{об}}{M(T_M)} \right)^n \left[ C \frac{1}{n} L \frac{3n-1}{n} c_M^2(T_M) g v C_M(T_M) k(T_M) \frac{1-n}{n} \right]^n, \quad (23)$$

здесь параметры трансформаторного масла  $m$ ,  $C_M$ ,  $c_M$ ,  $k$  являются функциями температуры верхней части масла и определяются эмпирическими зависимостями (11) – (14).

Дифференциальное уравнение, соответствующее схеме, представленной на рис. 3, записывается в виде:

$$Q_{об} = C_{об} \frac{dT_{об}}{dt} + \frac{T_{об} - T_M}{R_{об-M}}. \quad (24)$$

Подставляя (22) в (24), получаем:

$$Q_{об} = C_{об} \frac{dT_{об}}{dt} + \frac{T_{об} - T_M}{\frac{1}{hS}}. \quad (25)$$

Так как  $\Delta T_{об} = T_{об} - T_M$ , а  $h$  определяется соотношением (23), то

$$Q_{об} = C_M \frac{dT_{об}}{dt} + \frac{T_{об} - T_M}{\frac{1}{\left(\frac{T_{об} - T_M}{M(T_M)}\right)^n \left[ C^{\frac{1}{n}} L^{\frac{3n-1}{n}} c_M^2(T_M) g v C_M(T_M) k(T_M)^{\frac{1-n}{n}} \right]^n S}},$$

откуда

$$\begin{aligned} & \frac{1}{S} \left( \frac{MT_M}{C^{\frac{1}{n}} L^{\frac{3n-1}{n}} c_M^2(T_M) g v C_M(T_M) k(T_M)^{\frac{1-n}{n}}} \right)^n Q_{об} = \\ & = \frac{1}{S} \left( \frac{MT_M}{C^{\frac{1}{n}} L^{\frac{3n-1}{n}} c_M^2(T_M) g v C_M(T_M) k(T_M)^{\frac{1-n}{n}} C_M(T_M)} \right)^n C_{об} \frac{dT_{об}}{dt} + (T_{об} - T_M)^{1+n}. \quad (26) \end{aligned}$$

Уравнение (26) может быть показано в форме Коши:

$$\begin{aligned} & \frac{dT_{об}}{dt} = \frac{1}{C_{об}} Q_{об} - \\ & - \frac{S}{C_{об} M^n(T_M)} \left( C^{\frac{1}{n}} L^{\frac{3n-1}{n}} c_M^2(T_M) g v C_M(T_M) k(T_M)^{\frac{1-n}{n}} \right)^n (T_{об} - T_M)^{1+n}, \quad (27) \end{aligned}$$

совместно с соотношениями (11) – (14) оно представляет собой математическую модель динамики температуры наиболее нагретой точки верхней части обмотки. Последнее уравнение можно путем введения новых переменных дать в виде:

$$\frac{dT_{об}}{dt} = \frac{1}{M^n \Phi_{об}} \left( \frac{P_{\Sigma об} K^2}{I + R} M^n \Delta T_{об} - \frac{(T_{об} - T_M)^{1+n}}{\Delta T_{об}^n} \right);$$

$$P_{\Sigma об} = P_k \left( \frac{T_{об} + T_k}{T_{об ном} + T_k} \right) + P_{вихр} \left( \frac{T_{об} + T_k}{T_{об ном} + T_k} \right), \quad (28)$$

где  $K$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\mu$  – вязкость масла, зависящая от температуры;  $\Phi_{об}$  – постоянная времени наиболее нагретой точки обмотки;  $T_M$  – температура масла;  $T_{об}$  – температура наиболее нагретой точки обмотки;  $n$  – эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора;  $\Delta T_{об}$  – номинальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой верхней части масла.

Обычно наиболее нагретая точка обмотки силового трансформатора находится в верхней ее части, поэтому для проведения расчетов необходимо решить численным методом систему нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_M}{dt} = \frac{1}{C_M} (Q_k + Q_{вихр}) - \\ - \frac{S \cdot C_M^{1-n}}{M^n} \left( \frac{M}{C^{1/n} L^{3n-1/n} c_M^2 g v k^{1/n}} \right)^n (T_M - T_{вн})^{1+n}, \\ \frac{dT_{об}}{dt} = \frac{1}{C_{об}} Q_{об} - \\ - \frac{S}{C_{об} M^n (T_M)} \left( C^{1/n} L^{3n-1/n} c_M^2 (T_M) g v C_M (T_M) k (T_M)^{1/n} \right)^n (T_{об} - T_M)^{1+n} \end{array} \right. \quad (29)$$

при известных зависимостях параметров уравнений от температуры:

$$M = 0,13573 \cdot 10^{-5} \left( e^{\frac{2797,3}{273+T_M}} \right), \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$C_M = 1960 + 4,005 T_M, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{°C}};$$

$$\rho_M = 887 - 0,659 T_M, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$k = 0,124 - 1,525 \cdot 10^{-4} T_M, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$$
(30)

и начальных условиях:

$$T_M(t_0) = T_M^0; \quad T_{об}(t_0) = T_{об}^0. \quad (31)$$

Решение задачи Коши (29) – (31) в настоящей работе проводилось численным методом решения жестких дифференциальных уравнении с адаптивным выбором шага интегрирования — методом Гира. Данный численный метод реализован в виде подпрограммы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений в системе MatLab.

Так как предположение о расположении наиболее нагретой точки в верхней части любой из обмоток силового трансформатора не может быть подтверждено теоретически на современном уровне знаний, то нами были разработаны модели динамики температуры наиболее нагретой точки нижней части обмотки и динамики температуры нижней части масла.

Вывод этих уравнений аналогичен выводу уравнений для верхней части трансформатора, а поэтому он приводится с сокращениями.

Тепловая модель наиболее нагретой точки нижней части обмотки может быть представлена следующей термоэлектрической схемой (рис. 4).

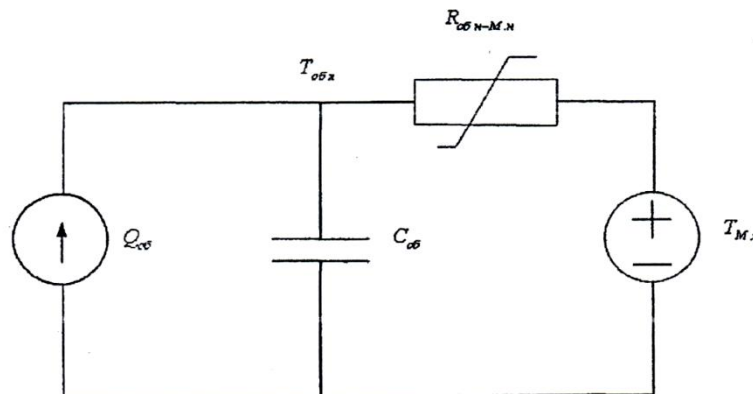


Рис. 4. Термоэлектрическая схема наиболее нагретой точки нижней части обмотки

Этой схеме после достаточно трудоемких преобразований соответствует следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dT_{об.н}}{dt} = \frac{1}{\mu^n \tau_{об}} \left( P_{\Sigma об.н} K^2 \mu^n \Delta T_{об.н} - \frac{(T_{об.н} - T_{Мн})^{1+n}}{\Delta T_{об.н}^n} \right);$$

$$P_{\Sigma об.н} = P_k \left( \frac{T_{об.н} + T_k}{T_{об.н.ном} + T_k} \right) + P_{вихр} \left( \frac{T_{об.н} + T_k}{T_{об.н.ном} + T_k} \right), \quad (32)$$

где  $K$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\mu$  – вязкость масла, зависящая от температуры;  $\tau_{об}$  – постоянная времени наиболее нагретой точки обмотки;  $T_{Мн}$  – температура нижней части масла;  $T_{об.н}$  – температура наиболее нагретой точки нижней части обмотки;  $n$  – эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора;  $\Delta T_{об.н}$  –

номинальное превышение температуры наиболее нагретой точки нижней части обмотки над температурой верхней части масла.

Тепловая модель нижней части трансформаторного масла может быть представлена следующей термоэлектрической схемой (рис. 5).

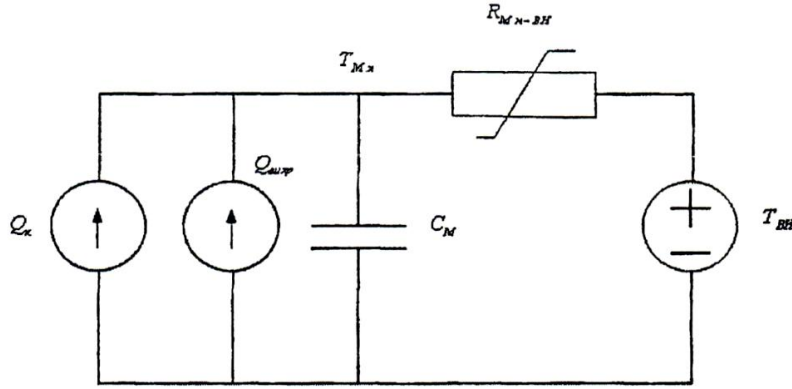


Рис. 5. Термоэлектрическая схема нижней части трансформаторного масла

Переходный тепловой процесс, соответствующий рис. 5, описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dT_{MН}}{dt} = \frac{1}{\mu^n \tau_{MН}} \left( \frac{I + RP_{\Sigma H} K^2}{I + R} \mu^n \Delta T_{MН} - \frac{(T_{MН} - T_{ВН})^{1+n}}{\Delta T_{MН}^n} \right), \quad (33)$$

где  $I$  – ток нагрузки;  $R$  – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода;  $K$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\mu$  – вязкость масла, зависящая от температуры;  $\tau_{MН}$  – постоянная времени нижней части масла;  $T_{MН}$  – температура нижней части масла;  $T_{ВН}$  – температура воздуха;  $n$  – эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора;  $P_{\Sigma H}$  – суммарные потери, определяемые по формуле:

$$P_{\Sigma H} = P_k \left( \frac{T_{eH} + T_k}{T_{eH, \text{ном}} + T_k} \right) + P_{\Sigma 1} \left( \frac{T_{eH} + T_k}{T_{eH, \text{ном}} + T_k} \right);$$

$$T_e = \frac{T_{об1H} + T_{об2H}}{2}. \quad (34)$$

Здесь  $P_k$  – потери короткого замыкания;  $P_{\Sigma 1}$  – потери на гистерезис и вихревые токи;  $T_k$  – корректирующий коэффициент.

Дифференциальные уравнения (32) – (33) решались совместно с зависимостями (11) – (14), в которых в данном случае вместо температуры верхней части масла выбиралась температура нижней части масла.



Для проверки адекватности построенных теоретических моделей расчета распределения температуры в конструктивных элементах силового трансформатора при линейной и нелинейной нагрузке были проведены вычислительные эксперименты.

Результаты этих экспериментов для типового трансформатора мощностью 400 кВА приведены на рис. 6 и 7.

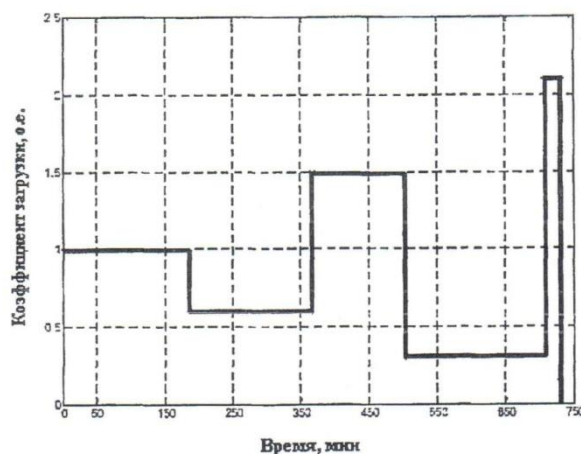


Рис. 6. Динамика коэффициента загрузки трансформатора

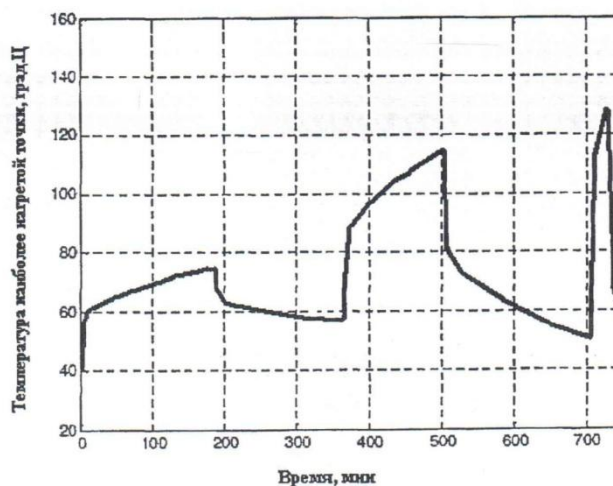


Рис. 7. Динамика температуры наиболее нагретой точки обмотки в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора

Сравнение результатов численных экспериментов показало, что аналитические зависимости дают погрешность в вычислении потерь в пределах 7–11 %, в зависимости от конструктивных особенностей трансформатора и способа его охлаждения.

## **SIMULATION OF THERMAL MODES OF POWER TRANSFORMERS** **GRACHEVA E.I., NGUYEN T., SERPIONOVA T.A.**

*The paper presents an alternative way of modeling based on the task of convective flow using the heat transfer coefficient.*

*Keywords: power transformer, simulation, thermal model, heat transfer.*

УДК 621.313:620.1

## **ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА**

ГРОЗОВ В.В., КГЭУ, студент-магистр, grozovvalera@gmail.com

ЦВЕТКОВ А.Н., КГЭУ, к.т.н., доцент, tsvetkov9@mail.ru

*Представлены результаты исследования известных типов электродвигателей, их особенностей, направленного на улучшение существующих методов диагностики электродвигателей путем их анализа и синтеза.*

*Ключевые слова: электродвигатель, методы диагностики, приводной механизм, устройство диагностики, оптимизация и совершенствование.*

В промышленности электродвигатель является самым распространенным типом электроустановок. На их работу значительно влияют условия окружающей среды, режим работы приводного механизма, квалификация персонала, обслуживающего данный электродвигатель. Отказ электродвигателя по вышеуказанным причинам наносит экономический ущерб промышленному предприятию вследствие простоя рабочего механизма и, как следствие, недоотпуска продукции. Важно в кратчайшие сроки произвести диагностику электродвигателя (в большинстве случаев причина отказа известна и дефектация электродвигателя проходит быстро), выполнить качественный ремонт (замена подшипников, замена сгоревшей обмотки) и произвести послеремонтную диагностику.

От правильного проведения послеремонтной диагностики зависит будущий ресурс электродвигателя. Любой неустранимый, не обнаруженный по каким-либо причинам дефект в двигателе станет причиной недолгой работы и очередного отказа.

Существует устройство для испытания асинхронных двигателей под нагрузкой с тиристорным управлением подачи напряжения и ограничителем тока в статоре, что позволяет проводить испытания в условиях, приближенных к эксплуатационным. Однако проводить испытания следует, предварительно оценив состояние изоляции.

Способы испытания, основанные на анализе спектра токов и напряжений, перспективны, но применяются для машин переменного тока.

Множество различных способов ориентировано на испытание одного из типов электродвигателя. Поэтому создание способа, технического устройства, способного испытывать любые типы двигателей, учитывать их особенности, необходимо для снижения времени простоя промышленного агрегата, где помимо асинхронных электродвигателей как раз могут быть задействованы и двигатели постоянного тока.

### **Источники**

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М., 1997. – 153 с.

2. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.

### **DIAGNOSIS OF MOTOR AFTER OVERHAUL**

GROZOV V.V., TSVETKOV A.N.

*Investigation of known types of electric motors, their characteristics, aimed at improving the existing methods of diagnostics of electric motors by their analysis and synthesis.*

*Keywords: electric, diagnostic methods, the drive mechanism, device diagnostics, optimization and improvement.*

УДК 658.264

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛА КОТЕЛЬНОЙ**

ГУМЕРОВА Р.Х., КНИТУ–КАИ, к.ф.-м.н., доцент, rgumerova@mail.ru  
ЧЕРНЯХОВСКИЙ В.А., КНИТУ–КАИ, магистрант, chernyahovsky@list.ru

*Статья содержит математическую модель потребления природного газа и объема произведенного тепла до и после модернизации котельной. Произведен анализ данных, собранных на протяжении 2006–2015 гг. эксплуатации. Сделан вывод о работе котельной.*

*Ключевые слова: математическая модель, котельная, модернизация, анализ данных, потребление природного газа, объем произведенного тепла.*

В настоящее время потребители электрической энергии обязаны, в соответствии с [1], принять все доступные рациональные меры для уменьшения ее потребления.

На практике принятые организацией предприятия меры по энергосбережению, согласно [2], должны включать в себя реализацию потенциала организационного и технологического энергосбережения, т.е. внедрение передовых технологий, техническое перевооружение существующих производств, внедрение энергосберегающих мероприятий, позволяющих существенно снизить затраты энергии на выпуск единицы продукции.

Данные меры способствуют уменьшению потребления электроэнергии на всех производственных этапах предприятия. Техническое перевооружение, замена устаревшего оборудования на новое и пр. применяется, как правило, на предприятиях старой постройки. Строительство же новых производственных объектов сопряжено с закладыванием высокого энергосберегающего потенциала на стадии проектирования.

Потенциал энергосбережения можно определить как количество энергетических ресурсов, которое может быть сокращено при выпуске одного и того же объема и перечня товаров и услуг неизменного качества за счет проведения самокупаемых организационно-технологических мероприятий при заданных условиях развития техники и цен на энергоносители.

Потенциал энергосбережения зависит от таких факторов, как состояние научно-технического прогресса, цены на оборудование и энергоносители и меняется во времени.

Объектом исследования является котельная ОАО «Комбинат автомобильных фургонов» (ОАО «КАФ»). Предметом исследования является математическая модель, отражающая объемы потребленного природного газа и выработанного тепла котельной до и после модернизации за период 2006–2015 гг.

Цель работы состоит в анализе данных о количестве потребленного природного газа и произведенного тепла.

Были собраны и оценены данные потребления природного газа, количество выработанного тепла и данные среднемесячных температур с 2006 по 2015 гг. Для наглядности общие диаграммы конвертированы в рис. 1–3 с соответствующими подписями и обозначениями цветовых маркировок годов. Следует иметь в виду, что некоторые данные о среднемесячных температурах в летний период не фиксировались, что видно из рис. 3.

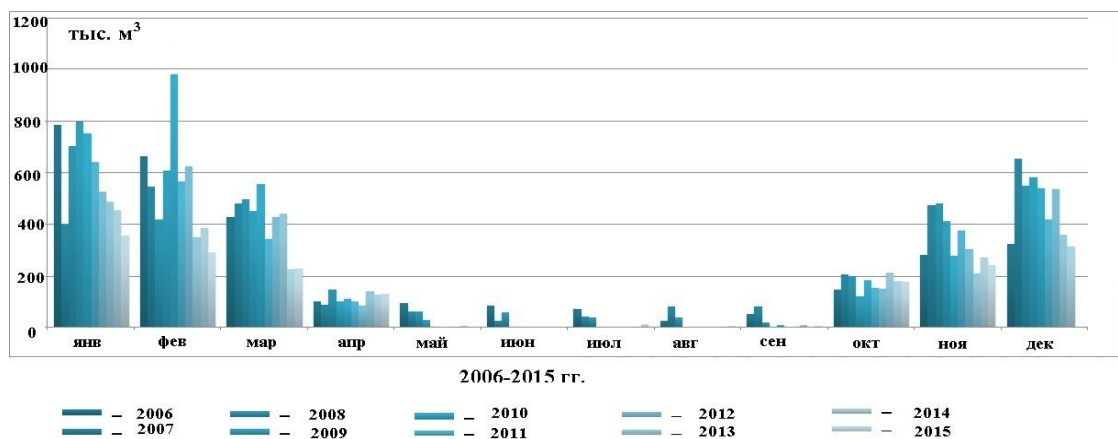


Рис. 1. Потребление природного газа с 2006 по 2015 гг.

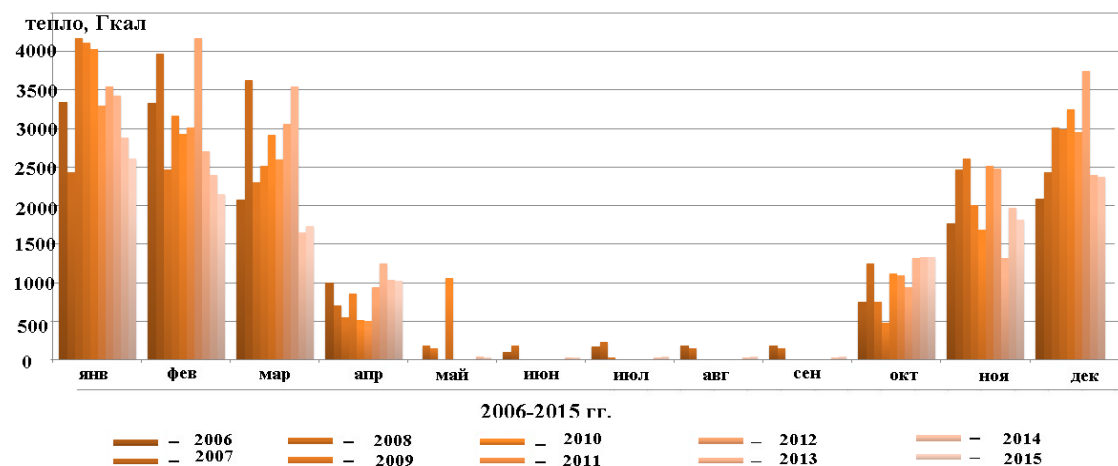


Рис. 2. Количество произведенного тепла с 2006 по 2015 гг.

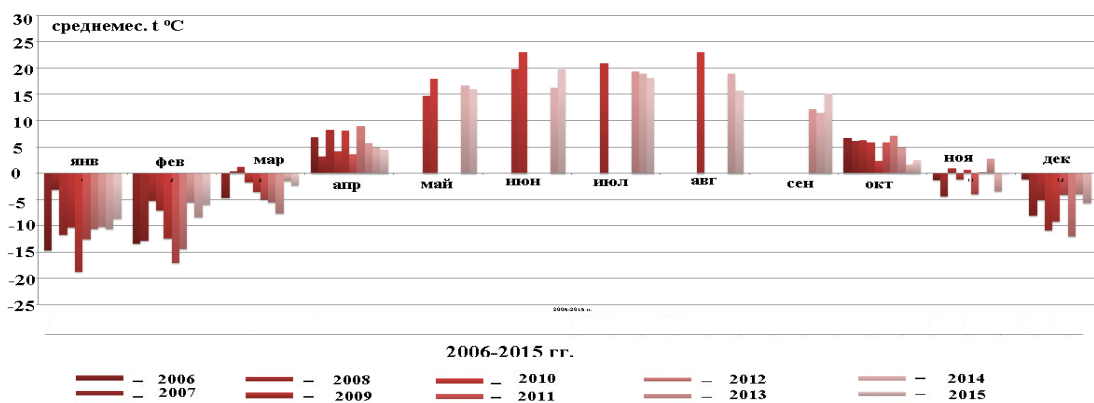


Рис. 3. Среднемесячные температуры с 2006 по 2015 гг.

Передача котельной от теплоснабжающей организации предприятию состоялась 01 июня 2011 г. Строительство новой котельной было начато в апреле, а закончено – в ноябре 2013 г. Запуск новой котельной состоялся в феврале 2014 г.

Исходя из рис. 1, видна общая тенденция снижения потребления природного газа за последние 10 лет, за исключением отдельных периодов. Данные о количестве произведенного тепла (рис. 2) коррелируют с данными рис. 1: большему объему потребленного газа соответствует большее количество произведенного тепла, и наоборот.

Период нахождения старой котельной в ведении теплоснабжающей организации отличается большим потреблением газа и количеством выработанного тепла. Это объясняется необходимостью поставки тепла в город. Кроме того, на фоне общей картины потребления выделяется февраль 2010 г., когда потребление дошло до самой высокой отметки за все 10 лет исследования – 981,089 тыс. м<sup>3</sup> природного газа и, соответственно, количество выработанного котельной тепла – 2933,9 Гкал. Для наглядности приведем показатели потребления газа и выработанного тепла за 2010 г. на рис. 4 и 5 соответственно.

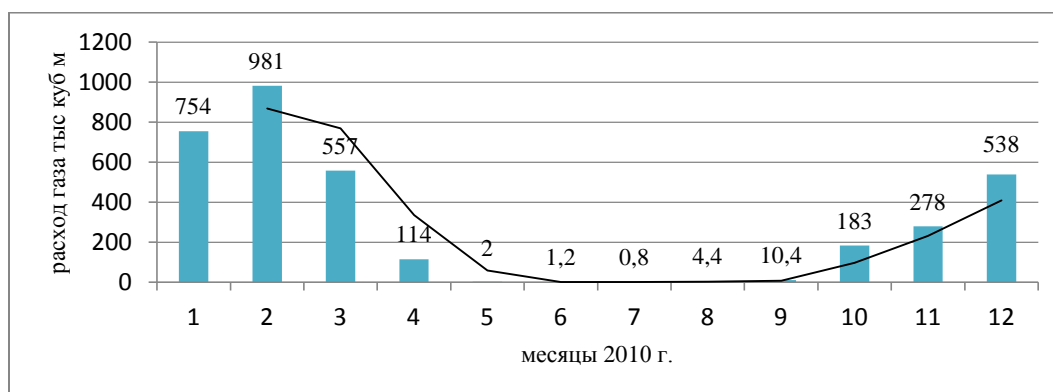


Рис. 4. Потребление природного газа за 2010 г.

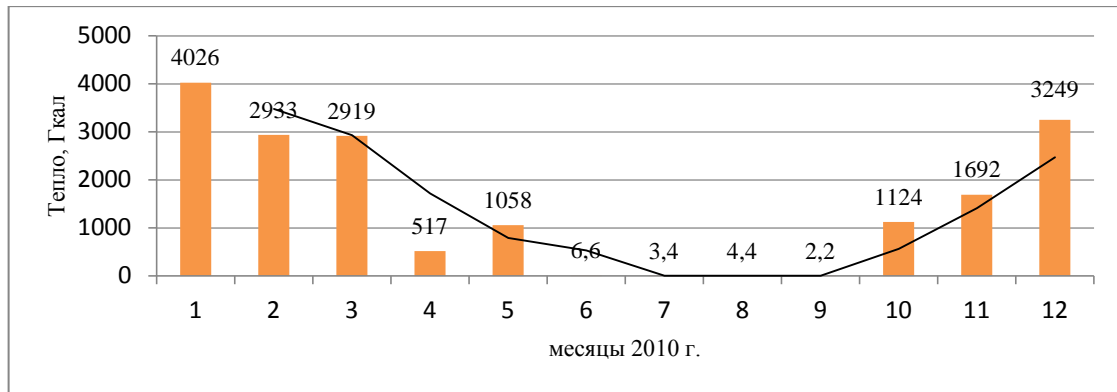


Рис. 5. Объем выработанного тепла за 2010 г.

Такое большое потребление природного газа объясняется тем, что котельная поставляла пар для нужд ОАО «Молочное дело». В феврале 2010 г. было выработано меньше тепла, чем в январе, при большем расходе газа и при более высокой температуре. Такие показатели связаны с износом оборудования паровых котлов.

Из рис. 1 и 2 видно, что с момента передачи котельной ОАО «КАФ» заметно снижение потребления природного газа при частичном увеличении количества производимого тепла. В первую очередь это связано с отключением ГВС города и передачи пара ОАО «Молочное дело». Особенно хорошо эта тенденция прослеживается за октябрь и ноябрь 2011–2015 гг. Выбивается из общей картины потребление газа за декабрь 2012 г. – 534,44 тыс. м<sup>3</sup> при произведенных 3743,74 Гкал тепла (самый большой показатель за 10 лет исследования). Наличие такого количества потребного тепла связано со среднемесячной температурой в –11,91 °С, что является наименьшим показателем за период исследования.

Из рис. 2–4 также видно, что имеет место снижение потребления природного газа с момента передачи котельной предприятию. За декабрь 2007 г. было потреблено максимальное количество природного газа за исследуемый период – 655 тыс. м<sup>3</sup> при выработанных 2436,69 Гкал тепла и среднемесячной температуре –8,05 °С. Это сравнение иллюстрируют рис. 6–8. В летние месяцы 2007 и 2012 гг. учет среднемесячной температуры на предприятии не производился. Потребление в 2012 г. большего объема газа и, как следствие, производство большего количества теплоты, чем в 2007 г., связано с более низкими среднемесячными температурами (январь, февраль и март). В декабре 2012 г. новая котельная потребила газа меньше, чем старая котельная в 2007 г., при большем количестве произведенного тепла и меньшем значении среднемесячной температуры.

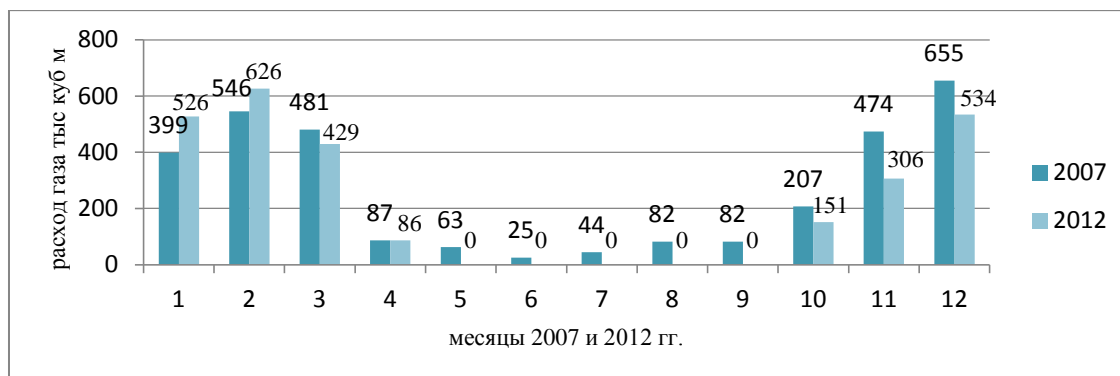


Рис. 6. Потребление природного газа за 2007 и 2012 гг.

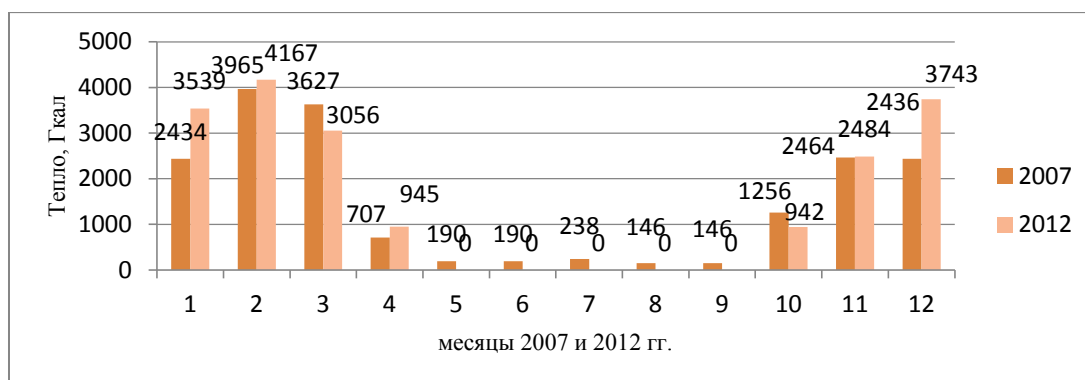


Рис. 7. Количество выработанного тепла за 2007 и 2012 гг.

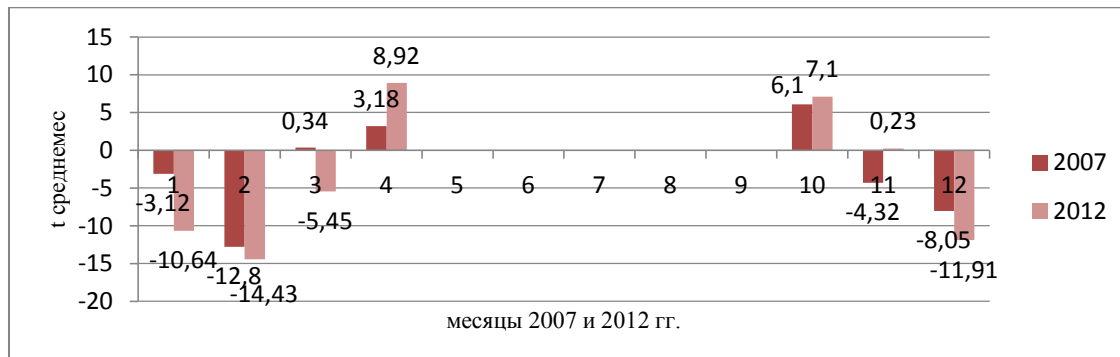


Рис. 8. Среднемесячные температуры за 2007 и 2012 гг.

Повышение эффективности работы старой котельной иллюстрирует февраль 2012 г. выработкой самого большого количества тепла за исследуемый период времени – 4167,96 Гкал, при умеренном потреблении газа 626,167 тыс. м<sup>3</sup> и одним из самых низких значений февральских среднемесячных температур –14,43 °С.

Период с момента ввода в эксплуатацию новой модульной котельной характеризуется стабильным снижением потребления природного газа и количества выработанного тепла. Рис. 1 и 2 иллюстрируют эту тенденцию. Для наглядности сравним отопительные периоды с июня 2011 по 2015 гг., т.е. период, когда котельная находится в ведении ОАО «КАФ».



Работу старой котельной на отопление предприятия отражает период с июня 2011 по февраль 2014 гг., а с февраля 2014 по ноябрь 2015 гг. видим результат работы новой котельной. Отразим эти данные на графиках (рис. 9–11). Тонкой красной линией на этих диаграммах отмечен момент начала функционирования новой котельной.

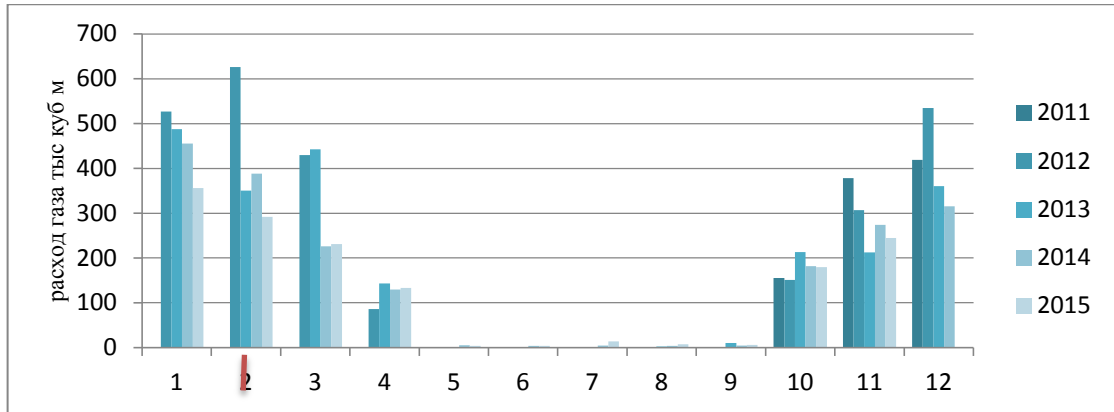


Рис. 9. Сравнение потребления природного газа старой и новой котельной

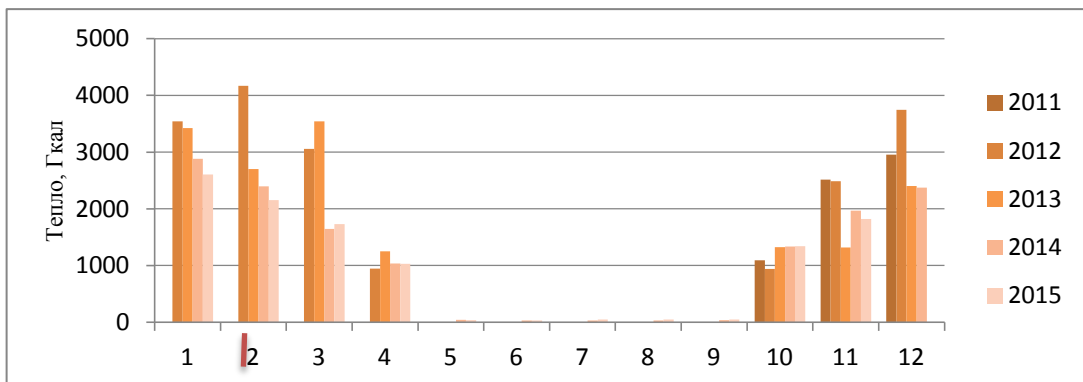


Рис. 10. Сравнение количества выработанного тепла старой и новой котельной

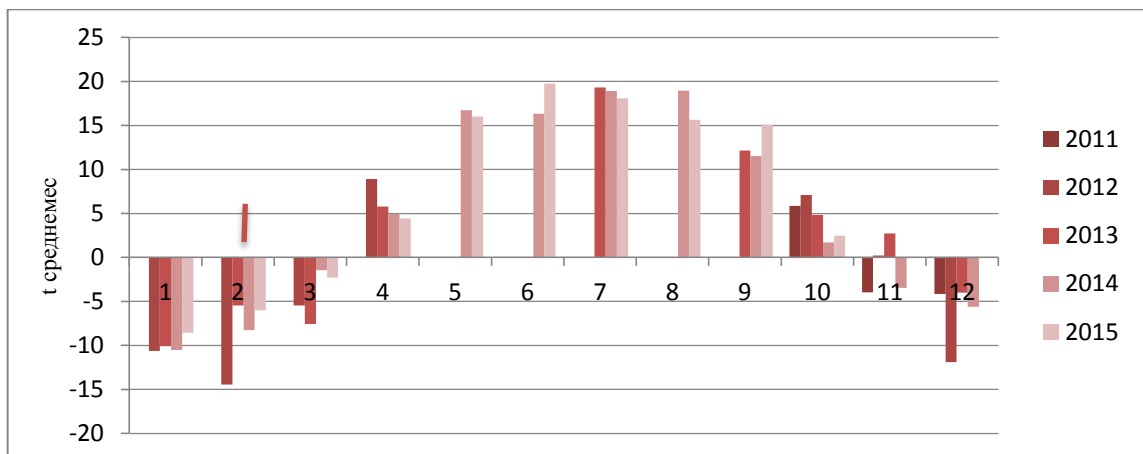


Рис. 11. Сравнение среднемесячных температур с июня 2011 по ноябрь 2015 гг.

Таким образом, приведены математические модели потребления природного газа и объема выработанного тепла котельной. На протяжении 2006–2015 гг. состояние котельной менялось: в 2011 г. котельная перешла от теплоснабжающей компании в ведение предприятия, в связи с чем прекратилась подача пара в город и на нужды ОАО «Молочное дело»; в 2014 г. запущена новая котельная, а старая законсервирована. Изменение режима работы котельной с годами отличает снижение объема потребляемого газа и произведенного тепла.

Модернизация котельной оправдана в связи с износом оборудования, его низкой эффективностью и отсутствием производственной потребности в горячем паре. Модернизированная котельная мобильна, эффективна и отвечает современным производственным нуждам предприятия в тепловой энергии.

### **Источники**

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 13.07.2015). – Доступен на справочно-правовом портале «КонсультантПлюс».

2. Данилов О.Л. Энергосбережение в теплоэнергетике и тепло-технологиях: учеб. для вузов / О.Л. Данилов [и др.]. – М.: МЭИ, 2010. – С. 38–40.

### **THE MATHEMATICAL MODEL OF NATURAL GAS CONSUMPTION AND HEAT PRODUCED OF BOILER STATION GUMEROVA R.KH., CHERNYAKHOVSKIY V.A.**

*The article is contain mathematical model of natural gas consumption and volume of heat produced before and after modernization of boiler station. The analyze of data which were collected in term 2005–2015 of exploitation was produced. The conclude about work boiler station was produced.*

*Keywords: Mathematical model, boiler station, modernization, analyze of data, natural gas consumption, the volume of heat production.*

УДК 004.896:621.865

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА AR-601**

ДЕВАЕВ В.М., КНИТУ–КАИ, к.т.н., доцент, vdevaev@yandex.ru  
ФАДЕЕВ А.Ю., КНИТУ–КАИ, аспирант, andrjuhafad@yandex.ru  
НИКИТИНА Д.В., КНИТУ–КАИ, аспирант, daria.92rus@gmail.com

*Автономное движение антропоморфного робота рассматривается как суперпозиция множества типовых элементов движения – так называемых паттернов, каждый из которых можно рассматривать как агент некоторой мультиагентной системы [1]. Для управления роботом серии AR-601 создана информационно-коммуникационная инфраструктура, представляющая некоторую мультиагентную среду, позволяющую разрабатывать алгоритмы отдельных паттернов движения и запускать их в среде как множество самостоятельно выполняемых и взаимодействующих между собой агентов. В работе представлены алгоритмы бокового перемещения антропоморфного робота серии AR-601 с обеспечением активной устойчивости за счет паттерна устойчивости.*

*Ключевые слова: динамическая стабилизация, антропоморфные роботы, AR-601.*

Рассматривается задача реализации бокового шага антропоморфного робота серии AR-601 производства АО «НПО «Андроидная техника» с обеспечением его устойчивости [2, 3]. Для управления роботом разработана информационно-коммуникационная инфраструктура, представляющая собой мультиагентную среду, позволяющую запускать алгоритмы выполнения отдельных паттернов движения как самостоятельно функционирующие и взаимодействующие между собой агенты. Агенты располагаются на одном или нескольких контроллерах и взаимодействуют с главным процессором робота через сеть типа Ethernet. В данной работе представлены алгоритмы бокового перемещения антропоморфного робота серии AR-601 с обеспечением активной устойчивости. При этом отдельно рассматриваются математические модели и алгоритмы паттернов шага робота вбок и обеспечения устойчивости робота в его продольной плоскости симметрии.

### Алгоритм устойчивости

Рассмотрим паттерн устойчивости робота в продольной плоскости. На рис. 1 приводится конструкция стопы робота AR-601. Стопа связана с голенью с помощью электрического привода, задающего угол между ними. К стопе с помощью пружины прикреплена подошва стопы. Имеется силомоментный датчик, позволяющий получать значения моментов сил, возникающих в сочленении стопы с голенью. Предполагается, что корпус робота, бедра и голени зафиксированы относительно друг друга, устойчивость достигается путем изменения наклона голени относительно стопы.

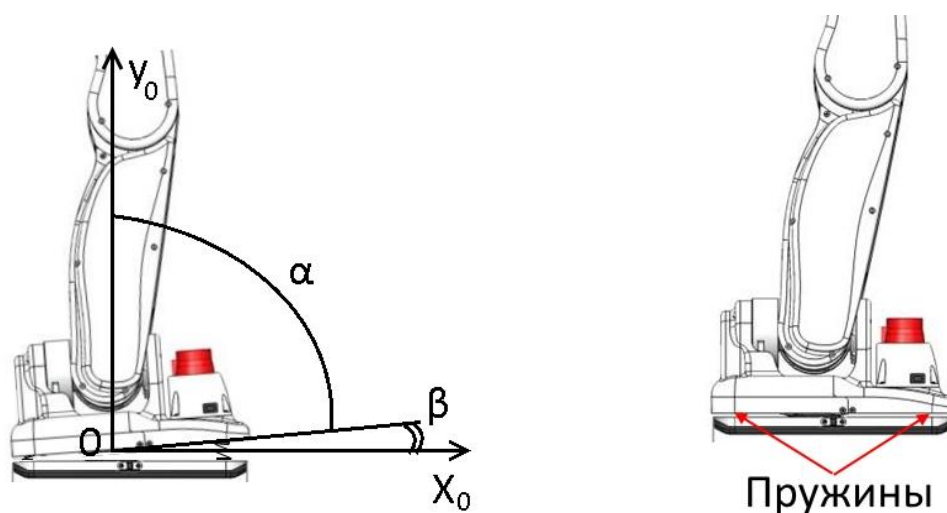


Рис. 1. Схема узла голени робота AR-601

На рис. 1  $\alpha$  – угол поворота голени относительно стопы,  $\beta$  – угол наклона стопы относительно подошвы (пола). Тогда  $\gamma = \alpha + \beta$  – наклон ноги относительно пола.

Пусть  $M_g = lmg \sin(\gamma)$  – момент, создаваемый весом робота;  $M_\beta = K_\beta \beta$  – момент, создаваемый пружинами в подошвах робота;  $l$  – расстояние от стопы до центра масс робота;  $g$  – ускорение свободного падения;  $mg$  – вес робота;  $K_\beta$  – коэффициент упругости подошвы.

Уравнение динамики наклона робота описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$I_m \ddot{\gamma} = lmg \sin(\gamma) - K_\beta \beta. \quad (1)$$

Считая значение  $\gamma$  малым, заменяем  $\sin \gamma$  на  $\gamma$ :

$$I_m \ddot{\gamma} = lmg\gamma - K_\beta \beta. \quad (2)$$

Требуется обеспечить устойчивость по углу  $\gamma$ . Пусть требуемая динамика описывается уравнением:

$$I_m \ddot{\gamma} = K_1 \gamma + K_2 \dot{\gamma}. \quad (3)$$

Приведем уравнение к следующему виду:

$$K_1 \gamma + K_2 \dot{\gamma} = lmg\gamma - K_\beta \beta. \quad (4)$$

Выводим  $\beta$  через  $\alpha$ :  $\beta = \gamma - \alpha$ . Тогда:

$$K_1 \gamma - lmg\gamma + K_\beta \gamma + K_2 \dot{\gamma} = K_\beta \alpha; \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{K_1 + K_\beta - lmg}{K_\beta} \gamma + \frac{K_2}{K_\beta} \dot{\gamma}. \quad (6)$$

Если задавать  $\alpha = \alpha(t)$  по формуле (6), то динамика колебаний робота на ступнях будет соответствовать выражению (3). Здесь  $K_1$  и  $K_2$  задаются из желаемой динамики,  $l$ ,  $m$  и  $K_\beta$  известны.

Алгоритм управления стопами для обеспечения устойчивости: с датчиков моментов в стопах робота снимаются показатели  $v_\gamma(t_i)$  в момент  $t_i$  и вычисляются значения  $\gamma(t_i)$ ,  $\dot{\gamma}(t_i)$ . Вычисляется  $\alpha = \alpha(t)$  по формуле (6) и подается на исполнение в привод стопы.

### Алгоритм шага

Рассмотрим выполнение роботом бокового шага как наиболее простого элемента ходьбы [4]. Предполагается, что корпус робота всегда поддерживается в вертикальном положении. Конструкция ног робота приведена на рис. 2. Введем декартову систему координат, связанную с корпусом робота, как показано на рис. 2.

Пусть  $S$  – половина длины шага робота. Тогда:

$$S = L \cos(\gamma), \quad (7)$$

где  $L$  – длина ноги,  $\gamma$  – соответствующий угол поворота бедра робота.

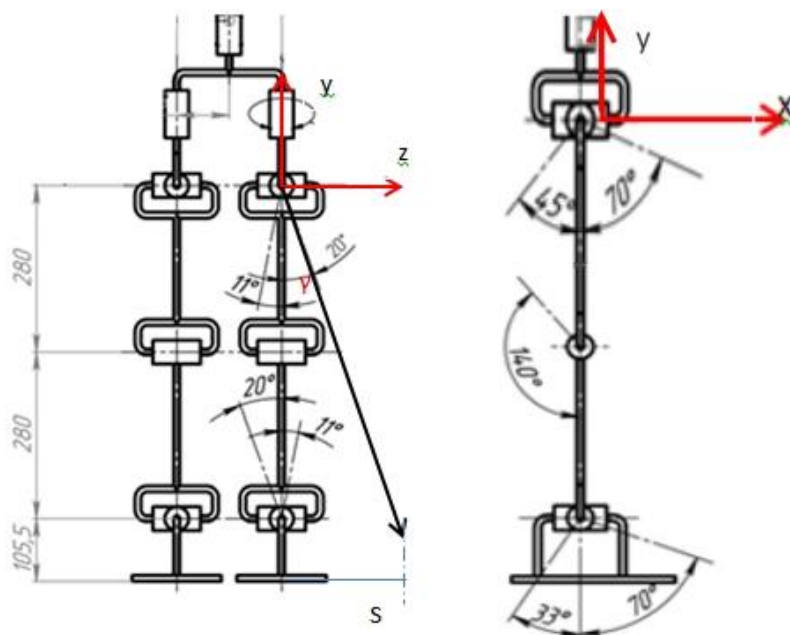


Рис. 2. Схема расположения ног робота AR-601

Таким образом, если во время шага оба бедра поворачиваются на углы  $\gamma$ , то общая длина шага равна  $2S$ . При осуществлении шага одна нога считается опорной, и ее стопа остается на месте. Вторая нога сгибается в колене и переставляется в заданное место. Перемещение стопы выполняется по параболе [5]:

$$y = az^2 + bz + c. \quad (8)$$

Задавая координаты параболы, зависящие от начального и конечного положения стопы, а также от высоты шага, можно вычислить текущее расстояние от таза до стопы:

$$Lc = \frac{L-y(t)}{\cos(\Delta\gamma)}, \quad (9)$$

а также необходимые углы сгиба колена  $\beta$  и бедра  $\alpha$  (рис. 3), позволяющие выполнить движение стопы по заданной ранее траектории (2):

$$\alpha(t) = \frac{lb^2 + Lc(t)^2 - ls^2}{2lb \cdot Lc(t)}; \quad (10)$$

$$\beta_1(t) = \frac{ls^2 + lb^2 - Lc(t)^2}{2lb \cdot ls}; \quad (11)$$

$$\beta(t) = 180 - \beta_1(t), \quad (12)$$

где  $lb$  – длина бедра;  $ls$  – длина голени;  $\beta_1(t)$  – промежуточный угол для вычисления сгиба колена на работе.

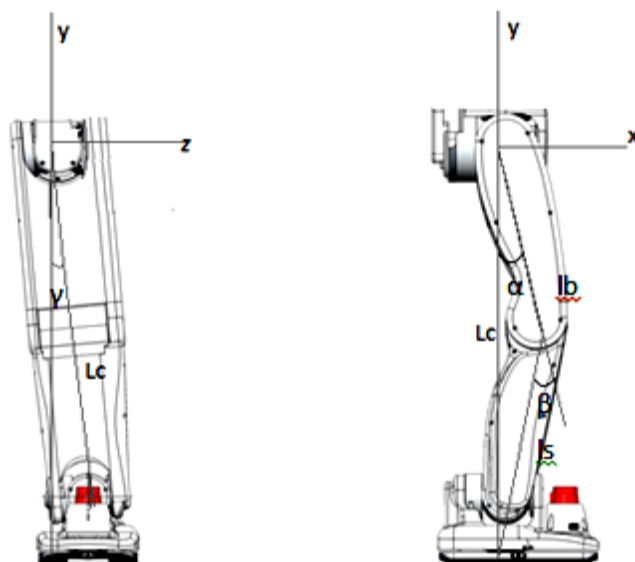


Рис. 3. Положение углов работа

Для обеспечения устойчивости во время движения необходимо, чтобы центр масс переносимой ноги находился в плоскости  $YOZ$ . Для этого будем высчитывать отклонение реального положения центра масс переносимой ноги от желаемого:

$$-y_{cm}(t) = \frac{mb(lb \cos(\alpha(t)) + ms(lb \cos(\alpha(t)) + ls \cos(\beta_1(t))))}{mb + ms}; \quad (13)$$

$$x_{cm}(t) = \frac{mb(lb \sin(\alpha(t)) + ms(lb \sin(\alpha(t)) + ls \sin(\beta_1(t))))}{mb + ms}. \quad (14)$$

Из (17), (18):

$$a_{cm}(t) = a \operatorname{tg} \left( \frac{y_{cm}(t)}{x_{cm}(t)} \right), \quad (15)$$

где  $\alpha_{cm}$  – угол отклонения от желаемого центра масс переносимой ноги.

Приведенные в работе алгоритмы реализованы на языке программирования Python, отлажены с помощью научно-образовательного комплекса [1] на базе операционной системы для роботов РОС [6] и реализованы на антропоморфном роботе AR-601.

## Результат

В результате параллельной работы алгоритма устойчивости и алгоритма шага мы можем переносить ногу робота вбок на заданное расстояние и за заданное время. При этом робот не «заваливается» и происходит адекватная имитация шага человека.

## Источники

1. Sirazetdinov R. Program complex of modeling and virtualization anthropomorphic robot AR-601 bases on ROS and GAZEBO systems / R. Sirazetdinov [et al.] // IMMOD-2015, Moscow 2015. – pp. 328–331.

2. Bogdanov A. Building an anthropomorphic robot including interaction control / A. Bogdanov [et al.] // Irreversible processes in nature and technology. Digest of Eighth-Russian Conference, 2015. – pp. 228–229.

3. NPO “Androidnaya tehnika”. – URL: <http://npo-at.com/products/ar-600e/>.

4. Devaev V. Minimax method for estimating the parameters of motion robotic systems for multiple measurements of small precision / V. Devaev. // XI All-Russian Congress of the fundamental problems of Theoretical and Applied Mechanics, Kazan, 20 – 24 August, 2015. – pp. 1148–1149.

5. Devaev V.M. Balancing of the anthropomorphous robot walking / V.M. Devaev, D.V. Nikitina, A.Y. Fadeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 134.

6. ROS documentation. – URL: <http://wiki.ros.org>.

УДК 631

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПАКТНАЯ КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА

ДИКАРЕВ П.В., ВолгГТУ, магистрант, [dikarev.pavel@mail.ru](mailto:dikarev.pavel@mail.ru)

МАКАРОВ А.М., ВолгГТУ, к.т.н., доцент, [amm34@mail.ru](mailto:amm34@mail.ru)

ВОЛКОВ И.В., ВолгГТУ, инженер, [berkytxt@rambler.ru](mailto:berkytxt@rambler.ru)

ЛАЗАРЕВ В.В., ВолгГТУ, магистрант, [lazar@lenta.ru](mailto:lazar@lenta.ru)

*Рассмотрены вопросы обеспечения нужд конечного потребителя теплой водой и электрической энергией в условиях нестационарного использования. Разработана схема компактной автономной когенерационной установки и описан принцип ее работы.*



*Ключевые слова: когенерация, мобильная установка, нагрев воды, тепловая энергия, регулирование, водоснабжение, электроснабжение, микроконтроллер.*

Когенерация – это процесс производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства – когенерационной установки. Тепловая энергия вырабатывается за счет использования тепловых потерь первичного приводного двигателя – газопоршневого, газовой турбины, дизеля<sup>†</sup>.

Существующие когенерационные установки являются стационарными, достаточно мощными и дорогостоящими для частного использования. Однако использование данного принципа генерации энергии может быть полезно и эффективно при нестационарном использовании (перебои в подаче тепло- и электроэнергии в частных домах и на небольших промышленных объектах, отдых на природе и т.д.). В этом случае решающую роль играет мобильность и стоимость когенерационной установки.

Предлагаемое устройство будет выполнено в виде переносного блока прямоугольной формы весом не более 25 кг со штуцерами для подключения выносных элементов (погружной насос, трубопровод и линии горячего водоснабжения).

Управление установкой осуществляется от блока управления на базе микроконтроллера. Пользователем задается мощность и необходимая температура воды. Система определяет наличие воды в баке. Если воды в баке нет, то система оповестит об этом. При желании можно использовать внешний источник воды, для этого необходимо задействовать погружной насос. После того, как вода будет набрана, система сравнит температуру воды с заданной температурой. Если температура воды окажется меньше заданной, происходит ее нагрев. Когда вода нагрета, т.е. температура воды окажется выше заданной, и при условии, что включен режим поддержания температуры, система будет работать в бесконечном цикле, сравнивая температуру воды с заданной и при необходимости нагревая ее. Если же этот режим не включен, тогда работа установки завершается, оповещая об этом пользователя.

---

<sup>†</sup> Гольдинер А.Я. Газопоршневые электроагрегаты / А.Я. Гольдинер, М.И. Цыркин, В.В. Бондаренко. – СПб.: Галерея Принт, 2006. – 240 с.

**AUTOMATIC COMPACT COGENERATION ENERGODEVICE**  
DIKAREV P.V., MAKAROV A.M., VOLKOV I.V., LAZAREV V.V.

*There has been considered the problems of the needs of the end consumer with warm water and electric power in a non-stationary use. Has been developed the scheme of compact autonomous cogeneration device and described how it works.*

*Keywords: cogeneration, mobile device, heating water, thermal energy, regulation, water-supply, power-supply, microcontroller.*

УДК 621.31:004

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БАЗЫ ДАННЫХ**

ДОМАНОВ В.И., УлГТУ, к.т.н., доцент, [andrew.domanov@gmail.ru](mailto:andrew.domanov@gmail.ru)

БИЛАЛОВА А.И., УлГТУ, аспирантка, [bilalova\\_alisa@mail.ru](mailto:bilalova_alisa@mail.ru)

ГОРШКОВ В.А., УлГТУ, студент, [gorshkovru@mail.ru](mailto:gorshkovru@mail.ru)

*Прогнозирование электропотребления предоставляет первоначальную информацию для планирования нормальных режимов работы при управлении энергохозяйством. В работе рассмотрены задачи и цели прогнозирования объемов энергопотребления с различными математическими моделями. Для решения задач прогнозирования построен прогноз с минимальной ошибкой потребления электроэнергии с учетом влияния метеофакторов. Для составления прогноза использованы методы регрессионного анализа, а также статистический анализ для оценки результатов прогноза. Приведенные исследования позволяют выработать рекомендации по формированию исходной базы и определить влияние отдельных компонентов на ошибки прогноза.*

*Ключевые слова: прогнозирование энергопотребления, корреляция, метеофактор, статистический анализ, регрессионный анализ.*

В условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы. Прогноз дает информацию

для дальнейшего планирования спроса, обеспечения надежного снабжения потребителей, уменьшения затрат на производство, поставку и поддержание качественных показателей электрической энергии и увеличение спроса. Прогноз нагрузки выполняет решающую роль при образовании цены на оптовом рынке электроэнергии и мощности и становится все более важным как для производителей, так и для потребителей. Количество электроэнергии, которая закупается на оптовом рынке, определяется в соответствии с прогнозом. В случае составления неточного прогноза, энергосбытовое предприятие вынуждено докупать либо продавать излишнюю электроэнергию по маленькой цене. Денежные затраты возлагаются на покупателей за счет увеличения цены на электроэнергию. Покупатели в этом случае могут перейти к конкурирующему гарантирующему поставщику для приобретения электроэнергии по более низкой цене. Все это приводит к значительным тратам поставщика, а также, в некоторых случаях, к штрафам на оптовом рынке вплоть до отстранения от участия в торгах.

Решение данной проблемы ставит задачу построения прогноза потребления электроэнергии с минимальной погрешностью и определения зависимости объемов энергопотребления от метеофакторов. Точность прогнозирования напрямую зависит от методик расчета. Существует множество моделей и методов краткосрочного и долгосрочного прогнозирования нагрузки, каждая из которых имеют определенные достоинства и недостатки. В работе анализируется ошибка прогнозирования в зависимости от объема и состава исходной информации [1].

Практический интерес при прогнозировании потребления электроэнергии представляет синтез и анализ временных рядов, которые характеризуют динамику вариантов суммарного электропотребления, в целях построения расчетных моделей этого процесса без привлечения информации о внутренней структуре потребления. Сопоставление фактических реализаций этого процесса и такой однофакторной модели может внести ясность в целесообразность учета дополнительной информации как о внутренних, так и о метеорологических (внешних) факторах для выявления реальных возможностей дальнейшего уточнения расчета запланированного суммарного электропотребления, предназначенных для текущего планирования режимов работы.

Если мы будем сравнивать количество выборок, составленных по значениям в течение определенного промежутка времени (квартал, месяц и т.д.), сделаем выводы о том, что изменение этих величин зависит от времени. Поэтому краткосрочное прогнозирование (на один шаг вперед)

можно делать на базе регрессионной модели по способу наименьших квадратов (МНК). Экспертные оценки дают нам понять, что на практике для прогнозирования по МНК достаточно использовать уравнение регрессии первого или второго порядка, которое можно представить в виде линейной или параболической функций времени [2].

Для построения прогнозных значений были исследованы данные, накопленные в МУП «Ульяновская городская электросеть» за три года. Исходные данные – количество потребленной электроэнергии ежемесячно за 2014 год, а также средняя температура и влажность окружающей среды г. Ульяновска. Исходной информацией для составления прогноза потребления электроэнергии могут выступать: предыдущие значения прогнозируемой величины  $x_1$ ; предыдущие значения величин  $x_i$ , связанных технически с переменной  $x_1$ . Процесс составления прогноза можно разделить на 3 этапа: составление исходной базы данных; выполнение математических вычислений (собственно прогнозирование); анализ результатов (определение ошибок) [3].

Рассмотрим модели прогнозирования электроэнергии, построенные с помощью регрессионного анализа с использованием линейных, степенных и квадратичных уравнений.

Первая модель получена на основе предыдущих трех лет с помощью линейной функции и имеет вид:

$$y = 374,51 - 4,24x_1 + 1,76x_2. \quad (1)$$

Анализ показывает, что для модели (1) вероятность ошибки  $5,33e^{-19}$ ,  $R^2 = 0,921$ . Среднее расхождение за год прогнозирования 4,02 %, а максимальная ошибка прогнозирования составляет 10,36 % и приходится на сентябрь.

Вторая модель построена на основе данных трех предшествующих лет с помощью квадратичной функции и имеет вид:

$$y = -8,34 + 13,07x_1 + 10,99x_2 - 0,13x_1^2 - 0,05x_1x_2 - 0,22x_2^2. \quad (2)$$

Для модели (2) вероятность ошибки  $4,84e^{-20}$ ,  $R^2 = 0,96$ . Среднее расхождение за год 3,7 %. Максимальная ошибка прогнозирования 8,79 % приходится на сентябрь.

Третья модель построена на основе данных трех предшествующих лет с помощью степенной функции, а также с зависимостью от данных предшествующего года и имеет вид:

$$y = 23,22 + 7,52x_1 + 8,82x_2 - 0,1x_1^2 - 0,14x_1x_2 - 0,05x_2^2 + 0,38y(t-12) - 0,04y(t-1) - 0,07y(t-2). \quad (3)$$

Для модели (3) вероятность ошибки  $1,02e^{-18}$ ,  $R^2 = 0,97$ . Среднее расхождение за год 3,41 %. Максимальная ошибка прогнозирования 6,54 % приходится на сентябрь.

В таблице сопоставляются полученные результаты.

#### Результаты ошибок прогнозирования

Номер формулы модели	Вероятность ошибки	$R^2$	Среднее значение ошибки, %	Максимальная ошибка, %
1	$5,33e^{-19}$	0,921	4,02	10,36
2	$4,84e^{-20}$	0,96	3,7	8,79
3	$1,02e^{-18}$	0,97	3,41	6,54

#### Выводы

1. При увеличении исходной базы данных точность значений прогнозирования увеличивается.

2. Имеется жесткая корреляционная связь между параметрами потребляемой электроэнергии и метеофакторами.

3. Наиболее точный прогноз с минимальной ошибкой прогнозирования дает третья модель, построенная с помощью степенной функции.

4. Среднее значение ошибки при прогнозе только по энергопотреблению практически не изменяется от объема потребления.

#### Источники

1. Алексеева А.Ю. Метод экспоненциального сглаживания линии тренда временного ряда в сочетании с методом индексов сезонности при краткосрочном прогнозировании электропотребления / А.Ю. Алексеева, В.П. Степанов, М.О. Скрипачев // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 137–143.

2. Яковлев Д.А. Прогнозирование потребления активной электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта / Д.А. Яковлев // Проблемы модернизации инфраструктуры Транссибирской магистрали: сб. науч. тр. – Чита: ЗаБИЖТ, 2005. – С. 170–172.

3. Билалова А.И. Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами / А.И. Билалова, В.И. Доманов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук: темат. сб. науч. тр. – Самара, 2014. – Т. 16, № 4(3). – С. 535–537.

4. Доманов В.И., Билалова А.И. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59–65.

УДК 681.521.2/681.525

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СИСТЕМ ДЛЯ КРУИЗ-КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

ДУДКА Н.А., КНИТУ–КАИ, к.т.н., dnovoros57@mail.ru

*Рассматривается оценка возможностей комплексирования оптических и инфракрасных систем для удержания грузового транспортного средства на трассе в пределах заданного габарита относительно разделительной полосы. В основу работы системы положено выделение контура границы между асфальтом и разделительной полосой на изображении трассы и оценка положения транспортного средства в пределах заданного габарита. В отсутствие разделительной полосы производится выделение контура между асфальтом и придорожным покрытием. Работа оптической системы в диапазоне видимого света дублируется работой инфракрасной системы с выделением контура границы между асфальтом и придорожным покрытием. Комплексирование систем позволяет использовать систему в ночное время суток и в зимнее время. Система предназначена для повышения безопасности движения транспортного средства.*

*Ключевые слова: адаптивный круиз-контроль, оптические системы, инфракрасные системы, алгоритмы выделения контуров изображений.*

В настоящее время разработки в области интеллектуальных транспортных средств (ИТСр) ведутся по трем основным направлениям:

- SmartPilot – создание «умных» помощников для водителей автомобилей;
- AirPilot – создание автомобилей с дистанционным управлением;
- RoboPilot – создание автомобилей, движущихся в режиме «автопилот» (без участия водителя).

В рамках направления SmartPilot давно развивается система адаптивного круиз-контроля. Как известно, круиз-контроль обеспечивает заданную скорость движения транспортного средства, адаптивный круиз-контроль обеспечивает не только заданную скорость, но и расстояние до впереди идущего автомобиля, в том числе и при его перестроении [1, 2]. Предлагаемый вариант комплексирования систем является расширением возможностей круиз-контроля применительно к большегрузным автомобилям при их движении по трассе с асфальтным покрытием. При этом применение тепловых камер ранее рассматривалось как визуальная помощь водителю, но не для целей адаптивного круиз-контроля [3].

Существуют различные методы выделения контуров на изображениях [4]. Для работы были выбраны операторы Собеля и Робертса. Обработка изображений производилась с использованием системы MatLab пакета Image Processing Toolbox. На рис. 1 представлено исходное изображение трассы без разметки. За основу взято изображение трассы М7 в 10 км от развязки Пестрецы – Набережные Челны (направление в сторону г. Москвы).

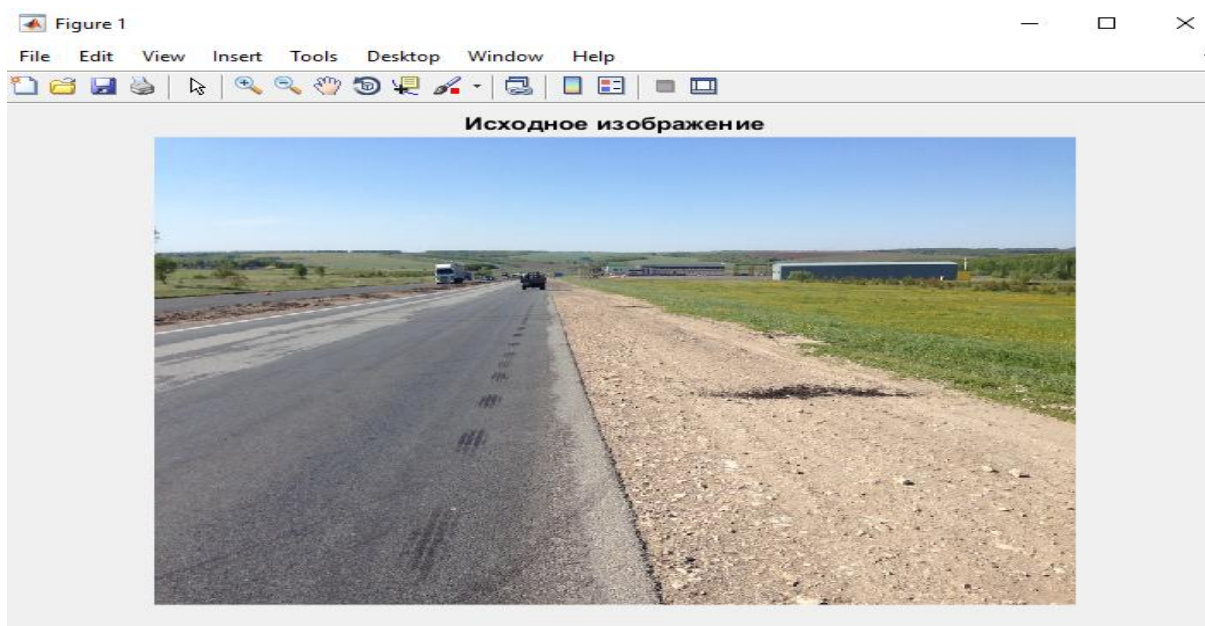


Рис. 1. Исходное изображение трассы без разметки

На рис. 2 представлено исходное изображение, обработанное с помощью оператора Собеля, на рис. 3 – исходное изображение, обработанное с помощью оператора Робертса. Анализ полученных контурных изображений показывает, что в отсутствие дорожной разметки граница «асфальт – придорожное покрытие» более четко выделяется оператором Собеля.



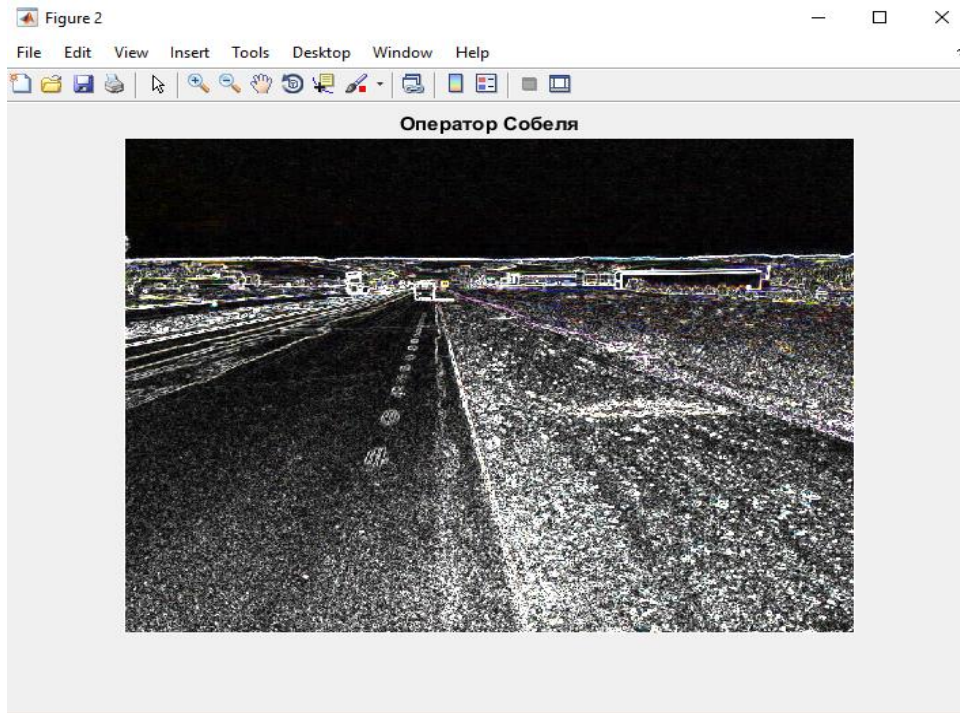


Рис. 2. Исходное изображение, обработанное оператором Собеля

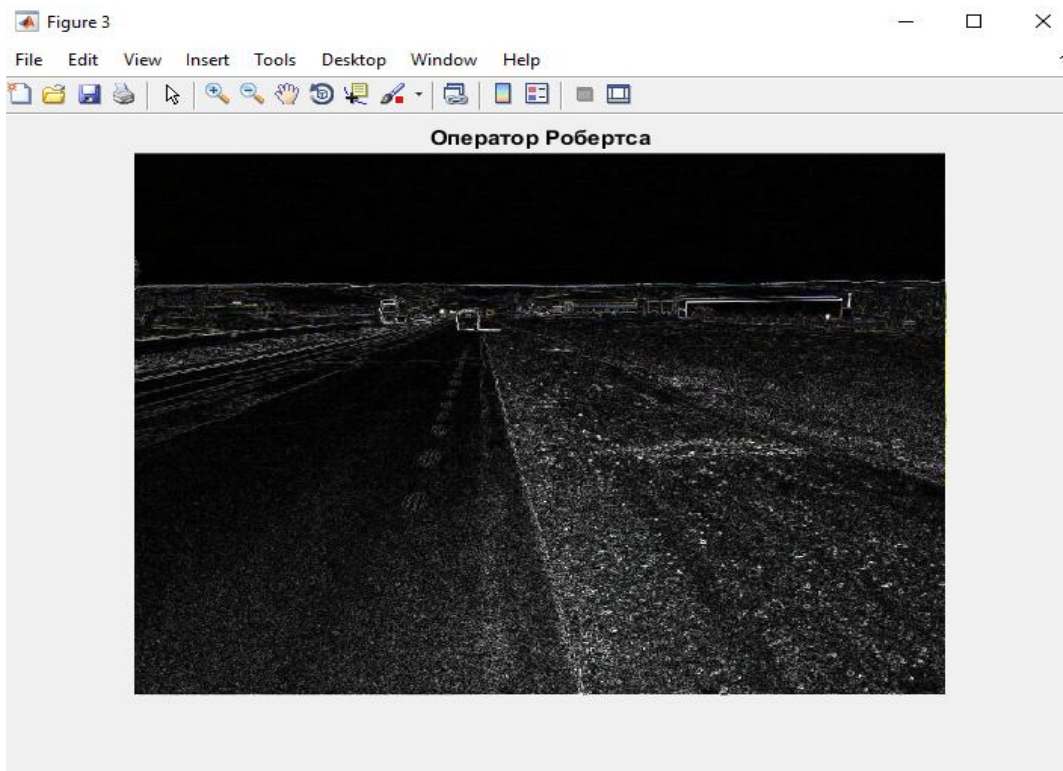


Рис. 3. Исходное изображение, обработанное оператором Робертса

На рис. 4 представлено исходное изображение трассы с разметкой. За основу взято изображение трассы М7 в 3 км от развязки Пестрецы – Набережные Челны (направление в сторону г. Москвы).



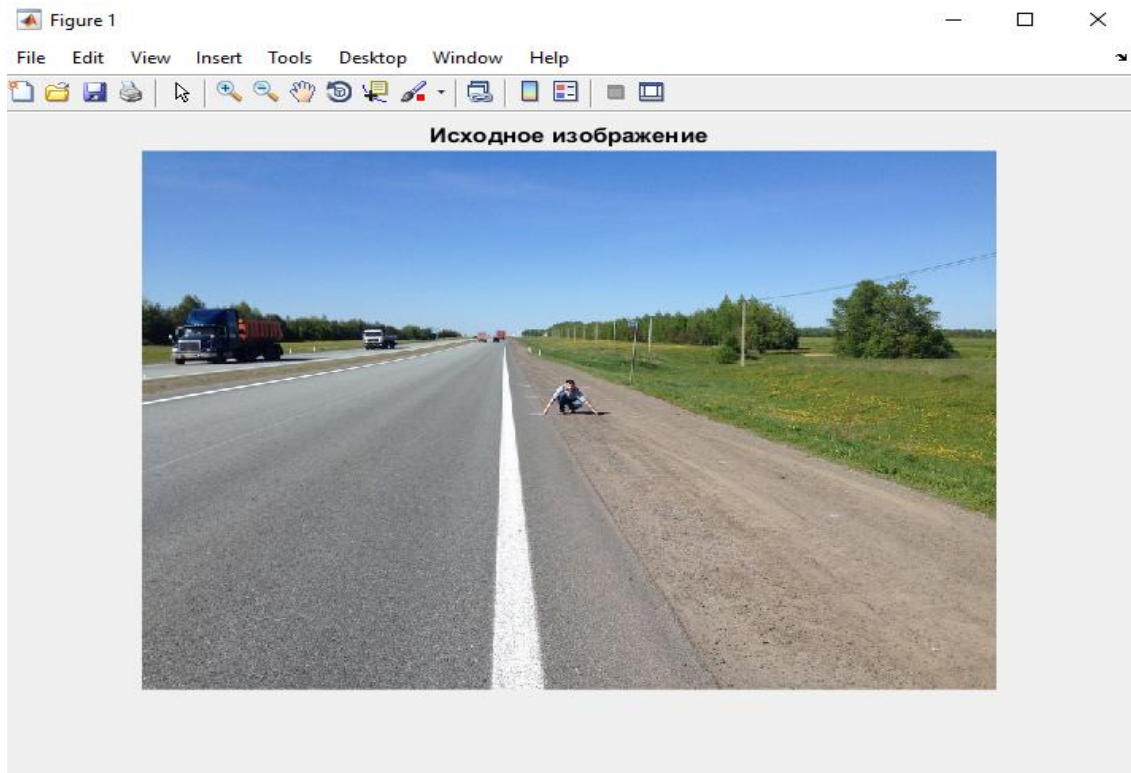


Рис. 4. Исходное изображение трассы с разметкой

На рис. 5 и 6 соответственно представлено исходное изображение, обработанное операторами Собеля и Робертса.

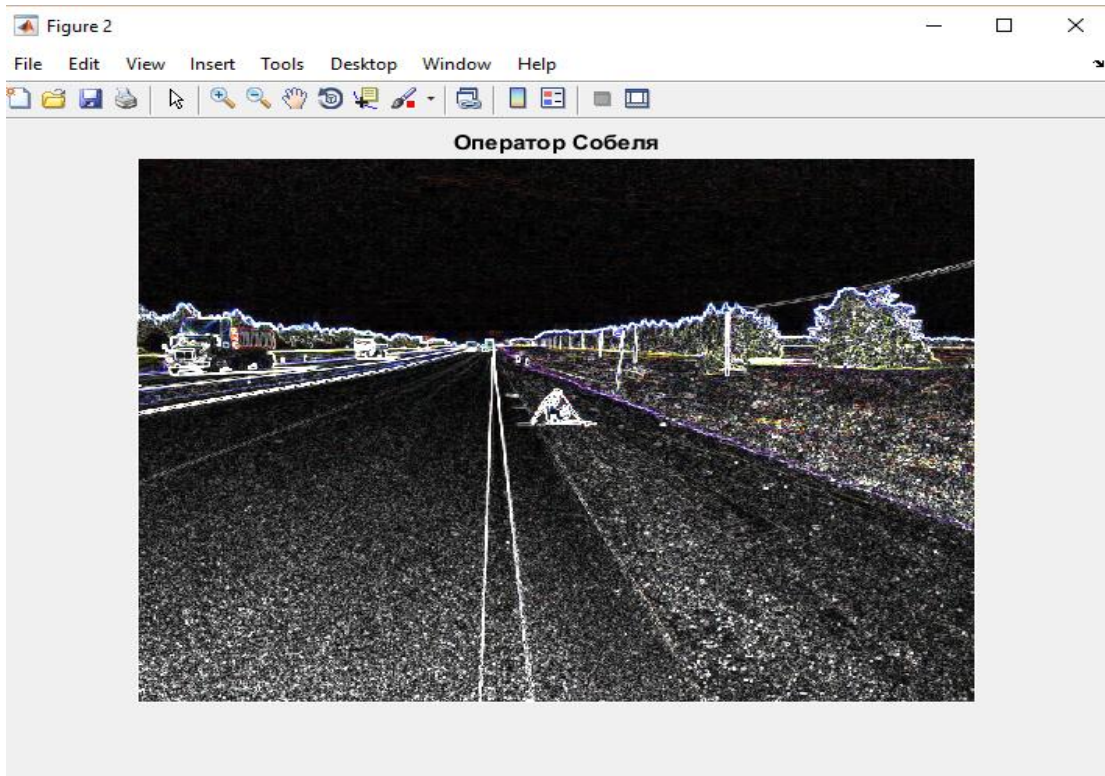


Рис. 5. Исходное изображение, обработанное оператором Собеля

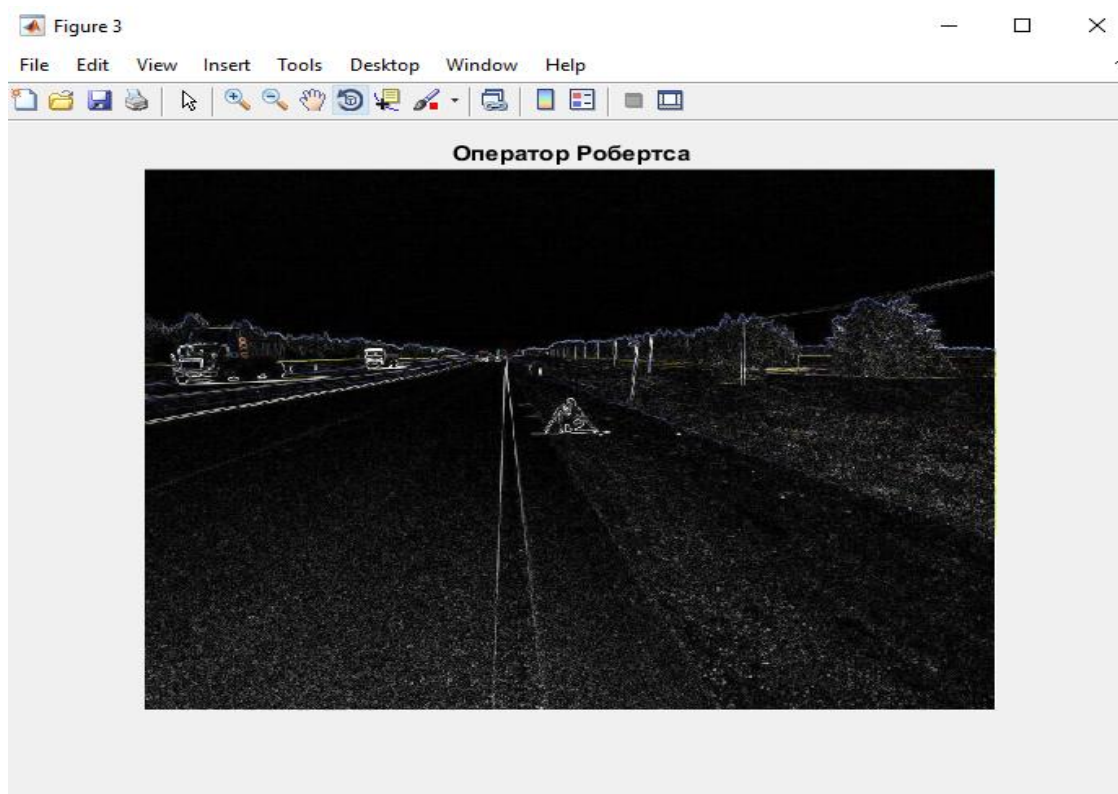


Рис. 6. Исходное изображение, обработанное оператором Робертса

Анализ контурных рисунков трассы с разметкой показывает, что выделение разметки на границе «асфальт – разметка – придорожное покрытие» более четко производится оператором Собеля. Инфракрасная съемка трассы была выполнена с помощью ИК-камеры Fluke Ti 32 (неохлаждаемый микроболометр), длина волны – 7,5–14 мкм, размер изображения – 640×480 пикселей в фокальной плоскости.

На рис. 7 и 8 соответственно представлены исходное изображение трассы с разметкой и его инфракрасное изображение. При проведении съемок зимой на инфракрасном изображении очищенной от снега трассы различается граница «асфальт – придорожное покрытие» (покрытое снегом). Обработка изображений производилась оператором Собеля, который подтвердил высокие результаты по выделению контуров изображения. Результаты проведенных экспериментов показали, что точность выделения контуров напрямую зависела от четкости фокусировки изображений, что, конечно, должно быть учтено при выборе ИК-датчика при проектировании системы.



Рис. 7. Исходное изображение трассы

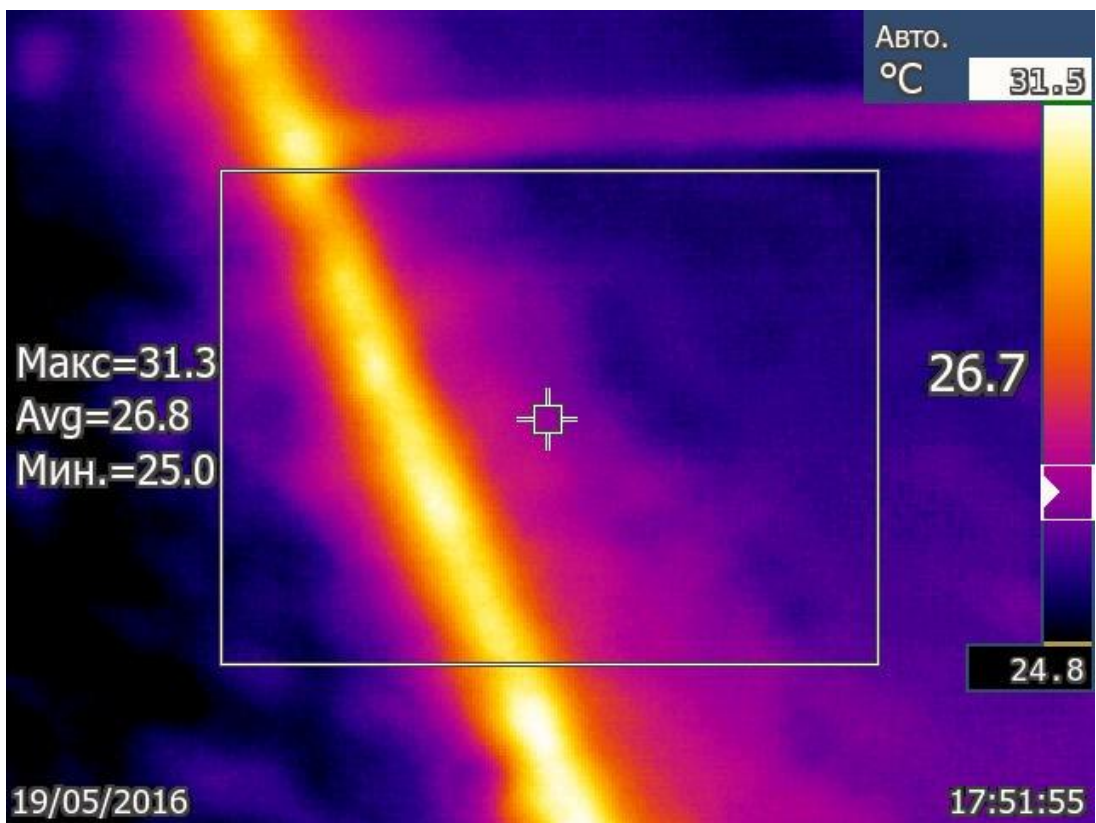


Рис. 8. Инфракрасное изображение трассы



Визуальный и аналитический анализ результатов экспериментов показывает, что при наличии разметки выделяются и разметка (оптическая система), и граница «асфальт – придорожное покрытие» (инфракрасная система). С привязкой к единой системе координат датчиков систем получают две выделенные контурные полосы, разделенные между собой: слева – разметка, справа – тепловая граница. Очевидно, что основным критерием задания габарита для удержания транспортного средства на трассе в этом случае выступает левая граница выделенной разметки. В отсутствие разметки таковым будет левая граница раздела «асфальт – дорожное покрытие» (оптическая система) и та же граница для инфракрасного изображения. В данном случае они практически сливаются в одну линию. Предполагается, что ночью осуществляется подсветка трассы ближним или дальним светом транспортного средства, что позволит выделить разметку. В отсутствие ее система работает в инфракрасном режиме. Режимы задания работы системы и ее переключение в этих случаях реализуются программно-аппаратным путем с выставлением режимов работы «день – ночь». Задание самого габарита производится в зависимости от ширины трассы и дорожных условий. Работа системы возможна как в автономном режиме, так и в режиме информационных сообщений водителю (звуковых или световых с проекцией указателя на лобовое стекло кабины).

Как показал анализ проведенных исследований, комплексирование оптических и инфракрасных систем позволяет расширить возможности адаптивного круиз-контроля за счет удержания транспортного средства на трассе в заданном габарите как в автономном режиме, так и в информационно-командном.

### **Источники**

1. Борщенко Я.А. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учеб. пособие / Я.А. Борщенко, В.М. Васильев. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2007. – 207 с.

2. Электрооборудование тракторов и автомобилей: учеб. пособие / сост. В.В. Морозов, Д.В. Гуляев, А.Н. Павлов. – Великие Луки: ВГСХА, 2011. – 226 с.

3. Сысоева С. Актуальные технологии и применение датчиков автомобильных систем активной безопасности. Инфракрасные тепловые камеры / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 11.

4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

## **COMPLEXATION SYSTEMS FOR CRUISE-CONTROL VEHICLES**

**DUDKA N.A.**

*This paper considers the assessment of the possibilities of multi-optical and infrared systems to keep the goods vehicle on the road within a predetermined dimension with respect to the dividing line to the right, if any, and in the absence of. The basis of the system is based on the selection contour boundaries between the asphalt and a dividing strip in the image track and score the vehicle position within predetermined dimensions. In the absence of a dividing line between the circuit selection is made with asphalt and road coating. Employment of the optical system in the visible range work duplicated infrared system, highlighting contour border between asphalt and roadside coating. Integration of systems allows to use the system at night and in winter. The use of the system intended to improve the safety of the vehicle.*

*Keywords: adaptive cruise-control, optical systems, infrared systems, algorithms for detecting image contours.*

УДК 681.521.2/681.525

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ В БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ**

ДУДКА Н.А., КНИТУ–КАИ, к.т.н., dnovoros57@mail.ru

*Рассматривается подход к управлению траекторией движения беспилотного транспортного средства (транспортно-грузовой платформы) на основе комплексного использования инерциальных измерительных систем и корреляционно-экстремальных систем навигации. Движение беспилотного транспортного средства осуществляется по заранее заданному обособленному маршруту самостоятельно или в составе колонны. В контрольных точках маршрута или точках технологической остановки производится оценка текущих координат, полученных с учетом измерений инерциальной системой, и результатов сравнения текущего изображения местности, полученного для конкретной точки местоположения транспортного средства, с эталонным изображением для этой же точки. Полученные результаты рассогласования между текущей траекторией движения и программной*

*используются для коррекции траектории движения транспортного средства на основе векторного управления. При этом изображения для различного времени суток могут быть получены для различных диапазонов спектра и преобразованы к контурному виду, что позволит расширить возможности применения транспортного средства и сократить время для принятия решения для корректировки маршрута движения.*

*Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, корреляционно-экстремальные системы навигации, эталонные и текущие изображения, инерциальная измерительная система, векторное управление.*

В настоящее время в рамках развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) ведутся разработки интеллектуальных транспортных средств (ИТСр). Разработки проводятся по трем основным направлениям:

- SmartPilot – создание «умных» помощников для водителей автомобилей;
- AirPilot – создание автомобилей с дистанционным управлением;
- RoboPilot – создание автомобилей, движущихся в режиме «автопилот» (без участия водителя).

К RoboPilot за рубежом на сегодня в некоторой мере уже можно отнести такие разработки легковых автомобилей, как Google (Гугломобиль на базе Toyota Prius), и грузовых автомобилей Daimler (Future Truck).

Основу оборудования транспортных средств RoboPilot-класса составляют системы датчиков (лидары, радары, видеокамеры стереозрения, обзорные камеры, датчики положения управляемых колес и т.д.) и системы обработки информации для принятия решений по управлению ИТСр (вычислительные средства и системы).

Проведенные недавно предварительные испытания в ограниченных условиях беспилотного грузового автомобиля КамАЗ-5350 показали обнадеживающие перспективы разработки и развития отечественных беспилотных транспортных средств. При этом нужно подчеркнуть, что имеющиеся отечественные разработки позволяют работать ИТСр в более сложных дорожных условиях (отсутствие дорожной разметки, неблагоприятные погодные условия, внезапное появление животных и других объектов на дороге и пр.), нежели их зарубежные аналоги.

Очевидно, что решение задач по расширению возможностей применения беспилотных транспортных средств на территории нашей страны будет диктоваться возможностями их применения в различных ситуационных и природно-климатических условиях. Это, в свою очередь, означает, что информационные сигналы системой ИТСр должны восприниматься для различных ситуаций (движение в транспортном потоке, движение по обособленному маршруту, движение по обособленному маршруту в составе колонны ИТСр и т.д.) и в условиях воздействия помех различного рода и различной интенсивности (дождь, туман, снег, пыль и др.). Кроме того, при движении по маршруту транспортного средства в системе будут накапливаться ошибки измерения расстояний и координат в контрольных (технологических) точках. Однако, с учетом всех выше перечисленных факторов, решения по управлению ИТСр в таких случаях должны быть однозначными и исключаящими аварийные ошибки.

В основу движения ИТСр по заданному маршруту положены принципы и алгоритмы, предложенные на сегодня как отечественными, так и зарубежными разработчиками. В силу новизны разработок, естественно, их существенное содержание не раскрывается. Тем не менее, очевидным является то, что в основе процесса управления движением ИТСр на маршруте лежит сравнение его текущего положения (состояния) с заданным программным (эталонным) положением и устранение выявленного рассогласования.

С учетом многоплановости указанной темы в данной статье рассматривается концепция построения беспилотного транспортного средства (БТС) в виде транспортно-грузовой автомобильной платформы для использования в карьерах и других подобных местах. Интерес к таким системам уже проявляет металлургический бизнес (Коммерсантъ, № 185 (5935), 6 октября 2016, с. 8).

В последние годы в практических приложениях автомобильной промышленности бурно развивается сегмент инерциальных систем. При этом опыт успешного применения полнофункциональных инерциальных модулей на основе MEMS-гироскопов и MEMS-акселерометров доказал, что они могут служить хорошей основой для проектирования полнофункциональной навигационной и измерительной системы автомобиля [1, 2]. Ошибки измерений, связанные с дрейфом акселерометров, предлагается корректировать с помощью приемников GPS [2]. Однако такое решение для коррекции дрейфа является не всегда продуктивным по ряду причин:

- отсутствие сигнала в темных для него зонах карьера;
- высокая стоимость использования системы и т.д.

При этом анализ отечественных разработок инерциальных систем для навигации в авиации, судовождении и наземном транспорте показывает, что их точностные характеристики выше, нежели зарубежные (АО Инерциальные технологии «Технокомплекса», г. Раменское, Московская область).

Представленные в работах [3–7] результаты проведенных исследований показали достаточно высокую эффективность применения корреляционно-экстремальных систем для высокоточного наведения и навигации летательных аппаратов (КЭСН). С учетом этого для навигации применительно к БТС предлагается, как вариант, совместное использование инерциальной системы и корреляционно-экстремальной системы навигации. Это может обеспечить его навигацию по заданному (программному) маршруту и компенсацию с определенной точностью дрейфа акселерометров и ошибок измерений инерциальной системой. Следует подчеркнуть и ряд преимуществ использования КЭСН для навигации транспортных средств перед традиционной системой, используемой для навигации летательных аппаратов:

- малые скорости движения (теоретически до 120 км/час);
- малый радиус корреляции используемого для целей навигации БТС геофизического поля;
- возможность использования нескольких геофизических полей (например, оптического, радиолокационного, теплового и др.);
- возможность проведения предварительной обработки текущих изображений в реальном масштабе времени.

Таким образом, в предлагаемом концептуальном варианте БТС в качестве элементов комплексированной системы используются КЭСН, работающая в оптическом диапазоне (включая ультрафиолетовый, инфракрасный диапазон и диапазон видимого света), и инерциальная навигационная система (ИНС).

Принцип функционирования предлагаемой системы поясняется на рис. 1. Здесь  $XOY$  – глобальная система координат, точка  $O$  начала координат совпадает с точкой начала движения БТС по программному маршруту. Указанные на маршруте точки ( $1 - 10$ ) совпадают с точками изменения направления движения и технологического останова (например, для загрузки БТС – точка 2, для выгрузки – точка 7). Маршрут готовится заранее, для маршрутных точек задаются координаты в глобальной системе координат и расстояния между ними. С БТС связана текущая



система координат  $X_T Y_T Z_T$ , начало которой связано с фиксированной точкой кинематики управления движением, а направление оси  $x$  совпадает с его продольной осью. Предполагается, что датчики КЭСН и ИНС расположены на высоте  $h$  в кабине БТС.

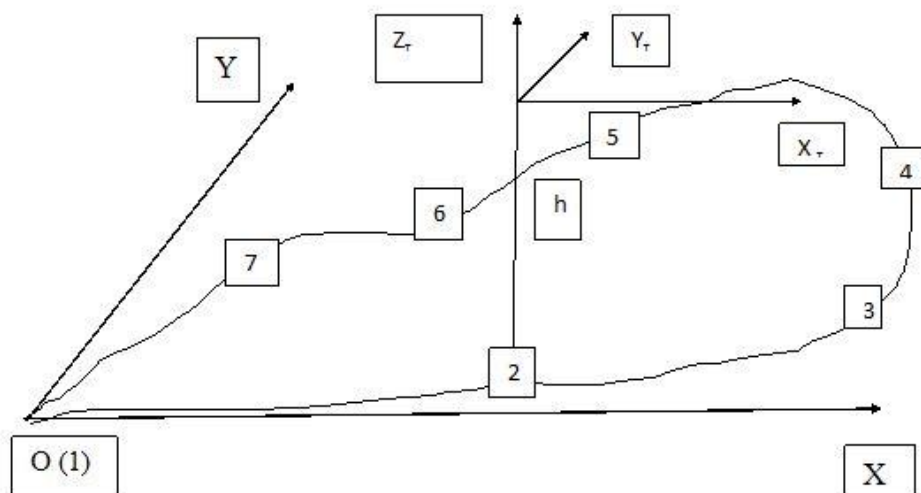


Рис. 1. Системы координат БТС: текущая и глобальная

С началом движения БТС из т.  $O(1)$  на основе показаний измеренных ИНС ускорений и направления оцениваются пройденное им текущее расстояние  $L_T$  и текущие координаты  $X_{1T} Y_{1T}$ , которые сравниваются с координатами  $X_2 Y_2$  точки 2. На основании данных координат вычисляется расстояние до точки 2 и угол  $\alpha$  направления дальнейшего движения, т.е. задается вектор движения. Таким образом, управление движением будет фактически векторным управлением. С учетом количественных показателей ошибок измерений ИНС в заданных маршрутных точках включается КЭСН. Формируемое текущее изображение окружающей местности сравнивается с эталонным изображением на основе использования выбранной критериальной функции [8, с. 25]. Определение положения экстремума (максимума) значения критериальной функции сходства изображений позволяет вычислить смещение центра текущего изображения относительно центра эталонного и на этой основе произвести оценку текущих координат местоположения БТС на маршруте движения. Для оценки точности определения экстремума критериальной функции было проведено моделирование с использованием пакета Image Processing Toolbox системы MatLab. На рис. 2 представлено эталонное изображение гипотетической трассы в области видимого света, на рис. 3 – текущее изображение как фрагмент (меньшая часть) эталонного изображения.



Рис. 2. Эталонное изображение



Рис. 3. Текущее изображение

Результаты вычислений критериальной функции представлены соответственно на рис. 4. По осям задана размерность эталонного изображения в пикселях. При проведении моделирования предполагалось, что искажения текущего изображения типа «размасштабирование» и «поворот» отсутствуют.

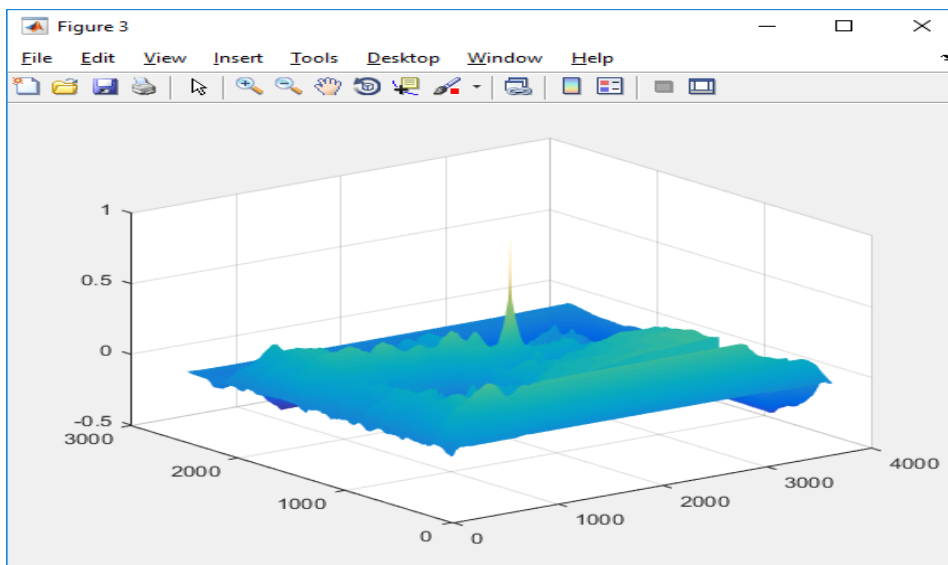


Рис. 4. График критериальной функции

Из графика видно, что имеется один экстремум, значение пика которого существенно выделяется на фоне других значений критериальной функции. Вычисленные координаты пика экстремума позволяют оценить рассогласование между положением текущего изображения относительно эталонного и таким образом оценить текущее местоположение (координаты) БТС, в соответствии с которыми и вводятся соответствующие поправки.

Следует подчеркнуть, что вышепредставленные изображения имеют избыточную информативность для решения поставленных задач. Для навигации предлагаемого БТС, как вариант, возможно использование стенов с бинарными изображениями различных фигур: окружность, крест, звезда, эллипс и т.п. При этом, например, использование окружности предпочтительнее, поскольку ее изображение инвариантно к искажению типа «поворот» относительно продольной оси  $x$  БТС, а заданные эталонные геометрические размеры позволяют оценить текущие искажения типа «масштабирование» и «поворот» в горизонтальной плоскости текущего изображения.

Как известно, контуры играют первостепенную роль в восприятии изображений объектов. При смене времени года, например, с лета на осень происходит смена окраски обстановки, окружающей трассу (травы, листьев деревьев). Для совмещения текущих (цветных) для этого времени года изображений потребуются соответствующие этому времени года эталонные изображения. С целью оценки информативности контурных изображений проводилась фильтрация «полных» изображений. Выделение контуров проводилось с использованием MatLab операторами Робертса, Превитта, Собеля. Эксперименты показали, что методы Превитта и Собеля обеспечивают сохранение большего числа деталей, нежели метод Робертса. Это относится и к бинарным изображениям. Поэтому для стабильного используемого маршрута движения целесообразным является «оконтурить» бинарные эталонные изображения выбранных фигур на этапе формирования маршрута, а текущие изображения будут обрабатываться в масштабе реального времени.

Как было отмечено выше, эксплуатация БТС будет производиться в различных погодных условиях. Дождь, снег, туман будут накладывать помехи на текущее изображение, искажая, в том числе, и его контуры. Для оценки точности выделения контуров изображений, формируемых в условиях воздействия помех, производилось моделирование в системе MatLab. При этом помеха формировалась в виде «гауссова шума» и накладывалась на изображение. В качестве метода выделения контуров

выбран алгоритм на основе критерия Уилкоксона [9]. Длина выборки варьировалась от 5 до 7 пикселей. В отличие от подхода, рассмотренного в работе [9], выделение контуров производилось на плоскости по координатам  $x$  и  $y$  изображений со скольжением по пикселям. В местах перехода яркости на изображениях наблюдается экстремум функции выделения контура. Установлено, что среднеквадратическое значение ошибки выделения границы контура возрастает с увеличением шума, однако для выбранного метода допустимым является даже соотношение сигнал/шум, равное единице. При этом совмещение изображений в КЭСН производится с ошибкой, допустимость которой для принятия решения по управлению определяется чувствительностью системы навигации БТС.

Таким образом, в предлагаемом концептуальном варианте БТС в качестве элементов комплексированной системы используются КЭСН, работающая в оптическом диапазоне, и ИНС. Точность работы предлагаемой системы зависит от точности работы ИНС и КЭСН. Именно выбранные элементы системы и алгоритмическое обеспечение ее работы позволят произвести оценку погрешностей навигации БТС. На сегодня ведется разработка имитационной модели навигации предлагаемого БТС, результаты которой могут быть положены в проект его реализации.

### Источники

1. Сысоева С. Новые сенсорные решения. Выход на новый уровень измерений / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2011. – № 8. – С. 59–68.
2. Скэннелл Б. Применение прецизионных MEMS-датчиков в новых навигационных приложениях / Б. Скэннелл // Компоненты и технологии. – 2011. – № 9. – С. 50–52.
3. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные системы навигации / В.К. Баклицкий, А.Н. Юрьев. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
4. Белоглазов И.Н. Корреляционно-экстремальные системы / И.Н. Белоглазов, В.П. Тарасенко. – М.: Сов. радио, 1974. – 392 с.
5. Дмитриевский А.А. Баллистика и навигация ракет / А.А. Дмитриевский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 104 с.
6. Красовский А.А. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А.А. Красовский, И.Н. Белоглазов, Г.П. Чигин. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
7. Алексеев В.И. Экстремальная радионавигация / В.И. Алексеев [и др.]; под ред. Р.И. Полонникова, В.П. Тарасенко. – М.: Наука, 1978. – 279 с.

8. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах: монография / под. ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.

9. Дудка Н.А. Повышение эффективности применения КЭСН в условиях воздействия помех: дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Дудка. – Казань.

## **THE USE OF CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEMS IN UNMANNED VEHICLES**

DUDKA N.A.

*An approach to the management of the movement path of the unmanned vehicle (transport-loading platform) based on the integrated use of inertial measurement systems and correlation-extreme navigation systems. The movement of the unmanned vehicle is carried to a predetermined separate business from their own or as a part of the column. The control points of the route, or stop points technological assesses current coordinates obtained based inertial measurement system, and the results of the comparison of the current image area obtained for a particular point of the vehicle position with the reference image to the same point. The results mismatch between the current program and the motion trajectory are used to correct the trajectory of the vehicle based on the vector control. In this case the image for different times of day can be obtained for the different spectral ranges and converted to mean contour, which will enhance the possibility of using the vehicle and reduce the time for a decision to adjust the travel route.*

*Keywords: unmanned vehicles; correlation-extreme navigation system; reference and current image; inertial measurement system; vector control.*

УДК 62-6

## **ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ**

ДЮРЯГИН А.М., КАЗ им. С.П. Горбунова – филиал ПАО «Туполев»,  
ведущий специалист

*Вопросам исследования и проектирования двигателей и трансформаторов в топливно-энергетическом комплексе посвящено большое количество работ. Практически в каждой из них ставится вопрос о повышении надежности и увеличении КПД при уменьшении себестоимости и трудозатрат при эксплуатации.*

*Ключевые слова: энергобезопасность, трансформатор, двигатель, магнитопровод.*

Вопрос энергобезопасности в современном мире становится все более актуальным. Техногенные катастрофы за последнее время стали достаточно частыми, а их последствия приобретают огромные масштабы.

У асинхронных двигателей наиболее слабое место – межвитковая изоляция обмотки статора. Проверить ее состояние и тем самым предотвратить аварию возможно различными способами. В основном методы проверки подразделяются на безразборные и с разборкой двигателя. Второй вариант имеет высокую достоверность, но требует достаточно большого количества времени, сил и расходов. Безразборные методы диагностики, позволяющие определить состояние двигателя, удобны при эксплуатации, но не имеют высокой достоверности.

В трансформаторах большое значение имеет качество масла. Контроль за соответствием показателей трансформаторного масла в основном основан на химическом анализе. При достаточной достоверности данному методу присущи и недостатки: долгий период проведения анализа, большая трудоемкость и себестоимость. Предлагаются различные альтернативные методы определения, которые достаточно сложны и требуют особой точности в измерениях.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что большую роль в долговечности и надежности работы играет среда, в которой работают электрические машины. И изоляция обмотки, и трансформаторное масло испытывают негативную нагрузку от самих элементов рабочих систем. В итоге возможны пробой в обмотке, перегревы и выход из строя агрегатов.

В этой связи логично предположить, что должны существовать способы по уменьшению влияния элементов электрических машин на изоляционные материалы.

Для устранения данной проблемы предлагается рассмотреть возможность улучшения характеристик магнитопровода в электротехнических устройствах. Как известно<sup>‡</sup>, магнитопровод выполняет несколько задач:

– магнитопровод совместно с размещенной на нем обмоткой при подключении последней к источнику электрической энергии создает магнитный поток определенной интенсивности и конфигурации;

---

<sup>‡</sup> Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2003. – С. 166–172.

- магнитопровод значительно усиливает магнитный поток;
- магнитопровод является основанием, на котором размещаются все необходимые дополнительные элементы.

Он также обеспечивает крепление устройства на каком-то основании.

Предлагается при выборе магнитопровода избегать пересечения ветвей магнитной цепи под углом, т.е. необходимо отдавать предпочтение скругленным формам, из-за чего снижается взаимное влияние магнитных моментов микрочастиц, размещенных на стыке ветвей магнитных цепей, тем самым магнитное сопротивление магнитопровода уменьшается. При выборе материала, из которого изготавливается магнитопровод, необходимо отдавать предпочтение тем, которые позволяют достичь максимального усиления свойств магнитопровода и использовать максимально возможное количество и массу данного материала, что позволит вовлечь наибольшее число магнитных моментов атомов (молекул) в усиление внешнего магнитного поля.

В результате частично снижается нагрузка на остальные элементы системы, уменьшаются затраты на перемагничивание, снижаются потери в системе, что, в свою очередь, ведет к уменьшению нагрева, снижению вибраций электрических машин и трансформаторов. В итоге снижается влияние негативных факторов на изоляционные материалы и повышается надежность.

Таким образом, одним из способов по повышению энергобезопасности в топливно-энергетическом комплексе является разработка электрических машин и трансформаторов с улучшенными характеристиками составных частей данных устройств.

УДК 621

## **КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

ЕГУДАНОВА Е.А., Казанский центр обслуживания потребителей (Горки),  
Дирекция по обслуживанию потребителей,  
филиал ОАО «Сетевая компания», специалист

*В настоящее время проблема компенсации реактивной мощности особенно остро обсуждается как энергетиками, так и потребителями.*

*Ключевые слова: реактивная мощность, конденсатор, емкость, диэлектрик, электрическая прочность, нагрузка, потребитель.*

Компенсация реактивной мощности (КРМ) – ключ к решению вопроса энергосбережения. Кто-то заметит: «Так это же решение для крупных предприятий с большим энергопотреблением». Возражу: «Значительное количество реактивной мощности в настоящее время потребляется источниками освещения, нелинейной нагрузкой, переносными электрическими инструментами, погружными насосами, электрическими отопительными котлами и системами приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования» (табл. 1). Повышенная потребляемая из сети реактивная мощность и снижение качества напряжения влекут за собой лишние расходы на оплату электроэнергии и ремонт выходящего из строя из-за плохого качества напряжения оборудования.

Таблица 1

## Реальное потребление электроэнергии бытовыми приборами

№ п/п	Наименование электроприемника	Номинальная или установленная мощность	Расчетные коэффициенты		Примечание
			спроса $K_c$	использования $K_{и}$	
1	Электрическое освещение гостиных	35–40 Вт/м <sup>2</sup>	0,8	0,8	Светильники с лампами накаливания
2	Электрическое освещение жилых комнат (спален)	25–30 Вт/м <sup>2</sup>	0,6	0,6	
3	Электрическое освещение кабинетов, библиотек, игровых и т.п.	30–35 Вт/м <sup>2</sup>	0,6	0,8	
4	Электрическое освещение кухонь	25–30 Вт/м <sup>2</sup>	1,0	0,8	
5	Электрическое освещение холлов, коридоров и т.п.	20–25 Вт/м <sup>2</sup>	0,8	0,8	
6	Бытовая розеточная сеть (теле-, радиоаппаратура, холодильники, пылесосы, утюги, бра, торшеры и пр.)	100 Вт/розетку	–	0,7–1,0	1 розетка на 6 м <sup>2</sup> общей площади: $K_{и} = 0,7$ при числе розеток более 50; $K_{и} = 0,8$ при числе розеток от 20 до 50; $K_{и} = 0,9$ при числе розеток от 10 до 20; $K_{и} = 1,0$ при числе розеток до 10
7	Электроплита	10,5 кВт/плита	0,8	1,0	
8	Стиральная машина	2,2 кВт	1,0	0,6	
9	Посудомоечная машина	2,2 кВт	0,8	0,8	
10	Сауна	4–12 кВт	0,8	0,8	
11	Джакузи с подогревом	2,5 кВт	0,8	0,8	



12	Душевая кабина с подогревом	3,0 кВт	0,6	0,8	
13	Водонагреватели аккумуляторные	1,5–2 кВт	0,6	0,8	
14	Водонагреватели проточные	5–18 кВт	0,4	1,0	
15	Кондиционеры	1,5–4 кВт	0,7	0,8	
16	Электрокамины	1–2 кВт	0,4	1,0	
17	Кухонные комбайны, кофеварки, электрочайники и т.п. (суммарно)	4–5 кВт на квартиру	0,3	1,0	
18	Теплый пол в комнате, кухне, прихожей	60 Вт/м <sup>2</sup>	0,5	1,0	
19	Теплый пол в ванной, сауне, детской	80 Вт/м <sup>2</sup>	0,3	1,0	
20	Электрические отопительные котлы	4–24 кВт	0,8	0,9	
21	Приборы электроотопления	70–100 Вт/м <sup>2</sup>	0,8	1,0	
22	Тепловентиляторы	1,5–2 кВт	0,9	0,9	
23	Электрокалориферы	3–6 кВт	0,4	0,9	
24	Газонокосилки	1,5–1,8 кВт	0,4	0,8	
25	Погружные насосы	0,75–1,5 кВт	0,8	0,9	
26	Персональные компьютеры	0,4–0,5 кВт	0,6	1,0	

В энергосистемах развитых стран мира, в том числе и в России, сети низкого напряжения формируют большую долю потребности в реактивной мощности, а их удаленность от генераторов электростанций определяет целесообразность генерации (компенсации) требуемых объемов реактивной мощности у потребителей и/или на подстанциях сетей низкого и среднего напряжения.

### **Целесообразность КРМ в сетях низкого напряжения**

Низкий коэффициент реактивной мощности в потребительских распределительных сетях обуславливает:

- ограничение способности силовых трансформаторов;
- падение и скачки напряжения в сети и на отдельных участках сети;
- перегрузку защитных и управляющих устройств со снижением срока их работы;
- существенное увеличение электрических потерь;
- необходимость увеличения сечения токоведущих кабелей и т.д.

Многую был проведен анализ звонков за 1-й квартал 2016 г. в контакт-центре ОАО «Сетевая компания». Поступило 260 звонков от потребителей, из них 126 на тему «качество электроэнергии». Все обращения, поступающие в ОАО «Сетевая компания» регистрировались и обрабатывались в информационной системе управления взаимоотношениями с клиентами (CRM), которая была внедрена в 2015 г. 126 обращений о качестве электроэнергии были занесены в САЦ для принятия корректирующих мер РЭС (ситуационно-аналитический центр ОАО «Сетевая компания») – табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица обращений, занесенных в САЦ  
(\*в том числе недостаточная мощность на объектах)

Жалоба на качество электроэнергии (тип проблемы)	Количество обращений за 1-й квартал 2016 г.
1. Продолжительные: колебания напряжения (высокое / низкое*) несимметрия 3-фазной системы провалы напряжения, импульсы напряжения, временное перенапряжение, фликер	20/67 3 21
2. Случайные	2
3. Выгорание фазы «Ноль»	2
4. Перебои и отказ в работе электроприборов	18
Итого:	132

Подробнее хотелось бы остановиться на недостаточной мощности на объектах. Все жилые (нежилые) объекты подключены к линиям электропередачи с напряжением 220–380 В с установленной мощностью. Для жилого дома это порядка 15 кВт. Именно подведенная мощность определяет максимальное значение нагрузки на внутреннюю сеть (количество одновременно включенных электроприборов) и ограничивается автоматическим выключателем.

Как правило, средняя потребляемая мощность составляет порядка 15–20 % от реально имеющейся в доме, но, учитывая периодические пики потребления, выделенная на объект мощность должна покрывать максимально допустимую нагрузку, даже если она непродолжительна.

В случае недостатка мощности сети выбивает автомат. Это случается, когда одновременно работает большое количество электроприборов: включен кондиционер, на кухонной плите работают все конфорки, работает СВЧ-печь, включился насос в бассейне и пр. В этой ситуации вы можете только выбрать, какой из электроприборов отключить, чтобы обеспечить работу остальной электротехники. Чтобы увеличить мощность, нужно пройти полный цикл технологического присоединения объекта к инженерным сетям. Более того, на сегодняшний день увеличение и присоединение электрической мощности, например, в Татарстане достаточно проблематично: бывает и так, что присоединение к ЛЭП невозможно.

Поэтому КРМ «на местах», у потребителя, по одной из наиболее целесообразных в каждой конкретной ситуации схем (централизованная, групповая, индивидуальная или комбинированная) остается самым эффективным и разумным способом снижения уровня энергозатрат и повышения качества передаваемой / потребляемой электроэнергии.

Вместе с тем, государство по факту не в состоянии обеспечить даже крупных потребителей электрической энергии установками КРМ ни по схемам лизинга, ни с помощью государственных преференций – самим потребителям в виде действенных и ощутимых налоговых льгот или банковским институциям для снижения кредитных ставок на целевые займы по приобретению установок КРМ. Т.е. пока проблема КРМ на местах полностью выведена в плоскость потребителя, и каждый владелец нагрузки продолжает решать вопрос необходимости использования установок КРМ, руководствуясь собственными критериями для оценки целесообразности принимаемого решения.

В распределительных сетях коммунально-бытовых потребителей, содержащих преимущественно однофазную, коммутируемую по индивидуальному режиму нагрузку, устройства КРМ применяются еще недостаточно, но расход электроэнергии в жилом секторе увеличивается, поэтому рассмотрение установки устройств компенсации у таких абонентов становится актуальной темой. Среди многочисленных факторов, оказывающих влияние на эффективность работы системы электропитания (СЭС), одно из приоритетных мест занимает именно вопрос КРМ.

Следует принять во внимание, что за последнее десятилетие расход электроэнергии жилищного сектора увеличился (табл. 3), средняя

статистическая мощность силовых трансформаторов городских муниципальных сетей достигла 325 кВАр, а зона использования трансформаторной мощности сместилась в сторону увеличения и находится в пределах 250...400 кВАр.

Таблица 3

## Расчетные коэффициенты реактивной мощности жилого сектора

Потребитель электроэнергии	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
Жилые дома с электрическими плитами	0,98	0,2
Жилые дома с плитами на газообразном или твердом топливе	0,96	0,29
Хозяйственные насосы, вентиляционные и другие санитарно-технические устройства	0,8	0,75
Лифты	0,65	1,17

Чтобы понять суть процессов, протекающих в конкретной электросети, нужна достоверная техническая информация. Для этого необходимо проводить мониторинг параметров электросети, снимая и фиксируя специальными приборами одновременно несколько десятков характеристик электросети с интервалом в доли секунды (токи, напряжения, активные, реактивные и полные мощности по каждой фазе,  $\cos \varphi$ , гармонический состав сети и т.д.). Полученную информацию необходимо обрабатывать, анализировать, и только после этого можно будет с уверенностью сказать, что за процессы протекают в конкретной электросети и, самое главное, где, каким образом и сколько нужно компенсировать реактивной мощности, чтобы электроэнергия, получаемая от поставщика, имела бы необходимые показатели качества и расходовалась самым экономичным образом, без потерь, а еще и с экономией электроэнергии.

Обработка графиков нагрузки (рис. 1, 2), снятых на вводе многоквартирного жилого дома, показала: в течение суток среднее значение коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) менялось от 0,88 до 0,97, а пофазные – от 0,84 до 0,99. Соответственно, суммарное потребление реактивной мощности колебалось в пределах 9–14 кВАр, а пофазное – от 1 до 6 кВАр.

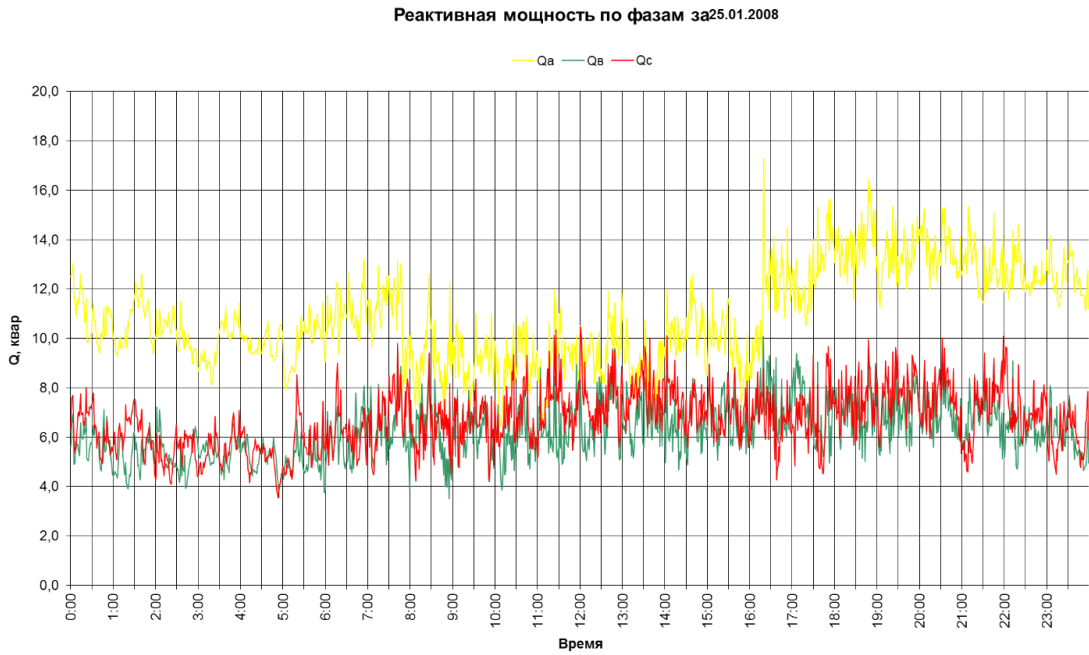


Рис. 1. График суточного потребления реактивной мощности по фазам за 25.01.2016



Рис. 2. График суточного потребления активной и реактивной мощности на вводе многоквартирного жилого дома

Таким образом, постоянное наличие в перетоках мощности СЭС реактивной составляющей приводит к значительным потерям электроэнергии в распределительных сетях крупных городов и необходимости их возмещения за счет дополнительных источников генерации.

Сложность решения данного вопроса во многом связана с неравномерным потреблением реактивной мощности по отдельным фазам (рис. 1), затрудняющим применение традиционных для промышленных сетей установок КРМ на базе трехфазных батарей конденсаторов, управляемых регулятором, установленным в одной из фаз компенсируемой сети.

Для повышения резерва мощности городских СЭС представляет интерес опыт наших зарубежных коллег, в частности наработки дистрибьюторской электроэнергетической компании Edeinor S.A.A. (Перу) (она входит в специализирующуюся на генерации, передаче и распределении электроэнергии в ряде южноамериканских стран группу Endesa (Испания)) по КРМ в низковольтных распределительных сетях на минимальном удалении от потребителей. По заказу Edeinor S.A.A. один из крупнейших производителей низковольтных косинусных конденсаторов – компания EPCOS AG – выпустила серию однофазных конденсаторов HomeCap, адаптированных для КРМ мелких коммунально-бытовых нагрузок (рис. 3).



Рис. 3. Конденсатор HomeCap

Номинальная емкость конденсаторов HomeCap варьируется от 5 до 33 мкФ, что позволяет компенсировать индуктивную составляющую реактивной мощности от 0,25 до 1,66 кВАр (при напряжении сети 50 Гц в диапазоне 127–380 В).

В качестве диэлектрика используется усиленная полипропиленовая пленка, электроды выполнены металлическим напылением – технология МКР (metallized kunststoff polypropylene). Намотка секции – стандартная круглая, внутренний объем заполнен нетоксичным полиуретановым компаундом. Как и все косинусные конденсаторы компании EPCOS AG, конденсаторы серии HomeCap обладают свойством «самовосстановления» при локальном пробое обкладок.

Цилиндрический алюминиевый корпус конденсаторов изолирован с помощью термоусадочной поливиниловой трубки, а сдвоенные ножевые выводы электродов закрыты диэлектрическим пластиковым колпаком (степень защиты IP53), тем самым обеспечивается полная безопасность при эксплуатации в бытовых условиях, подтвержденная соответствующим сертификатом стандарта UL 810 (лаборатории по технике безопасности США).

Встроенное устройство, срабатывающее при превышении избыточного давления внутри корпуса, автоматически отключает конденсатор при его перегреве или лавинном пробое секции. Диаметр конденсаторов HomeCap –  $(42,5 \pm 1)$  мм, а высота, в зависимости от величины номинальной емкости, – 70–125 мм. Вертикальное удлинение корпуса конденсатора в случае срабатывания защиты от превышения внутреннего давления – не более 13 мм.

Подключение конденсатора осуществляется двухжильным гибким кабелем сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  и длиной 300 или 500 мм. Допустимый нагрев изоляции кабеля –  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Эксплуатация конденсаторов HomeCap возможна внутри помещений при температуре окружающей среды  $-25\dots+55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отклонение номинальной емкости составляет  $-5 / +10 \%$ . Потери активной мощности не превышают 5 Вт на кВАр. Гарантийный срок службы – до 100 000 ч.

Крепление конденсаторов HomeCap к монтажной поверхности осуществляется хомутом или присоединенным к днищу болтовым ( $M8 \times 10$ ) соединением.

На рис. 4 показана установка конденсатора HomeCap в ящике учета. Конденсатор (в правом нижнем углу) подключен к клеммам электросчетчика.



Рис. 4. Ящик учета с установленным конденсатором HomeCap

Конденсаторы HomeCap выполнены в полном соответствии с требованиями стандарта IEC 60831-1/2.

По данным Edeinor S.A.A., установка конденсаторов HomeCap суммарной мощностью 37 000 кВАр в 114 000 домовладений района Инфантас северной части Лимы повысила средневзвешенный коэффициент мощности распределительной сети с 0,84 до 0,93, что позволило ежегодно экономить примерно 280 кВт·ч на каждый присоединенный кВАр реактивной мощности, или всего около 19 300 МВт·ч в год. Кроме того, учитывая качественные изменения характера бытовой нагрузки (импульсные источники питания электроприборов, активные балласты энергосберегающих ламп), искажающие синусоидальность напряжения сети, одновременно при помощи конденсаторов HomeCap удалось снизить уровень гармонических составляющих THDU в среднем на 1 %.

В отличие от городских, необходимость КРМ для низковольтных сельских распределительных сетей никогда под сомнение не ставилась.

Одной из технической сложностей практического выполнения рекомендации по 80 % КРМ непосредственно в низковольтных сельских сетях является отсутствие конденсаторов, приспособленных к монтажу на ВЛ. По расчетам среднее значение остаточной (не допускающей режима перекомпенсации) реактивной мощности при передаче по ВЛ 0,4 кВ активной мощности 50 кВт для смешанной, с преобладанием (более 40 %) коммунально-бытовой нагрузки составило 8 кВАр, следовательно, оптимальная номинальная реактивная мощность таких конденсаторов должна быть в пределах единиц – нескольких десятков кВАр.

Рассмотрим систему КРМ, применяемую на ВЛ низковольтных сетей г. Джайпур (штат Раджастан, Индия) энергетической компанией Jaipur Vidyut Vitran Nigam Ltd, на базе конденсаторов серии PoleCap® (рис. 5) производства EPCOS AG. Проведенный мониторинг СЭС, содержащей около 1 000 МВА установленной мощности 4 600 трансформаторов 11/0,433 кВ единичной мощностью 25–500 кВА, показал: летняя загрузка трансформаторов составила 506 МВА (430 МВт), зимняя – 353 МВА (300 МВт); средневзвешенный  $\cos j$  – 0,85; полные потери (2005 г.) – 17 % от объема отпуска электроэнергии.





Рис. 5. Конденсатор серии PoleCap®

В ходе пилотного проекта по КРМ в узлах присоединения к трансформаторам низковольтных нагрузок, непосредственно на опорах ВЛ 0,4 кВ, было установлено 13 375 конденсаторов PoleCap суммарной реактивной мощностью 70 Мвар, в том числе 13 000 конденсаторов 5 кВАр, 250 – 10 кВАр, 125 – 20 кВАр. В результате значение  $\cos \varphi$  повысилось до 0,95, а потери снизились до 13 %.

Данные конденсаторы (рис. 3, 5) – модификация хорошо зарекомендовавшего себя типа металлопленочных конденсаторов, выполненных по технологии МКР/МКК (metalized kunststoff kompakt) – одновременное увеличение площади и повышение электрической прочности контакта слоя металлизации электродов за счет сочетания ровного и волнового среза кромок пленки, укладываемой с характерным для МКР-технологии небольшим смещением витков. Кроме того, серия PoleCap включает ряд трехфазных конденсаторов реактивной мощностью 0,5–5 кВАр, выполненных по традиционной технологии МКР.

Усовершенствование базовой конструкции серийных МКК-конденсаторов обеспечило возможность непосредственной (без дополнительного футляра) установки конденсаторов PoleCap на открытом воздухе, во влажных или запыленных помещениях. Корпус конденсатора выполнен из 99,5 %-го алюминия и заполнен инертным газом (рис. 6).

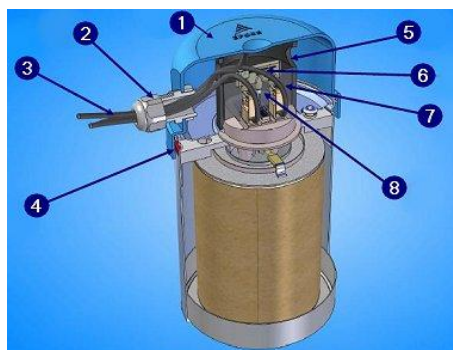


Рис. 6. Конструкция МКК-конденсаторов

На рис. 6 под прочной пластиковой крышкой 1 находится герметичное, окруженное пластмассовым кольцом 5 и залитое эпоксидным компаундом 7 исполнение клеммной колодки 8, обеспечивающее степень защиты IP54.

Подключение производится через уплотнение кабельного ввода 2 трех одножильных 2-метровых кабелей 3 и керамического модуля разрядных резисторов 6 обжатием и пайкой контактных соединений. Для удобства визуального контроля срабатывания защиты от превышения избыточного давления на удлиненной части корпуса конденсатора появляется ярко-красная полоса 4.

Таким образом, опыт применения КРМ в коммунально-бытовых сетях развивающихся стран с высоким уровнем сетевых потерь показывает, что даже простые технические решения, например использование нерегулируемых батарей специальных типов косинусных конденсаторов, могут быть экономически весьма эффективными.

УДК 62-83:621.313.3

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА**

ЖУРАВЛЕВ А.М., ЮУрГУ (НИУ), аспирант

СЫЧЕВ Д.А., ЮУрГУ (НИУ), аспирант

ИМАНОВА А.А., ЮУрГУ (НИУ), магистрант

*Рассматриваются пути повышения надежности электроприводов жилищно-коммунального хозяйства. Построены зависимости вероятности безотказной работы  $P$  комплекса «полупроводниковый преобразователь – двигатель» от запаса мощности. В качестве показателя сравнения решений приняты затраченные средства на установленное электрооборудование. Повышение показателя вероятности безотказной работы электропривода возможно не только за счет увеличения габаритной мощности силовой части, но и, например, путем изменения количества фаз. Отмечено, что надежность системы возможно улучшить при использовании синхронного реактивного электропривода с импульсно-векторным управлением в сочетании с резервированием полупроводникового преобразователя. Смоделирован комплекс «силовой полупроводниковый преобразователь – синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения». Представлены результаты математического моделирования*

*синхронного реактивного электропривода с импульсно-векторным управлением: определен характер зависимости удельных показателей электропривода при изменении количества фаз.*

*Ключевые слова: надежность, синхронная реактивная машина независимого возбуждения, импульсно-векторная система.*

В настоящее время во многих отраслях тяжелой и легкой промышленности, а также в энергетике и жилищно-коммунальном комплексе наиболее остро стоит вопрос надежности систем, обеспечивающих бесперебойный технологический процесс, работающих на синхронных частотно-регулируемых электроприводах. При нарушении в работе любого из элементов системы электропривода происходит сбой технологического процесса, что впоследствии, в лучшем случае, приведет к простоям оборудования и большим денежным затратам, в худшем – к угрозе жизни и здоровью людей.

Наиболее частой причиной отказа в рабочей системе электропривода являются отключение преобразователя частоты по максимальной токовой защите и неисправности в работе системы возбуждения синхронной машины.

Как правило, вероятность безотказной работы  $P$  электроприводов в жилищно-коммунальном хозяйстве составляет не более 90 %, что достигается за счет увеличения установленной мощности силового электрооборудования на 10 % от расчетной. К сравнению: для объектов и предприятий специального назначения показатель  $P$  составляет 99–99,9 %. В [1] авторы обращают внимание, что для снижения отказов в 3 раза вероятность  $P$  необходимо увеличить до 98 %.

Следовательно, повышение показателей надежности электроприводов жилищно-коммунального комплекса является актуальной проблемой.

### **Анализ путей повышения надежности показателей электропривода**

На сегодняшний день надежность любой системы улучшают двумя основными способами: введением избыточности системы [1] и применением принципиально новых технических решений, имеющих высокий надежностный показатель. В первом случае основные элементы системы электропривода умышленно выбирают с завышенной мощностью. Во-втором случае можно, например, отказаться от традиционной конфигурации схем силовых цепей, использовать  $m$ -фазные независимые источники питания на каждую фазу, не увеличивать установленную мощность полупроводникового преобразователя выше номинальной, а надежность системы обеспечить за счет использования резервного

преобразователя мощностью, равной  $p/m$ , где  $p$  – суммарная установленная мощность электропривода.

Проанализировав первый способ, можно сделать следующий вывод: вероятность безотказной работы  $P$  увеличивается по мере завышения установленной мощности основных элементов электропривода (электрической машины и полупроводникового преобразователя) [2]. На рис. 1 показана зависимость величины безотказной работы электродвигателя от относительного значения затрат на увеличение запаса мощности электрической машины. За единицу значения стоимости был принят двигатель с номинальной мощностью, соответствующей условиям допустимого нагрева, с надежностным показателем, равным 0,9.

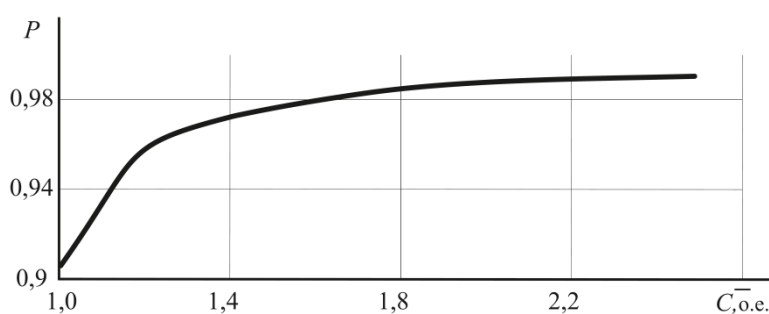


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от относительных затрат  $\bar{C}$  на электромеханический преобразователь с диапазоном запаса по мощности от 75 до 200 кВт

Аналогично была построена зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от затрат  $\bar{C}$  на полупроводниковый преобразователь (рис. 2). Кривая на рис. 2 качественно совпадает с кривой на рис. 1, но при этом для обеспечения высоких надежностных показателей увеличиваются относительные затраты  $\bar{C}$ . Дело в том, что доля затрат на полупроводниковый преобразователь составляет большую часть общей стоимости установленного электрооборудования [3].

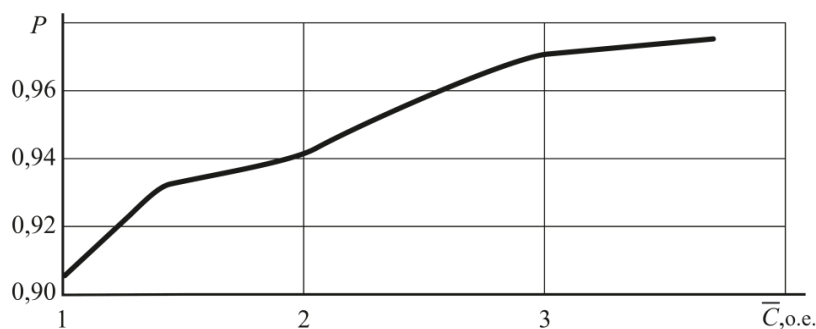


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от относительных затрат  $\bar{C}$  на полупроводниковый преобразователь с диапазоном запаса по мощности от 75 до 200 кВт

Так как затраты на полупроводниковое оборудование для повышения надежного показателя, близкого к 1, имеют неоправданно высокую стоимость, актуальной задачей встает предложение новых схемотехнических решений силовых цепей полупроводникового оборудования и электрической машины с показателем вероятности безотказной работы 0,98–0,99.

### Импульсно-векторная схема управления

Электропривод на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) [4], отличающейся простотой конструкции статора и «холодным» ротором, в наибольшей степени отвечает требованиям надежности современных систем [5]. Уже имеющаяся схема силовых цепей системы электропривода выполняется многофазной с индивидуальными источниками питания [6]. Для обеспечения простоты схемы управления данным электроприводом предлагается применение структуры с импульсно-векторным управлением [7]. Для работы предложенной структуры необходимо обеспечить подключение фазных обмоток двигателя  $M$  напрямую к питающей сети (рис. 3, обмотки 2–4), а концы (рис. 3, обмотки 5–7) – к неуправляемому выпрямителю. На рис. 3 схема имеет  $m = 3$  фазы. В общем случае используется  $m$ -фазный выпрямитель. На случай отказа одного из плеч моста 9 (рис. 3) предусмотрен резерв, мощность которого соответствует  $p/m$ , где  $p$  – номинальная мощность электропривода.

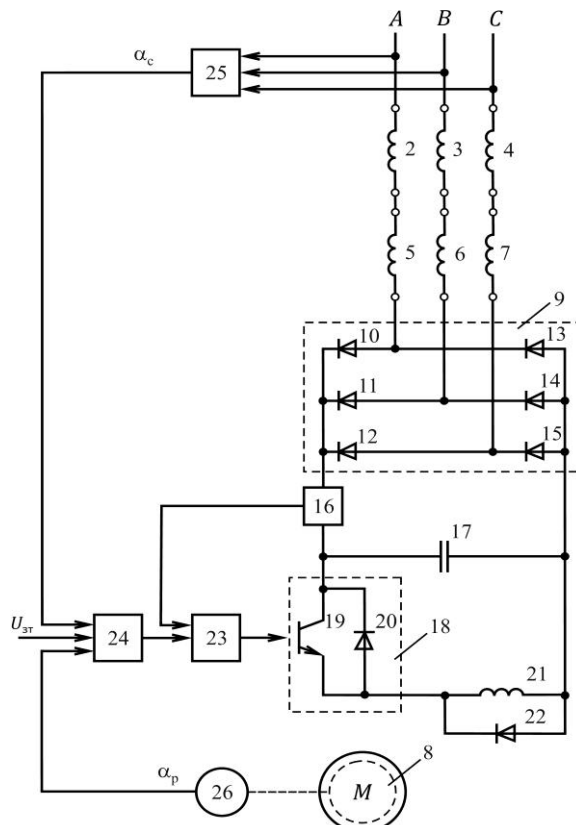


Рис. 3. Электропривод с импульсно-векторным управлением СРМНВ

Идея работы схемы следующая: на транзисторный блок 18 в функции положения ротора через датчик положения 26 и обобщающего вектора напряжения  $\alpha_c$  происходит формирование управляющих импульсов так, чтобы блок 18 по обмоткам статора пропускал ток лишь в те отрезки времени, когда взаимное положение полюсов явнополюсного ротора и магнитного поля, создаваемого токами статора, соответствует двигательному электромагнитному моменту электрической машины.

Главное преимущество данной системы в том, что независимо от выбранного количества фаз  $m$  транзисторный блок 18 в любом случае состоит из одного транзистора, что значительно повышает надежность предложенной системы. В случае отказа транзистора работа системы продолжается благодаря введению в цепь резервного аналогичного полупроводникового элемента.

Адекватность предлагаемой схемы была проверена на математической модели электропривода, состоящей из двух блоков. Реализация первого блока осуществлялась в соответствующем программном обеспечении математического моделирования [8], в виде дифференциальных уравнений полных производных с учетом в статорных обмотках с активным сопротивлением  $r$  уравнения баланса напряжений, а также, для вращающихся тел с угловой скоростью  $\omega$ , уравнения Лагранжа. Для определения передаточной функции каждого из звеньев полупроводниковый преобразователь можно представить аperiодическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания [9], учитывающим инерционные свойства микропроцессорного блока.

Для решения второго блока (модель магнитной системы) [10], включающего в себя уравнения частных производных, использовалось соответствующее программное обеспечение для расчетов математического моделирования, так как данная модель требовала учета распределения магнитных полей в электрической машине, решение которых осуществляется методом конечных элементов в вариационной постановке [11]. Расчет дифференциальных уравнений этого блока проводился в том же программном обеспечении [12]. Результирующий электромагнитный момент, создаваемый двигателем, использовался при расчетах в первом блоке [13].

В двигателе и полупроводниковом преобразователе при моделировании электропривода варьировалось количество фаз  $m$  (рис. 4). Момент сопротивления на валу двигателя при расчете принимался номинальным. Показанные зависимости позволяют выбрать оптимальное число фаз преобразователя в зависимости от мощности по критерию надежности. Так, например, в диапазоне мощностей от 2 до 3 МВт самыми надежными являются 2-, 3- и 6-фазные схемы, при мощностях от 4,5 МВт наиболее

предпочтительно использовать 3-, 6- или 12-фазный преобразователь. Однако увеличение количества фаз  $m$  ведет к увеличению количества вентилялей и стоимости полупроводникового преобразователя [14].

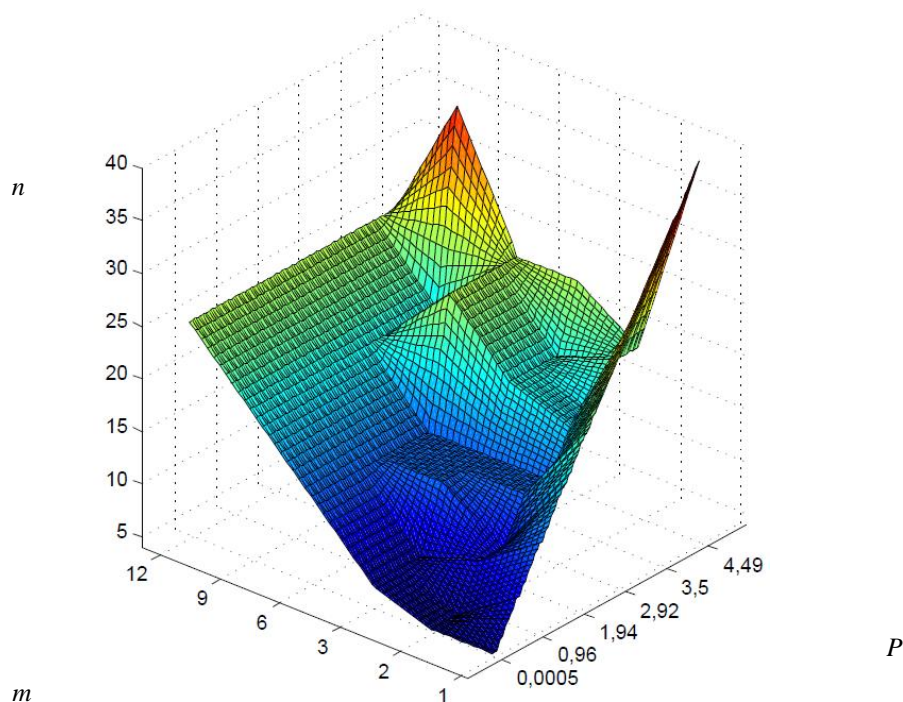


Рис. 4. Зависимость количества силовых транзисторов в функции количества числа фаз преобразователя и диапазона мощности электропривода

В первом случае оптимальный выбор системы управления электропривода заключается в сравнении двух схем по наименьшей стоимости силового оборудования и лучшему надежностному показателю [15]. По кривой на рис. 1 производится расчет цены электропривода по условию высокой возможности безотказной работы.

Во втором случае для сравнения наиболее оптимальной выбрана схема с импульсно-векторным управлением. В этом случае при оценке стоимости рассчитывается не только установленное оборудование, но и определяется оптимальное число фаз  $m$  электромеханического преобразователя и электрического. Цена электрического преобразователя определяется стоимостью на основной преобразователь, который зависит от номинальной мощности, и резервный модуль мощностью  $p/m$ , где  $p$  – номинальная мощность электропривода. В зависимости от выбранного количества фаз  $m$  (рис. 4) происходит снижение полезной мощности, поэтому при расчете стоимости электромеханического преобразователя необходимо учитывать не только высокий надежностный показатель  $P$  (рис. 1), но и снижение полезной мощности двигателя.

Таким образом, для электроприводов, работающих с непрерывным графиком нагрузки и обеспечивающих бесперебойность рабочих процессов в жилищно-коммунальном хозяйстве, ряд традиционных структур должен быть дополнен новыми техническими решениями на базе многофазных схем силовых цепей.

### Источники

1. Рипс Я.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами / Я.А. Рипс, Б.А. Савельев. – М.: Энергия, 1974. – 248 с.
2. Grigoryev M.A. Specifics of power circuit arrangements of semiconductor converters for power supply to synchronous reluctance machines / M.A. Grigoryev // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85(10) – P. 601–603.
3. Usinin Y.S. Generator for vehicle applications, based on the field regulated reluctance machine / Y.S. Usinin [et al.] // SAE Technical Papers. – 2008.
4. Weh H. On the development of inverter fed reluctance machines for high power densities and high outp / H. Weh // ETZ Archiv. – 1984. – Bd. 6. – P. 135 – 144.
5. Usinin Yu.S. Switching losses in the rotor of the field regulated reluctance machine / S.P. Gladyshev [et al.] // SAE Technical Papers. – 2010.
6. Grigoryev M.A. Dynamic parameters of active rectifiers / M.A. Grigoryev [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85(10). – P. 638–640.
7. Gladyshev S.P. Pulse vector control of wound rotor induction motor / Yu.S. Usinin [et al.] // SAE Technical Papers. – 2010.
8. Grigoryev M.A. A mathematical model of the synchronous reluctance machine with independent control along the excitation line / M.A. Grigoryev, S.I. Kinas // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85(10). – P. 645–648.
9. Usynin Yu.S. Electric drive with a field-regulated reluctance machine / Yu.S. Usynin, M.A. Grigor'ev, A.N. Shishkov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84(3). – P. 149–154.
10. Grigoryev M.A. A control system for an electric drive with a synchronous reluctance machine with separate excitation / M.A. Grigoryev // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84(10). – P. 560–565.
11. Usinin Yu.S. Electric drive of an industrial tractor / Yu.S. Usinin [et al.] // SAE Technical Papers. – 2013.



12. Shishkov A.N. The DET-400 tractor traction electric drive / A.N. Shishkov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 10. – P. 24–26.

13. Usinin Yu.S. The electric drive of a tram with an average floor / Yu.S. Usinin // SAE Technical Papers. – 2008.

14. Usinin Yu.S. Weight and dimensional parameters of a power drive for electrical vehicle / Yu.S. Usinin [et al.] // SAE Technical Papers. – 2009.

15. Usinin Yu.S. The losses in control electric drives of transport mechanisms at different controlled laws / Yu.S. Usinin [et al.] // SAE Technical Papers. – 2011.

## **INCREASE RELIABILITY OF THE ELECTRIC DRIVE TO HOUSING AND UTILITY INFRASTRUCTURE**

ZHURAVLEV A.M., SYCHEV D.A., IMANOVA A.A.

*Article deals with increasing reliability of the electric drive to housing and utility infrastructure. The dependence parameters of reliability in system "electrical converters – electric motor" of power are received. Criterion for optimization was made costs. The attention is paid to improving reliability of electric drive is possible by increasing the number of phases. It is shown, that in synchronous electric drive with pulse-vector control to reserve a semiconductor converter can improve the reliability of system. A system "electrical converters – reluctance motor with field regulated machine" mathematical model is received. The results of mathematical modeling of synchronous electric drive with pulse-vector control are represented. Dependence of specific electric parameters of the number of phases was defined.*

*Keywords: reliability, field regulated reluctance machine, pulse-vector control system.*

УДК 621.311

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ЗАЛЯЛЕЕВ И.А., КГЭУ, бакалавр, [ilnur-zalyaleev@yandex.ru](mailto:ilnur-zalyaleev@yandex.ru)

САФИН А.Р., КГЭУ, доцент, [sarkazan@bk.ru](mailto:sarkazan@bk.ru)

*В настоящее время все большую актуальность приобретают автономные системы электроснабжения. Несмотря на однотипность основных вариантов проектирования таких энергетических комплексов (в том числе гибридных), в настоящее время не существует эффективных*

*алгоритмов управления устройствами, входящими в состав комплекса в целях обеспечения оптимальной его работы и покрытия необходимого уровня потребительской нагрузки. Соответственно, требуются продолжительные исследования в области определения критериев максимально энергоэффективного взаимодействия компонентов автономных энергоисточников данного типа. Унификация вариантов построения систем автономного электроснабжения, а также процессов, описываемых алгоритмами работы этих систем, при их формализации способна облегчить проектирование и масштабирование энергетических комплексов.*

*Ключевые слова: автономная система электроснабжения, источник электроэнергии, система управления.*

Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергорайонов, повышению надежности электроснабжения потребителей. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения (АСЭ). В последнее время АСЭ получают все более широкое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего применения. Указанные системы используются почти во всех областях народного хозяйства. Их самыми большими потребителями являются топливно-энергетический, агропромышленный и машиностроительный комплексы страны. Области применения таких систем охватывают различного рода электроагрегаты (стационарные, судовые) и управляемые электромеханические системы (строительно-дорожные, транспортные, ветроэнергетические установки и малые ГЭС, генераторы, которые работают на статические преобразователи частоты и электромашинные агрегаты), системы бесперебойного питания ответственных потребителей, в том числе современных вычислительных комплексов. Необходимость в АСЭ возникает там, где невозможно или экономически не выгодно использовать централизованное электроснабжение, например на передвижных объектах. А это, в первую очередь, труднодоступные объекты, отдаленные от больших электрических систем, которые имеют собственные источники первичной энергии, например газовые и нефтяные месторождения. АСЭ находят широкое применение в промышленности, строительстве, сельском и коммунальном хозяйствах. Они работают на предприятиях, в аэро-, морских и речных портах, в энергоблоках больниц, в фермерских хозяйствах, в системах аварийного энергоснабжения, на объектах оборонительного комплекса – везде, где необходима электроэнергия, а сеть или отдалена, или работает с перебоями. Исследованию теории и практики управления автономными

энергетическими комплексами и энергосбережением посвящено довольно большое количество работ. Однако на уровне АСЭ они разрозненные и не в полной мере способствуют решению данной проблемы.

К возможности иметь автономный источник электроснабжения сегодня стремятся как частные пользователи, так и крупные промышленные предприятия. Это связано, в первую очередь, с возможными трудностями у электроснабжающих организаций с обеспечением бесперебойной подачи электроэнергии. Продолжительные перебои в электроснабжении приводят не только к финансовым затратам, но и могут стать угрозой для человеческой жизни, если отключения происходят в медицинских учреждениях либо на опасных и вредных технологических производствах.

Основные причины, определяющие наличие независимых источников электроснабжения:

- низкое качество тока (резкие скачки, перепады, колебания и пр.), получаемого от энергоснабжающей организации;

- наличие потребителей особой и первой категории, требующих непрерывного электроснабжения;

- отсутствие возможности подключения к существующим электросетям.

Главным достоинством автономного электроснабжения считается бесперебойная работа технологического оборудования. Автономные источники могут использоваться как в качестве основного, так и в роли резервного источника. Аварийный источник комплектуют устройством АВР, способным подавать напряжение на обесточенный участок электросети за несколько долей секунд.

### **Разновидности автономных источников**

Источником электрической энергии могут являться:

- дизельные или бензиновые генераторы;

- фотоэлектрические батареи;

- ветрогенераторы;

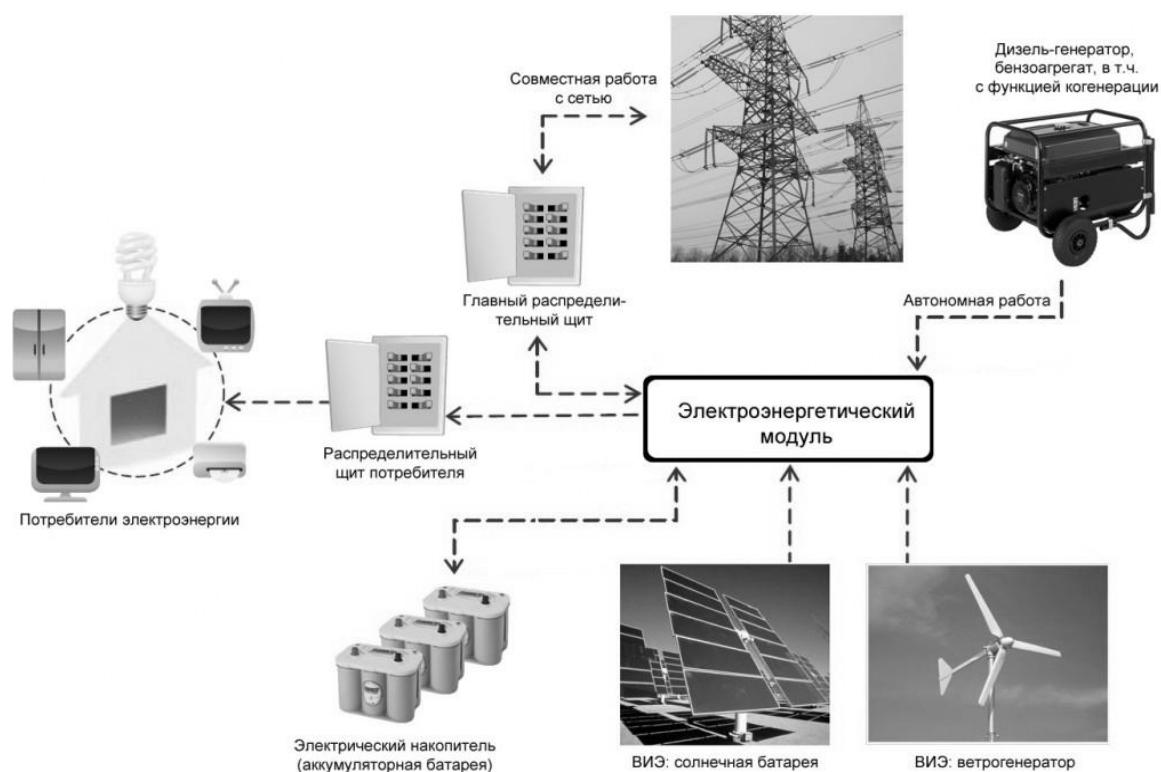
- ветроустановки.

Двигатели в электростанциях могут использоваться как бензиновые, так и дизельные. Первые, как известно, экономичнее, легче запускаются, характеризуются более значительным моторесурсом. Но их стоимость примерно в 2–3 раза выше аналогичных по мощности бензиновых. Поэтому дизельные электростанции рекомендуется применять в случаях, когда перерывы в электроснабжении случаются достаточно часто, что требует продолжительной работы станции. В противном случае целесообразнее использовать бензиновые генераторы.

Солнечные батареи сегодня устанавливаются на частных домах и дачах в качестве домашней электростанции и могут использоваться в качестве основного или резервного источника электроснабжения. Они не требуют значительных затрат на выработку электроэнергии, генерация электроэнергии в них происходит практически «даром». К недостаткам данных устройств относят большой объем стартовых финансовых вложений, к тому же особенности насыщения энергией Солнца создают некоторые трудности в их эксплуатации. Это связано с тем, что Солнце способно светить не круглый год, а только днем и только в ясную погоду, поэтому в комплекте с фотоэлектрическими батареями используются аккумуляторы, предназначенные для накопления электроэнергии, и конвертеры – устройства, трансформирующие постоянное напряжение от батарей в переменное 220 В, 50 Гц.

Ветро- и гидрогенераторы – это оборудование, которое уже достаточно давно применяется для генерации электроэнергии. Их использование ограничено различной ветровой активностью местности и наличием водоемов с активным движущимся водным потоком. Также их эффективная эксплуатация сопряжена с использованием дополнительного оборудования (аккумуляторных батарей, преобразователей и пр.).

Структурная схема подобной системы представлена на рисунке.



Структурная схема комбинированной энергетической системы на основе двигатель-генераторной установки, накопителя электрической энергии и ВИЭ

## Принципы управления и эксплуатация

Рассматривая вопросы эксплуатации систем электроснабжения, важно учитывать тот факт, что обслуживающие источники энергии и сопутствующее электрооборудование должны вырабатывать столько ресурса, сколько потребуется потребителям. Иными словами, работа электростанций и сетей рассчитывается на возможные изменения в нагрузках приемников. Рациональная эксплуатация систем электроснабжения предусматривает специальную подготовку персонала диспетчерских центров, которые смогут точно отслеживать спрос приемников на электроэнергию. Руководствуясь этими показателями, служба подбирает оптимальное количество генераторов при сокращении нагрузок или, напротив, запускает резервные станции при повышении нужд в энергии. Важно учитывать, что от качества обслуживания энергосистемой зависят производительность и безопасность рабочих процессов на предприятии. Нарушения в электроснабжении способны вызвать аварии, простои на конвейерах и другие неприятные ситуации и явления, в результате которых не исключено появление жертв и недовыпуск изготавливаемой продукции.

Система автоматического управления включает в себя систему аварийно-предупредительной защиты, состоящую из датчиков и исполнительных механизмов, смонтированных на дизеле, и блока автоматического управления.

Блок автоматического управления (далее БАУ) состоит из щита аварийно-предупредительной защиты (щита автоматики), щита автоматического резерва (далее – ЩАВР) и блока электроподогревателя.

БАУ обеспечивает:

- остановку дизеля без участия обслуживающего персонала в случае нарушения нормального режима работы агрегата; при перегрузке агрегата; при коротком замыкании в цепи потребителя; при исчезновении напряжения на клеммах генератора;

- автоматический запуск агрегата и прием нагрузки без участия обслуживающего персонала (при исчезновении напряжения во внешней сети).

Система обеспечивает:

- 4 попытки запуска;
- остановку агрегата (без участия обслуживающего персонала) при восстановлении напряжения внешней сети и переключение нагрузки на внешнюю сеть;

- автоматическое включение и выключение электронагревателя,

поддерживающего температуру масла в дизеле не менее 35 °С, для обеспечения постоянной готовности агрегата к запуску и приему нагрузки.

Автоматика дает возможность запуска агрегата с местного поста управления (вручную).

Блок управления, кроме перечисленных параметров, контролирует параметры работы генератора: частоту электрического тока (Гц); напряжение и ток в каждой фазе.

Блок управления формирует сигнал включения стартера для запуска двигателя и сигнал включения соленоида для глушения двигателя (для двигателей, оборудованных соленоидом глушения) или включения и выключения соленоида топливного насоса (для двигателей, оборудованных соленоидом включения топливного насоса).

Как показывает практика, капитальный ремонт или реконструкция устаревших электростанций в большинстве случаев является экономически нецелесообразным. Наиболее актуально создание быстровозводимых блочно-модульных генераторных установок контейнерного типа и стационарных электростанций до 50 МВт в легко возводимых строительных конструкциях. Разработка современных электростанций ориентирована на создание единого технологического комплекса, который включает в себя:

- автономные источники электроснабжения;
- вспомогательное оборудование;
- устройства для преобразования и распределения электроэнергии (трансформаторные подстанции и т.д.);
- автоматизированные системы управления и контроля за технологическим процессом;
- вспомогательные помещения для ремонта оборудования и хранения запасных частей;
- ограждающие конструкции и подсобные коммуникации.

Нарастающая популярность независимых источников энерго-снабжения связана с тем, что себестоимость электроэнергии от собственных генерирующих установок значительно ниже, чем тарифы единых энергосистем. Особенно это касается электростанций, работающих на попутном и природном газе. Зачастую стоимость строительства автономного генератора значительно ниже убытков, приносимых перебоями в электроснабжении.

Надежность электропитания обеспечивается на 100 % в случае параллельной работы с внешними электрическими сетями. Собственная генераторная установка на предприятии – это энергетическая

независимость от рынка электроэнергии. Автоматизированные системы управления дают возможность увеличить моторесурс и длительность эксплуатации на 25–30 %. В результате срок окупаемости оборудования значительно снижается.

### **Источники**

1. Григораш О.В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках электроэнергии / О.В. Григораш, П.Г. Корзенков // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 93(09). – С. 1–12.

2. Амерханов Р.А. Перспективы использования возобновляемых источников энергии / Р.А. Амерханов [и др.] // Труды КубГАУ. – 2013. – № 42. – С. 185 – 189.

3. Григораш О.В. Возобновляемые источники энергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О.В. Григораш [и др.] // Труды КубГАУ. – 2011. – № 5. – С. 18–192.

УДК 621

### **«ДАНФОСС» – ВЕДУЩИЙ МИРОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**

ЗИАТДИНОВ И.Ф., ООО «Danfoss», региональный представитель отдела силовой электроники

Компания представляет продукцию концерна Danfoss в России и предлагает полный спектр оборудования для учета и регулирования энергопотребления, холодильное оборудование и автоматику для коммерческого и промышленного применения, преобразователи частоты и др. Во многих направлениях концерн является признанным мировым лидером.

Компания Danfoss A/S, основанная в 1933 г., сегодня объединяет десятки современных предприятий на четырех континентах, имеет дочерние компании и представительства более чем в 100 странах мира. Головной офис расположен в г. Нордборг (Дания).

Российское представительство, компания «Данфосс», образовано в 1993 г. Спустя уже полгода в Москве, впервые в России было организовано полномасштабное производство радиаторных терморегуляторов по технологии Danfoss.

В 1998 г. ОАО «Сантехпром», ЗАО «Данфосс» и институт МНИИТЭП начали работу над созданием отопительного конвектора со встроенным термостатом. Новая разработка пошла в массовое производство. Благодаря этому практически все жилые здания, возводимые строительными организациями г. Москвы, оснащены новыми конвекторами с терморегуляторами. В последующем по данной технологии в разных регионах страны было начато производство отопительных приборов с термостатами.

В 2001–2002 гг. компания «Данфосс» приступила к выпуску регулирующих седельных клапанов, а также шаровых запорных кранов, широко применяемых в системах теплоснабжения, отопления, водоснабжения, а также в промышленных установках.

В 2007 г. в Истринском районе Московской области открыт завод. Общая площадь зданий, расположенных на территории представительства, на сегодняшний день составляет уже около 18 тыс. кв. м. Здесь организован выпуск балансировочных клапанов и стальных шаровых кранов для трубопроводов систем теплоснабжения, а также термостатов разных модификаций. Предприятие сертифицировано в соответствии с европейскими стандартами CEN-215 и ISO-9001, а также ISO TS-16949, предъявляющим более строгие требования к обеспечению качества продукции.

Через два года на производственной площадке «Данфосс» в Нижнем Новгороде был начат выпуск теплообменного оборудования и блочных тепловых пунктов.

Учитывая потребность рынка в современных технологиях, в ноябре 2012 г. на заводе «Данфосс» было запущено производство распределительных шкафов с узлом присоединения квартирной системы отопления, а затем и поэтажных распределительных шкафов системы отопления.

Среди новинок, производство которых освоено в 2014 г., – счетчик-распределитель нового поколения для организации индивидуального учета потребления тепловой энергии. Выпуск новой продукции налажен на партнерских мощностях.

Ввиду увеличения спроса на энергоэффективное тепловое оборудование в 2013 г. принято решение о строительстве еще одного завода в Нижегородской области.

В 2015 г. на производстве «Данфосс» в Московской области установлена производственная линия по штамповке новой линейки стальных шаровых кранов, специально разработанных для отечественного рынка.



Среди продуктов, выпускаемых компанией в России, – радиаторные терморегуляторы и клапаны, шаровые краны, регулирующие и балансировочные клапаны, счетчики-распределители, квартирные распределительные шкафы, пластинчатые теплообменники, блочные тепловые пункты, системы для управления тепловыми пунктами.

В настоящее время компания «Данфосс» имеет представительства в 21 городе России. Создано около 900 рабочих мест. Имеется обширный склад, налаженная система обработки заказов и доставки оборудования, успешно функционирует система электронной коммерции (интернет-продаж).

В рамках теплового направления компания предлагает средства автоматизации систем тепло- и холодоснабжения зданий, приборы коммерческого учета теплоснабжения, индивидуальные и блочные тепловые пункты, балансировочные клапаны, запорную и регуливающую арматуру и многое другое.

Компания осуществляет поставки оборудования для холодильных установок и систем кондиционирования воздуха в различных сферах: бытовое, коммерческое и промышленное холодоснабжение, магазиностроение, системы кондиционирования воздуха. Модельный ряд включает в себя коммерческую и промышленную арматуру, компрессоры и агрегаты, теплообменное оборудование, электронные системы управления. Danfoss A/S производит преобразователи частоты на напряжение 0,4 и 0,69 кВ и мощностью до 1400 кВт, устройства плавного пуска – до 800 кВт и все необходимые опции. Также в 2016 г. компания «Данфосс» вышла на рынок средневольтных преобразователей частоты и устройств плавного пуска двигателей на мощности от 315 кВт до 14,4 МВт включительно.

Подразделение промышленной автоматики выпускает компоненты для систем управления и контроля (КИПиА) в промышленности и морском секторе.

За 23 года работы в России компания «Данфосс» приняла участие в реализации десятков тысяч проектов по всей стране, решая задачи по снижению энергопотребления и повышению комфорта потребителей. Компания не раз становилась лауреатом премии «Береги энергию» за самые энергоэффективные проекты и решения.

Рассматривая более детально вопросы, связанные с научно-практической конференцией, можно отметить, что в направлении частотно-регулируемых приводов компания «Данфосс», официально объявив о поглощении и слиянии с компанией «Вакон» в декабре 2014 г.,

теперь является единственным специализированным производителем подобного оборудования в мире и занимается производством мотор-приводов как отдельным видом бизнеса. Секрет заключается в узкой специализации, что является одним из самых важных преимуществ на рынке, так как компетенция специалистов компании «Данфосс», занимающихся решением вопросов, связанных с производством, технической поддержкой, сервисом, логистикой и проектированием, максимально отвечает потребностям конечных потребителей, основными среди которых являются крупнейшие предприятия нефтехимического и нефтеперерабатывающего комплексов, нефтяной и горнодобывающей промышленности, предприятий коммунального хозяйства и, конечно, энергетики. Отталкиваясь также от специализации, можно отметить, что «Данфосс», как никакая другая компания, углубляется в процессы, связанные с применением частотно-регулируемых приводов, и выводит на рынок новые продукты, такие как, например, система удаленного мониторинга преобразователя частоты через облачный сервис, она так и называется – Cloudcontrol.

УДК 622.276.53

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДВУХСЕКЦИОННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СВОЙСТВОМ ЖИВУЧЕСТИ**

ИВАНОВ К.В., НИТПУ, магистрант, iwanow.kir2014@yandex.ru

СЕНЬКИВ Е.П., НИТПУ, магистрант, len4oka@mail.ru

РОЗАЕВ И.А., НИТПУ, аспирант, Rozayevia@gmail.com

ОДНОКОПЫТОВ Г.И., НИТПУ, к.т.н., доцент

*Рассмотрено применение 2-секционного электропривода для опасных производственных объектов. Для неполнофазных режимов работы приведены алгоритмы восстановления и обеспечения системы живучестью. Проведено моделирование в среде MatLab. Получены временные диаграммы переходных процессов в аварийном режиме.*

*Ключевые слова: 2-секционный электропривод, живучесть, неполнофазный режим работы, временные диаграммы переходных процессов.*

Электропривод переменного тока, построенный на основе асинхронных двигателей (АД), является основой построения практически всех сложных технических систем вращательного и поступательного принципа действия. Вопросы отказоустойчивости электропривода приобретают большое значение при использовании в составе опасных производственных объектов в таких отраслях, как ядерная, военная, химическая, строительная, металлургия, транспорт и др. Существует необходимость обеспечения безопасности и отказоустойчивости электропривода в составе насосных агрегатов при транспортировке газа, нефти и продуктов их переработки. При этом от безотказного функционирования АД в составе электрооборудования напрямую зависят жизни и здоровье людей. Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001.

Известны технические решения для многосекционных трехфазных электроприводов [1], где в случае отказа в одной из секций происходит ее отключение, в случае технического решения [2] возможно восстановление работоспособности для одного отказа в одной секции асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести.

Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного АД как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации (в одной из трех фаз) АД может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности для трехфазного двухсекционного электропривода [3].

Силовые преобразователи для АД выполняются по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам (рис. 1, *a*, *б*). В целях уменьшения времени переключения структуры электропривода  $T_{\Pi}$  необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя).

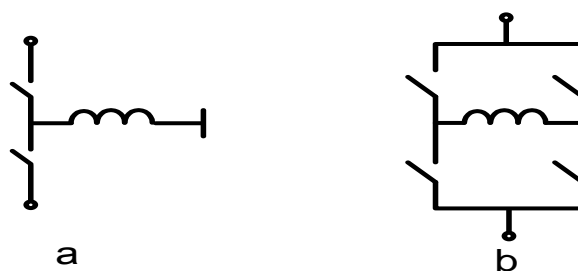


Рис. 1. Преобразовательная ячейка: *a* – полумоста; *б* – моста

Функциональная схема трехфазного двухсекционного отказоустойчивого электропривода приведена рис. 2 [3] (в общем случае  $n$ -секционного).

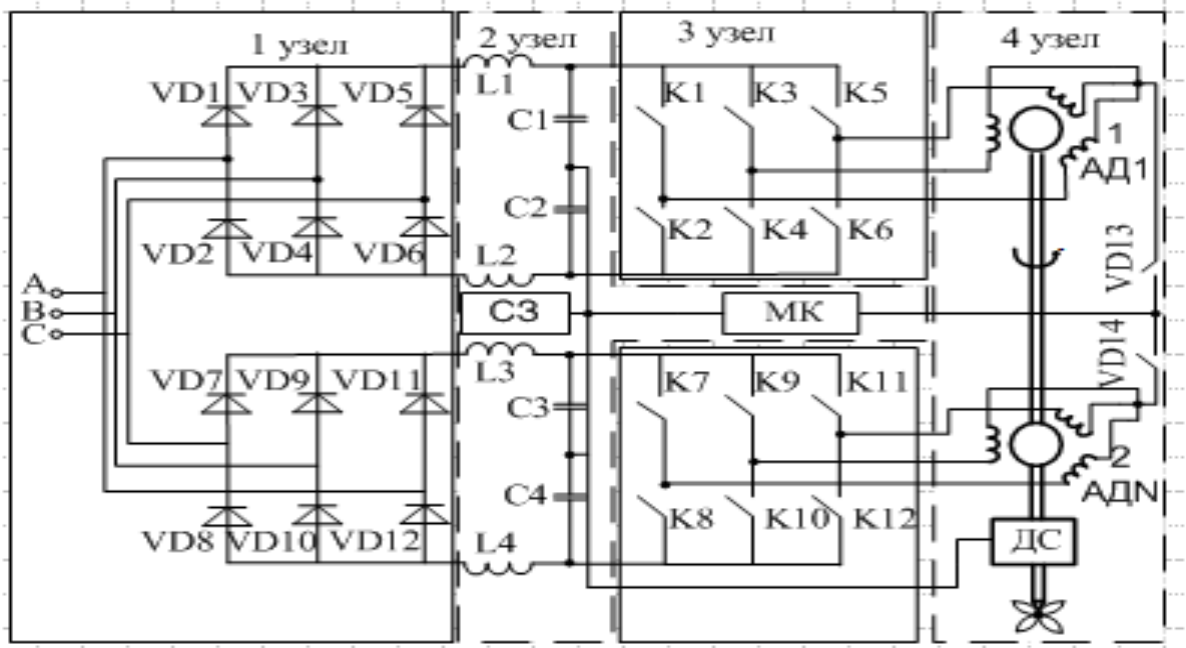


Рис. 2. Функциональная схема трехфазного двухсекционного отказоустойчивого электропривода

В асинхронном электроприводе с повышенной живучестью возможно купирование отказов в одном из двух преобразователей частоты либо отказа в одной из фаз двухсекционного двигателя. В результате по программе микроконтроллера происходит адаптация структуры электропривода из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим работы. При этом вектор одного из токов в отказавшей секции смещается на угол  $\pi/3$  с сохранением одинаковой амплитуды токов в фазах [4], и в результате обеспечивается сохранение кругового вращающегося поля в магнитном зазоре той секции электрического двигателя, где произошел отказ, работоспособная секция электропривода продолжает работать в трехфазном режиме.

При последующих неисправностях первой секции происходит аварийное отключение, и электропривод функционирует с пониженной активной мощностью, но с обеспечением свойства живучести. В процессе плавного исчерпания рабочего ресурса электропривода – структурного (за счет формирования избыточности в виде двух секций вместо одной) и функционального (за счет обеспечения работоспособности каждой из двух секций двигателя на двух оставшихся фазах трехфазного двигателя в аварийном режиме) резервов при минимальном составе электропривода –

обеспечивается работа на двух оставшихся фазах одной работоспособной секции при отказавших  $n - 1$  секциях включительно, что позволяет обеспечить работоспособность как при одиночных, так и при множественных отказах электропривода с обеспечением свойства повышенной живучести.

Была разработана математическая модель для исследования аварийных режимов трехфазного двухсекционного отказоустойчивого электропривода для схемы, приведенной на рис. 2.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}[i_1] &= [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left\langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \right\rangle \cdot [i_1] \right\}; \\ \frac{d}{dt}[i_2] &= [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \left\langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \right\rangle \cdot [i_2] \right\}; \\ \frac{d}{dt}[i_3] &= [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_3] - \left\langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \right\rangle \cdot [i_3] \right\}; \\ \frac{d}{dt}[i_4] &= [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_4] - \left\langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \right\rangle \cdot [i_4] \right\}; \\ [R_{M1}] &= ([1] + k_\infty [M_{o1}]) \cdot [R_1]; \\ [R_{M2}] &= ([1] + k_\infty [M_{o2}]) \cdot [R_2]; \\ T_{\Pi} &= t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (M_1 - M_2 + M_3 - M_4 - M_c); \\ M_1 &= p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1}i_{c1} + i_{B1}i_{a1} + i_{C1}i_{b1}) - (i_{A1}i_{b1} + i_{B1}i_{c1} + i_{C1}i_{a1})]; \\ M_2 &= p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2}i_{c2} + i_{B2}i_{a2} + i_{C2}i_{b2}) - (i_{A2}i_{b2} + i_{B2}i_{c2} + i_{C2}i_{a2})]; \\ M_3 &= p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A3}i_{c3} + i_{B3}i_{a3} + i_{C3}i_{b3}) - (i_{A3}i_{b3} + i_{B3}i_{c3} + i_{C3}i_{a3})]; \\ M_4 &= p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A4}i_{c4} + i_{B4}i_{a4} + i_{C4}i_{b4}) - (i_{A4}i_{b4} + i_{B4}i_{c4} + i_{C4}i_{a4})], \end{aligned}$$

где  $[i_1]$ ,  $[i_2]$  – матрицы фазных токов статора и ротора первой секции прямой и обратной последовательности соответственно;  $[i_3]$ ,  $[i_4]$  – матрицы фазных токов статора и ротора второй секции прямой и обратной последовательности соответственно;  $[U_1]$ ,  $[U_2]$  – матрицы фазных напряжений первой секции прямой и обратной последовательности

соответственно;  $[U_3]$ ,  $[U_4]$  – матрицы фазных напряжений второй секции прямой и обратной последовательности соответственно;  $[M_{o1}]$  – фазная матрица отказов первой секции электропривода;  $[M_{o2}]$  – фазная матрица отказов второй секции электропривода;  $[L_1]$ ,  $[L_2]$  – фазные матрицы индуктивностей;  $[L_1]^{-1}$  – обратная матрица  $[L_1]$ ;  $[R_1]$  – фазная матрица сопротивлений до отказа и  $[R_{M1}]$  – после отказа;  $[R_2]$  – фазная матрица сопротивлений до отказа и  $[R_{M2}]$  – после отказа;  $[1]$  – единичная матрица размером  $6 \times 6$ ;  $[k_\infty]$  – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора;  $T_{\Pi}$  – время переключения структуры электропривода;  $t_1$  – момент времени выявленного отказа;  $t_2$  – момент времени восстановления кругового вращающегося поля;  $\omega$  – частота вращения;  $M_1$ ,  $M_2$  – электромагнитный момент полей прямой и обратной последовательности первой секции;  $M_3$ ,  $M_4$  – электромагнитный момент полей прямой и обратной последовательности второй секции;  $M_c$  – момент сопротивления двигателя;  $J$  – суммарный момент инерции электропривода;  $p$  – число пар полюсов;  $L_s$ ,  $L_R$  – индуктивности статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность.

На основе полученной математической модели произведено построение имитационной модели электропривода в среде MatLab Simulink (рис. 3).

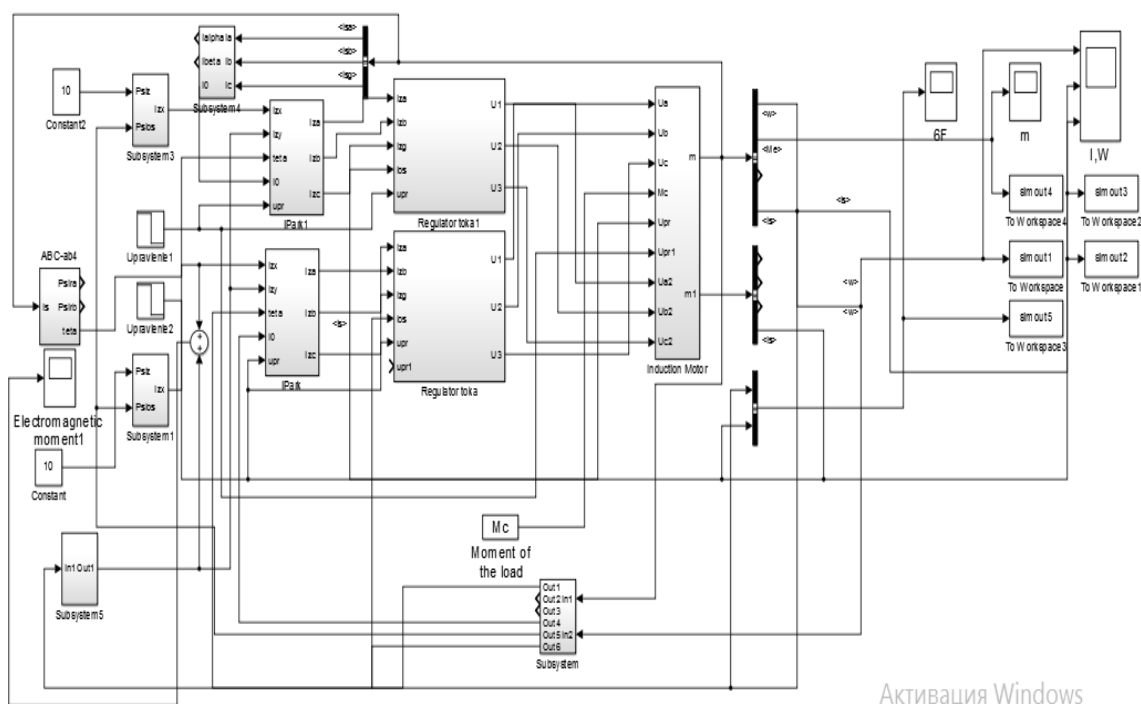


Рис. 3. Схема имитационной модели отказоустойчивого двухсекционного асинхронного электропривода в среде MatLab Simulink

Представленная модель содержит блок матрицы отказов 1, имитирующий возникновение аварийной ситуации; двухсекционный асинхронный двигатель 2, содержащий в своей структуре выражения для расчета полей прямой и обратной последовательности, а также механических процессов; источник сигнала задания 3; систему управления 4, которая включает в себя в зависимости от выбранного типа САУ требуемые регуляторы; два преобразователя частоты 5; блок задания момента нагрузки 6; блок измерений 7.

На рис. 4 представлены временные диаграммы переходных процессов последовательного исчерпания рабочего ресурса двухсекционного асинхронного электропривода с номинальным моментом.

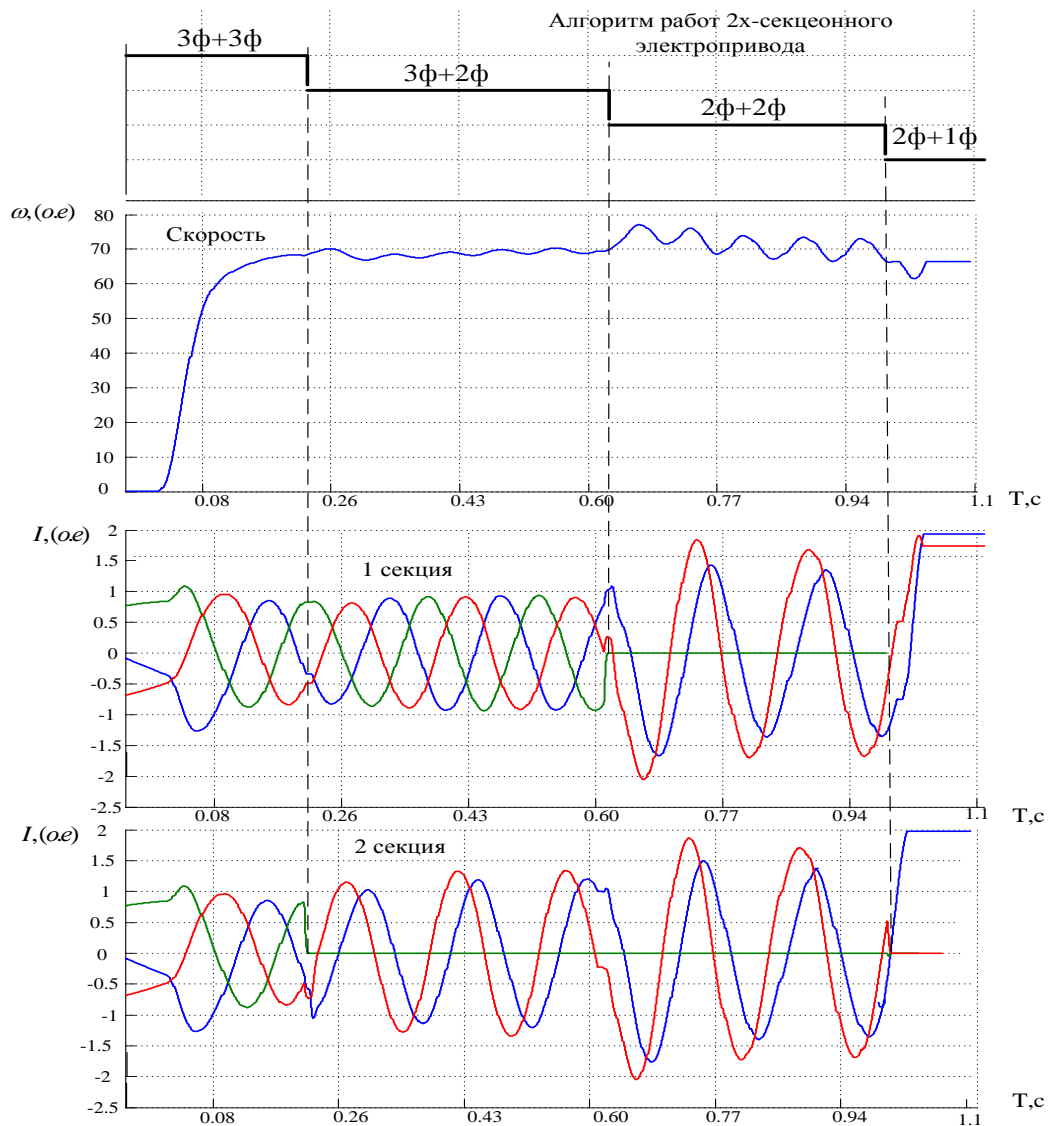


Рис. 4. Временные диаграммы переходных процессов

На участке времени от 0 до 0,08 с АД-1 и АД-2 переходят в номинальный режим, на диаграмме видно, что токи в обеих трехфазных секциях имеют синусоидальную форму и привод работает в номинальном режиме. В АД-2 в момент времени 0,23 с происходит первый отказ – обрыв фазы  $I_{\phi 3}$ , начинается переходный процесс, при котором для сохранения мощности двигателя ток в оставшихся фазах увеличивается на 15 % за счет векторного управления и сдвига двух оставшихся фаз на угол  $\pi/3$ . При втором отказе в АД-1 ток увеличивается на 15 % и в АД-2 – на 5 %, позволяя компенсировать уменьшение электромагнитной мощности.

При последующих отказах при номинальной нагрузке электропривод неработоспособен, однако при снижении рабочей нагрузки электропривода до 1/2 одна секция может быть отключена, а работа продолжена в односекционном режиме с обеспечением живучести при наличии последовательных множественных отказов – три отказа.

### Выводы

1. Двухсекционный трехфазный асинхронный электропривод позволяет восстановить работоспособность при двух последовательных отказах в разноименных секциях при номинальной нагрузке с сохранением кругового вращающегося поля.

2. Двухсекционный трехфазный асинхронный электропривод позволяет восстановить работоспособность при трех последовательных отказах в разноименных секциях при нагрузке до 1/2 с сохранением кругового вращающегося поля.

### Источники

1. Глухов Д.М. Моделирование многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах: автореф. / Д.М. Глухов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 18 с.

2. Пат. РФ № 2460190 (RU), Н02Н 7/09, Н02Н 7/12, Н02Н 7/122. Способ управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя вращательного или поступательного движения / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Й. Центнер. – № 2011113290; заявл. 06.04.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.

3. Пат. РФ № 164540 (RU). Асинхронный электропривод с повышенной живучестью / Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, А.Д. Брагин, И.А. Розаев, К.В. Иванов.

4. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1988. – 479 с.



УДК 621.38

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

ИДИАТУЛЛОВ З.Р., КНИТУ–КАИ, к.т.н., ZRIdiatullof@kai.ru

*Рассматриваются результаты экспериментальных исследований воздействия непреднамеренных электромагнитных помех на электронные средства. Указывается на необходимость учитывать особенности влияния электромагнитных помех на устройства управления энергоустановками. Предлагается конструировать новые электронные средства, используя перспективы аддитивных технологий.*

*Ключевые слова: электромагнитные помехи, электронные средства, энергоустановка, аддитивные технологии.*

Проблема электромагнитной совместимости технических средств продолжает оставаться одной из наиболее острых [1]. Нарушение совместной работы может быть вызвано воздействием помех СВЧ-диапазона на относительно низкочастотные электронные устройства. Данные воздействия могут приводить к нарушениям совместной работы электронных средств управления энергоустановками, включающих в себя как аналоговые, так и цифровые устройства [2].

Механизм воздействия относительно высокочастотных помех, не совпадающих с полосами пропускания рецепторов, в общих чертах достаточно ясен: под влиянием внешних полей в элементах монтажа, межблочных соединениях и т.п. возникают наведенные токи, которые создают на входах активных элементов соответствующие напряжения. При интенсивной помехе они вызывают различные нелинейные эффекты. Количественная сторона этих явлений изучена недостаточно.

Для получения количественных оценок восприимчивости к излучаемым помехам предлагается использовать методику, включающую два этапа. На первом этапе проводится анализ свойств монтажных, межблочных и других соединений как антенн. Связь значений интенсивности внешних помех и мощности сигнала, принятого цепями устройства, определяется коэффициентом усиления «антенны», т.е. цепей, связанных с активным элементом. Второй этап состоит в определении

порогового уровня нежелательных воздействий для конкретного активного элемента схемы. Ему соответствует такое значение мощности помехи, которое, действуя на входе активного элемента, приводит к недопустимому ухудшению качества работы рецептора для данного типа помех. Все необходимые величины допускают экспериментальное определение, причем для получения количественных оценок не требуется прибегать к измерениям в мощных полях, что потребовало бы использования специальных средств, а также надлежащей защиты персонала.

При воздействии СВЧ-помех на относительно низкочастотные устройства влияние помех имеет, в основном, внеполосный характер. Это означает, что влияние помех проявляется в тех случаях, когда абсолютный уровень помехи превышает диапазон линейности амплитудной характеристики активного прибора. Поэтому можно с определенной мерой приближения утверждать независимость пороговых значений от уровня сигнала, действующего на входе активного элемента. Это обстоятельство отличает рассматриваемые случаи от случаев влияния помех на радиоприемные устройства, в частности по побочным каналам приема, где определяющей величиной являются не столько уровни помех, сколько отношение сигнал/помеха. Подтверждением этого положения служат данные, полученные при анализе воздействия НЭМП СВЧ-диапазона на радиовещательный приемник ДВ–СВ–КВ-диапазонов.

Воздействие электромагнитных помех на цифровые устройства имеет ряд особенностей. Они связаны с используемой элементной базой, приемами проектирования, размещения элементов на плате, их соединением, с режимами работы активных элементов. С развитием цифровой техники повышается степень интеграции элементов. Используемые сейчас микросхемы содержат сотни тысяч активных элементов, каждый из которых потенциально может являться рецептором помех. Цифровые устройства обычно имеют общие шины передачи данных и питания. Это обстоятельство делает их особенно уязвимыми перед проникновением различного рода помех. Печатные проводники часто имеют значительную протяженность и, как следствие, потенциальную возможность появления в них токов, наведенных внешним электромагнитным полем. Действуя на входах интегральной микросхемы, они изменяют режимы работы активных элементов, что приводит к недопустимому изменению напряжений и, как следствие, нарушению нормальной работы всего устройства.

Для оценки воздействия непреднамеренных электромагнитных помех на цифровые устройства было проведено экспериментальное исследование. Установка включала в себя СВЧ-генератор – имитатор помехи, измерительные приборы – цифровой вольтметр и осциллограф. Необходимые напряжения подавались от стабилизированного источника питания. Все блоки установки были соединены через соответствующие фильтры и цепи развязки.

В результате исследований передаточных характеристик базовых логических элементов цифровых интегральных микросхем ТТЛ, ТТЛШ, КМОП были выявлены пороговые уровни восприимчивости ИС при воздействии СВЧ-помехи по цепи питания, на выход логического элемента, по пространству излучения. Проведены исследования восприимчивости к СВЧ-помехам ждущего мультивибратора на основе элементов ТТЛ и ТТЛШ; мультивибратора с самовозбуждением на ТТЛ- и КМОП-элементах; триггера ТТЛ.

Полученные результаты показывают необходимость учета возможного воздействия непреднамеренных СВЧ-помех при проектировании радиоэлектронной аппаратуры, а также необходимость разработки достаточно простых методик прогнозирования воздействия СВЧ-помех на электронные устройства. Указанные методики должны позволить уже на стадии разработки аппаратуры оценивать уровни восприимчивости и при необходимости заблаговременно принимать меры к их снижению.

Цель принятия конструкторских мер обеспечения ЭМС состоит в снижении уровней создаваемых помех ИП, восприимчивости рецепторов помех и повышении затухания электромагнитных полей на путях распространения от ИП к РП. В отличие от системотехнических и схемотехнических мер, они не затрагивают принцип действия устройств, их принципиальные схемы, функциональные параметры.

Традиционно конструирование начинают с анализа исходных данных: схемы электрической принципиальной, перечня элементов, требований к конструкции. Данный анализ производят с учетом возможности реализации на предприятии с использованием современных технологий. Иногда приходится корректировать перечень элементов, используя только доступные электронные компоненты. Далее разделяют элементы по месту крепления: на корпусе, печатных платах, в объемном монтаже. При этом необходимо особое внимание уделить элементам, работающим с повышенными значениями частот, токов и напряжений. Эти элементы обычно имеют значительные размеры и тепловыделение, поэтому их размещают в объемном монтаже, что позволяет использовать экранирование. Отрицательной стороной этого является большая протяженность соединительных проводов.

После сортировки переходят к размещению элементов на соответствующих поверхностях. Размеры поверхностей должны обеспечивать крепление электрорадиоэлементов, давать возможность произвести разводку проводов. Кроме этого, есть особые требования при размещении элементов на лицевой панели. Сверху под названием размещают индикаторы, ниже – органы управления, еще ниже – разъемы для подключения внешних цепей. Между элементами должны быть достаточные зазоры, чтобы при управлении одними не перемещались другие. Кроме этого, надо учитывать, что размеры, занимаемые элементами, могут отличаться внутри и снаружи. Например, галетный переключатель внутри прибора имеет значительно больший размер, нежели снаружи. Для обеспечения крепления элементов на лицевой панели необходимо делать большое количество отверстий, что снижает экранирующую способность корпуса. Элементы, работающие с высокими значениями частот и мощностей, на лицевой панели обычно не размещают. Их переносят на заднюю или боковые панели, где обеспечивают хорошее экранирование.

Внутри корпуса, ближе к лицевой панели располагают печатные платы – это обеспечивает минимальную длину соединяющих проводов, а следовательно, возможность появления перекрестных помех. Далее вглубь размещают блок питания. Здесь размещают работающие с высокими значениями частот и мощностей элементы, что позволяет создавать экранированные зоны внутри корпуса. Для обеспечения теплового режима именно в этой части корпуса делают вентиляционные отверстия, что может привести к значительному ухудшению экранирующих свойств корпуса.

Размещению электрорадиоэлементов на печатной плате посвящено большое количество литературы и нормативных документов. Необходимо указать на общую закономерность – уменьшение количества размещаемых элементов за счет интегрирования их в микросхемы, при этом увеличивается протяженность соединяющих проводников и количество используемых слоев, что потенциально увеличивает вероятность несовместимости внутри устройства за счет перекрестных помех.

С позиций использования радиочастотного ресурса конструкторскими мерами обеспечивается сокращение протяженности занимаемых областей с целью обеспечения соответствия параметров, влияющих на ЭМС, нормативным требованиям либо обеспечения значений их, определенных на этапе проектирования в виде некоторых конкретных требований.

При проектировании средств электроники необходимо правильно выбирать элементную базу. Разработчики принципиальной схемы при подборе элементов пользуются справочниками с основными параметрами. При выборе ориентируются на граничную частоту, рассеиваемую мощность, коэффициент усиления, максимальные токи и напряжения, крутизну характеристик. В меньшей степени смотрят на габариты, необходимость для данного элемента обеспечить специфические внешние условия. Еще меньше уделяют внимания возможности размещения этого элемента внутри корпуса, что может стать большой проблемой для конструктора и технолога, особенно при необходимости внесения изменения в ранее разработанный корпус.

Известно, что основные характеристики резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности не являются линейными. Это связано, прежде всего, с тем, что они имеют сложную внутреннюю структуру.

При изготовлении перспективных устройств электроники все шире внедряются аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), или технологии послойного синтеза. Еще недавно эти технологии использовались преимущественно в традиционно технологически продвинутых отраслях – автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности, а также в приборостроении и медицине.

Сегодня существует большое количество технологий, которые можно назвать аддитивными, объединяет их одно: построение происходит путем добавления материала (от англ. add – «добавлять»), в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала. Наиболее точной технологией является SLA-технология (от Stereolithography Apparatus), или стереолитография, – послойное отверждение жидкого фотополимера. Существует много видов фотополимерных композиций, поэтому спектр применения данных материалов, полученных по SLA-технологии, очень широк: макеты и масштабные модели, литейные и мастер-модели, дизайн-модели и прототипы, функциональные модели и т.д. Вторым видом является селективное лазерное спекание – SLS-технология (Selective Laser Sintering), Selective Laser Melting). Здесь основным материалом являются сыпучие, порошкообразные материалы, а лазер выступает источником тепла, посредством которого производится сплавление частичек порошка. В качестве модельных материалов используется большое количество как полимерных, так и металлических порошков. Третьим видом является

последующее лазерное спекание (сплавление) металлопорошковых композиций. По мнению специалистов, очень широкие перспективы открываются для технологии «струйной печати» – InkJet- или PolyJet-технологии. Эта технология позволяет нанесение материала или связки с помощью струйных головок.

Одним из направлений использования аддитивных технологий может стать обеспечение электромагнитной совместимости. На основе этих технологий можно создавать конструкции, имеющие анизотропную структуру, адаптированную под электромагнитную обстановку внутри устройств так, чтобы уменьшить или вообще исключить нежелательные воздействия от источников на рецепторы помех.

### **Источники**

1. Идиатуллов З.Р. Конструирование радиоэлектронных средств с учетом обеспечения электромагнитной совместимости / З.Р. Идиатуллов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: сб. докл. Всерос. НПК с междунар. участием. – Казань, 2016.

2. Гайнуллина А.А. Эксплуатация электронной техники по состоянию с контролем стабильности параметров / А.А. Гайнуллина, З.Р. Идиатуллов, Н.Н. Майлов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 19. – С. 284–289.

### **DESIGN POWER PLANTS CONTROLS WHILE ENSURING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IDIATULLOV Z.R.**

*This paper presents the results of experimental studies on the effects of inadvertent electromagnetic interference to electronic devices. The necessity to take into account features of electromagnetic interference in the power plants control. It is proposed to construct a new electronic means, using the perspectives of additive technologies.*

*Keywords: electromagnetic interference, electronic, power plant, additive technology.*

УДК 621.65:62-83

## **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ НЕФТИ И УПРАВЛЕНИЕ НЕФТЕДОБЫЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЯМР-АНАЛИЗАТОРА**

КАШАЕВ Р.С., КГЭУ, д.т.н., профессор, kashaev2007@yandex.ru  
КИЕН Н.Т., КГЭУ, аспирант, nckien@cnd.edu.vn

*В обзорной работе рассмотрены системы проточного пробоотбора и аппаратура для реализации методик экспресс-контроля расхода, газосодержания скважинной жидкости (СКЖ), концентрации воды и плотности компонентов СКЖ методом ЯМР-релаксометрии.*

*Ключевые слова: проточный пробоотбор, газосодержание, плотность, концентрация воды, ЯМР-релаксометрия.*

В последние годы в связи с резким повышением обводненности добываемой СКЖ актуальна задача разработки экспресс-методов ее контроля по ГОСТ 8.615-2005 на продуктивность (расход) скважин, концентрацию воды и газосодержания СКЖ и плотность компонентов для оптимизации процессов нефтедобычи. Существующие методы контроля не обладают достаточной представительностью пробоотбора, не дают полной информации об СКЖ и нефти, осуществляются с помощью комплектов разных анализаторов и не обладают достаточной оперативностью. Такими возможностями обладает метод импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), в частности метод ЯМР-релаксометрии (ЯМРР), являющийся неконтактным, неразрушающим и позволяющим проводить экспресс-анализ в автоматизированном режиме [1].

Целью работ является разработка системы проточного пробоотбора и аппаратуры для реализации экспресс-контроля нефти методом ЯМРР:

- газосодержания СКЖ и плотности компонентов СКЖ;
- концентрации воды в СКЖ и сырой нефти;
- расхода СКЖ на нефтедобывающих скважинах и на групповых замерных установках (ГЗУ).

Решение поставленных задач позволит одним измерительным комплексом на базе метода ЯМРР обеспечить аппаратурную поддержку ГОСТ 8.615-2005 на продуктивность (расход) скважин, концентрацию воды, нефти, газосодержание и плотности нефти для оптимизации технологических процессов нефтедобычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти.

Для работы информационных систем нефтедобычи с помощью установок центробежных электронасосов (УЭЦН) на уровне автоматизированной системы управления предприятием необходимо постоянно или периодически, но часто передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако зачастую эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1–4 раза в сутки.

Поэтому еще одной целью работы является разработка системы автоматического управления процессом контроля нефтедобычи УЭЦН с использованием управляющих сигналов от проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА). При этом не предполагается размещение первичных преобразователей в скважинах, поскольку это сопряжено с техническими сложностями энергоснабжения УЭЦН и создает потери напора.

На технологические процессы, связанные с добычей нефти, оказывают влияние: скачкообразный характер изменения расхода и давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому системы автоматического управления УЭЦН включают решение следующих основных задач:

- определение параметров среды (газонасыщенности и плотности СКЖ и нефти) или процесса (расхода, уровня), по которым будет осуществляться регулирование УЭЦН;
- регулирование параметров скважин с поддержанием их на заданном уровне;
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров УЭЦН и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования УЭЦН;
- защиту УЭЦН и другого оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

Первое сообщение о разработанном нами проточном ЯМР-анализаторе было сделано на XXVIII Ampere Congress, 1996, Canterbury, England [2]. Фото ЯМРА-I первого поколения и его функциональная схема представлены на рис. 1 и 2. На способ измерения концентрации воды в скважинной жидкости, проточный ЯМР-анализатор скважинной жидкости (1997, КНИРТИ) была подана заявка в Роспатент в 1995 г. [3]. ЯМР-анализатор успешно прошел метрологические испытания в ОАО «Татнефть».



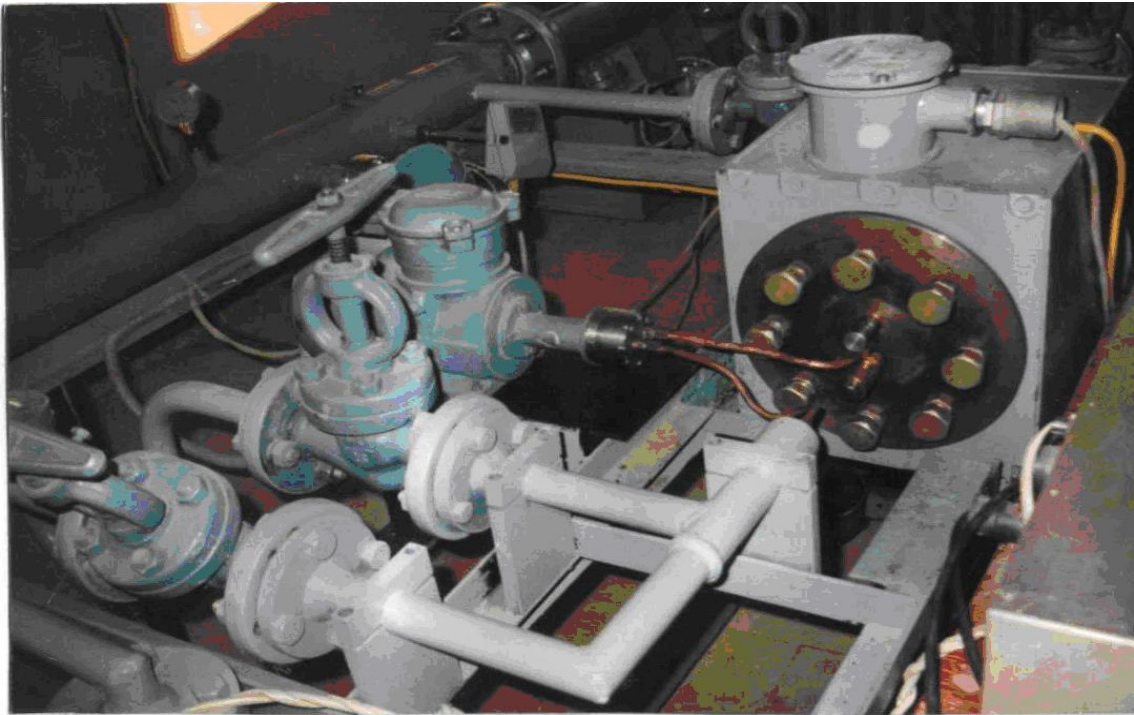


Рис. 1. Проточный ЯМР-анализатор скважинной жидкости

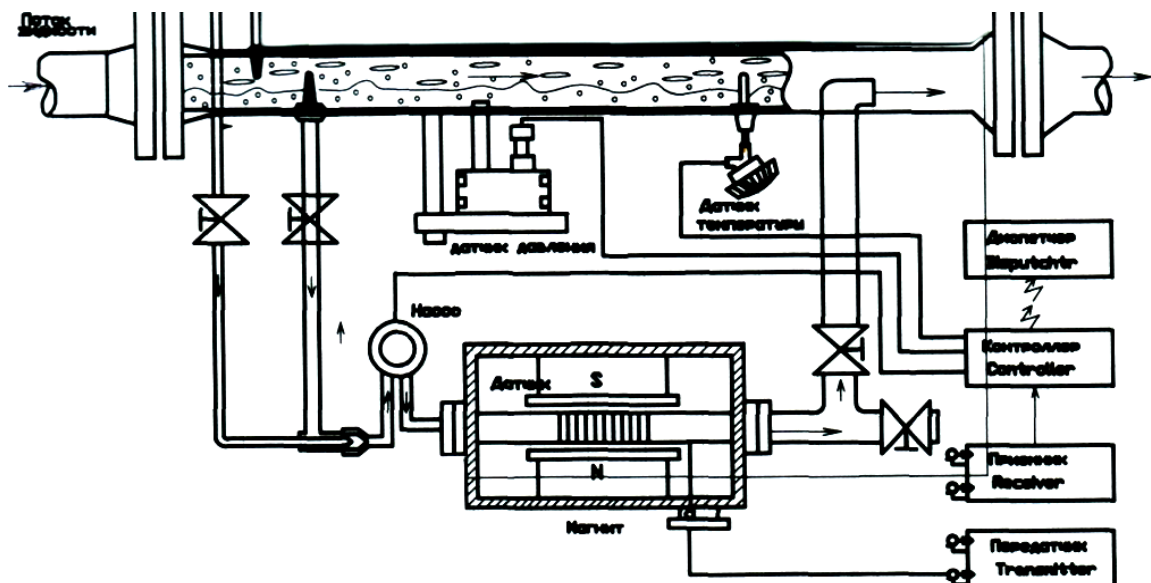


Рис. 2. Функциональная схема проточного ЯМР-анализатора

ЯМР-анализатор (ЯМРА-1) предназначен для контроля технологического процесса добычи и подготовки нефти. Функциональное назначение – количественное определение расхода, концентрации воды, нефти и газа в продукции нефтедобывающих скважин. Область применения – групповые замерные установки (ГЗУ), установки подготовки

нефти, газа и воды, скважины. Характеристики контролируемой среды: водо-нефте-газовая смесь (СКЖ), температура среды  $+5 \dots +500$  °С, давление – 0,1–6,4 МПа, плотность среды – 700–1100 кг/м<sup>3</sup>, объемная доля воды, нефти и газа – 0–100 %, массовая доля механических примесей – не более 10 %, массовая концентрация солей не ограничивается. Пределы допускаемого значения основной приведенной погрешности: по воде  $\pm 4$  %, по нефти  $\pm 4$  %, по газу  $\pm 6$  %. Изменения показаний и выходного сигнала анализатора составляют 0,5 основной приведенной погрешности при изменении: температуры окружающей среды на каждые 100 °С, напряжения питания от –15 % до +10 %, плотности нефти – на 50 кг/м<sup>3</sup> (без перенастройки ЯМРА-I). Режим работы ЯМРА-I – непрерывно-циклический, время однократного измерения – не более 3 мин. Выходной измерительный сигнал анализатора – 5–20 мА по ГОСТ 26.011-80. Связь с ЭВМ верхнего уровня должна осуществляться через интерфейс, соответствующий требованиям ГОСТ 26.016-81.

ЯМРА-I расположен во взрывоопасной зоне, поэтому передатчик мощных радиочастотных импульсов, приемник полезных сигналов с контроллером ЭВМ и блок питания расположены вне опасной зоны, на расстоянии четверти длины волны  $\lambda/4$  магнитного резонанса (около 15 м). Уровень взрывозащиты магнитной системы с ЯМР-датчиком – взрывонепроницаемая оболочка с кварцевым заполнением Exq.

Анализатор работает следующим образом: проба из горизонтального трубопровода со скважины (или магистрального трубопровода) двумя конусными пробоотборниками (на жидкость и газ, см. рис. 2) отбирается при открытии взрывозащищенного клапана, проходит в шестеренный смеситель, включаемый в работу по программе на определенное время автоматизированным электроприводом, и перекачивается в датчик ЯМР, расположенный внутри магнита с магнитным полем, соответствующим резонансной частоте 3 МГц. Подачей серий мощных радиочастотных импульсов, передаваемых по коаксиальному кабелю от передатчика, образец облучается переменным магнитным полем, фиксируется полезный сигнал огибающей спин-эхо, который по тому же каналу передается в приемник, усиливается, поступает в АЦП и через контроллер высвечивается на экране монитора. Далее сигнал обрабатывается по программе и определяются физико-химические параметры СКЖ: концентрация воды и нефти, газонасыщенность, при необходимости – плотность и вязкость.

В 1998 г. был опубликован европейский патент [4] на устройство для определения индивидуальных массовых скоростей в многокомпонентных потоках методом ЯМР, который представляет собой набор поляризующих и анализирующих магнитов с градиентом магнитного поля,

расположенных вдоль трубы. Способ, применяемый в устройстве, использует тот факт, что разные компоненты среды в потоке имеют разные продольные времена релаксации  $T_1$  вследствие их разных скоростей  $v$ . Путем анализа многоэкспоненциального спада намагниченности импульсными методиками в разных позициях вдоль трубы определяется средняя намагниченность каждой компоненты, являющаяся величиной массовой доли каждой компоненты многофазной среды в потоке. Одновременно определяется скорость потока каждой компоненты.

В 2004 г. был опубликован патент [5] на устройство, которое в разных вариантах (рис. 3) содержит магнитную систему из двух постоянных магнитов, собранных из отдельных элементов, и датчики разной конфигурации, обеспечивающие поляризацию и анализ по сдвигу фаз и изменению амплитуды сигнала. Конфигурации трубочек в зазоре поляризующей части магнита аналогичны таковым в [6].

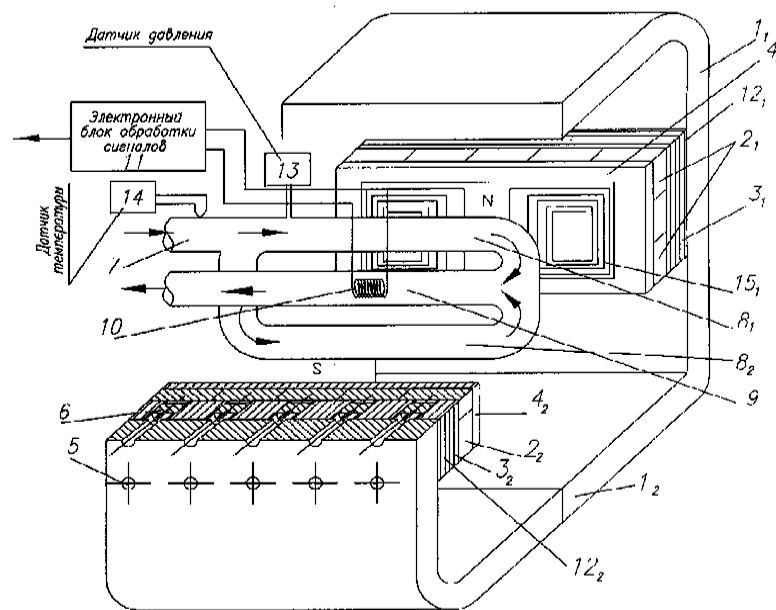


Рис. 3. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентной жидкости на основе ЯМР

Изготовлен программно-аппаратный комплекс «Канал-квант», но по точкам огибающей сигнала на рис. 4 можно провести не одну прямую.

Анализ сигнала с помощью программного обеспечения позволяет судить о расходе и составе многофазного потока с погрешностями  $\delta P = \pm 4\%$  для объемного расхода жидкости на скважине в диапазоне  $0-60 \text{ м}^3/\text{сут.}$  и  $\delta B = \pm 5\%$  для концентрации воды. Погрешность по расходу выше, чем в весоизмерительной установке на ГЗУ «Спутник-М», у которой  $\delta B = \pm 2,5\%$ .

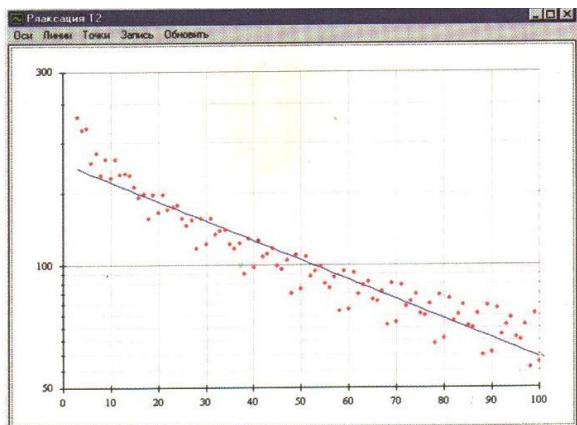


Рис. 5. Окно графика спада релаксации смеси вода-нефть, полученного при измерении состава смеси в отлаочном режиме

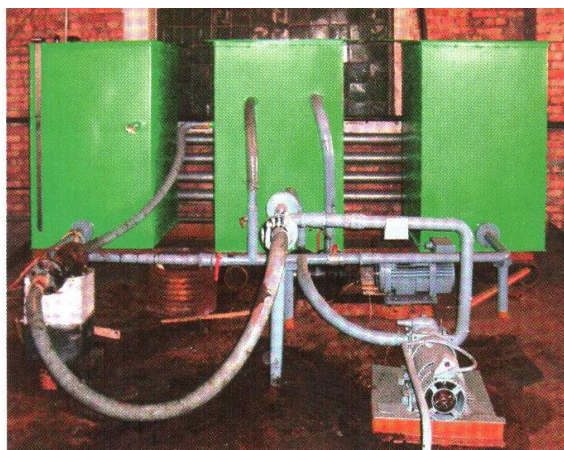


Рис. 6. Калибровочный стенд с подключённым измерителем

Рис. 4. Результаты измерения комплексом «Канал-квант» и калибровочный стенд с измерителем

Наш первый вариант проточного ЯМРА-I на натуральных испытаниях показал погрешность измерения по расходу, выходящую за пределы технического задания, поскольку для этой цели использовался метод перепада давлений на трубе Вентури, не имеющий отношения к ЯМРР, который применяется для измерения расхода в однокомпонентных (однофазных) средах. Поэтому мы разработали и в 2008 г. получили патент РФ № 74710 [7] на ЯМРА-II второго поколения, представленный на рис. 5, 6.

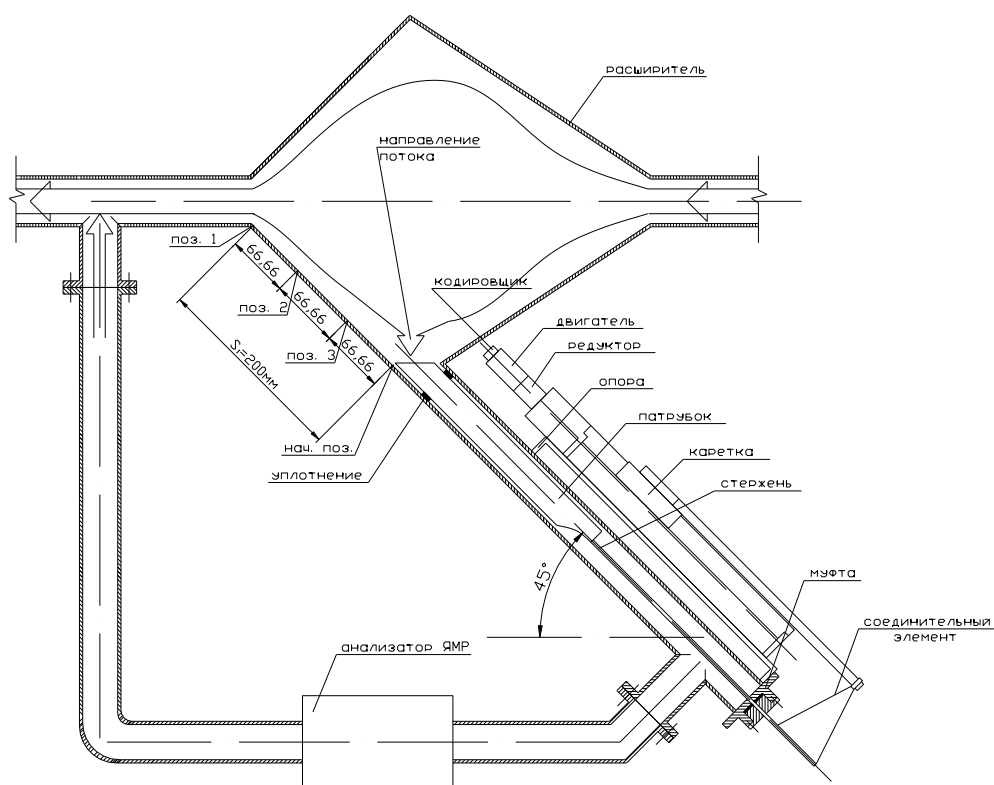


Рис. 5. Кинематическая схема системы пробоотбора ЯМРА-II

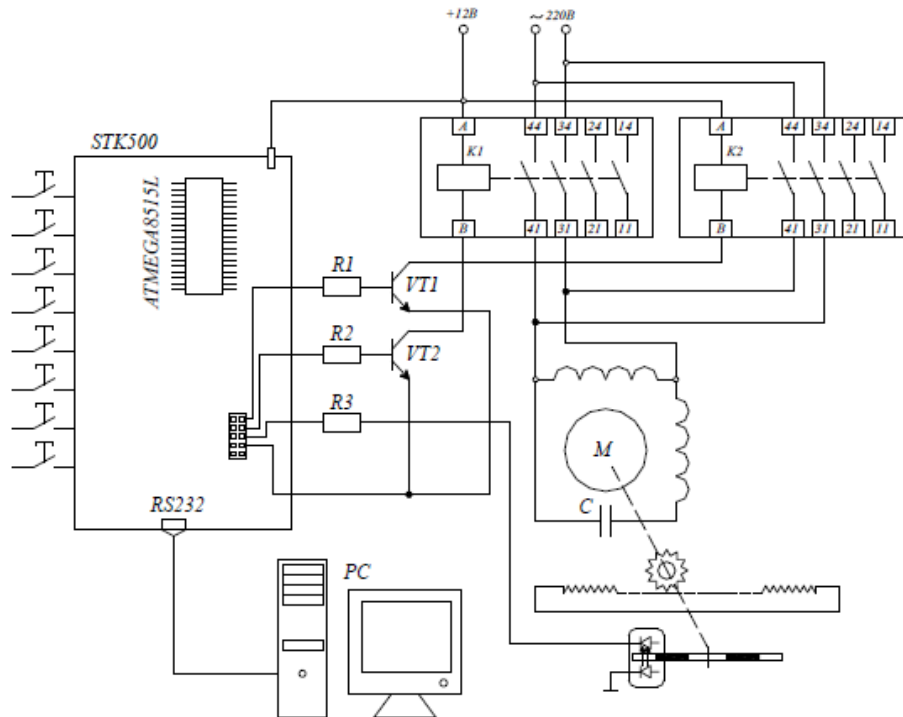


Рис. 6. Электрическая принципиальная схема системы пробоотбора ЯМРА-II

Устройство включает систему пробоотбора с АЭП, приводящим в движение перемещаемый в трубе пробоотборный патрубок, датчик релаксометра ЯМР для облучения потока жидкости последовательно РЧ-импульсов по методу Карра – Парселла – Мейбум – Гилла (КПМГ), блок для измерения времен спин-спиновой релаксации (в качестве которого может быть использован релаксометр ЯМР), по которым определяются параметры состава. С целью повышения диапазона измерения расхода и представительности пробоотбора в основу конструкции новой системы заложено устройство, отличающееся тем, что измерительная труба (вставленная в магистральную), из которой осуществляется отбор пробы, имеет коническое расширение, а пробоотбор в датчик релаксометра ЯМР осуществляется патрубком, имеющим возможность с помощью АЭП перемещения по сечению конического расширения. Управление положением патрубка осуществляется от контроллера ATMEGA8515L.

Принцип пробоотбора основан на уравнении Бернулли, согласно которому при неразрывности потока изменение давления жидкости  $P_i$  в разных сечениях трубы  $S_i$  при скоростях  $v_i$  описывается уравнением:

$$P_i/\rho g + v_i^2/2g = \text{const} \quad (1)$$

или, вследствие того, что расход  $Q_i$  постоянен:  $Q_i = S_i v_i = \text{const}$ , давления  $P_1$  и  $P_2$  в разных сечениях трубы  $S_1$  и  $S_2$  будут связаны уравнением:

$$P_1/\rho + \text{const}/S_1^2 = P_2/\rho + \text{const}/S_2^2. \quad (2)$$

Поток жидкости, попадая в расширение трубы, снижает скорость  $v$  и увеличивает давление  $P$  в степени, пропорциональной  $\sqrt{S}$ . В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, которая гомогенизируется и через входной патрубок поступает со скоростью  $v_i$ , определяемой положением патрубка, в датчик магнита ЯМР-анализатора и выходит через выходной патрубок, который может быть установлен в любом положении трубы. В результате скорость потока будет определяться разницей давлений  $P_{\text{max}} - P_i$  в сечении  $S_{\text{max}}$  и  $S_i$ . При расположении патрубка в сечении на уровне магистральной трубы разница давлений будет минимальна независимо от скорости и давления в магистральной трубе и скорость движения потока через датчик ЯМР будет также минимальной, что необходимо для измерения ЯМР-параметров (влажности, концентрации нефти, газа, дисперсности, вязкости, плотности и др.) как бы в остановленном потоке. Таким образом, отпадает необходимость реальной остановки потока. Конструктивно это означает отказ от вентиля и задвижек, требующих взрывозащиты и имеющих ресурс работы не более 2000 включений. Для измерения расхода входной патрубок располагается в таком положении сечения расширения трубы, которое обеспечивает диапазон скоростей потока, для которого нами была получена зависимость значений скорости релаксации от скорости потока  $v$  (м/с) или расхода  $Q$  (л/ч):  $(T_{2\text{эф}})^{-1} = (T_{20})^{-1} + (\tau)^{-1}$ , где  $T_{2\text{эф}}$  – измеряемое время релаксации потока;  $T_{20}$  – время релаксации неподвижной жидкости;  $\tau$  – время пребывания жидкости в объеме катушки датчика. Скорость потока  $v$  и расход  $Q$  определяют по формулам:

$$V = K_c S \left[ (T_{20})^{-1} + (\tau)^{-1} \right] / K S_d; \quad (3)$$

$$Q = K_c S \left[ (T_{20})^{-1} + (\tau)^{-1} \right], \quad (4)$$

где  $K = S/S_d$  – коэффициент редукции;  $S_d$  и  $S$  – площади сечений трубки датчика ЯМРА-II и трубы (на уровне положения патрубка в коническом расширении измерительной трубы);  $K_c$  – коэффициент в зависимости



$Q_d = K_c S_d (T_{2эф})^{-1}$ , зависящий от состава. Расход  $Q_i$  (и, соответственно, скорости  $v_i$ ) отдельных компонент жидкости определяют по формуле:

$$Q_i = Q P_i, \quad (5)$$

где  $P_i$  – концентрация  $i$ -й компоненты смеси, определяемой из огибающих эхо в методике КПМГ. Макет ЯМР-анализатора реализован в трубке  $\varnothing 30$  мм в зазоре магнита релаксометра ЯМР по [8].

Объемное содержание газа  $V_G^{ЯМР}$  определяется по формуле:

$$V_G^{ЯМР} = (A_0 - A_G) / A_0, \quad (6)$$

где  $A_0$ ,  $A_G$  – соответственно начальные амплитуды при полном заполнении датчика сырой нефтью и частичном заполнении его газом. Погрешность в стационарных условиях составила не более 1,4 %, а на потоке – 4,85 %.

ЯМР-анализатор позволяет также в остановленном потоке определять: дисперсность, концентрацию серы, вязкость, состав нефти и другие физико-химические параметры по методикам, описанным в [1].

В 2011 г. был опубликован патент [9] на изобретение, сущность которого заключается в том, что измерение скорости потока многофазного флюида по сигналу ЯМР в условиях действия градиента магнитного поля, направленного вдоль потока, и последующее Фурье-преобразование сигнала в частотный спектр осуществляется путем возбуждения ядер только в части приемной катушки – в объеме слоя поперек сечения потока, характеризующегося малой толщиной по сравнению с толщиной рабочей зоны приемной катушки, при этом время регистрации, длину приемной катушки и проходное сечение трубопровода подбирают такими, чтобы за время регистрации сигнала при максимальной скорости фаз потока флюида этот слой не выходил за пределы рабочей зоны этой катушки. Прототипом для способа измерения скорости потока методом ЯМР является [10]. Новым является также то, что по экстраполированным на нулевое время значениям амплитуд определяют относительные доли компонент и фаз флюида с определенными для них значениями скоростей. Относительно последней подчеркнутой фразы в формуле приведем цитату из описания патента № 74710 [7]: «Расход  $Q_i$  (и, соответственно, скорости  $v_i$ ) отдельных компонент жидкости определяют по формуле:

$$Q_i = QP_i, \quad (5)$$

где  $P_i$  – концентрация  $i$ -й компоненты смеси, определяемой из огибающих эхо в методике КПМГ».

### Источники

1. Кашаев Р.С. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем / Р.С. Кашаев. – Saarbruken: Lambert Academic Publishing, 2012. – 91 с.

2. Kashaev R.S. NMR-analyser for automatic control of physical-chemical parameters of crude oil and bitumen / R.S. Kashaev [et al.] // Magnetic Resonance and Related Phenomena: Extended Abstracts: 28<sup>th</sup> Ampere Congress, 1996, Canterbury, England. – P. 295–296.

3. Заявка на пат. № 95117256/25, 10.12.1995. Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов / Р.С. Кашаев, А.Н. Темников, З.Ш. Идиятуллин. – Бюллетень изобретений РФ. – 1997. – № 28.

4. Bayer A. Greding T. EP 0 691 526 A1 G01F1/74. Method and apparatus for the determination of the individual mass flow rates of the multicomponent flow, D-91171 (DE), representative: Gregory, Timothy Mark Northampton NN1 SEL (GB).

5. Св-во на полезную модель № 40496 U1, 10.09.2004. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентной жидкости на основе ЯМР / Р.Ф. Валиев, А.Г. Харисов, И.И. Садыков, А.А. Шмелев.

6. Жерновой А.И. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости / А.И. Жерновой, Г.Д. Латышев. – М.: Атомиздат, 1964. – С. 25–26.

7. Пат. РФ № 74710, 10.07.2008. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР / Р.С. Кашаев, А.Н. Темников, З.Ш. Идиятуллин, И.Р. Даутов.

8. Пат. № №67719, 25.06.2007. Портативный релаксометр ПМР / З.Ш. Идиятуллин, Р.С. Кашаев, А.Н. Темников.

9. Пат. РФ № 2427828 C1G01N24/08. Способ измерения скорости потока многофазного флюида при помощи регистрации сигнала ЯМР и устройство для его осуществления / Ш.Г. Ягудин, Р.Р. Харитонов, В.Д. Скирда, М.С. Тагиров, Н.В. Шкаликов, В.И. Попов, А.А. Ибрагимов.

10. Пат. US № 6046587 E21B47/10, G01F1/716, 1/74, G01V3/00, опубл. 04.04.2000.



УДК 621.65:62-83

## **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ И НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН И УСТАНОВОК ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ЯМР**

КАШАЕВ Р.С., КГЭУ, д.т.н., профессор, kashaev2007@yandex.ru

КУБАНГО Б.Э., КГЭУ, магистр, bemk10@mail.ru

*Рассматривается электроснабжение автоматизированных электроприводов технологических процессов нефтедобычи, повышения нефтеотдачи и подготовки нефти по данным экспресс-контроля продуктивности и качества продукции скважин проточным анализатором ядерного магнитного резонанса.*

*Ключевые слова: электроснабжение, автоматизированный электропривод, контроль, ядерный магнитный резонанс.*

В технологиях нефтедобычи и подготовки скважинной жидкости (СКЖ) требуются системы автоматического управления (САУ), основанные на проточном экспресс-контроле количества и качества продукции скважин. Ни один крупный промысел не может в настоящее время обойтись без систем автоматизации и документооборота. Для работы систем уровня АСУП (автоматизированная система управления предприятием) необходимо постоянно или периодически передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1–4 раза в сутки, что явно недостаточно.

Целью представленных работ является разработка системы электроснабжения проточного пробоотбора, анализа и подготовки нефти с использованием автоматизированных электроприводов (АЭП) и аппаратуры для реализации методик экспресс-контроля нефти методом ЯМРР:

- газосодержания СКЖ и плотности компонентов СКЖ;
- концентрации воды в СКЖ и сырой нефти;
- расхода СКЖ на нефтедобывающих и нагнетательных скважинах и на групповых замерных установках (ГЗУ).

Поэтому еще одной целью работ является разработка автоматизации систем электроснабжения нефтедобывающих скважин с использованием управляющих сигналов от проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА) по данным о дебите скважин, концентрации газа и воды

в скважинной жидкости, плотности и солесодержании в воде. При этом предполагается размещение первичных преобразователей не в скважинах, поскольку это ведет к сложностям их энергоснабжения и создает потери напора, а на поверхности у скважин или в групповых замерных установках.

На технологические процессы, связанные с нефтедобычей и повышением нефтеотдачи, оказывают влияние: скачкообразный характер изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому системы автоматического управления нефтедобывающими насосами, установками отделения пластовой воды от сырой нефти, ее очистки от солей и остаточной нефти, электроприводами (ЭП) нагнетательных скважин включают решение следующих основных задач:

- определение параметров сырой нефти (концентраций воды, пластовых солей и остаточной нефти, газонасыщенности);
- регулирование параметров водоотделения от сырой нефти в установках обезвоживания с поддержанием ее параметров на заданном уровне;
- определение параметров процесса (расхода закачиваемой в пласт воды);
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования;
- защиту оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

Таким образом, назначение САУ энергоснабжением – оперативное распределение энергии между электроприемниками месторождения.

В системах промышленного электроснабжения (СПЭ) нефтедобывающих скважин часто имеет место изменение нагрузки электродвигателей (ЭД) центробежных погружных (УЭЦН), штанговых плунжерных (станок-качалка) и цепных насосов (ПЦ), связанное с изменениями наполнения скважины скважинной жидкостью (СКЖ), а также ее состава, что ведет к соответствующему изменению моментов на валу ЭД электроприводов этих исполнительных органов нефтедобычи. Так, на ЭД штанговых насосов моменты даже уравновешенного ЭП (не говоря уже о неуравновешенном) резко изменяются, и потребляемая мощность может меняться от 0,5 до 4,5 кВт.

Для электроприводов глубинно-насосных станков-качалок и насосов, нагнетающих в пласты воду и реагенты, чаще всего применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и повышенным моментом – серия АОП2, у которых  $M_{п}/M_{ном} = 1,8–2$  при кратности пускового тока 5,5–7, и с повышенным скольжением – серия АОС2, у которых кратность пускового тока еще выше (2,6–3,3) при кратности тока 4,5–8,2. Однако наибольшее применение все же находят ЭД единой серии 4А, которые работают в диапазоне мощностей 1,1–11 кВт и для мощностей 15; 18,5; 20 и 30 кВт при частоте вращения 1500 об/мин.

Контроль параметров АЭП может производиться, например, по схеме, представленной на рис. 1. Здесь в качестве расходомера и анализатора параметров СКЖ, сырой нефти или воды, нагнетаемой в пласт, может использоваться многопараметрический проточный ЯМР-анализатор.

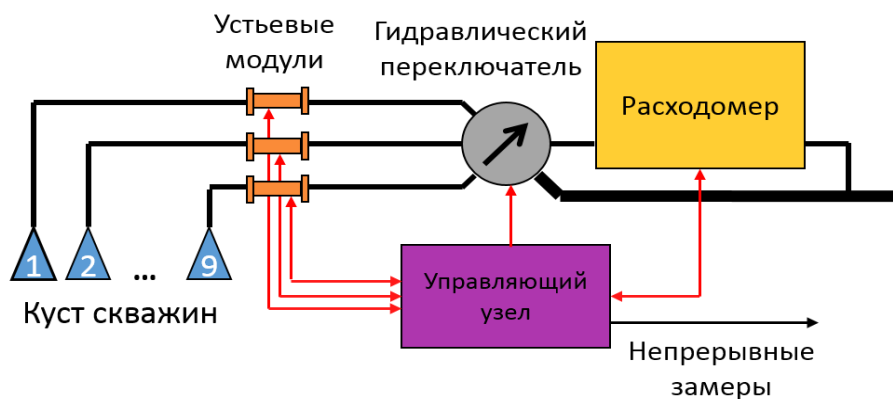


Рис. 1. Схема контроля параметров нефтедобычи

Создание систем автоматического управления (САУ), автоматизированных ЭП и автоматизированных систем управления технологических комплексов (АСУ ТП) потребовали внедрения регулируемых электроприводов (РЭП). Их использование решает также проблему энергосбережения. Энергоаудит, проведенный на ряде отечественных предприятий, показал, что большинство установленных ЭД имеют завышенную мощность, не соответствующую потребностям управляемого механизма, а средняя нагрузка ЭД по отношению к установленной мощности, не превышает 0,4–0,6, коэффициент загрузки составляет 0,3–0,4, то есть КПД электропривода значительно ниже номинального. В то же время в промышленно развитых странах принято считать, что средняя нагрузка ЭД должна составлять 0,6–0,7. При столь низких коэффициентах загрузки отечественных ЭП коэффициент полезного действия ЭД уменьшается на 2–6 %, а  $\cos \varphi$  – на 20–30 %. В Российской

Федерации это приводит к потерям 1–1,5 % электроэнергии.

Применение силовых модулей регулируемых ЭП, управляемых полупроводниковых преобразователей, выпрямителей и инверторов, тормозных модулей и устройств обеспечивает рекуперацию электроэнергии от ЭД в сеть и максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов.

Регулирование скорости АД изменением напряжения и частоты питающего напряжения используется для качественного регулирования, прежде всего, скорости АД. При таком регулировании не увеличивается скольжение  $S$ , поэтому потери мощности от этого фактора оказываются минимальными. При постоянной амплитуде напряжения статора с уменьшением  $f_1$  пусковой и критический моменты ЭД увеличиваются, а жесткость характеристик повышается, резко увеличивается ток намагничивания и статора. Магнитная система насыщается и резко увеличиваются электрические и магнитные потери. Поэтому для оптимального использования способа необходимо одновременно с частотой менять и напряжение. Закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ . При  $M_c = \text{const}$  напряжение  $U_1$  должно меняться пропорционально  $f_1$ :

$$U_1/f_1 = \text{const}. \quad (1)$$

Это следует из формулы:

$$U_1 \approx E = 4,44\Phi w_1 f_p k_{об}, \quad (2)$$

где  $w_1$  – число витков фазы обмотки статора;  $k_{об}$  – коэффициент, учитывающий конструкцию обмотки.

Зависимость между скоростью и моментом сопротивления неодинакова для разных нагрузок. Ряд ЭП требуют пониженной скорости вращения. Например, к ним относятся погружные нефтедобывающие центробежные насосы (УЭЦН), в которых момент нагрузки возрастает с увеличением скорости вращения и чья механическая характеристика описывается параболой, а следовательно, потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения. Теоретически снижение скорости в центробежных насосах на 10 % дает 30 % экономии потребляемой мощности. В зависимости от характера нагрузки ПЧ обеспечивает разные режимы управления ЭД, реализуя зависимость между  $U_1$  и  $f_1$  [1–5].

Режим с линейной зависимостью между  $U$  и  $f$  ( $U/f = \text{const}$ ) реализуется простейшими ПЧ для обеспечения постоянного момента нагрузки и для управления СД или двигателями, включенными параллельно. Вместе с тем, при уменьшении частоты, начиная с некоторого значения, максимальный момент ЭД начинает падать. Для его повышения на низких частотах в ПЧ предусмотрено повышение выходного напряжения.

При вентиляторном характере нагрузки имеем:

$$U_1 / f_1^2 = \text{const}. \quad (3)$$

При моменте, обратно пропорциональном скорости:

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}. \quad (4)$$

Используются и более сложные законы частотного регулирования, учитывающие, в частности, наличие активного сопротивления статора.

Наряду с факторами нестабильности момента сопротивления  $M_c$  на валу погружного электродвигателя центробежных насосов УЭЦН вследствие скачкообразного характера изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменения газового фактора (газовая пробка), дискретного характера срабатывания противоаварийной защиты, имеют место и неполнофазные режимы работы ЭД в результате аварий в линиях электропередач системы энергоснабжения.

Неполнофазные режимы (НПФР) возникают в случае перегорания плавкой вставки в одной из фаз линии, питающей электродвигатель, или потери электрического контакта в одной из фаз кабельной линии от шин главной понизительной подстанции (ГПП) к потребителям. Все эти НПФР имеют локальный характер, и для их избежания используются защиты: защиту от перегрузок, устанавливаемую в двух фазах, или специальную защиту от работы двигателя на двух фазах. В последнем случае можно использовать современные виды защит на цифровых реле, где уставка выставляется в процентном отношении разности токов в фазах. Если имеется обрыв фазы, то эта разность составляет 100 %. Однако при обрыве фазы в линии электропередачи (ЛЭП) электрической системы, от которой питается система питания электродвигателей (СПЭ) несимметричный режим накладывается на всю СПЭ. При этом разность токов в фазах зависит от группы соединения трансформаторов. Причем необходимо отметить, что НПФР в электрической системе может быть длительным, так как для электрических систем не является таким аварийным, как короткое замыкание (КЗ).

Для исследования последствий НПФР в СПЭ в электрической системе была выбрана типичная схема электроснабжения, представленная на рис. 2, где трансформатор ГПП (Т1) мощностью 16 МВ·А, напряжением 110/10 кВ через ЛЭП длиной 50 км с системой (С) напряжением 110 кВ, мощностью КЗ, которая равна 120 МВ·А. От шин 10 кВ ГПП через трансформатор Т2 мощностью 1 МВ·А, напряжением 10/0,4 кВ получают питание три асинхронных двигателя (М1), каждый мощностью 250 кВт, и такой же мощности семь асинхронных двигателей (М2) питаются через трансформатор Т3. Трансформатор Т1 имеет группу соединения обмоткой Ун/Д-11, трансформатор Т2 – У/Ун-0, а трансформатор Т3 – Д/Ун-11.

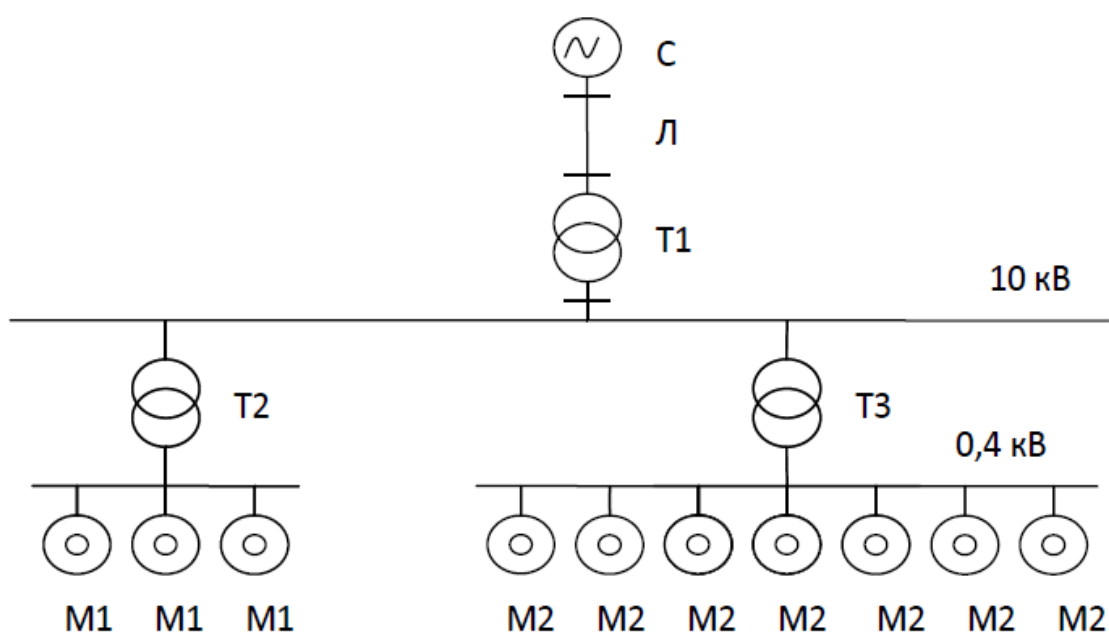


Рис. 2. Исследуемая схема энергоснабжения группы ЭД

Принятое допущение: при расчете не учитываются активные сопротивления различных элементов исходной схемы; расчет производится для времени  $t = 0$ . Последствия НПФР в СПЭ определяются значением дополнительного сопротивления  $\Delta Z_{Ln}$  в месте обрыва фазы в схеме замещения прямой последовательности. При обрыве одной фазы в линии 110 кВ:

$$\Delta Z_{Ln} = \frac{Z_{L2} Z_{L0}}{Z_{L2} + Z_{L0}}, \quad (5)$$

где  $Z_{L2}$ ,  $Z_{L0}$  – эквивалентные сопротивления обратной и нулевой последовательностей СПЭ относительно место обрыва.

Падение напряжения  $\Delta U_L$  в этом сопротивлении уменьшает напряжение прямой последовательности на нагрузке. Кроме того, такое же значение напряжения возникает в месте обрыва в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей и определяет токи и напряжения этих последовательностей в СПЭ [6].

Рассмотрим обрыв фазы  $A$  в начале ЛЭП. Согласно методу симметричных составляющих, падение напряжения в месте обрыва фазы определяются следующим уравнением напряжения:

– для прямой последовательности

$$\Delta U_{L1} = U_C - I_{L1} Z_{L1}; \quad (6)$$

– для обратной последовательности

$$\Delta U_{L2} = 0 - I_{L2} Z_{L2}; \quad (7)$$

– для нулевой последовательности

$$\Delta U_{L0} = 0 - I_{L0} Z_{L0}, \quad (8)$$

где  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ ,  $Z_{L0}$  – эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей СПЭ относительно место обрыва фазы;  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L0}$  – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, протекающие в поврежденной фазе ЛЭП, так что в ЛЭП:

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L0} = I_{LA} = 0 \quad (9)$$

падение напряжения в месте обрыва

$$\Delta U_{L1} = \Delta U_{L2} = \Delta U_{L0}. \quad (10)$$

На основе этих уравнений и с учетом группы соединения трансформаторов были определены токи и напряжения в фазах, которые представлены в табл. 1 и 2, где показаны их значения в линии Л 110 кВ, на стороне высокого напряжения (ВН) 10 кВ и на стороне низкого напряжения (НН) 0,4 кВ трансформаторов Т2 и Т3. Для сравнения в табл. 3 и 4 представлены соотношения токов и напряжений элементов схем электроснабжения и наибольшие токи в фазах, протекающие в неполнофазном режиме, где  $I_{ф.нр}$ ,  $I_{ф.нпр}$  – ток фаз в нормальном и НПФР;  $U_{ф.нр}$ ,  $U_{ф.нпр}$  – фазное напряжение в нормальном и НПФР.

В табл. 3 и 4 отношение токов и напряжений для Тр были определены со стороны низкого напряжения.

Таблица 1

Токи в фазах *A*, *B* и *C* при обрыве

	Ток фазы <i>A</i> , кА		Ток фазы <i>B</i> , кА		Ток фазы <i>C</i> , кА	
	ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН
Линия (Л)	0		0,075		0,075	
Трансформатор (Т1)	0	0,477	0,075	0,695	0,075	0,477
Трансформатор (Т2)	0,14	3,5	0,204	5,09	0,14	3,5
Трансформатор (Т3)	0,335	6,61	0,488	11,1	0,335	11,1

Таблица 2

Напряжение в фазах *A*, *B* и *C* при обрыве

	Напряжение фазы <i>A</i> , кВ		Напряжение фазы <i>B</i> , кВ		Напряжение фазы <i>C</i> , кВ	
	ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН
Линия (Л)	25,3		0		0	
Трансформатор (Т1)	25,3	5,5	0	8	0	5,5
Трансформатор (Т2)	5,5	0,22	8	0,32	5,5	0,22
Трансформатор (Т3)	5,5	0,17	8	0,29	5,5	0,29

Таблица 3

Соотношение токов в фазах *A*, *B* и *C*

	$I_{ф.нр}/I_{ф.нпр}$		
	фаза <i>A</i>	фаза <i>B</i>	фаза <i>C</i>
Линия (Л)	$\infty$	1,2	1,2
Трансформатор (Т1)	1,94	1,34	1,94
Трансформатор (Т2)	0,41	0,28	0,41
Трансформатор (Т3)	0,5	0,3	0,3
Двигатель (М1)	0,35	0,25	0,35
Двигатель (М2)	0,4	0,26	0,26



Соотношение напряжений в фазах *A*, *B* и *C*

	$I_{ф.нр}/I_{ф.нпр}$		
	фаза <i>A</i>	фаза <i>B</i>	фаза <i>C</i>
Линия (Л)	2,51	$\infty$	$\infty$
Трансформатор (Т1)	1,05	0,72	1,05
Трансформатор (Т2)	1,04	0,72	1,05
Трансформатор (Т3)	1,35	0,79	0,79
Двигатель (М1)	1	0,72	1
Двигатель (М2)	1,35	0,79	0,79

Анализ полученных результатов показывает, что существующие защиты трансформаторов (максимальная токовая защита – МТЗ) от перегрузки не срабатывают. В тяжелых условиях находятся электродвигатели, величины токов которых в некоторых фазах намного превышают номинальные.

Кроме этого, наблюдается снижение напряжения на шинах 0,4 кВ, что приводит к увеличению скольжения и реактивной мощности асинхронного двигателя и, в зависимости от его загрузки, к нарушению устойчивости.

Результаты расчета подтверждаются практикой. Обрыв одной фазы в линии 110 кВ, от которой осуществляется питание потребителей птицефабрики, привел к повреждению (сгоранию) 70 % всех электродвигателей на 0,4 кВ и к значительному ущербу, который выразился в виде падежа птиц.

Отсюда следует вывод, что необходимо усовершенствовать защиту от таких повреждений и устанавливать защиту от перегрузок не только в одной фазе, но и во всех трех, или применять специальную защиту.

В табл. 1–4 приведены данные расчетов по токам и напряжениям в разных аварийных режимах.

Из табл. 3 видно, что на ЛЭП МТЗ не срабатывает. Ток НПФР значительно превышает номинальный в большинстве случаев в двигателях, что приводит к выходу их из строя.

Так как приемниками в данной работе являются асинхронные двигатели, следует анализировать переходные процессы в АД. Основными характеристиками переходных процессов в АД, представляющими наибольший интерес, являются величины токов и моментов, время протекания, потери энергии в обмотках и их нагрев. При анализе

переходных процессов АД обычно рассматриваются: включение обмотки статора при разомкнутой обмотки ротора, пуск с короткозамкнутой обмоткой ротора, процесс разбега, тепловые потери в обмотках АД при пуске, повторное включение, реверсирование, отключение АД [7 – 11].

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- из-за обрыва одной из фаз ЛЭП на вторичной обмотке трансформатора восстанавливается ток во всех фазах;
- для предотвращения неполнофазных режимов следует использовать математическое моделирование переходных процессов;
- из-за обрыва фаз двигателя перестают запускаться или начинают забирать необходимый ток из других фаз, в такой ситуации обмотки двигателя подвергаются неравномерным нагрузкам, что может послужить причиной его повреждения;
- значение токов в фазах потребителей (асинхронных двигателей) значительно превышает ток фазы в нормальном режиме, что приводит к повреждению самих двигателей;
- защиту от перегрузок необходимо устанавливать в трех фазах.

### Источники

1. Кашаев Р.С. Автоматизированный электропривод и средства контроля в технологических и измерительных комплексах нефтяной промышленности: учеб. пособие / Р.С. Кашаев. – Казань, 2010. – 363 с.
2. Кашаев Р.С. Электропривод общепромышленных механизмов. Типовые расчеты: учеб. пособие / Р.С. Кашаев. – Казань, 2008.
3. Кашаев Р.С. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. пособие / Р.С. Кашаев. – Казань: Новое знание, 2005. – 118 с.
4. Кашаев Р.С. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: метод. указания к типовым расчетам / Р.С. Кашаев. – Казань, 2007. – 61 с.
5. Белов М.П. Автоматизация электропривода общепромышленных механизмов и технологических комплексов: учебник / М.П. Белов, Л.Н. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2004. – 576 с.
6. Былкин М.В. Моделирование, анализ и устранение последствий несимметричных режимов в системах электроснабжения / М.В. Былкин. – М., 1999.
7. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг. – М.: Высшая школа, 2001.

8. Кубанго Б. Исследования влияния неполнофазных режимов в электрической системе на режимные характеристики систем электроснабжения / Б. Кубанго // Тинчуринские чтения: матер. 4-й Междунар. молодеж. конф. – Казань, 2009. – Т. 1.

9. Кубанго Б. Влияние несимметричных режимов на двигательную нагрузку в системе электроснабжения / Б. Кубанго // Тинчуринские чтения: матер. 5-й Междунар. молодеж. науч. конф. – Казань, 2010. – Т. 1.

10. Кубанго Б. Несимметричные режимы работы двигателей / Б. Кубанго // 12-й Аспирантско-магистерский семинар, посвященный дню энергетика и 40-летию образования КГЭУ. – Казань, 2011.

11. Кубанго Б. Режимные характеристики систем электроснабжения при продольной несимметрии в электрической системе / Б. Кубанго // Вестник КГЭУ. – 2010. – № 2(5).

УДК 621.65:62-83

## **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СЫРОЙ НЕФТИ ПО ДАННЫМ ЯМР-АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОТДЕЛЕНИЯ ВОДЫ ОТ НЕФТИ И ЕЕ ОЧИСТКОЙ**

КАШАЕВ Р.С., КГЭУ, д.т.н., профессор, kashaev2007@yandex.ru

ТУНГ Ч.В., КГЭУ, аспирант, tvtung@cnd.edu.vn

*Рассмотрены вопросы онлайн-контроля параметров балласта скважинной жидкости системой пробоотбора на базе автоматизированного электропривода (АЭП) и управления отделением воды от нефти по данным анализа проточным ЯМР-анализатором (ЯМРА).*

*Ключевые слова: онлайн-контроль, параметры, автоматизированный электропривод, обезвоживание, проточный, анализатор, ядерный магнитный резонанс.*

Первоначально нефть добывающими скважинами извлекают, используя высокое начальное давление в пласте, превышающее давление на забое скважины. Но по мере выработки пласта синхронно с понижением давления падает и дебит скважины. Для сохранения продуктивности скважин и темпов добычи нефти используют метод внутриконтурного заводнения путем закачки в недра воды через нагнетательные скважины.

В последние годы многие отечественные месторождения находятся на последних стадиях разработки, и в связи с резким повышением обводненности добываемой скважинной жидкости (СКЖ) актуальна задача разработки экспресс-методов контроля СКЖ на расход по ГОСТ 8.615-2005, концентрацию солей и остаточной нефти в пластовой воде для оптимизации технологических процессов нефтедобычи, а также удаления и очистки балласта СКЖ (пластовой воды) от солей и использования очищенной воды для заводнения нефтеносных пластов. Существующие методы контроля и анализа не обладают достаточной представительностью пробоотбора, не дают полной информации, осуществляются с помощью комплектов разных анализаторов и не обладают достаточной оперативностью.

Таковыми возможностями обладает метод импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), в частности метод ЯМР-релаксометрии (ЯМРР), являющийся неконтактным, неразрушающим и позволяющим проводить экспресс-анализ без подготовки пробы и в автоматизированном режиме. Перечисленные аспекты определяют актуальность и важность поставленных и решаемых в работе задач.

Целью работ является разработка автоматической системы проточного пробоотбора на базе АЭП и аппаратуры контроля сточных вод нефтедобычи и нефтеподготовки путем реализации ЯМР-методик экспресс-контроля:

- концентрации воды в эмульсии при отделении пластовой воды от СКЖ;
- концентрации солей и остаточной нефти в пластовой и очищенной воде;
- расхода воды при закачке воды в пласт через нагнетательные скважины.

Разработка методик экспресс-контроля одним измерительным комплексом на базе метода ЯМР обеспечит аппаратную поддержку оптимизации технологических процессов добычи, подготовки нефти, повышения нефтеотдачи пластов.

Для работы информационных систем нефтедобычи уровня АСУП (автоматизированная система управления предприятием) необходимо постоянно или периодически, но часто передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако зачастую эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1–4 раза в сутки.

Нами предложена система автоматического пробоотбора, функционирующая от АЭП и представленная на рис. 1. Здесь 1 – емкость с растворителем; 2, 14 – воздушные обратные клапаны; 3, 4, 7, 10 – электромагнитные клапаны; 5 – ЯМР-анализатор; 6 – счетчик воды с импульсным выходом; 8, 11, 12, 15 – вентили; 9 – насос; 13 – расширитель; 16 – емкость с отходами.

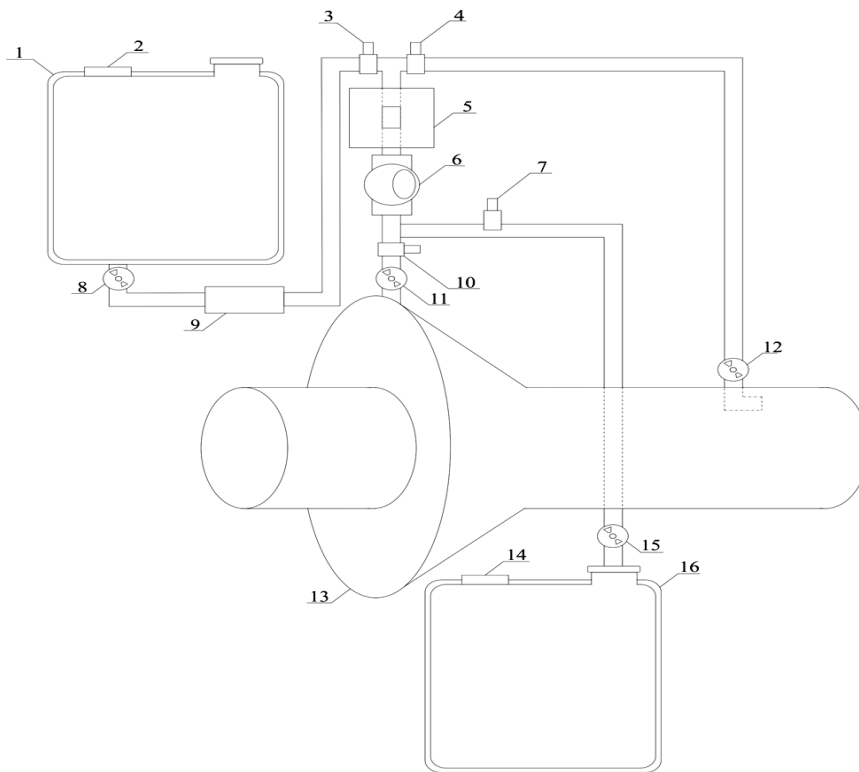


Рис. 1. Общий вид автоматизированной установки контроля концентрации нефти в воде

Поток жидкости, проходя через основной трубопровод, попадает в расширитель 13, в котором снижает скорость и увеличивает давление. В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, т.е. жидкость интенсивно перемешивается до однородной смеси создаваемыми вихревыми потоками и попадает в трубу с анализатором. При этом электромагнитные клапаны 4 и 11 находятся в открытом положении. Далее жидкость проходит через счетчик воды с импульсным выходом 6, где идет отсчет необходимого нам количества жидкости. Электромагнитные клапаны 3 и 7 находятся в закрытом положении для исключения возможности попадания жидкости в емкости 1 и 16. После прохождения смеси через счетчик воды 6 примеси нефти осаждаются на фильтре, расположенном в трубе под ЯМР-анализатором 5, и далее жидкость попадает по замкнутому контуру обратно в основной трубопровод. Как только импульсный счетчик воды 6 отсчитает X литров –

количество воды, задаваемое оператором, клапаны 4 и 10 закрываются. ЯМР-анализатор 5 начинает анализ примесей нефти, осажденных на фильтре. По окончании анализа процесс повторяется с самого начала, если допустимое значение загрязненности фильтра не превышает норму. В случае превышения предела загрязненности фильтра поступает сигнал от ЯМР-анализатора 5, дающий команду на очистку фильтра анализатора. При этом открываются соленоидные клапаны 3 и 7, включается насос 9 и начинается процесс перекачки растворителя из емкости 1 в емкость 16. Обратные клапаны 2 и 14 необходимы соответственно для всасывания и выпуска воздуха. С помощью вентилей 8, 11, 12, 15 можно регулировать пропускную способность трубопровода либо перекрыть его для технических работ.

Для управления автоматизированной установкой контроля концентрации примесей нефти в воде используется отладочный набор и система проектирования 57X500 для AVR флэш-контроллеров фирмы Atmel, который поставляется с микроконтроллером ATMEGA8515L на панели с маркировкой SCKT3000D3.

Еще одной целью работы является разработка системы автоматического управления процессом отделения пластовой воды от СКЖ и контроля ее очистки с использованием управляющих сигналов от проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА).

На технологические процессы, связанные с повышением нефтеотдачи, оказывают влияние: скачкообразный характер изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому системы автоматического управления отделения пластовой воды от сырой нефти, ее очистки от солей и остаточной нефти включают решение следующих основных задач:

- определение параметров сырой нефти (концентраций воды, пластовых солей и остаточной нефти);
- регулирование параметров водоотделения от сырой нефти в установках обезвоживания с поддержанием ее параметров на заданном уровне;
- определение параметров процесса (расхода закачиваемой в пласт воды);
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования;
- защиту оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

На рис. 2 представлена схема куста нагнетательных скважин.

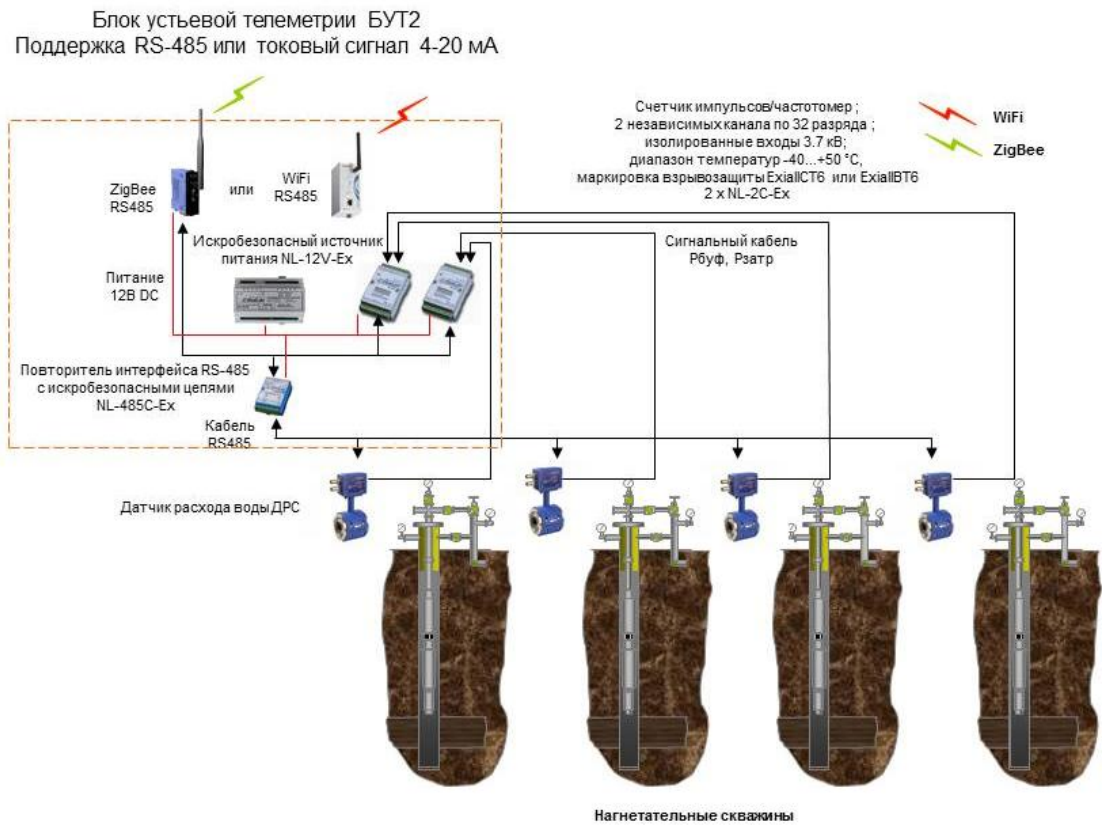


Рис. 2. Схема куста нагнетательных скважин

Основным видом разработки месторождения является режим разработки с поддержанием пластового давления. Для этого в пласт закачивают воду, водные растворы полимеров, щелочные растворы, эмульсии. При этом реагент выполняет две основные функции: поддержание пластового давления и улучшение процесса вытеснения нефти из пласта в добывающие скважины. Закачиваемый реагент поступает в пласт через нагнетательные скважины. Жидкость из пласта в эксплуатационную скважину поступает под действием перепада давления между пластом и забоем скважины.

Схема водоснабжения для заводнения пластов состоит из водозаборных сооружений для забора воды из источников и подачи ее насосами в водопроводную сеть или на водоочистную установку. С водоочистной установки вода подается в сеть, кустовые насосные станции для подачи воды и закачки ее в нагнетательные скважины.

Для закачки воды в нефтяные пласты применяют блочно-кустовые насосные станции БКНС, которые поднимают давление до давления нагнетания в пласт и направляют ее к водораспределительным гребенкам и

далее к нагнетательным скважинам. На КНС применяются центробежные насосы типа ЦНС с номинальной подачей  $180 \text{ м}^3/\text{ч}$  воды и напором от 900 до 1900 м. Технологическая схема нефтедобычи, например, НГДУ «Альметьевнефть» представлена на рис. 3.

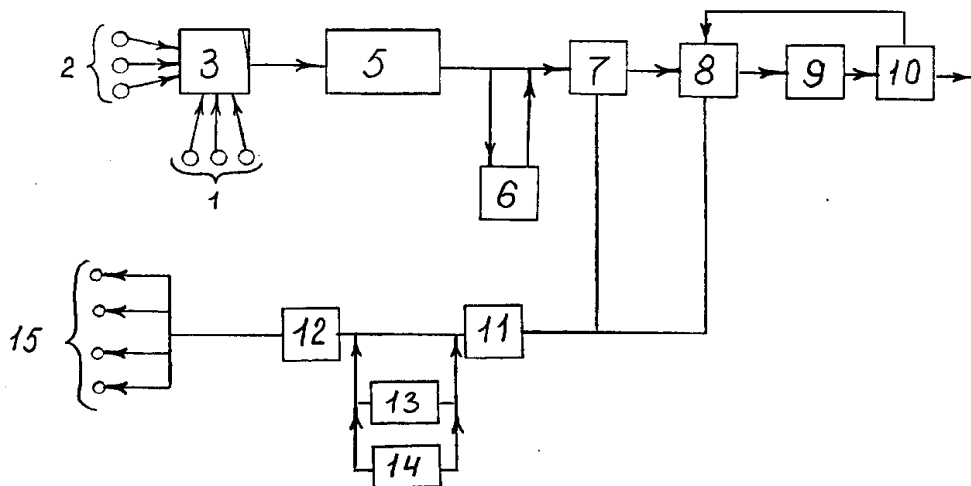


Рис. 3. Технологическая схема нефтедобычи НГДУ «Альметьевнефть»

В соответствии со схемой скважинная жидкость (СКЖ) в виде газонефтяной смеси с примесью воды с добывающих скважин 1, 2 поступает по трубопроводу на автоматизированную групповую замерную установку (ГЗУ) 3, где каждая скважина автоматически по программе подключается к измерительному устройству. После измерения дебитов жидкости и газа газожидкостная смесь от ГЗУ поступает в сепарационную установку 5, где происходит частичное отделение газа от жидкости (первая ступень сепарации). Продукция обводненных скважин по трубопроводам после измерения транспортируются в цех комплексной подготовки и перекачки нефти (ЦКППН). В случае низких буферных давлений эксплуатационных скважин для транспортировки нефти по системе нефтепромыслового сбора применяют дожимные насосные станции (ДНС) 6. В случае большого содержания воды (более 30 %) в транспортируемой жидкости применяются сепарационные установки с предварительным сбросом воды 7, 8.

Отделившаяся на обезвоживающих установках пластовая вода поступает на установки очистки пластовых вод, где она очищается для использования ее в системе поддержания пластового давления. С установок очистки вода попадает на автоматизированные КНС 10, откуда она поступает для закачки в нагнетательные скважины 15. На КНС подается также вода с водозаборных 13 и очистных 14 сооружений.



После установки 8 водонефтяная смесь поступает в сепарационную установку 9, предназначенную для извлечения из нефти углеводородных фракций. На установке 10 осуществляется учет товарной нефти по объему и массе и откачка ее на головные сооружения магистрального нефтепровода. Если обводненность нефти, поступившей на установку 10, превышает допустимые нормы, нефть автоматически возвращается на повторную обработку в электрообезвоживающую очистную установку ЭЛОУ 12.

В системе поддержания пластового давления к наиболее важному и конструктивно сложному звену относится КНС, которая состоит из блоков: буферного, насосов, управления АЭП, распределительной гребенки, распределительных устройств. Буферный блок состоит из двух горизонтальных емкостей 1 по 50 м<sup>3</sup> для отстаивания воды и удаления механических примесей. Насосные блоки закачивают воду в нагнетательные скважины. Для автоматического управления, защиты и контроля параметров КНС применяется система «Пласт-1М» (рис. 4). На рис. 4: 1, 14 – блоки управления; 2, 15 – блоки защиты; 3, 16 – панели КИП; 4, 17 – блоки исполнительных реле; 5, 20 – аппаратура давления; 6, 21 – манометры; 7, 19 – щиты сигнализации; 8, 9, 28 – насосы откачивающие; 11, 25 – электрозадвижки на нагнетание; 12, 26 – датчики по месту; 13 – устройство формирования сигналов ТУ и ТС; 18 – блок контроля температуры; 22 – шкаф тиристорного возбуждения; 23, 24 – маслонасосы; 27 – пусковое устройство; 28 – насосный агрегат; 29 – аппаратура щита автоматизации насосного агрегата; 30 – аппаратура щита местного контроля и управления насосным агрегатом; 31 – силовое оборудование; 32 – оборудование насосов. Система выполнена по блочно-функциональному принципу и включает следующую аппаратуру: щиты автоматизации КНС, автоматизации насосного агрегата, контроля и управления вспомогательного оборудования станции, а также комплект датчиков, необходимых для нормальной работы технологического оборудования КНС.

АЭП обеспечивает существенную часть роста нефтедобычи, повышения КПД насосных установок. Другим фактором, значительно улучшившим показатели, стало широкое применение микропроцессорных (МП) средств управления, защиты и регулирования. МП-контроллер осуществляет формирование режимов работы АЭП с помощью сигналов ШИМ-управления транзисторами автономных инверторов напряжения (АИН), защиты и аварийного отключения АЭП, приема и передачи внешних управляющих, задающих и информационных сигналов.



УДК 621

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

КАШАЕВ Р.С., КГЭУ, д.т.н., профессор, kashaev2007@yandex.ru  
ХУСНИЯРОВ И.Ф., КГЭУ, магистрант

*Рассмотрена конструкция и принцип действия устройства прямого преобразования солнечной радиации в электрическую энергию сочетанием термоэлектрических и фотоэлектрических преобразователей для обеспечения экологически чистым энергопитанием автономных датчиков и средств автоматики.*

*Ключевые слова: прямое преобразование, солнечная радиация, электрическая энергия, термоэлектрические, фотоэлектрические преобразователи.*

В полевых условиях электроснабжения датчиков и приборов плодотворна идея использования компактных устройств электропитания, основанных на преобразовании солнечного света и естественных перепадов температур в течение всего времени суток в электроэнергию солнечными панелями и термоэлементами на солнечном коллекторе с использованием эффекта Зеебека. Облучение и перепады температур могут создаваться также внешними источниками – горелками, костром, выхлопными газами двигателя и т.д. Такое устройство может найти применение в самых разных климатических зонах в любое время суток.

Для питания автоматических датчиков и средств автоматики в настоящее время широкое распространение получили электрогенераторы на фотоэлектрических элементах (ФЭ), обычно объединенных в солнечные панели. Солнце излучает энергию в диапазоне  $\lambda = 200 \dots 3000$  нм. При этом используемый ФЭ диапазон ультрафиолетовых длин волн  $\lambda = 200 \dots 800$  нм охватывает 58 % всей энергетической эффективности солнечного излучения. В то же время 42 % энергии Солнца лежит в диапазоне длин волн  $\lambda = 800 \dots 3000$  нм, в области теплового (инфракрасного – ИК) излучения, и фотоэлементами не используется. Кроме того, у ФЭ снижается КПД при их нагреве, также они не способны к электрогенерации в ночное время суток. Это ведет к тому, что, несмотря на то, что в некоторых образцах ФЭ достигнут КПД = 20...25 %, в реальных ФЭ он составляет 10–12 % [1].

Одним из решений задачи более эффективного использования солнечной радиации в ИК-области спектра является использование термоэлектрических элементов (ТЭ), основанных на эффекте Зеебека [2] – преобразовании в электроэнергию перепада температур аккумуляторов тепла от Солнца, а также бросового тепла в разных его формах – тепла отходящих газов теплоэлектростанций и котельных, нефти в трубопроводах, перепада температур воздуха и проточной воды в горах и артезианских скважинах и др.

Принцип эффекта Зеебека заключается в генерации термоЭДС с коэффициентом  $\alpha$ . Прибор, работающий на этом явлении, – термопара или ТЭ из  $N$  проводников с разными коэффициентами термоЭДС  $\alpha_A$  и  $\alpha_B$  (табл. 1). Если концы проводников находятся при разных температурах  $T_0$  и  $T_L$ , то на концах ветвей появляется термоЭДС:

$$\varepsilon = N(\alpha_A - \alpha_B)(T_0 - T_L). \quad (1)$$

В табл. 1 приведены значения коэффициентов термоЭДС  $\alpha$  некоторых полупроводников и металлов.

Таблица 1

Значения термоЭДС для  $T = 300$  К

Полупроводники	$\alpha$ , мкВ/К	Металлы	$\alpha$ , мкВ/К
MnS	-770	Pb	-0,1
ZnO	-714	Cu	+2,6
FeS <sub>2</sub>	-430	Te	+400
Cu <sub>2</sub> O	1150	Se	+1000

Эффективность ТЭ определяется безразмерным коэффициентом – термоэлектрической добротностью (или коэффициентом Йоффе):

$$ZT = \sigma \alpha^2 T / k, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности, а  $P = \sigma \alpha^2$  – термоэлектрический коэффициент мощности,  $\sigma$  – электропроводность. КПД такой системы:

$$\eta = C \Delta T s / l, \quad (3)$$

где  $C = \alpha^2 k / 2(\rho_1 + \rho_2) = \text{const}$ ;  $s$  – площадь сечения токопроводящей ветви;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления компонентов термопары.

Благодаря уменьшению длины ветвей  $l$  до 0,1 нм удается практически освободиться от рассеяния направленной энергии электронов на ионных остовах решетки.

КПД удается повысить до  $\approx 15...18\%$  в составных термоэлектрических генераторах (ТЭГ). Такой ТЭГ позволяет получать значительные мощности уже при самых незначительных перепадах температур, всегда присутствующих в окружающей среде.

Но очень важный, практически не используемый ресурс энергии – тепло экзотермического фазового перехода (ЭФП), получаемое при кристаллизации фазоменяющего теплоаккумулирующего материала (ТАМ) при его остывании. Известно, что удельная энергоемкость ТАМ достигает  $15\,000\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ , что в 25 раз выше удельной энергоемкости воды ( $60\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ). В качестве ТАМ могут быть применены гидратные соли и парафины, имеющие температуры фазовых переходов (ФП) в диапазоне  $0...100\text{ }^\circ\text{C}$ . Характеристики (температура плавления  $T_{\text{пл}}$ ,  $^\circ\text{C}$ , теплота плавления  $Q_{\text{пл}}$ , кДж/кг, и плотность  $\rho_{\text{ТВ}}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ), например, для кристаллогидратных солей приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики для кристаллогидратных солей

Материал	$T_{\text{пл}}$ , $^\circ\text{C}$	$Q_{\text{пл}}$ , кДж/кг	$\rho_{\text{ТВ}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$
$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,7	170	1710
$\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32,4	251	1460
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	210	1600
$\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58,2	260	1450
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	116	165	1570

Известно устройство по патенту RU № 135540, содержащее последовательно соединенные блок ТЭ, блок управления, аккумуляторную батарею, инвертор, а также солнечную панель, соединенную с блоком управления и аккумуляторной батареей. ТЭГ снабжен тепло-, холодопроводящими пластинами, первой и второй емкостями, заполненными соответственно первым и вторым рабочими веществами, блок ТЭ имеет верхнюю и нижнюю поверхности, на которых закреплены соответственно первая и вторая емкости, при этом первое и второе рабочие вещества имеют возможность испытывать фазовые переходы из одного агрегатного состояния в другое в разных температурных интервалах

окружающей среды в течение всего времени суток, а тепло-, холодопроводящие пластины закреплены на нижней поверхности блока ТЭ и погружены во второе рабочее вещество.

Недостатками этого устройства являются: низкая надежность работы в экстремальных условиях жаркого климата вследствие нагрева ФЭ солнечной панели и снижения ее КПД; рабочее вещество (ТАМ) имеет определенные температуры экзотермического фазового перехода и, следовательно, тепловыделение при кристаллизации будет находиться в узком температурном и временном диапазоне.

Известно также устройство по патенту RU № 134698, включающее термоэлектрические элементы, систему охлаждения, теплообменник горячих спаев термоэлементов, блок управления, полученная электроэнергия через аккумулятор направляется к потребителям. Оно отличается тем, что блок термоэлементов закреплен одной поверхностью на радиаторе с пористым капиллярным веществом, способным поглощать и испарять воду, а другой поверхностью – на теплоаккумулирующей емкости, способной поглощать и накапливать за счет тепла окружающего пространства и солнечной радиации, а также генерировать тепло за счет рабочего вещества, испытывающего фазовые переходы под воздействием изменений температуры окружающей среды в течение всего времени суток. В качестве рабочего вещества используется смесь кристаллогидратных солей или парафинов, имеющих разные температуры фазовых переходов. Блок управления (контроллер) выполняет функции: переключения направления, стабилизации и регулировки тока термоэлементов для зарядки аккумулятора, а также переключения работы ТЭ на режим нагрева теплоаккумулирующей емкости. К радиатору на термоэлементе прикреплен воздухозаборник, повернутый к ветру; инвертор для питания потребителей переменного тока разной частоты; к емкости прикреплен солнечный коллектор.

Известное устройство позволяет получать электроэнергию в весенне-летне-осеннее время круглосуточно. Недостатками этого устройства являются: низкая эффективность, поскольку поглощается только 42 % солнечной радиации в тепловом диапазоне спектра и не используется 58 % радиации видимой части спектра; смесь кристаллогидратных солей или парафинов, используемая в качестве рабочего вещества ТАМ, вследствие химического взаимодействия между собой не в полной мере выполняет свою функцию последовательного выделения тепловой энергии по мере охлаждения ТАМ в ночное время суток.

Задачей, поставленной в данной работе, является разработка термоэлектрического генератора, в котором устранены недостатки, повышены эффективность, надежность устройства и увеличен температурный и временной диапазон его работы в условиях круглогодичной (в том числе зимней) эксплуатации в любое время суток.

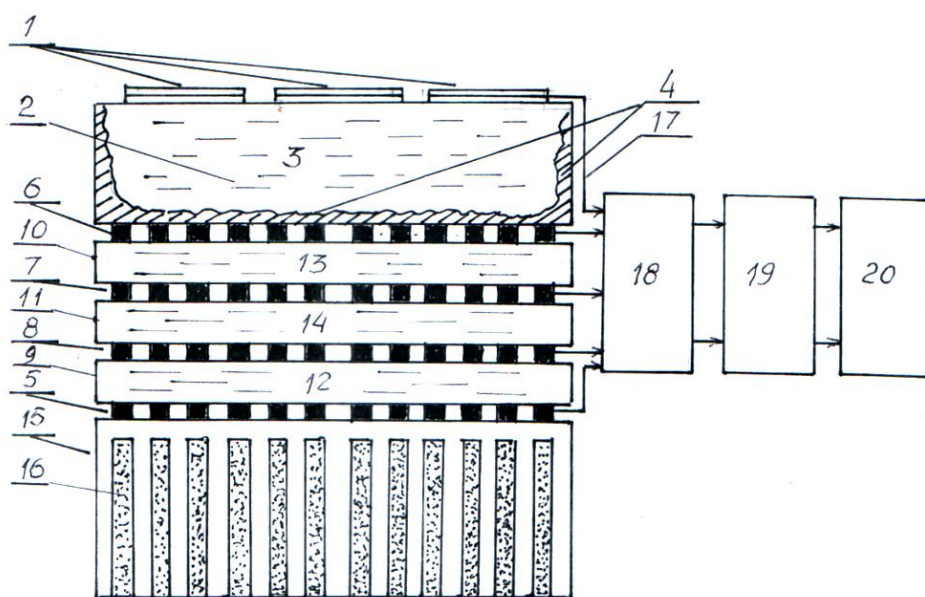
Результат достигается тем, что в термоэлектрический генератор, включающий последовательно соединенные первый блок термоэлементов (ТЭ), блок управления, который выполняет функции переключения направления, стабилизации и регулировки тока ТЭ для зарядки аккумулятора, инвертор, первую емкость, наполненную первым теплоаккумулирующим материалом (ТАМ), радиатор с пористым капиллярным веществом, способным поглощать и испарять влагу, к которому через первый блок ТЭ прикреплена первая емкость с первым ТАМ, способным поглощать и накапливать тепло за счет изменений температуры окружающей среды и генерировать тепло за счет экзотермического фазового перехода (ЭФП) под воздействием изменений температуры окружающей среды. Дополнительно введены солнечные батареи, солнечный коллектор (СК), наполненный незамерзающей теплопроводящей жидкостью и имеющий внутреннюю свето- и теплопоглощающую поверхность, вторая и третья дополнительные емкости, наполненные соответственно вторым и третьим ТАМ, а также второй, третий и четвертый блоки ТЭ, причем солнечные батареи прикреплены к верхней стороне СК. К нижней стороне СК прикреплен второй блок ТЭ, к нижней стороне которого, в свою очередь, прикреплена вторая емкость с прикрепленным снизу третьим блоком ТЭ, к нижней стороне которого прикреплена третья емкость, а к ее нижней поверхности прикреплен четвертый блок ТЭ, нижней поверхностью контактирующий с первой емкостью.

При этом первый, второй и третий ТАМ имеют разные температуры экзотермического фазового перехода. Термогенератор может содержать  $n$  дополнительных емкостей с  $n$  ТАМ с разными температурами ЭФП с прикрепленными к ним  $n$  блоками ТЭ.

Таким образом, технический результат достигается тем, что солнечные батареи, прикрепленные к внешней стороне СК с теплопроводящим рабочим веществом и с внутренней свето-, теплопоглощающей поверхностью, эффективно охлаждаются рабочим веществом СК, тем самым поддерживается высокий КПД фотоэлементов солнечной панели в жаркое время суток за счет отвода от них тепла. Солнечная батарея круглогодично (в том числе и зимой) генерирует ток в светлое время суток. Три емкости с ТАМ, имеющим разные температуры ЭФП  $T_{K1}$ ,  $T_{K2}$  и  $T_{K3}$  (причем  $T_{K2} > T_{K3} > T_{K1}$ ),

при охлаждении в холодное время суток последовательно, начиная с верхней ТАМ в верхней емкости испытывают ЭФП, поддерживая разность температур  $\Delta T_{ТЭ}$  на блоках ТЭ, расположенных между ними. Четыре последовательно соединенных блока ТЭ выполняют функции составной термоэлектрической батареи, повышая КПД термоэлектрического генератора, причем количество блоков ТЭ может наращиваться. Фотоэлементы солнечной панели и термоэлементы при перепадах температур  $\Delta T_{ТЭ}$  вырабатывают электрический ток, который по электрическим проводам передается в блок управления (контроллер), в котором ток переключается в зависимости от полярности температурных градиентов  $\Delta T_{ТЭ}$  на ТЭ, направляется в аккумулятор и при необходимости далее передается в инвертор для питания потребителей переменного тока необходимой частоты.

Сущность устройства поясняется чертежом на рисунке, где изображена конструкция термоэлектрического генератора.



Конструкция термоэлектрического генератора

Здесь 1 – солнечные батареи; 2 – солнечный коллектор; 3 – незамерзающая теплопроводящая жидкость; 4 – внутренняя свето-, теплопоглощающая поверхность СК; 5 – 8 – первый, второй, третий и четвертый блоки ТЭ; 9 – 11 – первая, вторая и третья емкости с ТАМ; 12–14 – первый, второй и третий ТАМ с разными температурами ЭФП; 15 – радиатор; 16 – пористое капиллярное водопоглощающее/испаряющее вещество; 17 – токопроводящие электрические провода; 18 – блок управления; 19 – аккумулятор; 20 – инвертор.



Устройство работает следующим образом. Солнечная радиация падает на солнечную батарею 1, расположенную на внешней стороне СК 2, и поглощается фотоэлементами солнечной панели в диапазоне длин волн  $\lambda = 200 \dots 800$  нм, который охватывает 58 % энергетической плотности солнечного излучения, и вырабатывается электрический ток, передаваемый в блок управления 18. Оставшиеся 42 % солнечной радиации (в силу прозрачности фотоэлементов и зазоров между ними) поглощаются незамерзающим теплопроводящим веществом 3 СК 2, а также внутренней свето-, теплопоглощающей поверхностью 4 СК. К нижней стороне СК прикреплен блок ТЭ 6, к которому снизу прикреплена вторая емкость 10, наполненная вторым ТАМ 13, и на перепаде температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между СК и поверхностью второй емкости 10 вырабатывается электрический ток, передаваемый в блок управления 18. К нижней стороне емкости 10 прикреплен блок ТЭ 7, к нижней стороне которого прикреплена третья дополнительная емкость 11, и на перепаде температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между поверхностями емкостей 10 и 11 вырабатывается электрический ток. К нижней стороне емкости 11 прикреплен блок ТЭ 8, к нижней стороне которого прикреплена первая емкость 9, и на перепаде температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между 11 и 9 вырабатывается электрический ток, передаваемый в блок управления 18. К нижней стороне емкости 9 прикреплен блок ТЭ 5, к нижней стороне которого прикреплен самый холодный элемент – радиатор 15, и на перепаде температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между поверхностями 9 и 15 вырабатывается электрический ток. Емкости 9–11 наполнены ТАМ 12–14, имеющим разные температуры ЭФП  $T_{К1}$ ,  $T_{К2}$  и  $T_{К3}$  (причем  $T_{К2} > T_{К3} > T_{К1}$ ), которые при охлаждении в холодное время суток последовательно, начиная с верхней, испытывают ЭФП, поддерживая разность температур  $\Delta T_{ТЭ}$  на блоках ТЭ 7, 8, 5, расположенных между ними. Четыре последовательно соединенных блока ТЭ 6, 7, 8, 5 формируют составную термоэлектрическую батарею, повышающую КПД термоэлектрического генератора. Количество блоков ТЭ может наращиваться. Солнечная панель 1 и термоэлементы 5–8 могут быть закреплены на солнечном коллекторе 2, емкостях 9–11 и радиаторе 15 через теплопроводящую пасту или притянуты скобами. Фотоэлементы солнечной панели 1 и термоэлементы 5–8 при перепадах температур вырабатывают электрический ток, который по электрическим проводам 17 передается в блок управления (контроллер) 18, в котором ток переключается в зависимости от полярности температурных градиентов  $\Delta T_{ТЭ}$  на ТЭ и направляется в аккумулятор 19, а при необходимости далее передается в инвертор 20 для питания потребителей переменного тока нужной частоты.

Солнечные панели *1* генерируют ток круглогодично в дневное время суток. Генерация тока ночью первоначально осуществляется на ТЭ *6* при перепаде температур  $\Delta T_{ТЭ1}$  между нагретым в дневное время СК *2* и емкостью *10*. Далее в ходе остывания ТАМ *13* (например,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) в емкости *10* при снижении температуры до температуры  $T_{К2} = 116$  °С возникает ЭФП с выделением тепла, что создает дополнительную разность температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между емкостями *10* и *11* и генерацию тока с ТЭ *7*. Далее по мере остывания ночью наступает очередь генерации тепла и тока за счет ЭФП ТАМ *14* (например,  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) с более низкой  $T_{К3} = 58$  °С на разности температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между *11* и *9* в ТЭ *8*. Наконец возникает ЭФП в ТАМ *12* (например, в  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ) с самой низкой  $T_{К1} = 29,7$  °С на разности температур  $\Delta T_{ТЭ}$  между *12* и радиатором *15* в ТЭ *5*.

Ток от солнечных панелей *1* и термоэлементов 5–8 типа ТЭС или ТЭБ, обеспечивающих выработку тока до 2 А при перепаде температур 60 °С, по электрическим проводам *17* передается в контроллер *18* (например, марки Atmega или TRS61100PW) и направляется в аккумулятор *19*, преимущественно щелочной, не содержащий кадмия или лития, обладающий очень низким саморазрядом, а при необходимости далее передается в инвертор *20* для питания потребителей переменного тока требуемой частоты.

Техническим результатом является повышение КПД в 1,5-2 раза до 15 % по сравнению с известными устройствами, а также круглогодичная и круглосуточная работа термоэлектрогенератора, т.е. увеличение времени его функционирования в среднем на 50 %.

Кроме того, заявляемое устройство ТЭГ может быть применено как тепловой насос зимой. Например, в зимнее время при отрицательных температурах окружающей среды радиатор, закопанный в земле на глубине 3–10 м, где температура держится на уровне +5...+7 °С, или погруженный в воду (вода подо льдом или артезианская имеет температуру  $\approx +4$  °С), способен создавать обратные градиенты температур на ТЭ, которые будут генерировать ток.

### Источники

1. Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии): учеб. пособие для вузов / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.; под ред. А.И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.

2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии / А.Г. Самойлович. – М.: ЛКИ, 2007. – 224 с.

3. Пат. RU № 135540 МПК H01J45/00 от 20.11.2013.  
Термоэлектрический генератор.

4. Пат. RU № 134698 МПК H01J45/00, F24J2/42 от 20.11.2013.  
Термоэлектрический автономный источник питания.

УДК 621

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

КОЗЕЛКОВ О.В., КГЭУ, к.т.н., kgeu\_era@mail.ru  
КОЗЕЛКОВА В.О., К(П)ФУ, студентка  
ХАКИМОВ А.Р., К(П)ФУ, студент

*Статья содержит основные положения по созданию математической модели процесса контроля и управления однопараметрическим объектом.*

*Ключевые слова: контроль, управление, модель, объект, параметры.*

В общем случае состояния объекта контроля (ОК)  $S_i$  характеризуются свойствами элементов, составляющих структуру данного объекта. Элементы объекта, свойства которых подлежат определению, обычно не доступны для непосредственного наблюдения и измерения. Поэтому приходится измерять не их параметры, а параметры процессов, порождаемых работающим объектом в режиме контроля.

Состояния ОК могут быть охарактеризованы множеством параметров состояния  $C_i$  объекта, значения которых отображаются контролируемыми параметрами  $Y_j$ . Процесс контроля состояния ОК в первом приближении можно показать схематично (рис. 1). Здесь ОК – объект контроля;  $S_i$  – множество состояний ОК;  $C_i$  – множество параметров состояний ОК;  $Y_j$  – контролируемые параметры.

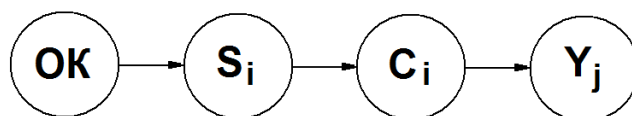


Рис. 1

Параметры состояния ОК образуют  $n$ -мерное пространство. Каждое  $S_i$ -е различимое состояние ОК может быть определено набором из  $n$  действительных чисел  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , т.е. в  $n$ -мерном пространстве состояние ОК в каждый момент времени можно представить вектором состояний  $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ .

Во время контроля объекта пусть регистрируется  $m$  различных выходных параметров  $Y_j$ , где  $j = \overline{1, m}$ , т.е. определяется набор  $m$  действительных чисел. Они являются признаками параметров состояния. Таким образом, получается новое пространство  $Y$ , т.е. пространство признаков параметров состояния (выходных параметров). Число его измерений равно количеству независимых контролируемых параметров. Каждой точке этого пространства соответствует определенное состояние ОК.

Для того чтобы решить основную задачу контроля – определить состояние ОК (сколько и какие признаки надо контролировать), необходимо установить связь между пространством параметров состояний ОК и пространством признаков, т.е. контролируемых параметров.

В общем случае объект можно рассматривать как функциональный преобразователь вектора параметров состояний  $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$  в вектор признаков  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ . Рассматривая данное состояние параметра  $C_i$  как точку в пространстве  $C$ , т.е.  $C = \{c_i\}$ ,  $c_i \in C$ , а набор признаков  $y_j$  как точку в пространстве  $Y$ -признаков состояния объекта, т.е.  $Y = \{y_i\}$ ,  $y_i \in Y$ , можно говорить о преобразовании пространства  $C$  в  $Y$ :  $F_{C_i} \in Y$ , или обратном преобразовании:

$$F^{-1}y_j \in C,$$

где  $F$  – некоторый оператор, на основе которого осуществляется многозначное отображение.

Задача установления связи между параметрами объекта и признаками (контролируемыми параметрами) сводится к определению функции  $F$ , т.е. к определению зависимостей координат (значений)  $y_1, y_2, \dots, y_m$  от координат  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , т.е.  $y_j = f(C_i)$ . Эти зависимости могут быть записаны в виде систем уравнений, в которых каждый признак  $y_j$  пространства  $Y$  является функцией  $n$  переменных  $C_i$  параметров состояния объекта:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f_1(C_1, C_2, \dots, C_n); \\
 y_2 &= f_2(C_1, C_2, \dots, C_n); \\
 &\dots \\
 y_m &= f_m(C_1, C_2, \dots, C_n).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Вид системы уравнений определяется в большинстве случаев на основе анализа возможных признаков (параметров контроля). Известными величинами в этом случае являются  $y_i$ , а неизвестными –  $C_i$ . Поэтому вопрос о разрешимости задачи определения состояния объекта сводится к вопросу о существовании решения системы уравнений относительно неизвестных  $C_i$ . Задача разрешима, если система (1) может быть записана в виде:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= F_1(y_1, y_2, \dots, y_m); \\
 C_2 &= F_2(y_1, y_2, \dots, y_m); \\
 &\dots \\
 C_m &= F_m(y_1, y_2, \dots, y_m).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

После установления состояния системы необходимо выработать требуемые меры –  $M$  (по регулировке, настройке, дальнейшему управлению, ремонту и др.). Эта задача будет разрешима, если по полученным значениям  $y_i$  можно установить необходимые меры:

$$M = f(Y). \tag{3}$$

Уравнения (1) и (3) характеризуют процесс контроля и управления и являются математической моделью этого процесса.

Для случая линейной зависимости система (1) превратится в систему линейных уравнений

$$\begin{aligned}
 y_1 &= d_{11}C_1 + d_{12}C_2 + \dots + d_{1n}C_n; \\
 y_2 &= d_{21}C_1 + d_{22}C_2 + \dots + d_{2n}C_n; \\
 &\dots \\
 y_m &= d_{m1}C_1 + d_{m2}C_2 + \dots + d_{mn}C_n.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Система (4) разрешима относительно неизвестных  $C_i$ , если ее определитель отличен от нуля:

$$\begin{vmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & \cdots & d_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{mn} \end{vmatrix} \neq 0.$$

В этом случае система (4) может быть преобразована в систему (5):

$$\begin{aligned} C_1 &= b_{11}y_1 + b_{12}y_2 + \dots + b_{1n}y_n; \\ C_2 &= b_{21}y_1 + b_{22}y_2 + \dots + b_{2n}y_n; \\ &\dots \\ C_m &= b_{m1}y_1 + b_{m2}y_2 + \dots + b_{mn}y_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) определяет общий алгоритм контроля и принцип действия системы контроля.

На практике бывает достаточно определить в процессе контроля, исправна или не исправна контролируемая система (ОК), т.е. определяют два состояния системы:  $S_D$  – допустимое и  $S_H$  – недопустимое. В этом случае аналогичным образом можно поставить в соответствие состояниям ОК определенные значения параметров состояний  $S_D$  и  $S_H$ , т.е.:

$$\begin{aligned} S^D &\rightarrow \{C_1^D, C_2^D, \dots, C_n^D\}; \\ &\dots \\ S^H &\rightarrow \{C_1^H, C_2^H, \dots, C_n^H\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее находят зависимости:

$$y^D = f_1(C^D) \quad \text{и} \quad y^H = f_2(C^H)$$

и определяют

$$C^D = F_1(y^D) \quad \text{и} \quad C^H = F_2(y^H).$$

Графическая модель процесса контроля и управления для двух состояний показана на рис. 2.

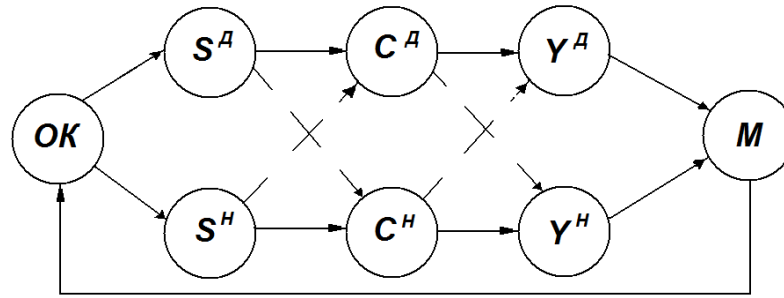


Рис. 2

В заключение следует отметить, что система контроля и управления (СКУ) устанавливает (определяет) истинное состояние ОК при идеальном контроле. В реальных условиях СКУ может неправильно оценить состояние ОК по следующим причинам.

1. Совокупность выходных параметров  $Y$  охватывает не все параметры состояния системы  $C$ , т.е. ОК охвачен контролем не в полном объеме.

2. СКУ измеряет значения с какой-то ошибкой, в результате чего истинное значение, например  $C_d$ , можно принять за  $C_H$ .

3. СКУ имеет запаздывание по времени, обусловленное временем сбора и обработки информации. Поэтому оценивается состояние ОК к моменту времени  $t + \Delta t$ , хотя контроль проводится в момент времени  $t$ , а за  $\Delta t$  ОК мог изменить свое состояние. На рис. 2 возможность ошибочного определения состояния ОК показана пунктирными линиями.

### Источники

1. Козелков О.В. Принципы и методы построения систем контроля с управляющей ЦВМ / О.В. Козелков, В.Ю. Корнилов, Д.Н. Елифанов // Сборник научно-технических статей. – Казань: КазВАКУ, 2005. – Ч. I. – С. 211–212.

2. Козелков О.В. Методика определения единичных показателей достоверности контроля многодвигательного электропривода аналитическим способом / О.В. Козелков // Путь науки. – 2014. – № 2.

### MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS CONTROL AND MONITORING OF ONE-PARAMETER OBJECT KOZELKOV O.V.

*This article contains general provisions establishing a mathematical model of the object-parameter monitoring and control process.*

*Keywords: control, management, model, object parameters.*

УДК 620.97

## **НОВЫЙ УРОВЕНЬ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЭК И ЖКХ: В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ**

КОНДАКОВ Л.А., ООО «Мицубиси Электрик (РУС)»,  
automation@mer.mee.com

*Представлена новая разработка компании «Мицубиси Электрик» – преобразователь частоты серии FR-F800. Преобразователь идеально подходит для работы с насосами, компрессорами и вентиляторами в ТЭК и ЖКХ, позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы, увеличить экономию электроэнергии, обеспечивает высокий пусковой крутящий момент и обладает множеством других передовых характеристик.*

*Ключевые слова: преобразователь частоты, энергоэффективность, экономия, встроенный программируемый логический контроллер.*

Вызовы сегодняшнего дня заставляют потребителей и производителей обращать особое внимание на термин «экономия», что неизбежно влечет за собой конкурентную борьбу производителей оборудования по повышению энергоэффективности и снижению затрат. Компания «Мицубиси Электрик» – мировой лидер по производству продукции в области электропривода – уверенно вступила в эту борьбу еще несколько лет назад и готова предложить клиентам варианты оптимизации производства в различных областях промышленности: машиностроении, металлургии, легкой и пищевой промышленности, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве и топливно-энергетическом комплексе.

### **Коротко о главном**

«Мицубиси Электрик» производит более 80 000 преобразователей частоты в месяц. Особое внимание компания уделяет надежности и качеству выпускаемого оборудования, так как оно является основополагающим средством автоматизации и обеспечивает не только гибкость производственных систем, но и значительную экономию электроэнергии, параллельно снижая износ.



Основными потребителями электроэнергии в современном мире являются электродвигатели. Преобразователи частоты производства «Мицубиси Электрик» решают проблему энергосбережения с большой эффективностью, позволяя сэкономить до 70 % потребляемой электроэнергии!

### Новинка в мире преобразователей частоты

Одной из последних разработок компании стали преобразователи частоты нового поколения для насосов и вентиляторов FR-F800 (рис. 1).



Рис. 1. Преобразователь частоты FR-F800

Новый преобразователь частоты имеет превосходные эксплуатационные характеристики, благодаря которым обеспечиваются экономия электроэнергии, оптимизированное управление скоростью, простота ввода в эксплуатацию и легкий монтаж.

Модель преобразователя частоты FR-F800 разработана специально для управления насосами и вентиляторами, но не менее успешно она способна работать с компрессорами и системами отопления, вентиляции и кондиционирования. Новый преобразователь частоты снабжен множеством инновационных функций, обеспечивающих точное управление с высоким показателем КПД (98 %).

Серия представлена в диапазоне мощностей:

- от 0,75 до 110 кВт с питанием 3 ф. 200 – 240 В;
- от 0,75 до 630 кВт с питанием 3 ф. 380 – 500 В.

В диапазоне мощностей от 355 до 630 кВт преобразователь частоты состоит из отдельного блока выпрямителя и отдельного блока преобразователя частоты, что значительно облегчает монтаж и обслуживание.

Также такое исполнение позволяет использовать преобразователь частоты в различных режимах (рис. 2):

- с 12-пульсной схемой выпрямления напряжения;
- параллельная работа силовых модулей для увеличения выходной мощности преобразователя до 1,5 МВт;
- совместная работа двух блоков инвертора для обеспечения функции рекуперации энергии в питающую сеть.

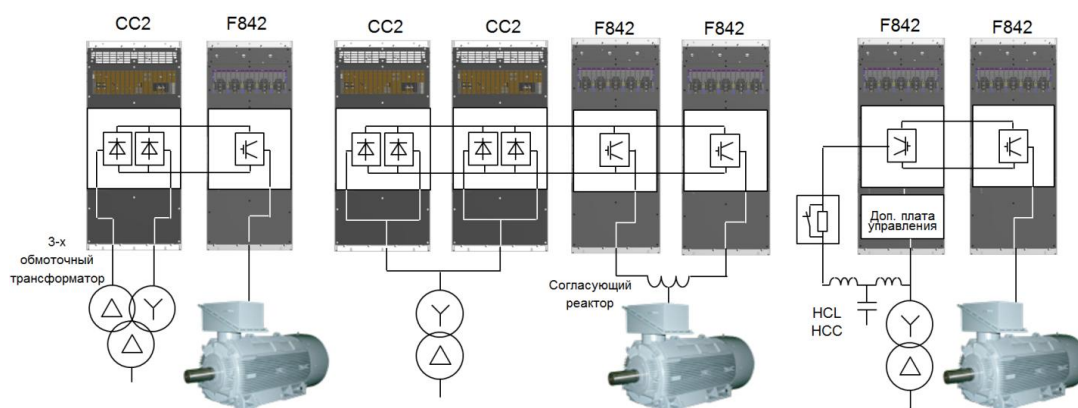


Рис. 2. 12-пульсная схема выпрямления, параллельная работа, работа в режиме рекуперации

## Функциональность преобразователя FR-F800

### *Экономия электроэнергии*

Потребляемая мощность таких видов нагрузки, как вентиляторы, насосы и воздуходувки, пропорциональна скорости вращения. Регулировка объема воздуха, выполняемая преобразователем частоты FR-F800 путем изменения скорости приводного двигателя, позволяет сэкономить электроэнергию (рис. 3).

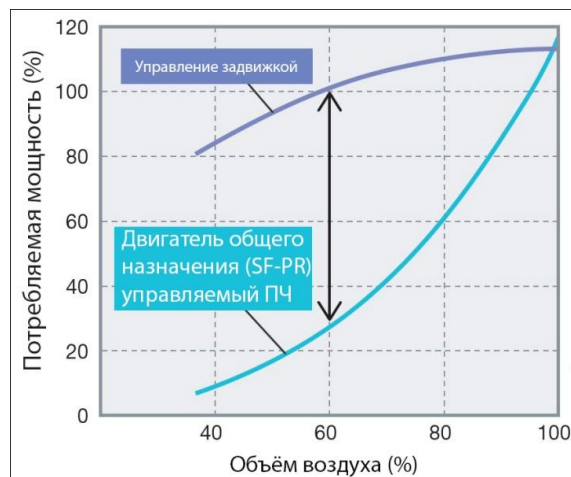


Рис. 3. Рабочая характеристика вентилятора

Передовая функция оптимального регулирования возбуждения (АОЕС) обеспечивает максимальное энергосбережение как при низко-, так и при высокомоментных нагрузках (рис. 4).

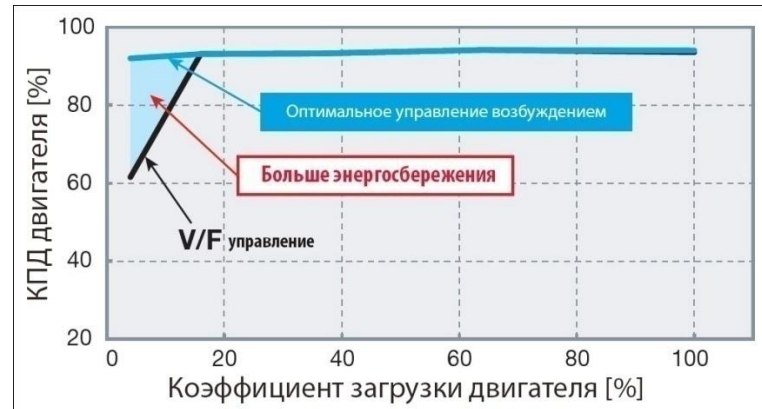


Рис. 4. Функция оптимального регулирования возбуждения

Данная функция непрерывно регулирует ток возбуждения до оптимального уровня для обеспечения высокого КПД электродвигателя. Например, при 4 % крутящего момента электродвигателя общего назначения КПД с функцией АОЕС примерно на 30 % выше, чем при обычном вольт-частотном регулировании. Также при использовании функции АОЕС обеспечивается разгон за максимально короткое время без необходимости проведения дополнительных настроек, высокий пусковой момент при сохранении высокого КПД. FR-F800 обеспечивает автоматическое управление питанием: например, в режиме ожидания все неиспользуемые контуры останавливаются и преобразователь частоты переходит в спящий режим. При наличии внешнего дополнительного источника питания 24 В для цепей управления преобразователя в режиме ожидания можно отключать магнитный контактор сетевого питания, что также позволяет снизить энергопотребление (рис. 5). Встроенная функция энергосберегающего мониторинга позволяет получить наглядную информацию об эффекте экономии электроэнергии на встроенной в преобразователь панели оператора, передать информацию по сетевому промышленному интерфейсу или вывести ее на внешнее устройство индикации (рис. 6).

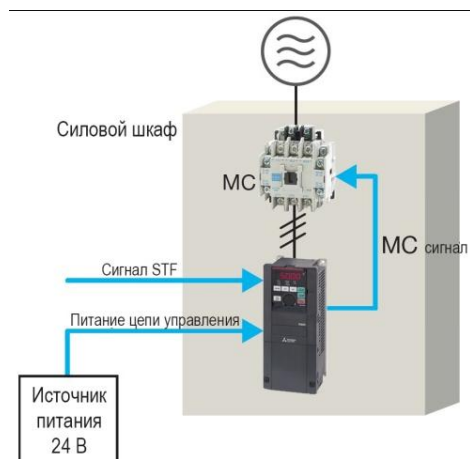


Рис. 5. Управление питанием



Рис. 6. Индикация энергосбережения

### *Расширенное ПИД-регулирование*

Преобразователь частоты FR-F800 имеет в наличии два ПИД-регулятора, поэтому способен выполнять регулирование не только самого электродвигателя, но и какого-либо другого устройства, что позволяет снизить стоимость системы за счет отсутствия внешнего ПИД-регулятора. Также ПИД-регулятор позволяет осуществлять каскадное управление насосами. Например, один из подключенных к системе насосов управляется преобразователем частоты, другие приводятся в действие внешним источником питания, количество включенных насосов регулируется в зависимости от объема потребляемой воды (рис. 7, 8). Вариант с последовательным запуском насосов от преобразователя частоты и последующим переводом на работу от сети также реализован в стандартных функциях моделей серии FR-F800.



Рис. 7. Работа с 2 ПИД-регуляторами

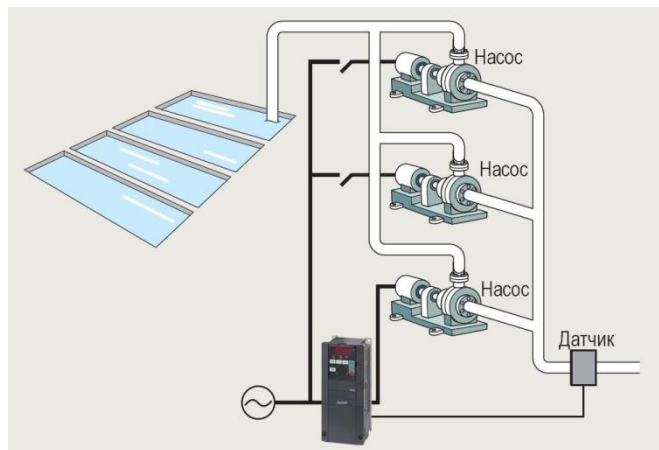


Рис. 8. Каскадное управление насосами

### *Специальные функции управления*

Преобразователь частоты FR-F800 способен проводить циклы очистки приводного механизма в соответствии с графиком или по требованию. Посторонние предметы с крыльчаток вентиляторов и насосов удаляются путем многократного переключения направления вращения и останова двигателя, что избавляет от необходимости производить дорогостоящий демонтаж системы. Эта функция представляет значительный интерес для операторов площадок сточных вод, где, как исторически сложилось, всегда было сложно обеспечить подобные функции.

Еще одним примером специальной функции управления является способность выявлять механические неполадки. Функция распознавания нагрузки (рис. 9) позволяет автоматически определять и сохранять 5 точек частоты вращения/крутящего момента нагрузки. Сравнение текущей

характеристики «нагрузка/скорость» с сохраненными значениями позволяет точно выявить отклонения и уже на раннем этапе принять меры для предотвращения отказов. Благодаря этой функции значительно уменьшается количество ложных срабатываний защиты, а следовательно, увеличивается время реальной работы. Также уменьшается время простоя для проведения работ по техническому обслуживанию и обеспечивается быстрое реагирование на реальные проблемы (блокировка насоса, попадание посторонних предметов в крыльчатку, обрыв приводного ремня и т.п.), которые высокоинтеллектуальный алгоритм распознает с высокой точностью.

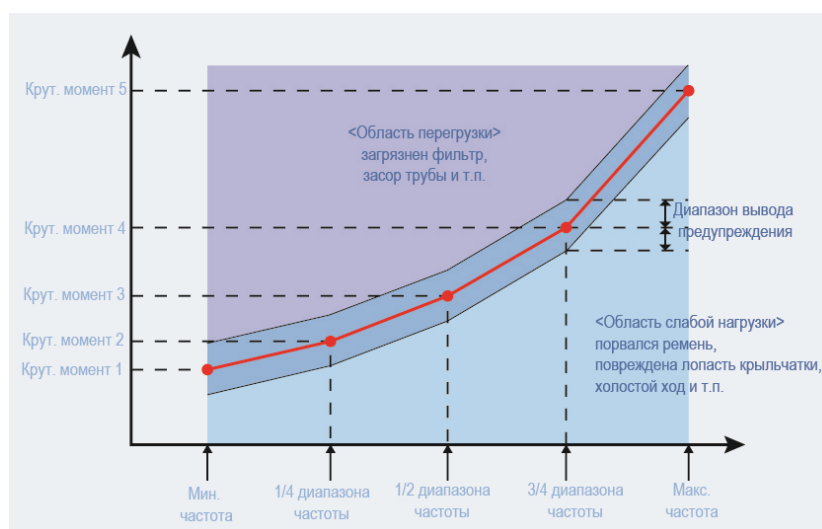


Рис. 9. Функция распознавания нагрузки

Еще одна специальная функция преобразователей серии FR-F800 – это функция предварительного прогрева электродвигателя, благодаря которой обеспечивается его плавный пуск, рассеивается конденсат и предотвращается возможный выход из строя при работе механизма в условиях низких температур.

Функция мониторинга работы в режиме реального времени позволяет выявить и уменьшить вибрации, возникающие вследствие механического резонанса, что, в свою очередь, защищает механизм от износа, механических повреждений и выхода из строя.

Для повышения надежности FR-F800, облегчения поиска неисправностей преобразователь частоты имеет встроенную функцию регистрации и отслеживания рабочих данных.

Специальная функция «Пожарный режим»: в аварийной ситуации при борьбе с пожаром FR-F800 отключает встроенные защиты и поддерживает работу приводных механизмов (вытяжных вентиляторов, пожарных насосов) максимально долго – вплоть до полного разрушения

самого преобразователя частоты или электродвигателя, не реагируя на перегрев, замыкания и т.п.

Встроенный полнофункциональный программируемый логический контроллер существенно расширяет функциональные возможности преобразователя частоты FR-F800. Встроенный ПЛК поддерживает управление до 128 дискретными сигналами ввода/вывода, 19 аналоговыми сигналами ввода/вывода, часы реального времени. Поддерживаемые языки программирования – релейная логика (LD) и функциональные блоки (FB). Для программирования ПЛК используется стандартное ПО для конфигурации преобразователя частоты – FR-Configurator 2.

### **Простота в использовании**

В преобразователе частоты FR-800 реализована автоматическая настройка как для асинхронных двигателей, так и для синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе. Встроенный пульт оператора с кнопками и лимбом предоставляет прямой доступ ко всем параметрам, обеспечивая простоту параметрирования. FR-F800 легко подключается к графическим панелям оператора «Мицубиси Электрик» серий GOT1000 и GOT2000 с помощью функции автоматического определения.

FR-F800 рассчитан на максимально полную совместимость с преобразователями частоты предыдущего поколения. Переход с моделей FR-F500/700 осуществляется с помощью автоматической конвертации параметров в ПО FR-Configurator 2.

В настоящее время вопрос подключения устройств автоматизации к промышленным сетям приобретает все большую важность. В преобразователе частоты FR-F800 предусмотрена возможность работы практически во всех промышленных сетях: CC-Link, ProfiBus, DeviceNet, LonWorks, Ethernet/IP, EtherCAT и т.д. При этом протоколы Modbus, Modbus/TCP, VACnet являются встроенными в преобразователь частоты.

### **Городская система водоснабжения**

Компания «Мицубиси Электрик» предлагает не только компоненты для промышленной автоматизации, но и комплексные решения. В частности, в области автоматизации городских систем водоснабжения ООО «Техникон» – официальный дистрибьютор компании «Мицубиси Электрик» – разработал концепцию глобального управления объектами



водоснабжения «Акватория». В своей основе концепция «Акватория» имеет три главные цели, каждая из которых направлена на сокращение затрат:

- повышение бесперебойности водоснабжения через оптимизацию режимов работы оборудования, влекущую снижение нагрузки на насосное оборудование и водопроводные сети;

- достижение максимального энергосберегающего эффекта и снижение утечек за счет глобального управления процессом водоподачи и водоотведения;

- снижение эксплуатационных расходов за счет типизации и унификации используемых решений и снижения зависимости от поставщика решения.

Аппаратно-программный комплекс состоит из:

- станций управления насосными агрегатами и защиты на базе оборудования «Мицубиси Электрик» (преобразователи частоты серии FR-F800, ПЛК серий iQ-R и iQ-F);

- оборудования телеметрии для передачи данных по проводным и беспроводным каналам;

- программного обеспечения оператора с инновационными алгоритмами управления на базе SCADA-системы «Мицубиси Электрик» MAPS.

«Акватория» создана в качестве альтернативы существующим системам управления, локальный характер которых не позволяет учитывать влияние смежных процессов в единой городской системе водоснабжения, а значит, делает невозможным достижение высокой ресурсо- и энергоэффективности.

Усредненными результатами от внедрения систем управления подачей воды можно считать следующие:

- экономия энергоресурсов – 26 %;

- уменьшение утечек – 11 %;

- уменьшение прорывов труб – 9 %;

- увеличение ресурса работы насосного оборудования – 30 %.

В концепции «Акватория» использован весь опыт, накопленный в тесном сотрудничестве с предприятиями коммунального хозяйства и проектными институтами, а также последние достижения в области систем управления компании «Мицубиси Электрик».



## A NEW LEVEL OF THE ENERGY SAVING PROCEDURE KONDAKOV L.

*The article presents a new frequency inverter product line of the Mitsubishi Electric. It is the ideal solution for pumps, compressors and fans in the fuel&energy sector and housing-communal services. Frequency invertors FR- F800 can significantly reduce operating costs, increase energy savings, also provide a high starting torque and other advantages.*

*Keywords: frequency Converter, energy efficiency, and savings built-in programmable logic controller.*

УДК 618.5.015

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

КОРНИЛОВ В.Ю., КГЭУ, д.т.н., профессор,  
vsstbrus@gmail.com

МУХАМЕТШИН А.И., КНИТУ–КАИ, магистр, аспирант,  
mo2825@yandex.ru

УСМАНОВ И.К., ООО «Таграс-ЭнергоСервис», аспирант,  
firzar\_renat@mail.ru

БИЛАЛОВ Ф.Ф., ООО «Таграс-ЭнергоСервис», аспирант,  
firzar\_renat@mail.ru

ВАЛИУЛЛИН Р.Р., ООО «Таграс-ЭнергоСервис», аспирант,  
firzar\_renat@mail.ru

МУХОРТОВ И.С., ООО «Таграс-ЭнергоСервис», аспирант,  
firzar\_renat@mail.ru

*В настоящее время в нефтяной промышленности основными потребителями электроэнергии являются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АД КЗР), которые задействованы в процессе механизированной добычи, а также в поддержании пластового давления и подготовки нефти. АД КЗР обладает рядом известных достоинств, к которым относится также и ремонтпригодность. Ремонт АД КЗР проводится как в простейших мастерских, так и в специализированных организациях на высокотехнологичном оборудовании.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, комбинированная обмотка, энергоэффективность, КПД, магнитодвижущая сила, потребляемая активная мощность, потребляемая реактивная мощность, потребляемый ток.*

Вопрос повышения ресурса электродвигателей остро стоит перед любой нефтедобывающей компанией. В настоящее время предпочтительными являются следующие два направления улучшения технико-экономических характеристик электродвигателей.

1. За счет увеличения в конструкции доли применения дорогих металлов с меньшим удельным сопротивлением, но это приводит к увеличению массы и стоимости (зарубежный опыт: электродвигатели IE2-IE4 по IEC 60034-30-1:2014). К тому же, начиная с 1 ноября 2017 года, все европейские производители АД, согласно принятой директиве, будут производить электродвигатели класса энергоэффективности не ниже IE3.

2. За счет изменения схем соединения обмотки статора или ротора. Данную технологию можно применить при капитальном ремонте существующих АД, при этом расход меди остается на прежнем уровне. Экономический эффект достигается за счет сглаживания и придания более «правильной», синусоидальной формы магнитодействующей силе. Это позволяет уменьшить потери в АД, а также пусковой ток при одновременном увеличении пускового момента.

На кафедре ПАЭ ФГБОУ ВО «КГЭУ» были разработаны схемы электрических соединений и укладки обмоток и рассчитаны обмоточные данные для АД серии АИР в диапазоне от 4 до 18,5 кВт, по которым в ООО «Ремстрой-ЭнергоСервис» были модернизированы следующие АД: АИР100S2 (4 кВт, 3000 об/мин), АИР100S2ПР (4 кВт, 3000 об/мин), АИР100L2 (5,5 кВт, 3000 об/мин), 5АМХ160S2 (15 кВт, 3000 об/мин), АИР180М8СНБУ1 (18,5 кВт, 750 об/мин).

Проведенные стендовые и совместные опытно-промышленные испытания показали у модернизированных АД уменьшение потребления активной мощности на 1,25–17,3 %, потребляемой реактивной мощности – на 1–40 % и потребляемого тока – на 1–31 % по сравнению с серийными АД.

**IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS**  
KORNILOV V.Y., MUKHAMETSHIN A.I., USMANOV I.K., BILALOV F.F.,  
VALIULLIN R.R., MUKHORTOV I.S.

*Currently, the oil industry the main consumers of electricity are asynchronous motors with squirrel-cage rotor (BP CDR), which are involved in the process of mechanized production, as well as in maintaining reservoir pressure and oil treatment. BP CDR has a number of well-known advantages which include also the maintainability. Repair BP CDR performed in the simplest of workshops and specialized organizations in the high-tech equipment.*

*Keywords: asynchronous motor with squirrel-cage rotor, combined winding, energy efficiency, efficiency, magnetomotive force is consumed by the active power, reactive power consumption, current consumption.*

УДК 621.65:621.3.07

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
НАСОСНОГО АГРЕГАТА И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ**

ЛАЗАРЕВ С.А., ЧГУ, НПП «ЭКРА», к.т.н., доцент, lazarev-s@ekra.ru  
МИТЮКОВ П.В., НПП «ЭКРА», mityukov-p@ekra.ru

*Проанализировано два варианта построения АСУ технологического процесса транспорта жидкости. Рассмотрен анализ энергоэффективных режимов работы насосного агрегата. Приведен алгоритм переключения питания электродвигателя насосного агрегата на сеть.*

*Ключевые слова: транспорт жидкости, насосный агрегат, электрический привод, преобразователь частоты, КПД, экономия электроэнергии.*

Рациональное и эффективное использование ресурсов электротехнического и электромеханического оборудования – важнейшая задача, которая с особой остротой ставит задачу экономии ресурсов и энергосбережения.

Применение системы плавного пуска и преобразователя частоты в мощном высоковольтном электроприводе полностью решает проблему

пуска электропривода, обеспечивает экономию ресурса электродвигателя и приводимого им механизма, устраняет негативное влияние процесса пуска на питающую электропривод сеть. Кроме того, применение частотно-регулируемого электропривода обеспечивает автоматическое регулирование скорости вращения электродвигателя в функции технологического параметра, что не только улучшает качество выпускаемого продукта, но и способствует разработке и внедрению в производство новых инновационных технологий.

Так, например, применение АСУ ТП в технологии транспорта нефти позволяет [1]:

- автоматизировать процесс пуска насосных агрегатов и регулирования технологического параметра (производительности насосного агрегата либо напора жидкости в трубопроводе);

- снизить расход ресурсов на 2-3 % за счет стабилизации давления в трубопроводе и уменьшить утечки;

- уменьшить износ электротехнического и гидромеханического оборудования;

- снизить вероятность возникновения аварий, вызванных гидроударами, благодаря плавному изменению режимов работы насосных агрегатов.

Для автоматизации процесса регулирования технологического параметра АСУ ТП включает регулятор и датчик технологического параметра в рассматриваемом случае давления в магистрали (напора) или производительности. Существует два варианта построения таких системы регулирования. В первом случае насосный агрегат работает с постоянной скоростью, а регулирование производительности осуществляется путем изменения характеристики магистрали с помощью задвижки. Во втором случае задвижка, установленная между насосом и магистралью, полностью открыта, и регулирование ведется управлением скоростью вращения рабочего колеса насоса путем применения регулируемого электропривода насосного агрегата.

В случае регулирования производительности насосного агрегата с использованием задвижки (рис. 1), привод насоса осуществляется от электродвигателя 1, вращающего колесо насоса 2 с постоянной скоростью. Регулирование напора на выходе насосного агрегата осуществляется посредством изменения  $Q(H)$  характеристики магистрали 3 и 4 на рис. 2, (напора) посредством задвижки 3. Для автоматизации процесса регулирования давления в магистрали задвижка 3 снабжена позиционным электроприводом 4 и регулятором напора 6. На входе

регулятора 6 осуществляется сравнение сигналов заданного напора 5 и сигнала датчика давления в магистрали 7.

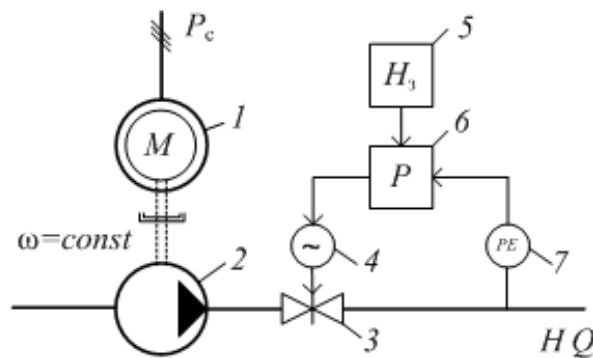


Рис. 1. Регулирование производительности насосного агрегата с помощью задвижки

При регулировании производительности насосного агрегата с помощью задвижки (рис. 1) потребляемая из электрической сети мощность  $P_c$  (1) определяется суммой мощности, затрачиваемой по требованиям технологического процесса на транспортировку жидкости (2), и мощности потерь  $\Delta P$ :

$$P_c = P_{\text{ТР}} + \Delta P = P_{\text{ТР}} + \Delta P_3 + \Delta P_{\text{НАС}} + \Delta P_{\text{ДВ}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{ТР}} = 9,81 H_2 Q \gamma, \quad (2)$$

где  $P_{\text{ТР}}$  – мощность на валу насоса исходя из технологического режима работы, кВт;  $H$  – напор в магистрали, создаваемый насосом, м;  $Q$  – расход по требованиям технологического режима м<sup>3</sup>/ч;  $\gamma$  – удельный вес жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Мощность потерь  $\Delta P$ , в свою очередь, складывается из потерь мощности на задвижке (3), потерь в насосе (4) и потерь в приводящем насос электродвигателе  $\Delta P_{\text{ДВ}}$ .

Рабочая точка насосного агрегата (рис. 2) определяется пересечением  $Q - H$  характеристик насоса (1) и магистрали (3) при полностью открытой задвижке либо характеристикой (4) – при дросселировании магистрали задвижкой. В этом случае при регулировании производительности насосного агрегата рабочая точка смещается из положения т. 1 в положение т. 2 (рис. 2), что сопровождается потерями мощности в задвижке.

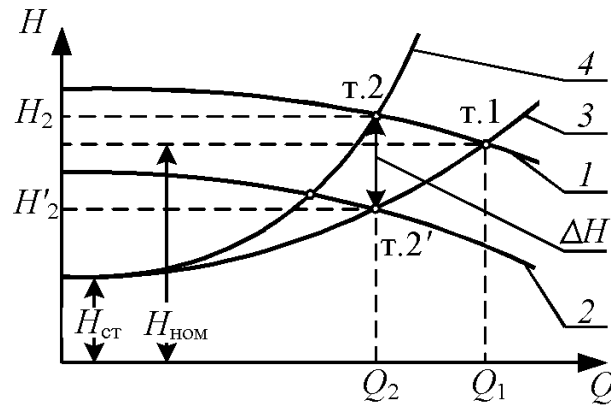


Рис. 2. Характеристики при регулировании напора (производительности) насосного агрегата

Потери мощности в задвижке (3) зависят от требуемого в соответствии с технологическим процессом расхода жидкости и прямо пропорциональны падению в ней напора:

$$\Delta P_3 = 9,81 \Delta H Q \gamma, \quad (3)$$

где  $\Delta H$  – падение напора на задвижке, м.

Потери на задвижке в процессе регулирования:

$$\Delta P_3 = P_2 \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right),$$

где  $\alpha = \Delta H / H_1$  – глубина регулирования давления;  $P_2$  – мощность на выходе напорного коллектора.

Мощность потерь в насосе (4) зависит от КПД насоса, определяемого его режимом работы:

$$\Delta P_{\text{НАС}} = 9,81 \Delta H_{\text{НАС}} \gamma \left( \frac{1-\eta_{\text{НАС}}}{\eta_{\text{НАС}}} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta H_{\text{НАС}}$  – изменение напора в насосе, м;  $\eta_{\text{НАС}}$  – КПД насоса.

Зависимость КПД насоса от его производительности характеризуется рабочей зоной  $Q_{\text{раб}}$  (на рис. 3 заштрихована), в которой КПД незначительно отличается от максимального значения  $\eta_{\text{max}}$ . В этой зоне регулирование производительности насоса с помощью задвижки экономически обосновано.

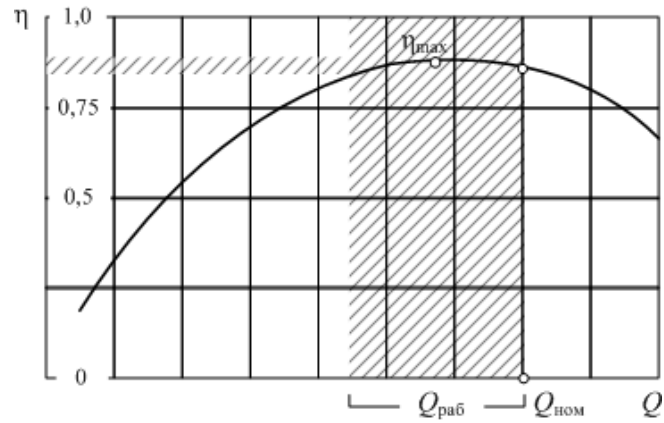


Рис. 3. Зависимость КПД насоса от его производительности

Если по условиям технологии требуется регулирование давления в магистрали (напора, создаваемого насосом) и производительности насосного агрегата, то применяется регулирование производительности насоса путем использования регулируемого электропривода. Наиболее эффективно и технически целесообразно в этом случае применить частотно-регулируемый электропривод с асинхронным или синхронным электродвигателем (рис. 4).

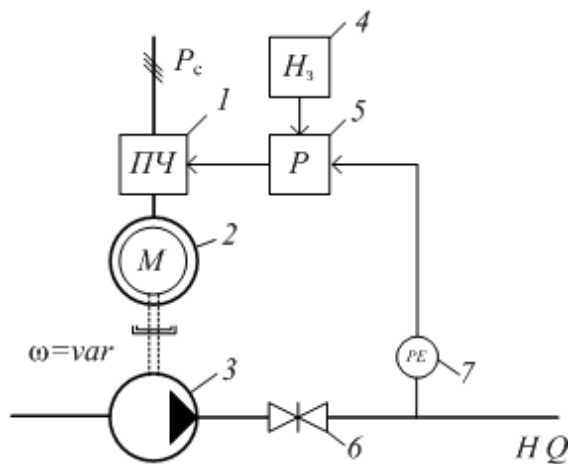


Рис. 4. Регулирование производительности насосного агрегата с помощью частотно-регулируемого электропривода

Характеристика насоса 2 на рис. 2 соответствует такому способу управления насосным агрегатом [3]. Пусть в этом случае насос работает при полностью открытой задвижке с производительностью  $Q_2$  и напором  $H'_2$ , что соответствует точке т. 2', тогда для создания такого же напора, что и в первом случае, необходимо дросселировать магистраль (характеристика 4), и потери напора и мощности в задвижке составят  $\Delta H_3$  и  $\Delta P_3$  соответственно.

Для реализации управления приводным электродвигателем 2 (рис. 4), регулирующим скорость вращения рабочего колеса насоса 3, при полностью открытой задвижке 6 используется преобразователь частоты 1. Автоматизация процесса регулирования напора в магистрали для этого случая осуществляется с помощью регулятора 5, сравнивающего сигналы задатчика напора 4 и датчика давления в магистрали 7.

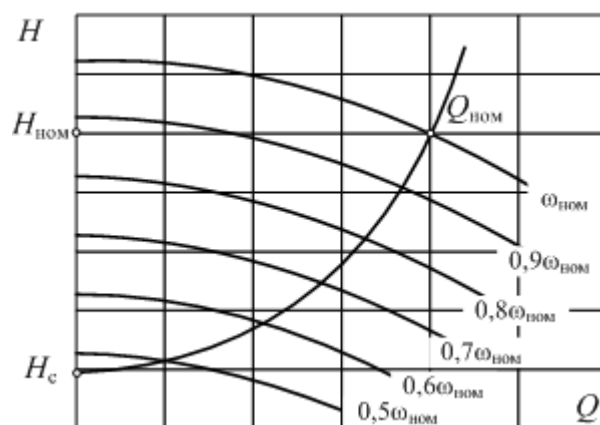


Рис. 5. Регулировочные характеристики насосного агрегата при использовании частотно-регулируемого электропривода насоса

Таким образом, с помощью регулирования скорости вращения рабочего колеса насоса можно обеспечить требуемый напор в магистрали при заданной производительности насосного агрегата без изменения характеристики магистрали (рис. 5). Важно отметить, что при таком регулировании КПД насоса изменяется незначительно и остается близким к максимальному значению (рис. 6) в широком диапазоне изменения производительности насосного агрегата.

Опыт показывает, что применение частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата, работающего в широком диапазоне регулирования производительности, позволяет экономить до 30–40 % электроэнергии, потребляемой агрегатом [1, 2].

Суммарная мощность, потребляемая из сети при использовании частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата и полностью открытой задвижке:

$$P_C = P_{TP} + \Delta P_{НАС} + \Delta P_{ПР} + \Delta P_{ДВ},$$

где  $\Delta P_{ПР}$  — потери мощности в преобразователе, определяются значением его КПД:



$$\Delta P_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{ДВ}}(1-\eta_{\text{ПР}})}{\eta_{\text{ПР}}} = P_2 \frac{1}{\eta_{\text{Н}}\eta_{\text{ДВ}}} \left( \frac{1-\eta_{\text{ПР}}}{\eta_{\text{ПР}}} \right).$$

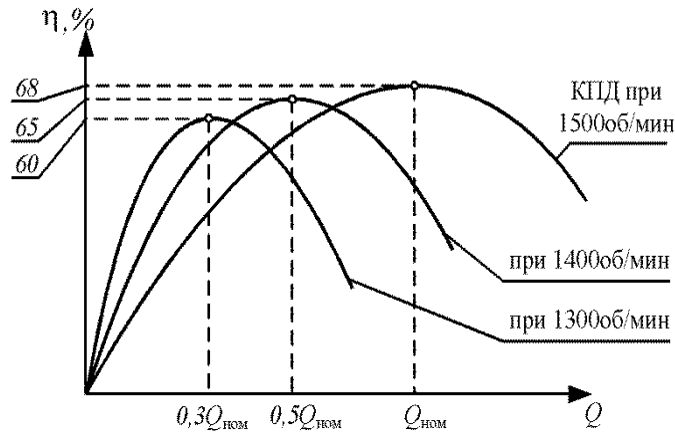


Рис. 6. Зависимости КПД насоса от его производительности при различных скоростях вращения рабочего колеса

Так, для многоуровневого преобразователя частоты типа ЭСН, выпускаемого НПП «ЭКРА», номинальный КПД составляет  $\eta_{\text{ПР}} = 0,97$ .

Для оценки эффективности применения частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата по сравнению с дросселированием задвижкой рассмотрим снижение потерь при использовании регулируемого электропривода:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ПР}} - \Delta P_3.$$

Таким образом, применение частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата становится экономически целесообразным при условии  $\Delta P_{\text{ПР}} < \Delta P_3$ .

Граничное значение глубины регулирования давления в трубопроводе, при котором потери в задвижке и потери в преобразователе равны, составит:

$$\alpha = \frac{\Delta H}{H_1} = \left( \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{Н}}} \right)^2,$$

что соответствует скорости вращения насосного агрегата  $\omega_0$  (рис. 7). Сравнительный анализ рассмотренных способов регулирования показывает экономическую эффективность регулирования насосного агрегата с помощью преобразователя частоты ниже скорости  $\omega_0$  и регулирования с помощью задвижки в диапазоне от  $\omega_0$  до  $\omega_{\text{Н}}$ .

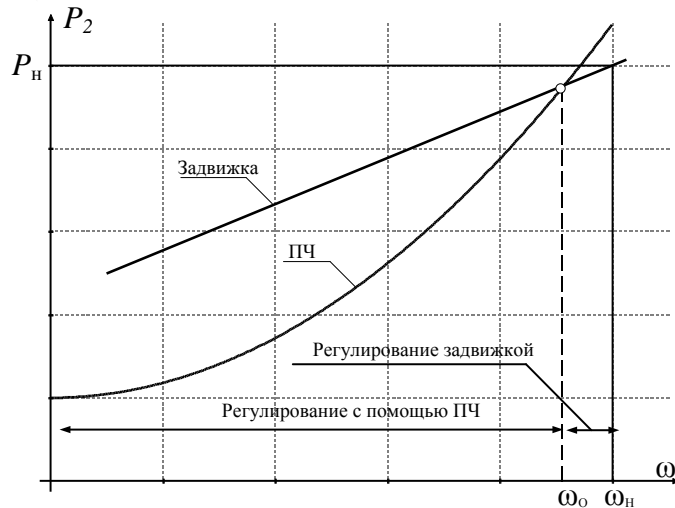


Рис. 7. Сравнение способов регулирования с помощью преобразователя частоты (ПЧ) и дросселирования трубопровода задвижкой

Для обеспечения экономически эффективного управления электроприводом насосного агрегата от преобразователя частоты необходимо использовать реализованный в частотно-регулируемом электроприводе ЭСН механизм перехода на питание электродвигателя насоса от сети и последующее регулирование с помощью задвижки 4 (рис. 8). В этом случае при регулировании скорости насосного агрегата 3 ниже скорости  $\omega_0$  питание электродвигателя 2 осуществляется от преобразователя частоты 1, а при более высоких значениях скорости двигатель переключается на питание от сети выключателем 6, при этом отключаются выключатели 7 и 8, реактор 5 участвует при переключении 7 и 6.

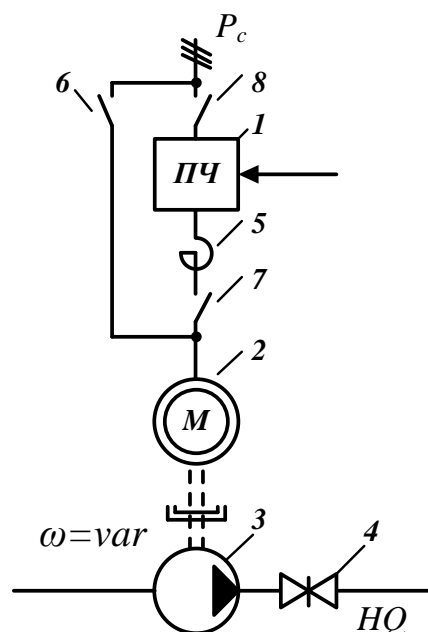


Рис. 8. Схема перехода на питание электродвигателя от сети

Для скорости  $\omega < \omega_0$  работа преобразователя частоты ЭСН (рис. 9) в условиях работы от нестабильного источника напряжения (газотурбинная станция, дизель-генератор и т.д.) характеризуется высокой точностью регулирования технологического параметра или поддержания заданной скорости и не зависит от источника входного напряжения. Представлены графики  $U_{BC}$  мгновенного линейного напряжения питающей сети,  $U_{VW}$  мгновенного линейного напряжения статора и  $I_V$  мгновенного фазного тока статора, формируемого преобразователем частоты серии ЭСН. Все сигналы приведены в о.е.: для напряжения число 1 соответствует амплитуде номинального линейного напряжения, а для тока число 1 соответствует амплитуде номинального фазного тока статора электродвигателя.

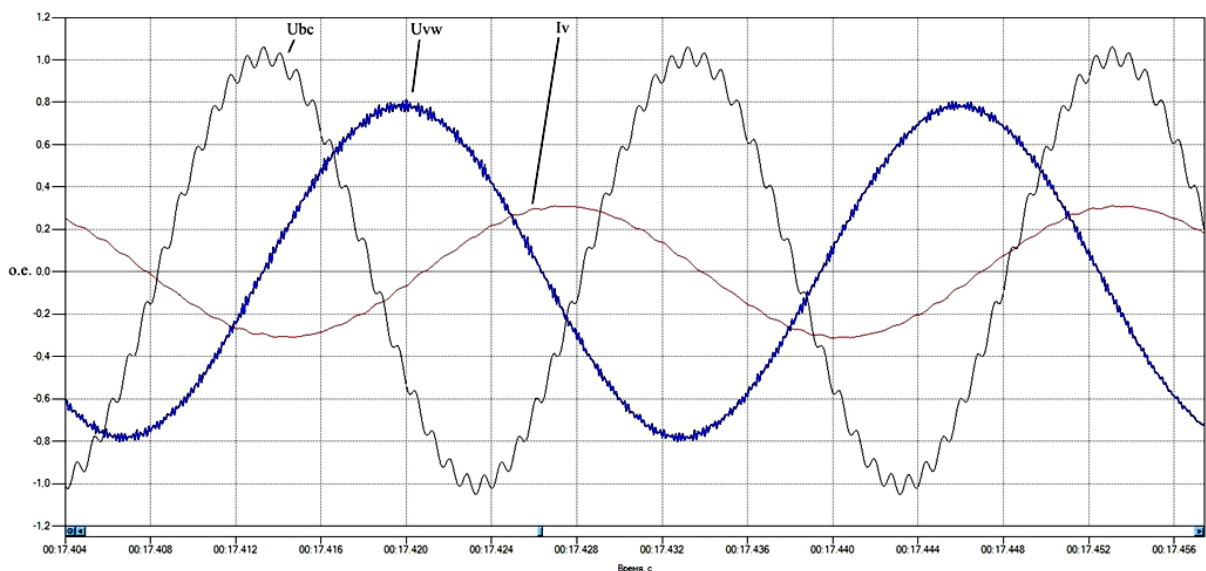


Рис. 9. Осциллограмма регулирования скорости

Если при работе насосного агрегата от преобразователя частоты заданная скорость выполняет условие  $\omega \geq \omega_0$  автоматически, с заданной выдержкой времени или по команде оперативного персонала (зависит от требований) начинается алгоритм шунтирования электродвигателя на сеть (переход вверх), который можно разделить на 4 этапа.

1. Формируется частота на выходе преобразователя частоты, соответствующая частоте питающего напряжения.

2. Выравнивается амплитуда выходного напряжения в соответствии с мгновенным значением на входе.

3. Включается в работу регулятор фазового сдвига (рис. 10), на вход которого поступает угол между входным и выходным напряжением, допускается работа с перерегулированием при условии, что фазовый сдвиг не будет превышать  $\pm 180$  эл. град.

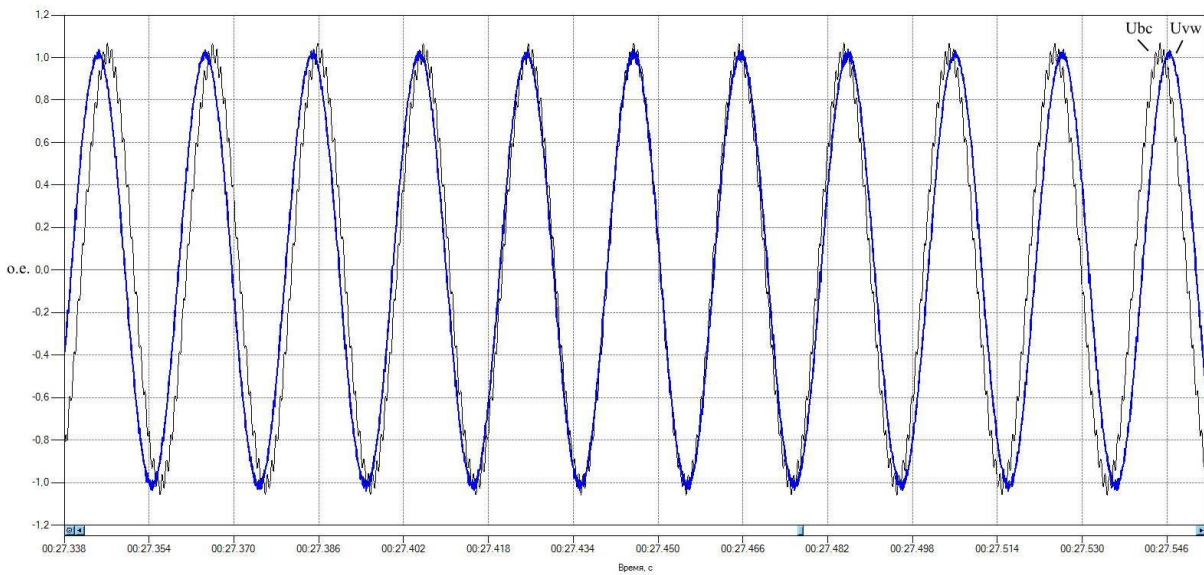


Рис. 10. Осциллограмма работы регулятора фазового сдвига

4. Заключительный этап – процесс коммутации силовыми выключателями (рис. 11). Для надежной работы, чтобы не терять управление технологическим параметром, в первую очередь включается выключатель 6 (рис. 8), и получается режим совместной работы преобразователя частоты на «сеть». После подтверждения о включении выключателя закрываются силовые ключи и подается команда на выключение 7 (рис. 8).

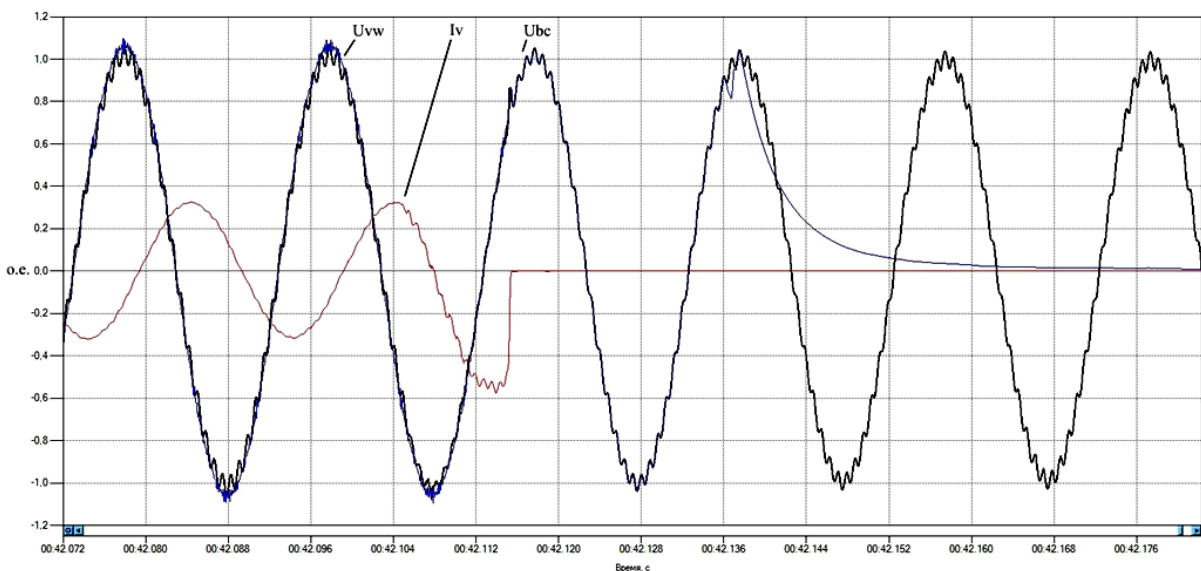


Рис. 11. Осциллограмма перехода на питание электродвигателя от сети

## Выводы

При построении автоматизированных систем управления технологическим процессом насосных агрегатов технически и экономически целесообразно:

1) для небольшого диапазона регулирования производительности агрегата – использование устройства плавного пуска электродвигателя и регулирование производительности с помощью изменения характеристики магистрали задвижкой;

2) для больших диапазонов регулирования производительности насосного агрегата – применение частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата.

Экономически целесообразно при длительной работе насосного агрегата в условиях, когда потери в преобразователе превышают возможные потери при регулировании задвижкой, реализовать переход электродвигателя на питание от сети по рассмотренному алгоритму и дальнейшее регулирование насосного агрегата осуществлять дросселированием магистрали задвижкой.

## Источники

1. Лазарев С.А. Комплексная автоматизация электроприводов промышленных агрегатов нефтегазового комплекса / С.А. Лазарев // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 3(35). – С. 17–20.

2. Лазарев С.А. Передовые технологии экономии ресурсов и энергосбережения посредством оборудования НПП «ЭКРА» для электроприводов промышленных агрегатов нефтегазового комплекса / С.А. Лазарев // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 3(43). – С. 34–36.

3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

## ENERGY SAVING MODES OF OPERATION OF THE ELECTRIC PUMPING UNIT AND THEIR IMPLEMENTATION

LAZAREV S.A., MITYKOV P.V.

*Analyzed two options of building automation of the process fluid transport. Considered an analysis of energy-saving modes of operation of the pump unit.*

*Keywords: liquid transportation, pumping unit, electric drive, frequency converter, efficiency, energy saving.*

УДК 621.311:621.316.9

## **РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ПУНКТА СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

ЛИЗУНОВ И.Н., КГЭУ, к.т.н., доцент, nebkoue@yandex.ru

МИСБАХОВ Р.Ш., КГЭУ, к.т.н., доцент, zerdex@bk.ru

БАГАУТДИНОВ И.З., КНИТУ–КАИ, аспирант, ilyas\_81992@mail.ru

*Рассмотрены вопросы создания централизованной системы релейной защиты и автоматики для распределительных пунктов и трансформаторных подстанций среднего напряжения (РП и ТП СН), в том числе необходимые и требуемые функции релейной защиты на объекте. Разработаны численные модели подсистем для имитационной модели централизованной системы релейной защиты и автоматики.*

*Ключевые слова: релейная защита и автоматика, централизованная релейная защита и автоматика (РЗА), контроль и управление энергопотреблением, распределительные пункты и трансформаторные подстанции среднего напряжения (РП и ТП СН).*

Согласно требованиям ПУЭ [1] и нормативной документации, а также по результатам анализа тенденции развития техники РЗА, в том числе перспектив в рамках технологий «интеллектуальных сетей» для распределительных сетей среднего напряжения, можно выделить следующие требуемые и дополнительные функции защит для ТП и РП СН:

- максимальную токовую защиту (МТЗ);
- защиту от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ);
- логическую защиту шин (ЛЗШ) для секций шин;
- дуговую защиту (ДГЗ);
- автоматическое повторное включение (АПВ);
- автоматическое включение резерва (АВР).
- устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ).

Для проверки работоспособности вышеуказанных функций РЗА, а также алгоритмов РЗА при их реализации в централизованной системе релейной защиты и автоматики (ЦСРЗА) для РП и ТП СН применяется имитационная модель ЦСРЗА, а также математическая модель

распределительного устройства среднего напряжения. Имитационная модель также применима для исследования количественных характеристик и оптимизации настроек защит.

Исследования были проведены в MatLab Simulink, и прототипом послужила схема 10(6)-1 [1].

Поскольку модель РП СН была выполнена в MatLab Simulink, то и имитационную модель ЦСРЗА целесообразно разрабатывать в этом же программном пакете. Более того, обе эти модели могут быть выполнены в одном и том же файле Simulink, что обеспечивает прямое соединение силовых и информационных входов и выходов, а следовательно, интеграцию моделей в единый исследовательский комплекс. При этом нет необходимости использовать рабочее пространство (Workspace) MatLab, записывать данные моделирования в файл с последующим считыванием и выполнять прочие работы с данными, замедляющими обмен информацией и усложняющими процесс исследования.

### **Максимальная токовая защита**

Подсистема МТЗ построена следующим образом. Сигналы токов фаз *A*, *B* и *C*, заведенные в подсистему через первые три входа, пропускаются через блоки RMS для получения среднеквадратичных значений. Далее с помощью блока MinMax определяется наибольший из фазных токов, который далее подается на верхние по схеме выводы реле Relay1 – «Relay3. На нижние по схеме выводы подаются величины уставок срабатывания по току. Если текущее значение тока превышает уставку, блок Relay на выходе Out формирует единичный логический сигнал, в противном случае на выходе присутствует уровень логического нуля.

### **Защита от замыканий на землю для линий**

В подсистеме ОЗЗ контроль замыкания на землю производится по фазным токам  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , которые заводятся на соответствующие входы от обычных трансформаторов тока [2, 3]. Эти сигналы объединяются в трехфазную шину сигналов и подаются на блоки  $I_0$ ,  $I_3$ ,  $I_5$ ,  $I_7$ . Каждый блок представляет собой стандартный библиотечный компонент Simulink 3-Phase Sequenceanalyzer, настроенный на соответствующую гармонику. На данном этапе контроль производится по амплитуде тока соответствующей гармоники, снимаемого с выхода Mag блока анализа.

## Защита от замыканий на землю для секций шин

Структура и работа подсистемы ЗЗС такие же, как и в защите от ОЗЗ для линий электропередачи [2, 3]. Отличие состоит в том, что здесь ведется контроль только основной гармоники нулевой последовательности, выделяемой блоком 3-Phase Sequenceanalyzer,  $U_0$ .

### Логическая защита шин

Подсистема ЛЗШ реализует простейшую логику защиты шин, основанную на анализе сигналов пуска максимальных токовых защит. В нормальном режиме сигнал на выходе логического элемента «И»  $And_1$  поддерживается на нулевом уровне отсутствием сигнала пуска МТЗ ввода [2, 3]. При возникновении короткого замыкания на какой-либо из отходящих линий происходит одновременный пуск и МТЗ этой линии, и МТЗ ввода, поскольку последняя имеет достаточную для этого чувствительность. Таким образом, на обоих входах  $Pusk\_MTZ\_pr$  и  $Pusk\_MTZ\_vv$  появляется уровень логической единицы, однако благодаря элементу  $Not1$ , реализующему логику инвертирования, произведение этих сигналов будет равно нулю, что обеспечивает несрабатывание защиты шин в этой ситуации.

Если же короткое замыкание возникнет на шинах, то пуска МТЗ присоединений не произойдет, и сигнал  $Pusk\_MTZ\_pr$  будет нулевым, а при прохождении через инвертор  $Not1$  – единичным. В то же время МТЗ ввода гарантированно запустится, вследствие чего сигнал  $Pusk\_MTZ\_vv$  перейдет в единичное значение, и при умножении на инвертированный сигнал  $Pusk\_MTZ\_pr$  обеспечит на выходе элемента  $And_1$  единичный уровень пуска логической защиты шин. Таким образом, обеспечивается срабатывание данной защиты только при возникновении короткого замыкания на шинах РТП. При этом срабатывания МТЗ ввода не произойдет, потому что ЛЗШ, обладая большим быстродействием, быстрее отключит вводной выключатель и обесточит поврежденные шины.

### Дуговая защита

Подсистема ДЗ реализована с опросом датчиков дуги, располагаемых в отсеках защищаемой ячейки, и с контролем тока [2, 3]. Срабатывание датчиков дуги приводит к появлению единичного сигнала на входе  $Pusk\_dg$ , который поступает на нижний по схеме вход логического элемента  $And$ . В верхней части схемы реализован контроль



тока, протекающего через ячейку. Максимальное из действующих значений фазных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  сравнивается с уставкой по току срабатывания  $I_{cp}$  в элементе Relay1, и, если ток превышает заданное значение, элемент Relay1 обеспечивает единичный уровень на верхнем по схеме входе элемента And, тем самым приводя к срабатыванию триггера S-RFlip-Flop. Поскольку к дуговой защите предъявляются максимально жесткие требования по быстродействию, то никаких элементов выдержки времени на срабатывание не предусмотрено: сигнал с выхода триггера непосредственно поступает на выход подсистемы, активируя цепи отключения ячейки.

### **Автоматическое повторное включение**

Сигналы  $P_0$  и  $P_B$  поступают в рассматриваемую подсистему от блок-контактов выключателя ячейки [2, 3]. Цепь блоков Timer и DTC необходима для корректной работы подсистемы при моделировании в Simulink и к работе собственно автоматики не относится. То же касается блоков Memory1 и Memory2, которые развязывают входные и выходные цепи модели, исключая алгебраические петли (algebraicloops), часто возникающие при моделировании сложных систем.

### **Автоматическое включение резерва**

Основной информацией для анализа текущего режима РТП является совокупность фазных напряжений обеих секций шин РТП [2, 3]. С помощью стандартных библиотечных блоков Simulink 3-Phase Sequenceanalyzer вычисляются амплитуды и фазы векторов напряжения первой и второй секций. Поскольку информация о фазах в простых алгоритмах АВР не используется, соответствующие выходы Phase блоков  $U_1$  и  $U_2$  заглушены терминаторами Terminator1 и Terminator2. Величины напряжений секций сравниваются блоками Relay1 и Relay2 с уставкой срабатывания АВР по напряжению, заводимой в подсистему через вход  $U_{cp}$ .

### **Устройство резервирования отказа выключателя**

Фрагмент подсистемы, реализующий обработку фазных токов и их анализ по величине, аналогичен рассмотренным ранее в других подсистемах. Если текущая величина фазного тока превышает уставку срабатывания по току  $I_{cp}$  (которая заведомо превышает любой ток

нормального режима), то это означает наличие короткого замыкания на данном присоединении [2, 3]. В этом случае срабатывает релейный элемент Relay1, обеспечивая логическую единицу на своем выходе.

### **Вывод**

Для надежной и функциональной работы централизованной системы релейной защиты и автоматики в распределительном пункте среднего напряжения необходимо надежно, с необходимым техническим совершенством реализовывать в ней функции защит, которые, как минимум, требуются согласно нормативно-технической документации, а также иметь возможность выполнить дополнительные – согласно современной тенденции развития интеллектуальных сетей в России и за рубежом. Важно учесть различные варианты работы ЦСРЗА в различных условиях на объектах распределительных электрических сетей среднего напряжения. Целесообразным способом моделирования ЦСРЗА для электроустановок среднего напряжения является имитационное моделирование. Для его проведения была разработана имитационная модель ЦСРЗА для РП и ТП СН, включающая в себя численные модели подсистем ЦСРЗА. Проведенное моделирование с учетом разработанной модели самого объекта (РП СН) показало необходимость и достаточность выполняемых функций РЗА, а также эффективность дополнительных интеллектуальных (адаптивных) алгоритмов РЗА в системе.

### **Источники**

1. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения.

2. Распределительные пункты (РП и ЦРП) наружной установки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metk.biz/index.php?m=19&sp=32>.

3. Крюков В.И. Обслуживание и ремонт электрооборудования подстанций и распределительных устройств: учеб. пособие / В.И. Крюков. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.

**DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL SUBSYSTEMS FOR  
CENTRALIZED SYSTEM OF RELAY PROTECTION AND  
AUTOMATION OF DISTRIBUTION POINTS MEDIUM VOLTAGE**

LIZUNOV I.N., MISBAKHOV R.SH., BAGAUTDINOV I.Z.

*The problems of creating TSSRZA for RP CH, including the necessary and required functions of relay protection at the facility. Developed numerical models for simulation subsystems TSSRZA model.*

*Keywords: Relay protection and automation, adaptive algorithms of relay protection and automation, control and power management.*

УДК 54.08:681.2

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДАВЛЕНИЯ  
МАСЛА ДВИГАТЕЛЕЙ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ЛОМАКИН И.В., КГЭУ, к.т.н., доцент, lomakin\_igor@mail.ru  
БЕЛОВА С.А., КГЭУ, магистрант

*В работе выполнен анализ существующих способов контроля системы маслоснабжения двигателя. Предложен алгоритм контроля системы смазки двигателя внутреннего сгорания.*

*Ключевые слова: схемотехника, система смазки, датчик давления масла, канал контроля, алгоритм.*

Современные двигатели внутреннего сгорания имеют встроенные микропроцессорные диагностические системы, которые контролируют процессы топливоподачи и газораспределения. Однако контроль состояния системы смазки осуществляется только визуально (щупом и лампой датчика давления масла). В то же время повышение надежности двигателей, в том числе и за счет совершенствования системы смазки и текущего контроля ее состояния, является достаточно актуальной задачей. Поэтому работа посвящена разработке автоматического канала контроля параметров системы маслоснабжения двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Показатель давления масла и его изменение под воздействием изменения числа оборотов двигателя характеризуют техническое состояние системы смазки, подшипников коленвала и распредвала.

Давление масла зависит от температуры двигателя (рис. 1) и скорости вращения коленчатого вала (рис. 2). Давление масла минимально на холостом ходу, а максимальное давление масла конструктивно ограничено соответствующей регулировкой редукционного клапана [1].

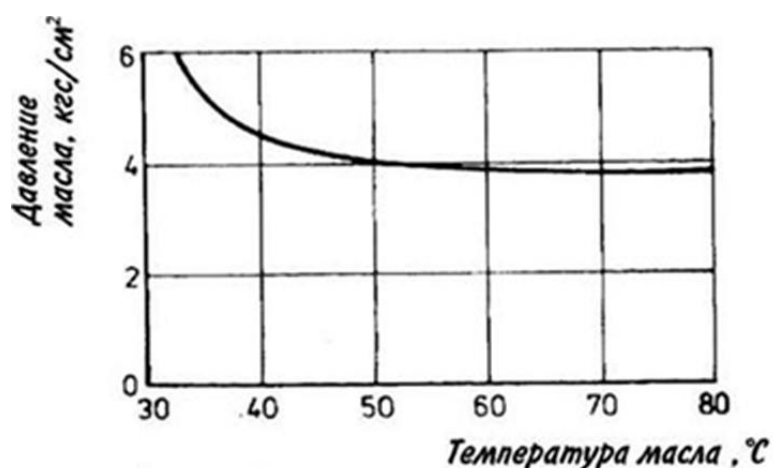


Рис. 1. Зависимость давления масла от температуры

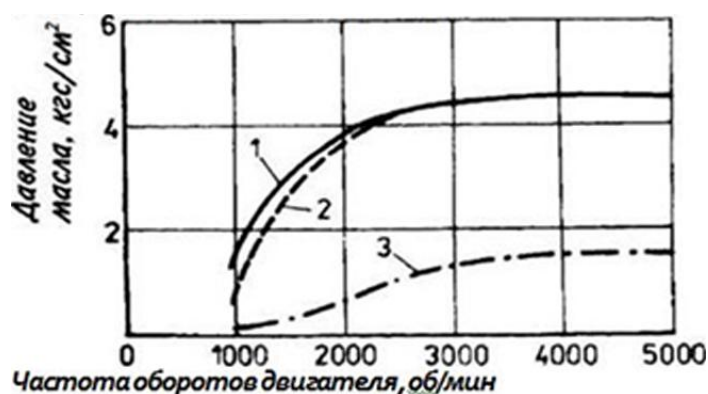


Рис. 2. Зависимость давления масла от режима работы двигателя:  
 1 – при исправной системе смазки; 2 – при неисправном масляном насосе, увеличенном зазоре; 3 – при увеличенном зазоре под подшипников коленвала

Зависимость давления масла от температуры можно аппроксимировать формулой:

$$p(t) = 3,8 + 300 \cdot e^{-0,15 \cdot t}, \quad (1)$$

где  $t$  – температура масла, °C; 3,8 и 300 – эмпирически подобранные коэффициенты.

Зависимость давления масла от частоты оборотов двигателя также можно представить формулой:

$$p(\omega) = p_0(t) \left( 1 - e^{-\frac{(\omega-800)}{700}} \right), \quad (2)$$

где  $p_0(t)$  – начальное давление масла при номинальных оборотах двигателя, вычисленное по формуле (1).

У исправного ДВС давление масла должно составлять:

- 1 кгс/см<sup>2</sup> на холостом ходу (не ниже 0,3 кгс/см<sup>2</sup>);
- 2–4 кгс/см<sup>2</sup> на высоких оборотах для бензиновых двигателей;
- 3–6 кгс/см<sup>2</sup> на высоких оборотах для дизельных двигателей.

Таким образом, обрабатывая показания датчиков давления, температуры и тахометра, можно составить заключение о состоянии системы смазки в текущий момент времени.

Надежность работы смазочной системы зависит от множества параметров. Для оценки состояния системы смазки ДВС в качестве контролируемых параметров целесообразно выбрать:

- уровень масла в картере двигателя;
- показания датчика температуры двигателя;
- показания датчика давления масла.

Контроль состояния системы смазки ДВС будет заключаться в выполнении следующих макроопераций:

- контроль уровня масла с помощью специального датчика;
- контроль температуры ( $t$ ), оборотов коленчатого вала ( $\omega$ ), давления масла ( $p$ ).

Словесное описание алгоритма контроля состояния системы смазки ДВС можно представить в следующем виде.

При включении зажигания необходимо убедиться в безопасности запуска двигателя. То есть в первую очередь необходимо проконтролировать минимально допустимый уровень масла на выключенном двигателе. Если уровень  $V$  находится выше минимального  $V_{\min}$ , то формируется разрешение на запуск двигателя. Если уровень  $V$  находится ниже отметки  $V_{\min}$ , то срабатывает индикатор, требующий долить масло, и воспрещается запуск двигателя.

Далее контролируются температура и частота вращения двигателя. По полученным значениям вычисляются четыре контрольные границы давления масла  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  при нормальной температуре масла (80–90 °С) – рис. 3.

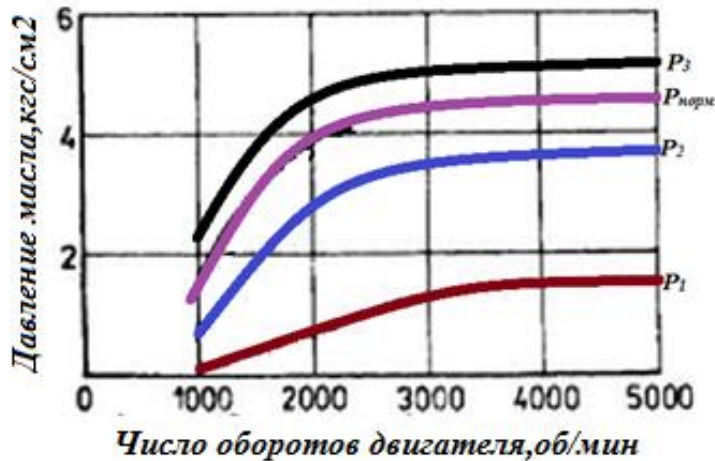


Рис. 3. График зависимости давления масла от числа оборотов двигателя с границами допуска

Эти контрольные границы можно описать формулами:

$$p_1(\omega) = 0,4 p_0(t) \left( 1 - e^{-\frac{(\omega-800)}{700}} \right); \quad (3)$$

$$p_2(\omega) = 0,8 p_0(t) \left( 1 - e^{-\frac{(\omega-800)}{700}} \right); \quad (4)$$

$$p_3(\omega) = 1,1 p_0(t) \left( 1 - e^{-\frac{(\omega-800)}{700}} \right). \quad (5)$$

Если давление  $p$  находится ниже границы давления  $p_1(\omega)$ , то необходимо снять и проверить клапан.

Если давление  $p$  находится выше границы давления  $p_1(\omega)$ , то давление масла  $p$  сравнивается со следующей границей допуска  $p_2(\omega)$ .

Если давление  $p$  находится ниже границы давления  $p_2(\omega)$ , то загорается индикатор «долить» масло и формируется рекомендация на остановку двигателя.

Если давление  $p$  находится выше границы давления  $p_3(\omega)$ , но ниже допуска  $p_3(\omega)$ , то давление масла  $p$  считается нормальным для работы ДВС.

Если давление  $p$  находится выше границы давления  $p_2(\omega)$ , то работа двигателя прекращается до устранения неисправностей (загрязнение масляных каналов, неправильная регулировка редуционного клапана).

Процесс контроля повторяется до тех пор, пока не появится неисправность или не поступит команда на остановку двигателя (рис. 4).

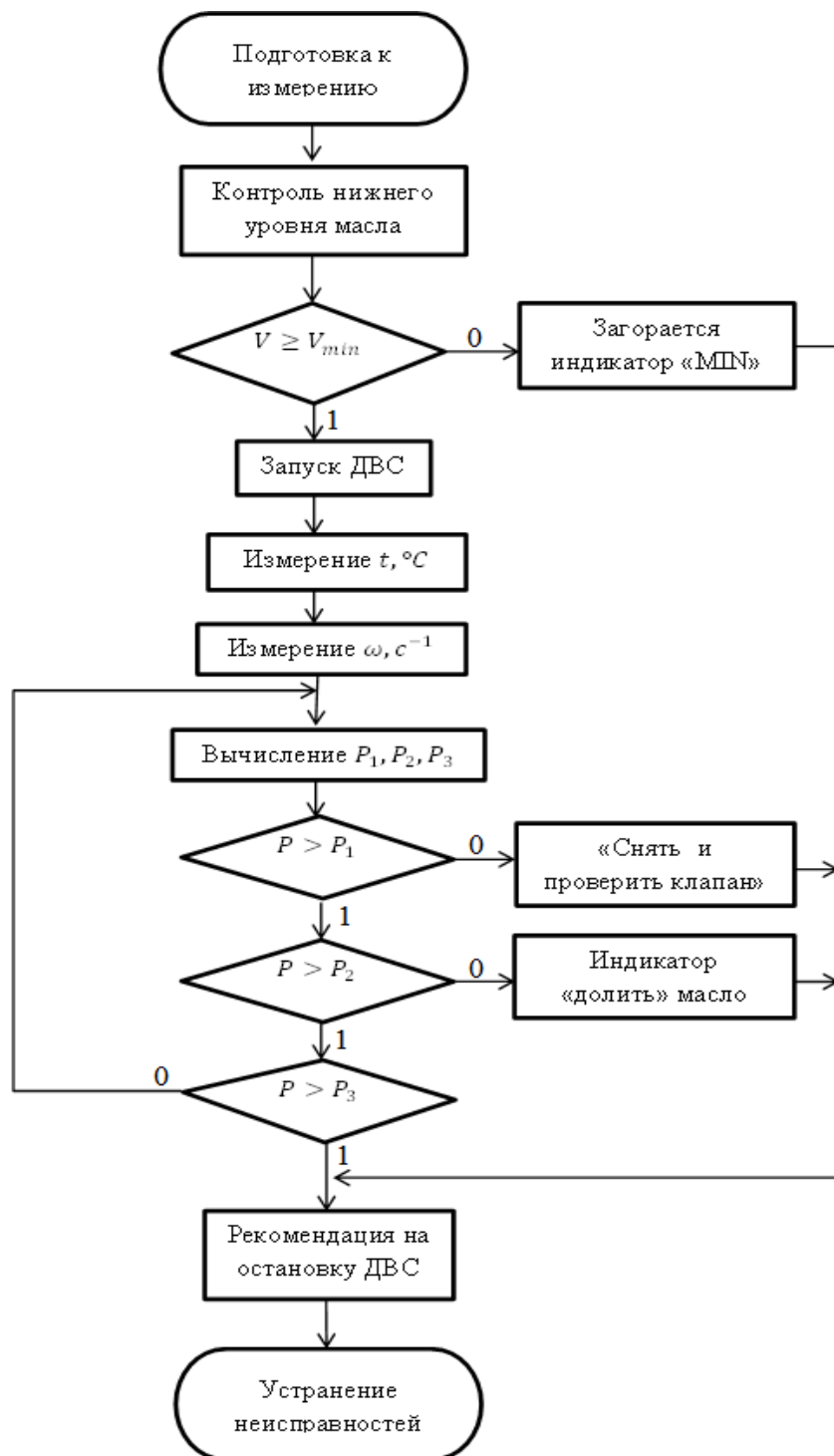


Рис. 4. Блок-схема алгоритма

Предлагаемый алгоритм позволяет контролировать текущее состояние системы смазки ДВС в процессе его эксплуатации.

### Источники

1. Косенков А.А. Проверка давления масла [Электронный ресурс] / А.А. Косенков. – Режим доступа: <http://world2car.ru/index.php/diagnostika-avtomobilya/607-proverka-davleniya-masla>.
2. Ломакин И.В. Программное обеспечение и технология программирования микроконтроллеров: лабораторный практикум / И.В. Ломакин. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. – 92 с.
3. Контроль за давлением масла в двигателе. Система смазки двигателя внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autoshcool.ru/remont/>.

### ALGORITHM OF PRESSURE CONTROL OF ENGINES, POWER STATIONS

LOMAKIN I.V., BELOVA S.A.

*In work the analysis of existing methods of control of the oil supply system of the engine. The proposed control algorithm of the lubrication system of the internal combustion engine.*

*Keywords: circuit design, lubrication system, internal combustion engine, the oil pressure sensor, the control channel.*

УДК 658.26.662

### ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ И ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОПОЛЕВОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ДВИГАТЕЛЕЙ

ЛУТФУЛЛИН И.И., КГЭУ, студент  
САФИН А.М., КГЭУ, студент  
СЕРПИОНОВ А.А., КГЭУ, студент  
УРАЗАЕВ В.Г., КГЭУ, студент  
КАПАЕВ В.И., КГЭУ, к.т.н., доцент

Объектом исследования является процесс формирования топливовоздушной горючей смеси в ДВС транспортных средств.



Целью является выявление наиболее эффективного, технически и экономически целесообразного способа воздействия электрического и магнитного полей на процесс формирования топливовоздушной горючей смеси ДВС с целью активизации ее последующего горения и разработка устройств, реализующих этот способ.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), приводные ДВС транспортных средств являются одним из основных мировых потребителей топлива и атмосферы планеты и одновременно – основными экологическими загрязнителями атмосферы и всей окружающей среды. Известно, что КПД бензинового ДВС – примерно 35 %, а дизельного – 45 %, и 12 % топлива в топливовоздушной смеси в карбюраторном ДВС не успевает сгорать. В связи с проблемами экологии и энергосбережения, на сегодня достаточно остро стоят вопросы повышения эффективности ДВС транспортных средств. Поэтому радикальное энергосбережение и повышение экологичности именно в этой важнейшей отрасли наиболее значимо для устойчивого развития цивилизации на обозримое будущее.

В настоящее время вопросу формирования эффективной топливовоздушной смеси ДВС посвящено множество исследований [1, 2]. Однако эффективность известных способов отдельного воздействия электрических и магнитных полей на компоненты горючей смеси [3–7] невысока, так как при этом не реализуются сформулированный в данном проекте общий методологический принцип решения проблемы радикального топливосбережения в ДВС, сутью которого является системный подход, в соответствии с которым процессы подготовки, активизации и эффективного смешения разнообразных топливовоздушных смесей являются взаимозависимыми и поэтому должны рассматриваться и решаться в комплексе. Причем его реализация не должна вызывать существенную модернизацию конструкции двигателей.

### **Теоретическая часть**

Для реализации двухэтапного способа активизации топливовоздушной горючей смеси в состав активатора предлагается включить два блока: блок электрополевого ионизатора-активатора кислорода воздуха и блок магнитополевого активатора топлива и смесителя компонентов горючей смеси (рис. 1).

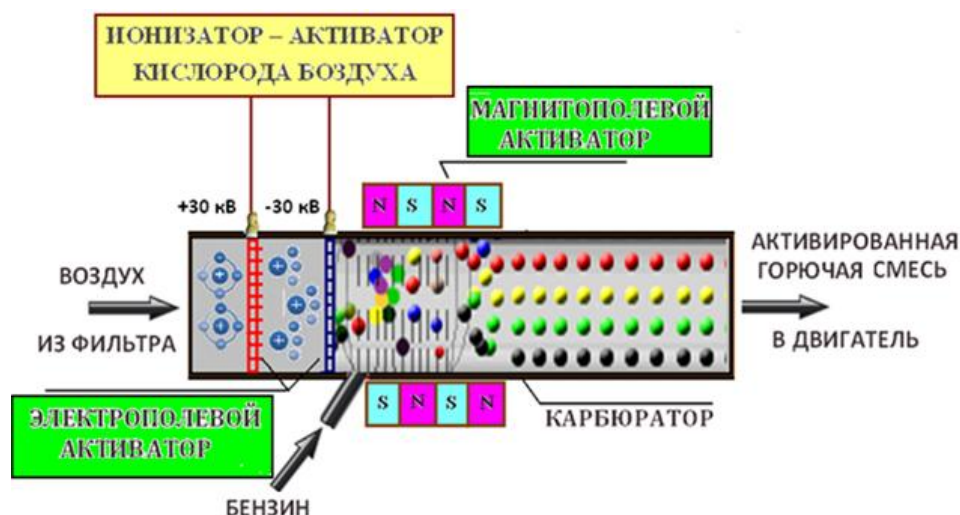
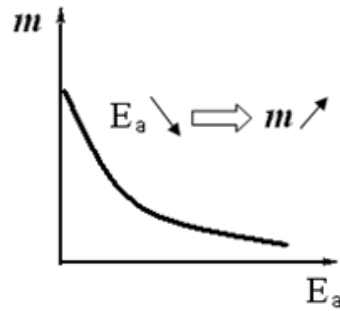


Рис. 1. Двухэтапный способ активизации топливоздушную горючей смеси

Блок электрополевого ионизатора-активатора кислорода воздуха осуществляет предварительную ионизацию поступающего в камеру сгорания кислорода воздуха многоимпульсным электрическим полем, синхронизированным с тактами поступления воздуха в камеру сгорания ДВС.

Блок магнитополевого активатора топлива и смесителя компонентов горючей смеси своим последующим воздействием на топливоздушную горючую смесь полярно-переменным магнитным полем способствует дополнительной активизации и повышению качества смешения ее компонентов. Так как в бензине и дизельном топливе всегда происходит формирование уплотненных групп углеводородных молекул (молекулу-сгустков), горение сгустков происходит по внешней их поверхности, молекулы, находящиеся внутри сгустка, не успевают полностью сгореть и выбрасываются с выхлопом. При прохождении молекул топлива через магнитные поля активатора происходят сдвиги электронов и ядра внутри молекулы, вследствие этого энергия связей внутри молекулы изменяется. Происходит их изгибание и частично даже разрыв. В результате энергия активации молекул, определяющая количественный энергетический уровень для начала цепной реакции горения топлива, снижается. Чем ниже активационный барьер реакции горения, тем быстрее она идет в данных условиях, потому что большее число молекул топлива способно преодолевать барьер в единицу времени и вступать в начальный процесс воспламенения. Из закона Аррениуса видно, что при низких энергиях активации  $E_a$  химическое превращение будет происходить с очень высокой скоростью (рис. 2).

Рис. 2. Зависимость  $m(E_a)$ 

Таким образом, чем более активно топливо, тем полнее сгорание топливной смеси, а значит, экономичнее, экологически чище и мощнее ДВС.

Кроме того, ионизированные молекулы кислорода воздуха, проходя через магнитополевой активатор, подвергаются также знакопеременному силовому воздействию магнитным полем и начинают совершать колебательные движения. Взаимные колебания активизированных компонентов горючей смеси приводят к их соударениям с интенсивным перемешиванием, что способствует повышению качества смешивания активизированных компонентов горючей смеси.

Предложенная технология активизации топливоздушной горючей смеси имеет огромную актуальность и очень широкое применение не только на транспорте, но и в теплоэнергетике в связи с удорожанием топлива и глобальными экологическими проблемами.

### Практическая часть

Основным исполнительным элементом электрополевого активатора, от которого зависит эффективность, является коронирующий электрод.

Коронирующий электрод-активатор вставляется между воздушным фильтром и корпусом карбюратора двигателя и изолируется электрически от их корпусов с помощью изолирующего высоковольтного корпуса.

Магнитополевой активатор – блок для активации топлива и повышения качества смешения активизированных топливной и воздушной составляющих горючей смеси магнитным полем – представляет из себя два ряда постоянных сверхмощных неодимовых магнитов, установленных на внешней поверхности патрубка из немагнитного материала.

Схема установки разработанного двухэтапного многоимпульсного электро-магнитополевого активатора топливоздушной горючей смеси ДВС представлена на рис. 3.

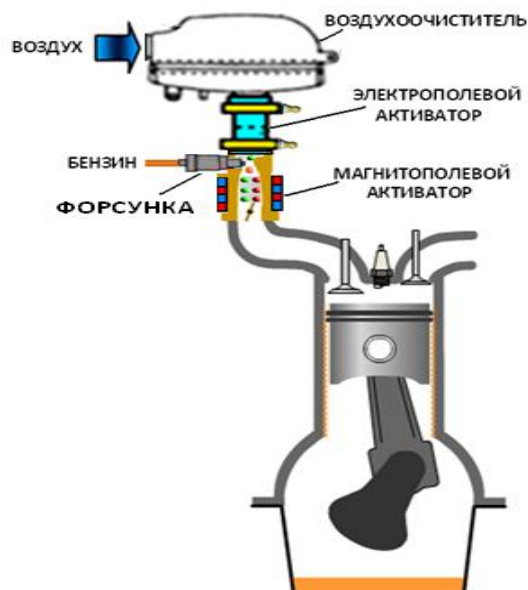


Рис. 3. Схема установки двухэтапного многоимпульсного электро-магнитного активатора топливовоздушной горючей смеси

### Обоснование экономической эффективности

Экспериментальная проверка многоимпульсного электрополевого ионизатора-активатора кислорода в потоке воздуха, поступающего в камеру сгорания ДВС, проводилась на приводном двигателе бензоэлектрического агрегата АБ-2-О/230.

Результаты эксперимента представлены в виде графика-зависимости удельного расхода топлива  $\gamma$  от величины напряжения  $U$  на коронирующем электроде-активаторе (рис. 4).

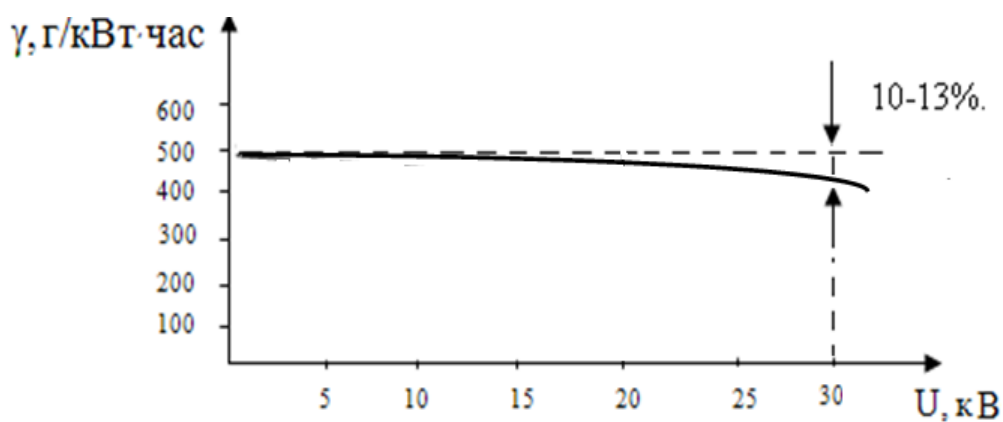


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива  $\gamma$  от величины напряжения  $U$  на коронирующем электроде-активаторе

Из графика следует, что предполагаемое устройство сокращает расход бензина на выработку двигателем 1 кВт/ч энергии на 10 – 13 %. Это свидетельствует об интенсификации процесса горения горючей смеси в двигателе. Полнота сгорания топлива улучшает и качество выхлопных газов двигателя, что положительно отразилось на экологических характеристиках двигателя, как подтверждается данными контрольных замеров, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Контрольные параметры	Стандартная комплектация	Применение электрополевого активатора
Окислы углерода CO, %	1,5	0,3
Содержание углеводородов CH	300	260
Расход топлива, г/кВт · ч	500	450

Сравнительные технические характеристики топлива, обработанного магнитным активатором горения топлива, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика топлива	Единица измерения	Стандартное топливо	Топливо после магнитного активатора
Температура вспышки	°С	88	70,2
Теплота сгорания низшая	кДж/кг	42 633	44 520

Использование активированного магнитным полем топлива приводит к снижению выбросов нормируемых вредных веществ: CO – 12,8 %, CH – 13,2 %, и расхода топлива – 6,4 %.

Результаты испытаний ДВС с различными типами устройств на стендах позволили в концентрированном виде показать положительное влияние электромагнитных воздействий на топливную экономичность и экологические показатели.

Ориентировочная себестоимость разрабатываемого активатора топливовоздушной горючей смеси ДВС не превышает 20 000 руб. Обеспечивая уменьшение расхода топлива на 10–13 %, данный активатор

дает только на одноразовой заправке бензином легкового автомобиля экономию в 100 руб. При 100 заправках бензином легкового автомобиля в год, что соответствует среднему городскому стилю пользования легковым автомобилем, срок окупаемости разрабатываемого активатора составит 2 года. При этом улучшаются экологические, экономические, мощностные, экологические и многие другие характеристики ДВС.

Результаты испытаний ДВС с различными типами устройств на стендах позволили в концентрированном виде показать положительное влияние электромагнитных воздействий на топливную экономичность и экологические показатели.

В настоящее время исследования основополагающего способа завершены. Невыясненным остался вопрос разработки наиболее эффективной конструкции электрода-активатора, обладающего наибольшей способностью ионизации воздуха и высокой коррозионной стойкостью. Оформляется заявка на патент. Проект находится в стадии разработки устройства.

### Источники

1. Луканин В.Н. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин. – М.: Высшая школа, 2005.

2. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1971.

3. Степанов Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьеченков. – М.: Металлургия, 1970.

4. Дудышев В.Д. Экономия топлива и снижение токсичности бензиновых двигателей / В.Д. Дудышев // Экология и промышленность России. – 2003. – май.

5. Пат. РФ № 2135814.6. Способ интенсификации работы ДВС / В.Д. Дудышев.

6. Пат. РФ № 2117179. Способ снижения токсичности выхлопных газов автотранспорта / В.Д. Дудышев. – Приоритет от 20.02.96 г. (электроогневой метод).

7. Пат. РФ № 96186 от 29.03.2010. Устройство для ионизации воздуха / Ю.Н. Лакетко.

УДК 681.5

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕДАЧ**

МАКАРОВ А.В., КНИТУ–КАИ, аспирант, [alekseimakarov15@gmail.com](mailto:alekseimakarov15@gmail.com)  
АФАНАСЬЕВ А.Ю., КНИТУ–КАИ, д.т.н., профессор,  
[afanasiev\\_eo@mail.ru](mailto:afanasiev_eo@mail.ru)

*Рассмотрено оптимальное управление транспортным средством с параллельной работой дизельного двигателя и электродвигателя. Решена задача оптимального управления гибридной силовой установкой транспортного средства с переключением передач по критерию минимума потребления топлива и электрической энергии накопителя.*

*Ключевые слова: гибридная силовая установка, переключение передач, система автоматического управления, стратегия управления, динамическое программирование, математическая модель, оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина.*

В настоящее время в развитии автомобильной промышленности существует ряд проблем. Во-первых, это истощение природных невозобновляемых энергетических ресурсов, таких как нефть и природный газ. Следующая проблема заключается в экономии металлов и других материалов, которые используются в автомобильной промышленности и электротехнике. Последней проблемой является экологическая, связанная с выбросами двигателей внутреннего сгорания.

Одним из путей решения этих проблем является использование гибридных транспортных средств, которые сочетают в себе двигатели внутреннего сгорания и электромоторы.

Тем не менее, производство и эксплуатация гибридных электрических транспортных средств имеет ряд проблем. Эти автомобили более дорогостоящие, имеют большую массу и тяжелы в эксплуатации, поэтому необходимо использовать их эффективно.

### **Уравнения и характеристики гибридной силовой установки транспортного средства с дизельным двигателем и электромотором**

Рассмотрим транспортное средство (ТС) с гибридной силовой установкой (ГСУ), включающей двигатель внутреннего сгорания (дизельный двигатель) (ДД), синхронный электродвигатель (ЭД),

гидромеханическую передачу (ГМП), накопитель электрической энергии (НЭ) в виде аккумуляторной батареи (АБ) или суперконденсаторов (СК), преобразователь частоты (ПЧ) и управляющее устройство (УУ).

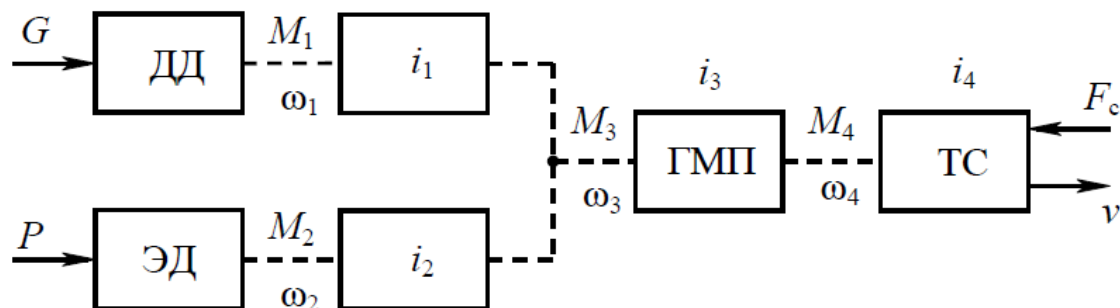


Рис. 1. Функциональная схема ГСУ с жесткой связью

На ДД поступает топливо с секундным расходом  $G$ , кг/с (все единицы в системе СИ). Выходной вал ДД имеет момент  $M_1$  и частоту вращения  $\omega_1$ . Он связан с входным валом гидромеханической передачи ГМП через передачу с передаточным числом  $i_1$ .

На ЭД поступает электроэнергия от ПЧ с мощностью  $P$ , Вт. Выходной вал ЭД имеет момент  $M_2$  и частоту вращения  $\omega_2$ . Он связан с входным валом ГМП через передачу с передаточным числом  $i_2$ .

Входной вал ГМП имеет частоту вращения  $\omega_3$ , удовлетворяющую равенствам:

$$\omega_1 = i_1 \omega_3; \quad (1)$$

$$\omega_2 = i_2 \omega_3. \quad (2)$$

К нему приложен момент (в статике, без учета динамических потерь в двигателях):

$$M_3 = i_1 M_1 + i_2 M_2. \quad (3)$$

Здесь соотношения приводятся без учета потерь энергии в жестких механических передачах. Эти потери переносятся на общий статический момент сопротивления.

Выходной вал ГМП имеет частоту вращения  $\omega_4$  и момент  $M_4$ . Они связаны с входными величинами  $M_3$ ,  $\omega_3$  связями, которые выражаются равенствами:



$$\omega_3 = i_3 \omega_4; \quad (4)$$

$$M_4 = i_3 M_3. \quad (5)$$

Со скоростью ТС  $v$  и с активной продольной силой  $F$ , действующей на ТС, имеются связи, выражаемые уравнениями:

$$\omega_4 = i_4 v; \quad (6)$$

$$F = i_4 M_4. \quad (7)$$

Потери в механической передаче учитываются соответствующим увеличением силы сопротивления  $F_c$ .

### Уравнения и характеристики дизельного двигателя

Внешняя скоростная характеристика мощности ДД при полной подаче топлива:

$$P_{1B} = P_T \left( a_0 \bar{\omega} + a_1 \bar{\omega}^2 - a_2 \bar{\omega}^3 \right) = P_T f_P(\bar{\omega}), \quad (8)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – постоянные положительные коэффициенты;  $P_T$  – максимальное значение мощности при полной подаче топлива и при частоте вращения  $\omega_P$ ;  $\bar{\omega}$  – относительная частота вращения:

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_P.$$

Внешняя скоростная характеристика момента при полной подаче топлива:

$$M_{1B} = M_P \left( a_0 + a_1 \bar{\omega} + a_2 \bar{\omega}^2 \right) = M_P f_M(\bar{\omega}), \quad (9)$$

где  $M_T$  – максимальный момент при полной подаче топлива, который достигается при частоте вращения  $\omega_M$ ;  $M_P$  – момент при полной подаче топлива и  $\omega_1 = \omega_P$ .

Степень использования мощности или момента:

$$u_1 = \frac{P_1}{P_{1B}} = \frac{M_1}{M_{1B}}. \quad (10)$$

Текущая мощность ДД:

$$P_1 = u_1 P_{1B} = u_1 P_T k_P. \quad (11)$$

Текущий момент ДД:

$$M_1 = u_1 M_{1B} = u_1 M_P f_M. \quad (12)$$

ДВС имеет расходную характеристику:

$$G = G(M_1, \omega_1).$$

Секундный расход топлива:

$$G = g M_1 \omega_1 = g P_1 = k_\omega k_u g_P P_T k_P u_1 = u_1 f_P f_u f_\omega G_P, \quad (13)$$

где  $G_P = g_P P_T$  – максимальный расход топлива при  $\omega = \omega_P$ ;  $f_u$  – коэффициент, зависящий от степени использования  $u_1$ ;  $g_P$  – удельный расход топлива при полной подаче и частоте вращения  $\omega_P$ .

Удельный расход топлива  $g$ , кг/с·Вт:

$$g = f_\omega f_u g_P, \quad (14)$$

где  $f_\omega$  – коэффициент, зависящий от частоты вращения.

### Уравнения электродвигателя

Электродвигатель имеет расходные характеристики, описываемые уравнением

$$P = P(M_2, \omega_2).$$

Примем, что электродвигатель синхронный, с возбуждением от постоянных магнитов, и эта зависимость имеет вид:

$$P = M_2 \omega_2 + 3rI^2 + c_1 \omega_2 + c_2 \omega_2^2. \quad (15)$$

Здесь  $M_2$  – момент на валу ЭД, Н·м;  $\omega^2$  – частота вращения вала ЭД, рад/с;  $P$  – электрическая мощность, потребляемая ЭД от источника (ПЧ), Вт;  $r, I$  – активное сопротивление и действующее значение тока фазы обмотки статора ЭД.

Электромагнитный момент ЭД определяется выражением:

$$M_2 = c_3 I.$$

### Уравнения транспортного средства

Движение транспортного средства ТС описывается уравнениями:

$$\frac{ds}{dt} = v; \quad (16)$$

$$m \frac{dv}{dt} = i_4 M_4 - F_c(v, s). \quad (17)$$

Здесь  $m$  – масса ТС с приведенными моментами инерции вращающихся частей, кг;  $v$  – скорость ТС, касательная к профилю дороги, м/с;  $s$  – путь, пройденный ТС и измеренный вдоль профиля дороги, м;  $F_c$  – сила сопротивления движению, включающая силу лобового аэродинамического сопротивления, компоненту силы гравитации при наклонной дороге, приведенную силу от трения качения, приведенную силу от потерь моментов в механических передачах, Н;  $M_4$  – момент на выходном валу ГМП.

Данные уравнения можно преобразовать к виду:

$$\frac{dx_3}{dt} = x_4; \quad (18)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = [M_4 - M_{4c}(x_3, x_4)] / J_4. \quad (19)$$

Здесь  $x_3 = \alpha_4$ ,  $x_4 = \omega_4$  – угол поворота и частота вращения выходного вала ГМП;  $J_4$  – суммарный момент инерции, приведенный к выходному валу ГМП;  $M_{4c}$  – статический момент сопротивления, приведенный к выходному валу ГМП.

Примем, что статический момент  $M_{4c}$  определяется выражением:

$$M_{4c} = k_0 + k_1 x_2 + k_2 x_2^2 + k_3 \sin k_4 x_1. \quad (20)$$

Первое слагаемое соответствует сухому трению, второе – вязкому трению, третье – аэродинамическому сопротивлению, четвертое – рельефу дороги.

### Постановка задачи оптимального управления

Движение автобуса с гибридной силовой установкой описывается уравнениями:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (21)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)]/J_4. \quad (22)$$

Здесь  $x_1 = \alpha_4$ ,  $x_2 = \omega_4$  – угол поворота и частота вращения выходного вала гидромеханической передачи (ГМП);  $u_1$  – степень использования дизельного двигателя ДД по мощности и моменту;  $u_2 = I$  – ток;  $J_4$  – суммарный момент инерции ДД, электродвигателя ЭД и автобуса, приведенный к выходному валу ГМП;  $M_{4c}$  – приведенный статический момент сопротивления.

Момент ЭД  $M_2$  и момент инерции ЭД пересчитаны на передаточное отношение ДД  $i_1$ . Момент инерции  $J_4$  определяется по формуле:

$$J_4 = J_A + i^2 J_D, \quad (23)$$

где  $J_A$  – момент инерции, эквивалентный массе автобуса;  $J_D$  – эквивалентный момент инерции ЭД и ДД;  $i = i_1 i_3$  – передаточное отношение от коленчатого вала ДД до выходного вала ГМП.

Величины  $x_1$  и  $x_2$  играют роль фазовых координат, а величины  $u_1$  и  $u_2$  – роль управляющих воздействий.

Предполагается, что функции  $M_1(u_1, x_2)$ ,  $M_2(u_2)$ ,  $M_c(x_1, x_2)$ ,  $G(u_1, x_1)$ ,  $P(u_2, x_2)$  известны. Задан интервал времени  $[t_0, t_f]$ , начальные и конечные условия:

$$x_1(t_0) = x_{10}; \quad x_2(t_0) = x_{20}; \quad x_1(t_f) = x_{1f}; \quad x_2(t_f) = x_{2f}. \quad (24)$$

Отметим, что конечное значение  $x_{1f}$  принимается произвольным.

Требуется найти законы изменения управляющих воздействий  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , при которых функционал

$$V = \int_{t_0}^{t_f} (a_D G(u_1, x_2) + a_E P(u_2, x_2)) dt \quad (25)$$

имеет минимальное значение при уравнениях (1), (2). Здесь  $a_D$ ,  $a_E$  – весовые коэффициенты, определяющие ценность дизельного топлива и электрической энергии.

Передаточное отношение  $i$  может принимать три значения.

Предполагается, что в момент времени  $t_1$  происходит переключение ГМП с передаточного отношения  $i'$  на передаточное отношение  $i''$ , а в момент времени  $t_2$  происходит переключение с передаточного отношения  $i''$  на передаточное отношение  $i'''$ .

### Решение задачи оптимального управления

Гамильтониан и дифференциальные уравнения относительно сопряженных переменных имеют вид:

$$H = -a_D G(u_1, x_2) - a_E P(u_2, x_2) + \psi_1 x_2 + \psi_2 [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)] / J_4 \Rightarrow \max_{u_1, u_2} \quad (26)$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = \frac{\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_1} = 0; \quad (27)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = a_D \frac{\partial G}{\partial x_2} + a_E \frac{\partial P}{\partial x_2} - \psi_1 - \frac{\psi_2}{J_4} \left( i \frac{\partial M_1}{\partial x_2} - \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_2} \right). \quad (28)$$

Примем начальное значение  $\psi_1(0) = 0$ . Это соответствует случаю, когда конечное значение угла  $\alpha$  безразлично, а конечное значение частоты вращения  $\omega$  управляется с помощью начального значения сопряженной переменной  $\psi_2(0)$ . Моменты времени переключения  $t_1$ ,  $t_2$  могут быть найдены из условия постоянства гамильтониана  $H$ .

Условия максимума гамильтониана  $H$  по управляющим воздействиям  $u_1$ ,  $u_2$  во внутренних точках имеют вид:

$$\frac{\partial H}{\partial u_1} = -a_D \frac{\partial G}{\partial u_1} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_1}{\partial u_1} = 0; \quad (29)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_2} = -a_E \frac{\partial P}{\partial u_2} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_2}{\partial u_2} = 0. \quad (30)$$

Предполагается, что в моменты переключения происходят мягкие (вязкие) удары, в результате которых происходит скачкообразное изменение частот вращения двигателей и автобуса при сохранении момента количества движения, но с потерей части кинетической энергии. Новые частоты вращения определяются по формулам:

$$x_2(t_1 + 0) = x_2(t_1 - 0)(J_A + i'J_D)/(J_A + i''J_D); \quad (31)$$

$$x_2(t_2 + 0) = x_2(t_2 - 0)(J_A + i''J_D)/(J_A + i'''J_D). \quad (32)$$

Была разработана программа в системе Turbo-Pascal .

Программа выполняет четыре итерации методом Ньютона, одна итерация имеет следующую форму:

$$\psi^* = \psi^0 + C\Delta t, \quad (33)$$

где  $\psi^0$  – начальное значение сопряженной переменной;  $\psi^*$  – сопряженная переменная после первой итерации;  $C$  – Матрица Якоби:

$$C = \begin{pmatrix} \frac{\partial dH_1}{\partial t_1} & \frac{\partial dH_1}{\partial t_2} & \frac{\partial dH_1}{\partial \psi_2(0)} \\ \frac{\partial dH_2}{\partial t_1} & \frac{\partial dH_2}{\partial t_2} & \frac{\partial dH_1}{\partial \psi_2(0)} \\ \frac{\partial x_2(t_f)}{\partial t_1} & \frac{\partial x_2(t_f)}{\partial t_2} & \frac{\partial x_2(t_f)}{\partial \psi_2(0)} \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Запишем в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_2^f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dH_1 \\ dH_2 \\ x_2(t_f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dH_1 \\ dH_2 \\ x_2(t_f) \end{pmatrix}^0 + C \begin{pmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta \psi_2(0) \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Выражение для поиска времени коробки переключения передач:

$$\begin{pmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta \psi_2(0) \end{pmatrix} = \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_2^f \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} dH_1 \\ dH_2 \\ x_2(t_f) \end{pmatrix} \right] \cdot C^{-1}. \quad (36)$$

Вычисления проводились при следующих данных. Количество дифференциальных уравнений  $m = 5$ . Количество шагов интегрирования  $n = 20\,000$ , шаг интегрирования  $h = 0,5$  мс. Общее время движения – 10 с.

Активное сопротивление фазы электродвигателя  $r = 1$  Ом. Момент инерции подвижных частей ДВС и ЭВ  $J_d = 2$  кг·м<sup>2</sup>. Момент инерции автомобиля, приведенный к выходному валу ГМП,  $J_a = 20$  кг·м<sup>2</sup>. Коэффициент момента ЭД  $c_3 = 3$ . Удельный расход топлива ДВС  $g = 6,25 \cdot 10^{-8}$  кг/с·Вт. Коэффициент запаса по моменту  $k_3 = 0,2$ . Частота вращения при максимальной мощности на коленчатом валу  $\omega_p = 150$  с<sup>-1</sup>.

Максимальная мощность  $P_T = 75\,000$  Вт. Момент на валу при  $\omega = \omega_p$   $M_p = 500$  Н·м. Коэффициенты стоимости топлива ДД и мощности  $P$ , потребляемой ЭД, имеют значения:  $a_D = 12$ ,  $a_E = 0,000002$ .

Передаточные отношения ГМП:  $i' = 2$ ;  $i'' = 1,4$ ;  $i''' = 1$ .

Коэффициенты аппроксимации  $f_\omega$ :  $b_0 = 1,23$ ;  $b_1 = -0,79$ ;  $b_2 = 0,56$ .

Коэффициенты аппроксимации  $f_u$ :  $d_0 = 1,7$ ;  $d_1 = -2,62$ ;  $d_2 = 1,92$ .

Коэффициенты аппроксимации статического момента  $M_{4c}$ :  $k_0 = 250$ ;  $k_1 = 0,3$ ;  $k_2 = 0,006$ .

Конечное значение частоты вращения  $\omega_f = 160$  с<sup>-1</sup>. Начальное значение сопряженной переменной  $\psi_2(0) = 0,00050$ . Вариация этой величины –  $10^{-5}$ .

Номера шагов, соответствующие моментам переключения ГМП:  $j_{s1} = 8400$ ;  $j_{s2} = 15000$ . Вариация номера шага – 3.

Масштабы величин для графики:  $\alpha = 0,25$ ;  $\omega = 2,5$ ;  $\psi_2 = 25000$ ;  $W = 400$ ;  $M_1, M_2, (M_1 + M_2) = 0,4$ .

## Результаты вычислений

Начальный вариант:

$$\omega(t_f) = 151,32; \quad dH_1 = -0,002816; \quad dH_2 = -0,000101.$$

Первая итерация:

$$\omega(t_f) = 160,085; \quad dH_1 = -0,001362; \quad dH_2 = -0,000898.$$

Вторая итерация:

$$\omega(t_f) = 159,975; \quad dH_1 = 0,000102; \quad dH_2 = -0,000047.$$

Третья итерация:

$$\omega(t_f) = 159,998; \quad dH_1 = -0,000002; \quad dH_2 = 0,000000.$$

Значения искоемых величин, соответствующие оптимальному управлению:

$$\psi_2(0) = 0,00055477; \quad j_{s1} = 8584; \quad j_{s2} = 14049.$$

Графики результатов приведены на рис. 2–6.

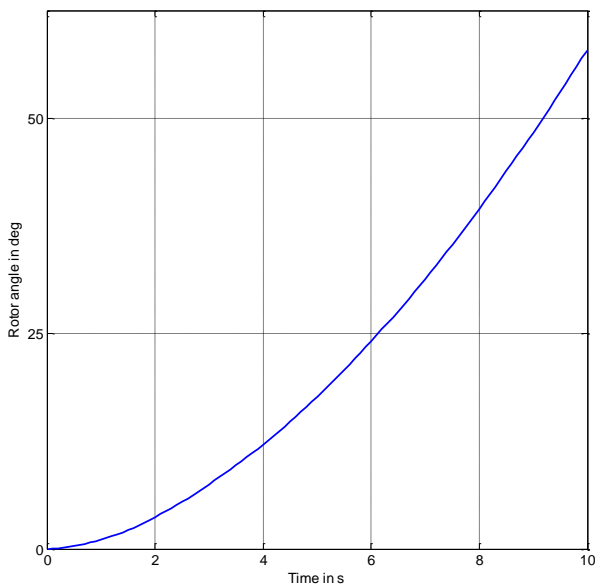


Рис. 2. Угол ротора

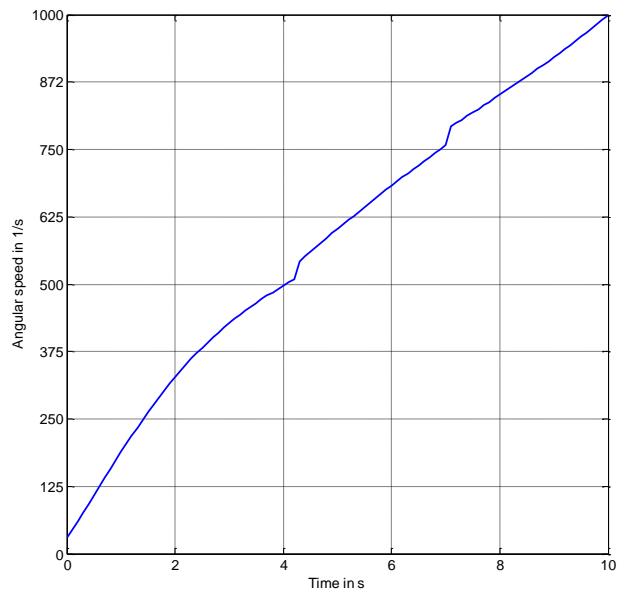


Рис. 3. Angular speed



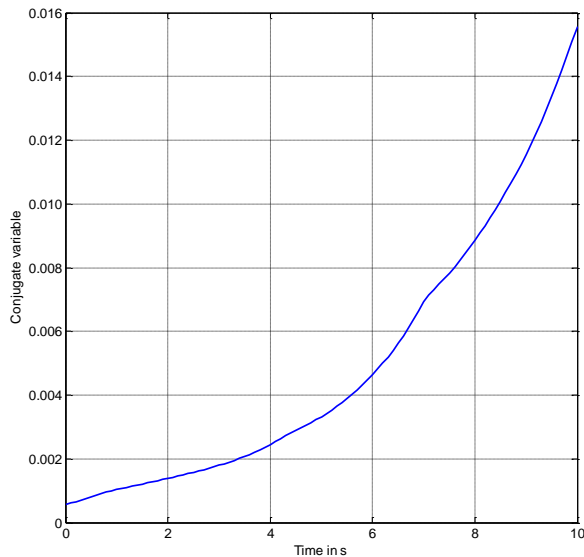


Рис. 4. Conjugate function

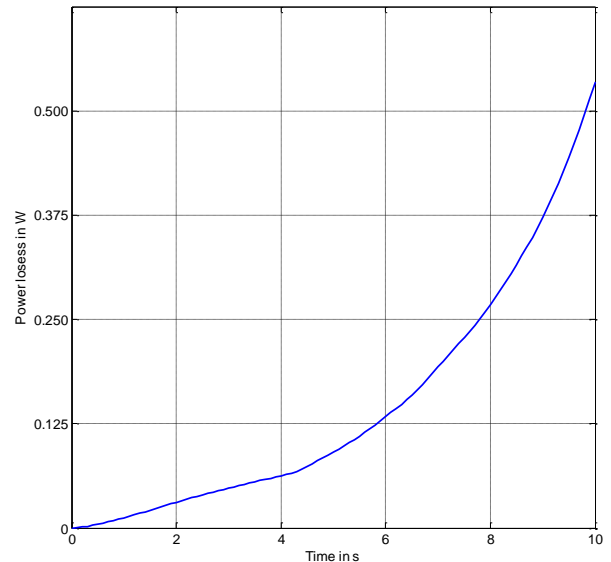


Рис. 5. Электрические потери

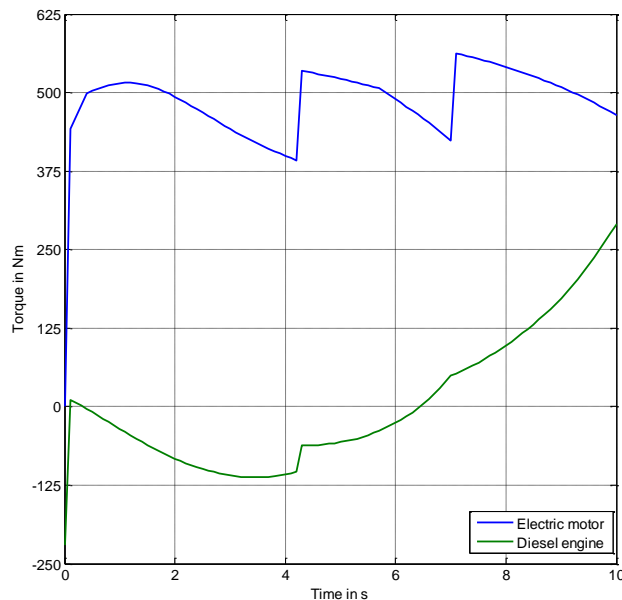


Рис. 6. Момент

Видно, что по мере разгона момент ДД уменьшается при каждом передаточном отношении. После каждого переключения скорости происходит быстрый наброс момента ДД. Далее, по мере разгона момент ЭД растет.

### Источники

1. Понтрягин Л.С. Принцип максимума // Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин [и др.]. – М.: Наука, 1969.
2. Афанасьев А.Ю. Моделирование электроприводов на ЭВМ в системе Turbo–Pascal 5.5 / А.Ю. Афанасьев. – Казань, 1999.

## OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH GEAR SHIFTIT

MAKAROV A.V., AFANASIEV A.YU

*In this article considered theory of optimal control. Given a base for optimal control theory. Solving problem for optimal current control problem and motion of hybrid electric vehicle with switching speed.*

*Keywords: hybrid electric vehicle, gear shift, system of control, control strategy, dynamical programming, mathematical model, optimal control, Pontrygin maximal principle.*

УДК 550.832(03)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА И ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦЕМЕНТАЦИИ СКВАЖИН С ОДНОСТОРОННИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ПРИЕМОМ УПРУГИХ ВОЛН С ОГОЛОВКА СКВАЖИНЫ

МАЛАЦИОН А.С., КГЭУ, к.т.н., ассистент, sky\_captain89@mail.ru  
АНДРЕЕВ Н.К., КГЭУ, д.т.н., профессор, ngeikandreev@gmail.com

*Излагаются результаты испытаний акустического метода для мониторинга состояния заколонного цементного кольца скважины. Представлены краткий обзор метода и описание прибора для контроля цементации скважин с односторонним возбуждением и приемом упругих волн с оголовка скважины. Приведена математическая модель распространения продольных упругих волн в системе «обсадная колонна скважины – цементное кольцо» с дефектными и бездефектными участками. В модели учтены влияние отражения волн от границ двух сред и зависимость коэффициента затухания упругих волн от частоты и местоположения дефектных участков вдоль тела скважины. Проведены измерения на реальной скважине. Результаты измерений сравниваются с данными метода акустического каротажа цементации. Предлагаемый метод является оперативным, не требует опускания аппаратуры в тело скважины, наличия в ней жидкости и поэтому является менее затратным.*

*Ключевые слова: контроль цементации скважин, распространение, затухание, отражение, упругие волны, частотная зависимость.*

В работе представлены результаты измерений на реальной скважине с использованием предлагаемого многочастотного акустического метода и прибора для контроля цементации скважин с односторонним возбуждением и приемом продольных упругих волн с оголовка скважины (ВАЦ) [1, 2] и известного метода акустического каротажа цементации (АКЦ) [3].

### Методика исследований

Существующие методы контроля цементации скважин (акустический каротаж, термометрия, гамма-гамма-каротаж и ряд других) недостаточно оперативны и требуют остановки технологического процесса добычи для опускания датчиков внутрь скважины [3]. Описываемый ниже метод применяется в комбинации с другими каротажными методами и отличается от них более высокой оперативностью, измерения проводятся с оголовка скважины. Поэтому он является менее затратным.

В используемом методе [2, 4, 5] в обсадной колонне, покрытой цементом, распространяются продольные упругие волны.

Здесь и далее в формулах цифрой 1 обозначен участок обсадной колонны с нормальным качеством цементации и состояния стальной трубы, а участок колонны с дефектами – цифрой 2. Двигаясь по обсадной колонне с дефектами цементации и дефектами стальной трубы, упругие волны частично отражаются от дефектов и частично проходят дальше. Процессы можно описать формулой:

$$u_1 = A_1 \exp[i(\omega t - K_1 x)] \exp(-\delta_1 x) + B_1 \exp[i(\omega t + K_1 x)] \exp(\delta_1 x). \quad (1)$$

Здесь  $A_1$  и  $B_1$  – амплитуда волны;  $K_1$  – волновое число;  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – время;  $x$  – ось, вдоль которой распространяется волна;  $\delta_1$  – коэффициент затухания звука в среде 1. Аналогичное выражение может быть написано для среды 2 с дефектом. Первое слагаемое соответствует волне, движущейся от оголовка скважины, а второе слагаемое – отраженной волне. Коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $W$  по амплитуде для акустической волны, согласно работе [6], равны, соответственно:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 S_2 - \rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2 + \rho_1 c_1 S_1}; \quad (2)$$

$$W = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_2 c_2 S_2}{\rho_2 c_2 S_2 + \rho_1 c_1 S_1},$$

где  $\rho_i$  – плотности сред,  $i = 1, 2$ ;  $c_i$  – скорости распространения волны;  $S_i$  – площади поперечного сечения первой и второй сред;  $Z_1$  и  $Z_2$  – механические импедансы соответствующих сред.

Метод основан на использовании комплекса данных, полученных путем: а) одностороннего возбуждения и регистрации формы эхо-сигналов, отраженных от дефектов, концов и элементов конструкции скважины; б) вычисления зависимости коэффициента затухания сигнала от частоты зондирования  $\delta(\omega_n)$  в звуковом диапазоне 1–20 кГц; в) определения координат дефектов и элементов конструкции скважины  $x_i = c_k t_i$  по времени  $t_i$  регистрации эхо-сигналов, превышающих по амплитуде пороговый уровень, и скорости  $c_k$  упругих волн на участках колонны; г) оценки изменений состояния скважины путем сопоставления результатов измерений, разделенных достаточно большими периодами регламентного контроля  $T_c$ . При сопоставлении обязательно учитываются данные других физических методов, что повышает достоверность данного метода.

### Основные результаты

Для реализации метода создана экспериментальная установка, включающая в себя прибор для контроля цементации скважин и исследовательский стенд [2, 4, 5]. Создано алгоритмическое и программно-техническое обеспечение для автоматизированного управления процессами измерений, контроля и тестирования узлов прибора, обеспечивающее надежное функционирование прибора, обработку информативных сигналов и представление результатов в реальном масштабе времени с выявлением вероятных дефектных участков скважины [5].

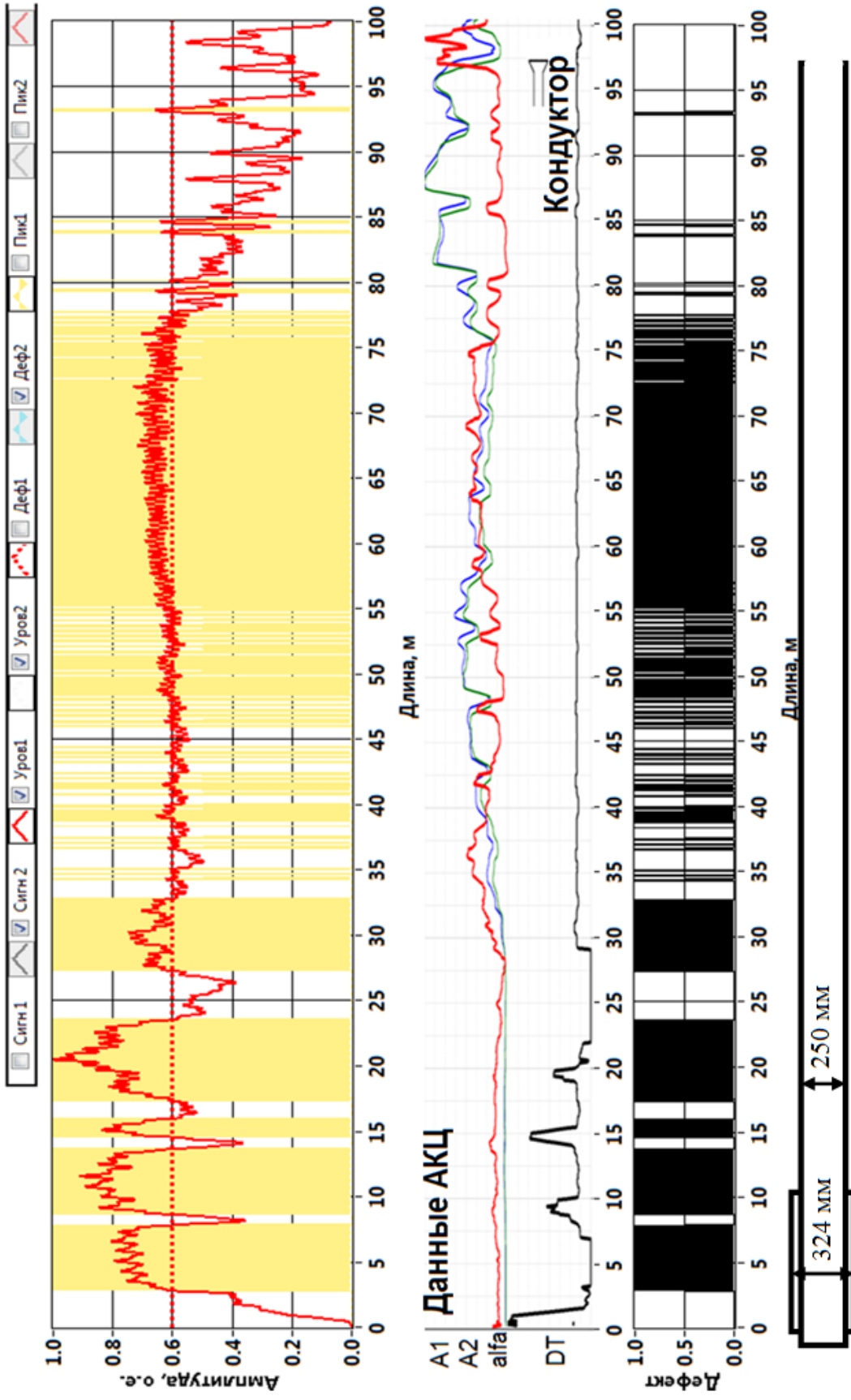
Метод проверен экспериментально на исследовательском стенде и реальных скважинах. Ниже излагаются результаты испытаний метода и прибора на исследовательской скважине Казанского федерального университета, г. Казань, 28 мая 2015 года. Проектная глубина скважины – 300 м, 100 м – глубина обсадки. Измерения проведены в автоматическом режиме с частотой заполнения зондирующего импульса  $f_0$  в диапазоне от 1 до 20 кГц с шагом 1 кГц.

Для сопоставления результатов измерений, полученных нами методом эхо-импульсной цементометрии с продольным возбуждением волн, приведены результаты исследований цементации скважины методом АКЦ, полученные коллективом специалистов Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ в лице В.Е. Косарева и Д.К. Нургалиева и любезно предоставленные нам.

Результаты представлены на рисунке. Сверху расположен график зависимости амплитуды сигнала от глубины на импульсное продольное возбуждение с оголовка скважины на частоте 18 кГц (метод ВАЦ). Средний график – зависимости коэффициента затухания  $\text{Alfa}$ , амплитуд первой положительной фазы по первому и второму приемнику  $A_1/A_2$  и интервального времени  $DT$  от глубины (метод АКЦ). Внизу представлены изображения дефектных и бездефектных областей скважины, построенные в программе Well Logging Data Processing при пороговом уровне  $S_L = 0,85$ .

По совпадению положений пиков амплитуд сигналов  $DT$  метода АКЦ и пиков эхо-сигналов метода ВАЦ можно констатировать: полученные результаты коррелируют между собой и соответствуют особенностям конструкции скважины. Следовательно, предлагаемый метод является работоспособным и может быть использован для контроля цементации скважин.

На основе результатов экспериментальных испытаний на исследовательском стенде и на реальных объектах выявлена связь амплитуды и степени затухания акустических эхо-сигналов с физическими характеристиками дефектных и бездефектных участков скважины. Выявлена возможность контроля динамики развития дефектов во время эксплуатации скважины по изменению степени и характера затухания сигнала в колонне в звуковом диапазоне частот по результатам периодического контроля и аттестации.



Сравнение сигналов, полученных методом АКЦ (середина) и разработанным прибором на частоте зондирования 18 кГц

### Источники

1. Козлов А.В. Разработка экспресс-технологии внескважинной цементометрии кондукторов: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / А.В. Козлов. – Казань, 1999.
2. Малацион А.С. Многочастотный акустический метод и прибор для контроля цементации скважин с односторонним возбуждением и упругих волн: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Малацион. – Казань, 2016.
3. Геофизические методы исследования скважин: Справочник геофизика / под ред. В.М. Запорожца. – М.: Недра, 1983. – С. 224–230.
4. Андреев Н.К. Неразрушающий акустический контроль и диагностика технического состояния водных и нефтяных скважин / Н.К. Андреев, А.С. Малацион // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1/2. – С. 107–115.
5. Андреев Н.К. Программно-технический комплекс неразрушающего акустического контроля и диагностики технического состояния водных и нефтяных скважин / Н.К. Андреев, А.С. Малацион // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7/8 – С. 111–122.
6. Paton В.Е. A method of low-frequency ultrasonic testing of extended objects by guided waves [Электронный ресурс] / В.Е. Paton, V.A. Troitskii, A.I. Bondarenko // Techn. diagnostika i nerazrushajushchii control. – 2008. – № 2. – Р. 20–30. Режим доступа: [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_03\\_38.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_03_38.pdf).

### THE RESULTS OF EXPERIMENTS OF TESTING THE METHOD AND DEVICE TO CONTROL THE CEMENTATION OF A WELL CASING BASED ON ONE-SIDED EXCITATION AND RECEPTION OF ELASTIC WAVES

MALATSION A.S., ANDREEV N.K.

*A brief overview of results of testing the method and description of the device to control the cementation of a well casing based on one-sided excitation and reception of elastic waves from the top of a well is given. The mathematical model of propagation of elastic waves in the system of a well casing and its cement ring containing defective and defect-free areas is considered. The influence of the reflection waves from the boundaries of the two solid mediums, and the dependence of attenuation coefficients of elastic waves on the frequency and location of defective areas along the pipeline of a well are taken into account. The experiments were fulfilled on the real well. The results are*

*compared with the results of the acoustic well logging method. The method is sufficiently rapid, does not require the lowering of the measurement instrument into a well body and is therefore less costly in comparison with other methods. A method is proposed to use in combination with other geophysical methods of well logging.*

*Keywords: control of the cementation of wells, casing, propagation, attenuation, reflection, elastic wave.*

УДК 62.83.52

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»**

МАЛАЦИОН А.С., КГЭУ, к.т.н., sky\_captain89@mail.ru

МАЛАЦИОН Н.В., КГЭУ, к.т.н., Nadia-4vp@yandex.ru

*Рассмотрен опыт применения прибора контроля энергетических характеристик системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» в лабораторных условиях и на объектах энергетики.*

*Ключевые слова: энергетические характеристики, преобразователь частоты, приборный комплекс, LabVIEW.*

Настройка системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» на оптимальные режимы работы – важная задача, решение которой позволяет продлить срок службы электротехнического оборудования, повысить его энергоэффективность.

В работах [1, 2] рассмотрен прибор контроля энергетических характеристик системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ – АД): его конструкция, алгоритм работы, методика. На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки, а на рис. 2 – внешний вид прибора.

Все измерения первоначально проведены на экспериментальной установке, которая обеспечила всестороннее изучение зависимости энергетических характеристик системы «ПЧ – АД» в установившихся режимах работы при различных условиях нагрузки на выходном валу двигателя, а также в зависимости от конфигурации системы, задаваемой в процессе параметрирования электропривода.



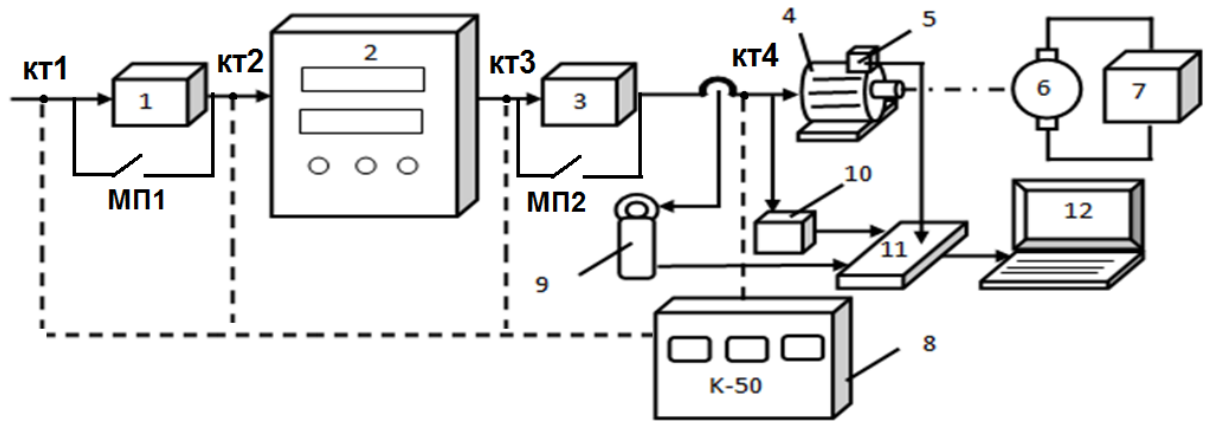


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – фильтр высших гармоник; 2 – преобразователь частоты (ПЧ); 3 – LC-фильтр; 4 – асинхронный двигатель; 5 – датчик температуры; 6 – двигатель постоянного тока независимого возбуждения; 7 – тиристорный преобразователь; 8 – переносной измерительный комплект К-50; 9 – датчик тока; 10 – датчик напряжения; 11 – аналогово-цифровой преобразователь; 12 – персональный компьютер; МП 1, 2 – магнитные пускатели; КТ – контрольные точки

Принцип работы установки заключается в следующем. Для определения энергетических характеристик системы «ПЧ – АД» на экспериментальной установке имеются контрольные точки КТ 1, КТ 2, КТ 3, КТ 4. С помощью магнитных пускателей МП 1, МП 2 можно шунтировать фильтр высших гармоник (то есть КТ 1 = КТ 2) или LC-фильтр (то есть КТ 3 = КТ 4), таким образом можно реализовать 4 варианта конфигурации системы «ПЧ – АД».



Рис. 2. Внешний вид прибора контроля энергетических характеристик системы «ПЧ – АД»

В настоящей работе будет рассмотрен опыт применения прибора в лабораторных условиях и на объектах энергетики.

## Определение частоты коммутации полупроводниковых ключей инвертора

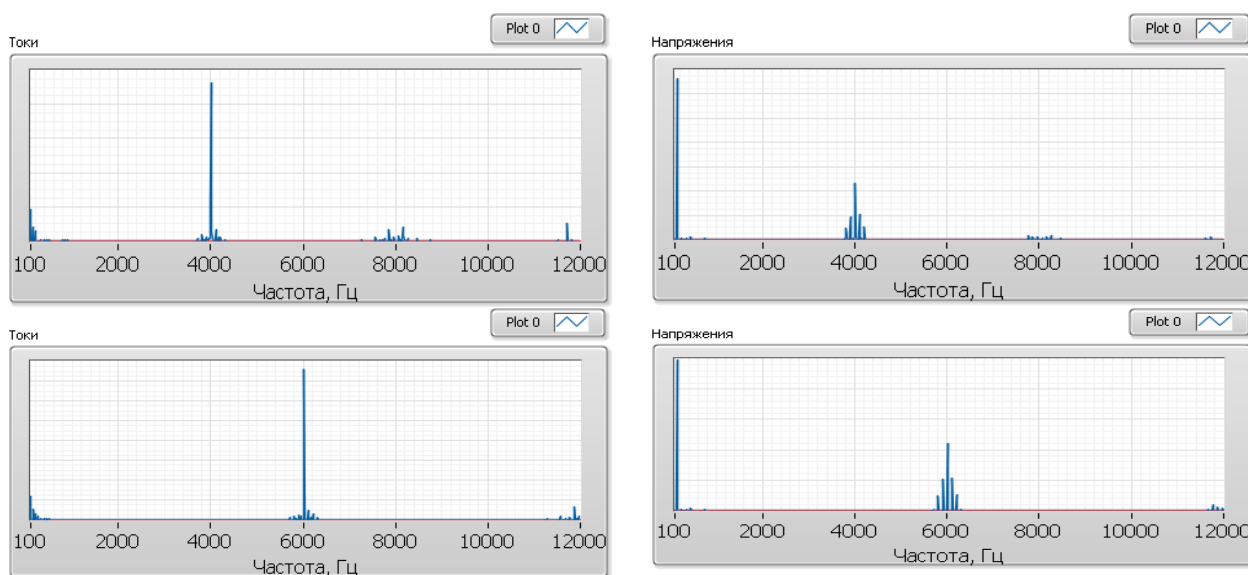
Разработанный авторами прибор позволяет определить частоту коммутации полупроводниковых ключей инвертора преобразователя частоты. Одним из методов уменьшения гармоник, генерируемых ПЧ, является увеличение несущей частоты ШИМ.

Увеличение частоты коммутации увеличивает КПД двигателя, снижает уровень шума, вибраций, улучшает форму напряжения, тепловые характеристики, однако уменьшается КПД инвертора (из-за увеличения потерь на переключение силовых ключей).

Ряд частотных преобразователей позволяют в некотором диапазоне менять этот параметр. Например, преобразователь фирмы Danfoss FC-302 позволяет выбрать следующую частоту переключения ключей: 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6 и 10 кГц.

Измерительные приборы с высокой скоростью выборки могут измерять как среднеквадратичные значения, так и мгновенные значения напряжения и тока на выходе преобразователя. По мгновенным значениям оценивают пики переходного процесса  $dU/dt$  на клеммах преобразователя или двигателя для подбора длины кабеля и фильтра. Также после Фурье-преобразования определяют гармонический состав токов и напряжений.

При проведении измерений мгновенных значений токов и напряжений на выходе преобразователя частоты на экспериментальной установке с частотой дискретизации АЦП 30 кГц на спектрах сигналов была видна несущая частота ШИМ. Для проверки возможности определения частоты переключения ключей инвертора экспериментальной установкой и приборным комплексом проведены измерения на преобразователе частоты Danfoss FC-302 (рис. 3).



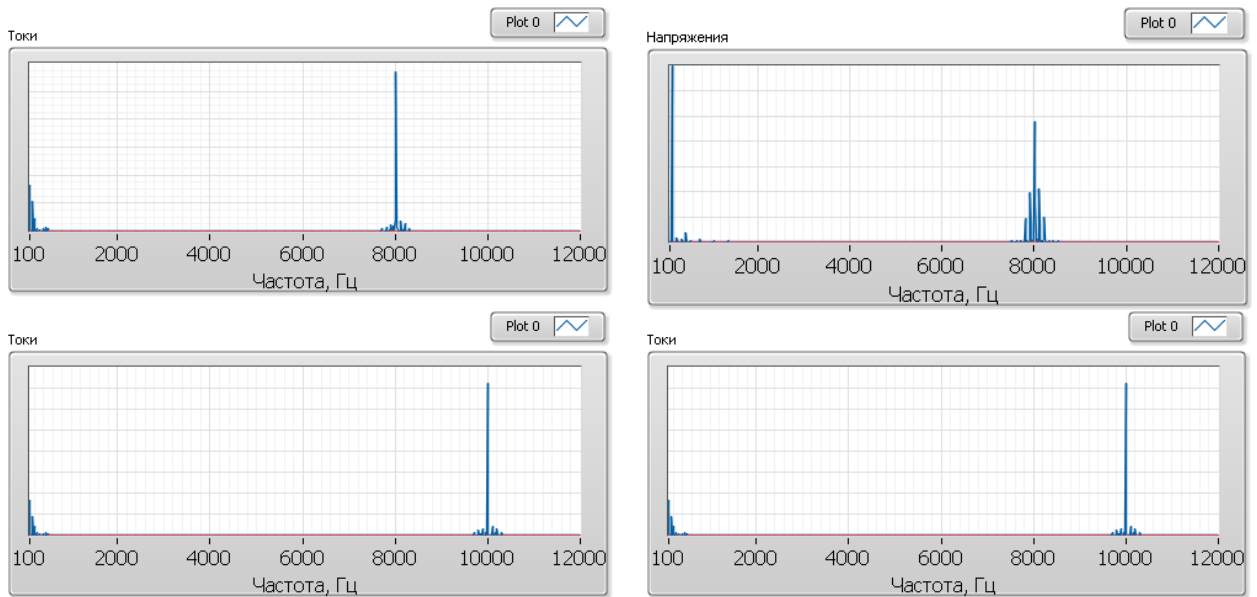


Рис. 3. Спектры токов (слева) и напряжений (справа), измеренные на экспериментальной установке с частотой дискретизации 30кГц при изменении частоты ШИМ 4, 6, 8, 10 кГц

На рис. 3 видно изменение спектров токов и напряжений при изменении частоты ШИМ. Таким образом, представляется возможным определение частоты переключения ключей инвертора по мгновенным значениям фазных токов и напряжений после Фурье-преобразования при увеличении частоты дискретизации АЦП.

### Определение влияния частоты питания электродвигателя от преобразователя частоты на коэффициент мощности $\cos\varphi$

Измерения проведены на экспериментальной установке с частотой питания электродвигателя 10, 30 и 50 Гц в контрольных точках КТ 1, КТ 4, согласно 4 вариантам при нагрузке на валу  $0,5M_{ном}$  (рис. 4):

- вариант 1 – система «ПЧ – АД» с фильтрами высших гармонических составляющих и LC-фильтром;
- вариант 2 – система «ПЧ – АД» с LC-фильтром;
- вариант 3 – система «ПЧ – АД» с фильтром высших гармонических составляющих;
- вариант 4 – система «ПЧ – АД» без фильтров.

Контрольная точка 1. Максимальный коэффициент мощности достигается на входе системы «ПЧ – АД» в КТ 1 при частоте питания электродвигателя 50 Гц и использовании LC- и АНФ-фильтров. Конфигурация варианта 1 увеличивает  $\cos\varphi$  на 0,8 % при  $f = 10$  Гц, на 3 % при  $f = 30$  Гц и на 9,16 % при  $f = 50$  Гц по сравнению с конфигурацией варианта 4, в которой отсутствуют фильтры.

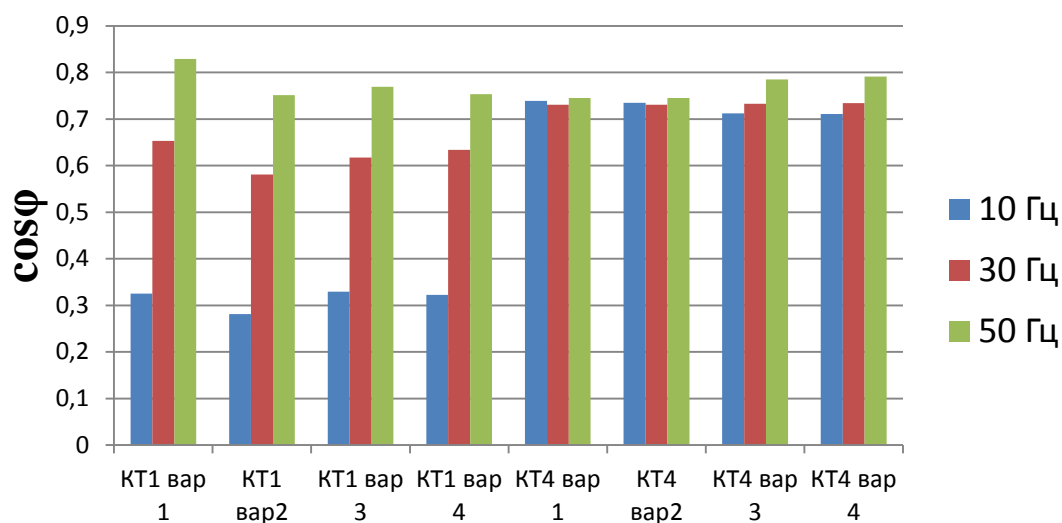


Рис. 4. Коэффициент мощности в зависимости от конфигурации электроустановки и частоты питания электродвигателя

Контрольная точка 4. Использование фильтров вызывает падение напряжения на линии питания, вследствие чего снижается коэффициент мощности электродвигателя. Так, в КТ 4 максимальный коэффициент мощности достигается при шунтировании всех фильтров и  $f = 50$  Гц. На низких частотах использование фильтров более оправдано. На  $f = 10$  Гц  $\cos \varphi$  при использовании фильтров увеличивается на 3,4 % по сравнению с конфигурацией варианта 4.

Таким образом, не смотря на ряд недостатков LC- и АНФ-фильтров (увеличение стоимости электроустановки, уменьшение коэффициента мощности мотора, ограничения для векторного управления), их использование улучшает работу электродвигателя и увеличивает коэффициент мощности системы «ПЧ–АД».

#### Измерение гармоник токов и напряжений в различных конфигурациях системы «ПЧ – АД»

Измерения проведены аналогично измерениям коэффициента мощности. Расчет проводился по измеренным мгновенным значениям фазных токов и напряжений в контрольных точках КТ 1, КТ 4. На рис. 5–8 представлены результаты при питании двигателя  $f = 30$  Гц.

В конфигурации варианта 1 и 2 (рис. 5) значительно снижаются гармоники тока: третья – в 3,3 раза, пятая – в 4,7 раза, седьмая – в 2,7 раза, девятая – в 5,4 раза, 11-я гармоника – в 8 раз. То есть при использовании фильтров гармоники по току на входе системы «ПЧ – АД» экспериментальной установки не превысили 10 % от тока первой гармоники.

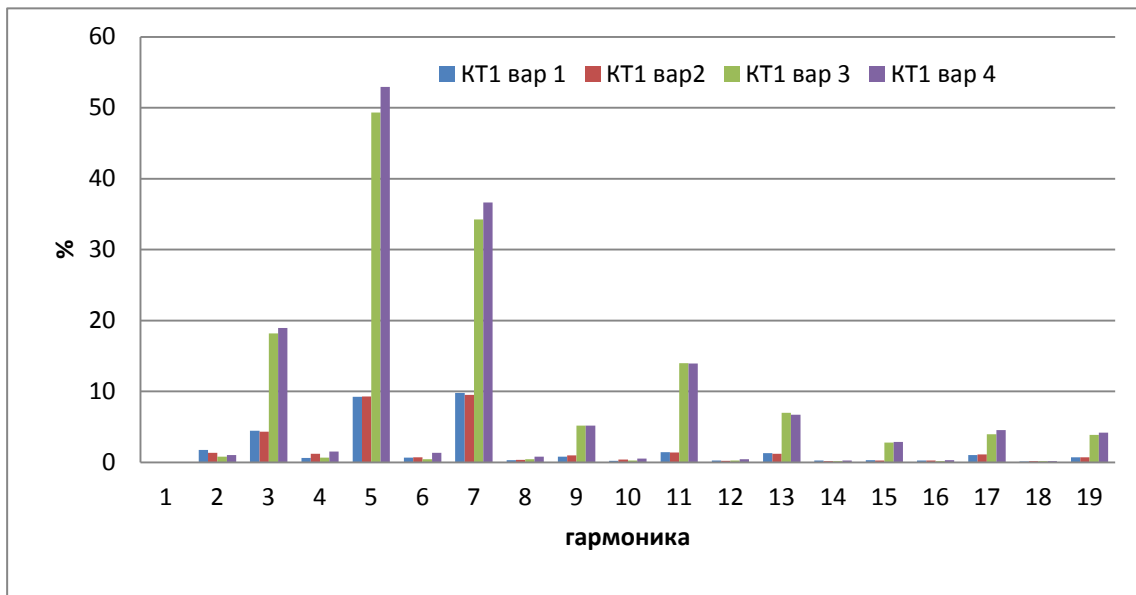


Рис. 5. Гармоники тока, измеренные в КТ 1 при  $f = 30$  Гц

Измерения гармонического состава тока в КТ 4 (рис. 6) выявили, что использование отдельно АНФ-фильтра (вариант 2) незначительно уменьшает гармоники. Эффективно использование конфигурации вариантов 1 и 3, при этом гармоники уменьшаются: третья – в 6,5 раз, пятая – в 9,9 раза, седьмая – в 8,2 раза, девятая – в 6,7 раза, 11 гармоника – в 4 раза относительно конфигурации варианта 4.

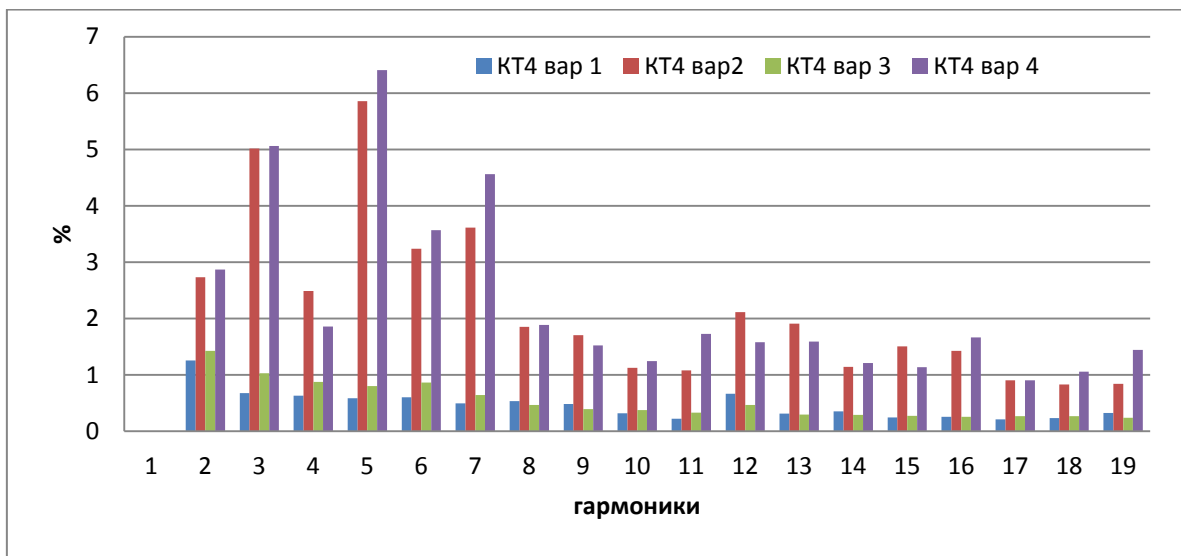


Рис. 6. Гармоники тока, измеренные в КТ 4 при  $f = 30$  Гц

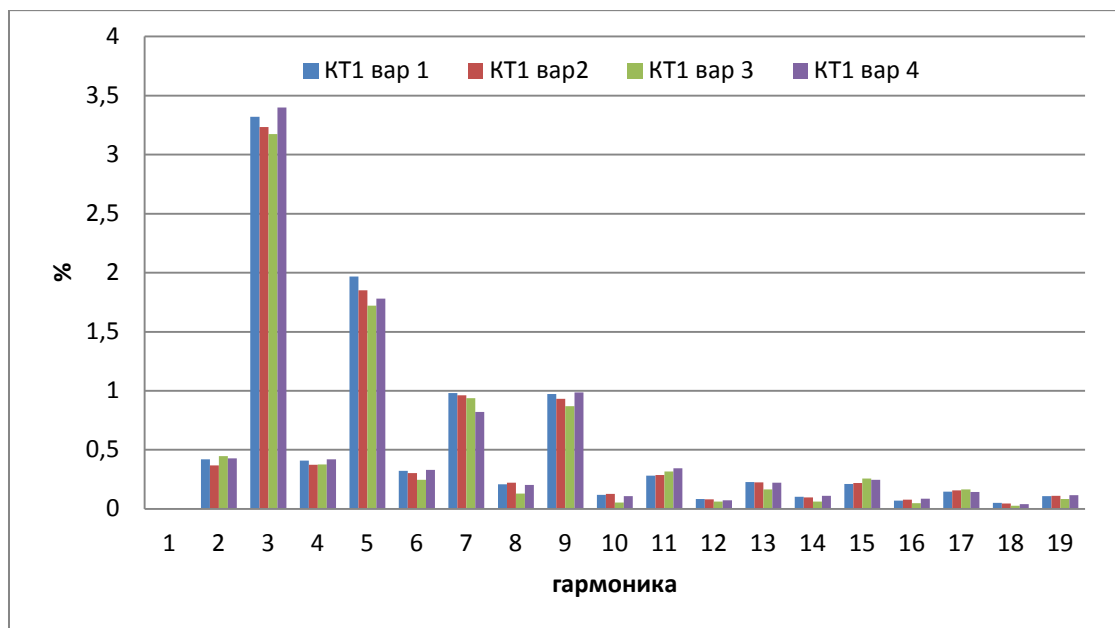


Рис. 7. Гармоники напряжения, измеренные в КТ 1 при  $f = 30$  Гц

Эффективная фильтрация гармоник напряжения в КТ 1 (рис. 7) и КТ 4 (рис. 8) происходит при использовании LC-фильтра (вариант 3). Конфигурация варианта 1 оправдана на гармониках выше девятой.

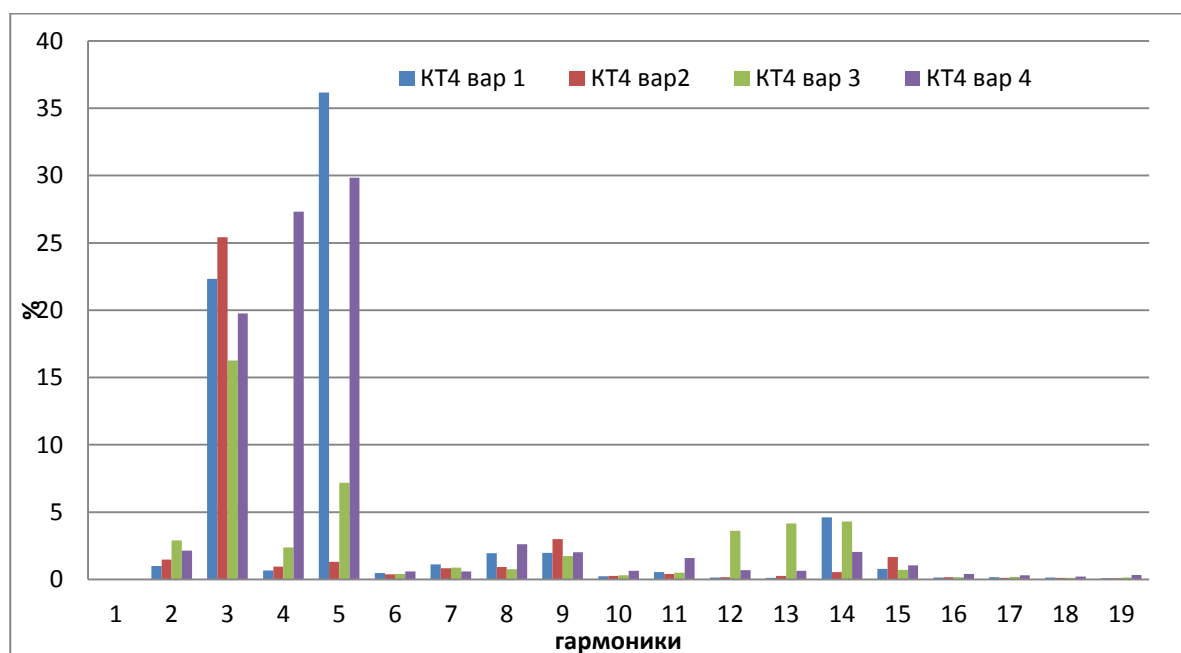


Рис. 8. Гармоники напряжения, измеренные в КТ 4 при  $f = 30$  Гц

Таким образом, на приборном комплексе и экспериментальной установке можно определять гармонический состав токов и напряжений. Анализ показывает, что компромиссным вариантом по снижению гармоник тока и напряжения как в КТ 1, так и КТ 2 является установка LC- и АНФ-фильтров (конфигурация 1).

## Внедрение и его перспективы

Разработанный прибор контроля энергетических характеристик асинхронных электроприводов успешно применен при оптимизации работы погружных центробежных насосов в СНТ «Шемелка», Республика Татарстан, путем настройки преобразователей частоты на максимальный КПД работы всей системы.

Проведены измерения на электроустановках филиалов заводов «ТехноНиколь» в г. Челябинске и г. Заинске (Республика Татарстан) – рис. 9, 10.



Рис. 9. Проведение измерений прибором контроля энергетических характеристик на заводе «ТехноНиколь»

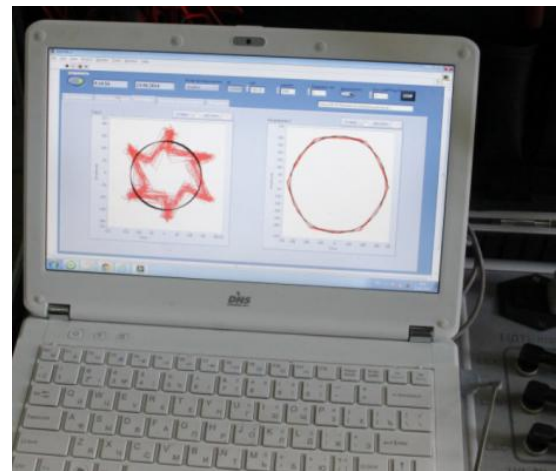


Рис. 10. Годографы тока (слева) и напряжений (справа), отображаемые на лицевой панели в процессе измерений на заводе «ТехноНиколь»

По результатам замеров выявлен низкий коэффициент мощности на ряде агрегатах, а также превышение коэффициента нелинейных гармонических искажений синусоидальности кривой тока. Установлены источники искажений формы кривых токов и напряжений – преобразователи частоты, не защищенные по входу фильтрами высших гармоник (типа АНФ). По проведенным нами замерам, компенсаторы реактивной мощности, постоянно выходявшие из строя, заменены на компенсаторы, защищенные фильтрами. В результате потребление полной мощности снизилось на 8 %. Все измерения параллельно проводились поверенным анализатором качества электроэнергии ELSPEC G4480. Отклонения составили не более 0,5 %

Еще одно экспериментальное применение разработанного прибора – часть системы по проведению гидродинамических испытаний нефтяных скважин на территории Республики Татарстан. Прибор выступает

в качестве расходомера, и по измеренным мгновенным значениям фазных токов и напряжений на выходе станции управления с преобразователем частоты производит расчет  $Q$ – $H$ -характеристики (насосная характеристика) центробежного насоса.

### Источники

1. Малацион А.С. Система мониторинга энергетических показателей асинхронного частотно-регулируемого ЭП в рабочем состоянии / А.С. Малацион, Н.В. Малацион // Современный взгляд на проблемы технических наук: сб. науч. тр. по итогам науч.-практ. конф. – Уфа, 2015. – Вып. 2. – С. 77–79.

2. Малацион А.С. Методика контроля энергетических показателей асинхронного частотно-регулируемого ЭП в рабочем состоянии / А.С. Малацион, Н.В. Малацион // Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития: сб. науч. тр. по итогам науч.-практ. конф. – Волгоград, 2015. – Вып. 2. – С. 169–171.

### EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF THE CONTROL DEVICE OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM «FREQUENCY CONVERTER – ASYNCHRONOUS ENGINE» MALATSION A.S., MALATSION N.V.

*In the article deals the experience of the application of the control device of the energy characteristics of the system «frequency converter – asynchronous engine» in the laboratory and at power plants.*

*Keywords: power characteristics, frequency converter, device, LabVIEW.*

УДК 621.396

### ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ФИЛЬТРА БЕССЕЛЯ

МАЛЕВ Н.А., КГЭУ, доцент, maleev@mail.ru  
ПОГОДИЦКИЙ О.В., КГЭУ, доцент, iskra\_18@mail.ru

*Объектом исследования является термоанемометрическая измерительная система, предназначенная для измерения скорости потока различных газовых сред. В работе анализируется передаточная функция*



*термоанемометра постоянной температуры при наличии пульсаций скорости потока. В целях повышения качества измерений на основе полиномиального фильтра Бесселя синтезируется регулятор, обеспечивающий плавность переходного процесса при требуемой точности.*

*Ключевые слова: термоанемометр, передаточная функция, фильтр Бесселя, переходный процесс.*

Принцип действия термоанемометра основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей чувствительного элемента – нити, помещаемой в поток и нагретой электрическим током. В термоанемометре постоянной температуры ток нагрева регулируется таким образом, чтобы выделяющееся количество тепла обеспечивало постоянную температуру нити. Термоанемометр состоит из измерительного моста с чувствительным элементом и функционального преобразователя с обратной связью.

Мгновенная величина расходуемой электрической энергии равна мгновенной тепловой потере на нагревание окружающей среды. Тепловые потери зависят от температуры, давления, скорости измеряемой среды и типа применяемого преобразователя. Если температура и давление среды при измерении не изменяются, то ток чувствительного элемента будет зависеть от скорости потока.

Используемый принцип оправдывает применение термоанемометра для измерения скорости потока в условиях высокочастотных пульсаций.

В результате увеличения скорости потока нить начинает охлаждаться, при этом изменяется ее сопротивление, что приводит к изменению падения напряжения, подаваемого на вход функционального преобразователя, в диагонали моста. Это напряжение усиливается посредством обратной связи подается на мост так, чтобы скомпенсировать охлаждение. Таким образом, напряжение, характеризующее нагрев чувствительного элемента, является мерой скорости потока.

Передаточная функция термоанемометра постоянной температуры с учетом воздействия на чувствительный элемент пульсаций скорости потока [1]:

$$W_t(s) = K \frac{c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{c_3 s^3 + (c_2 + Kc_{K2})s^2 + (c_1 + Kc_{K1})s + c_0 + Kc_{K0}} \frac{K_f}{T_f s + 1}. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $K_f$  и  $T_f$  – коэффициент передачи и постоянная времени функционального преобразователя,  $K$  представляет собой коэффициент усиления обратной связи, зависящий от частоты, параметры

с зависят от сопротивлений и индуктивности измерительного моста термоанемометра постоянной температуры.

Приведенная передаточная функция позволяет оценить качество переходного процесса и при необходимости скорректировать выходной сигнал термоанемометра в целях получения плавных изменений регистрируемых значений скорости потока.

Результаты моделирования термоанемометрической измерительной системы в соответствии с выражением (1) показаны на рис. 1.

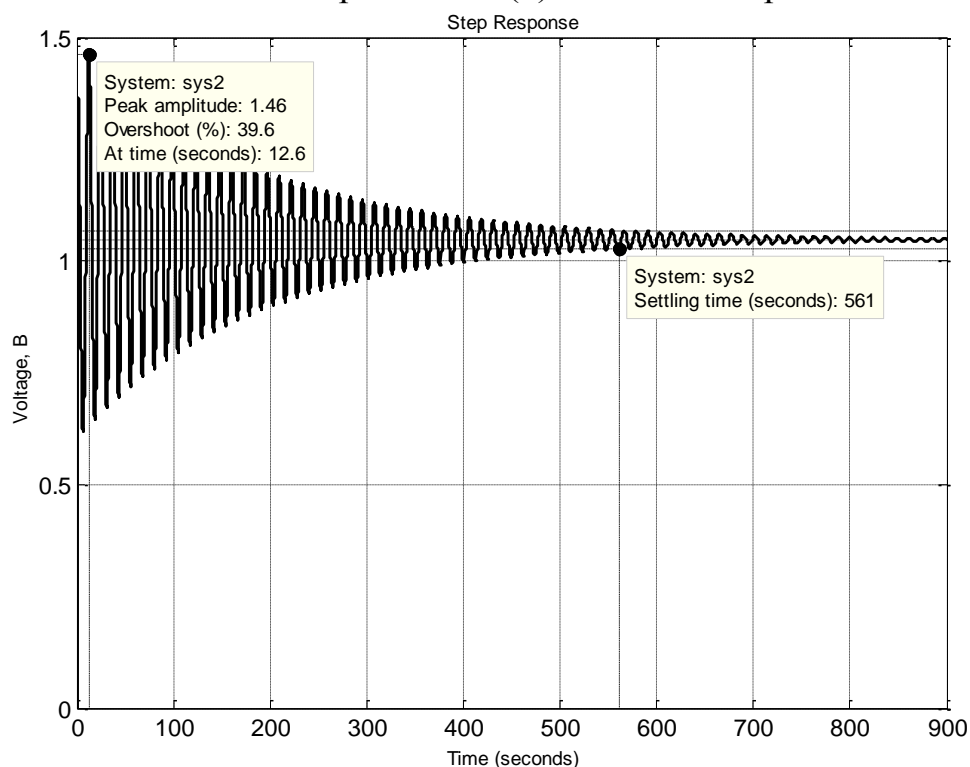


Рис. 1. График переходного процесса термоанемометрической измерительной системы  $W_t(s)$

Из рис. 1 следует, что переходный процесс в исследуемой системе характеризуется существенной колебательностью с перерегулированием около 40 % и значительным временем установления порядка 10 мин. Данное обстоятельство не позволяет адекватно использовать рассматриваемую систему для осуществления измерений без применения соответствующих корректирующих устройств.

В соответствии с методикой, изложенной в работах [2, 3], передаточная функция регулятора получается в результате деления желаемой передаточной функции  $W_1(s)$  на передаточную функцию  $W_t(s)$  неизменяемой части. В качестве звена с желаемой передаточной функцией принимаем полиномиальный фильтр Бесселя четвертого порядка, который

обеспечивает практически монотонный переходный процесс при относительно высоком быстродействии по сравнению с биномиальным распределением характеристического многочлена.

Передаточная функция полиномиального фильтра Бесселя четвертого порядка:

$$W_1(s) = \frac{K_0}{0,19s_n^4 + 0,9s_n^3 + 1,915s_n^2 + 2,114s_n + 1}, \quad s_n = \frac{s}{\omega_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

Передаточная функция регулятора:

$$W_r(s) = \frac{W_1(s)}{W_t(s)} = \frac{s^3 + n_2s^2 + n_1s + n_0}{d_7s^7 + d_6s^6 + d_5s^5 + d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0} =$$

$$= \frac{s^3 + 5,503s^2 + 0,32s + 1,432}{5,7s^7 + 58,35s^6 + 207,1s^5 + 390,5s^4 + 417,3s^3 + 235,1s^2 + 69,42s + 30}.$$

Логарифмические частотные характеристики нескорректированной системы (1) представлены на рис. 2.

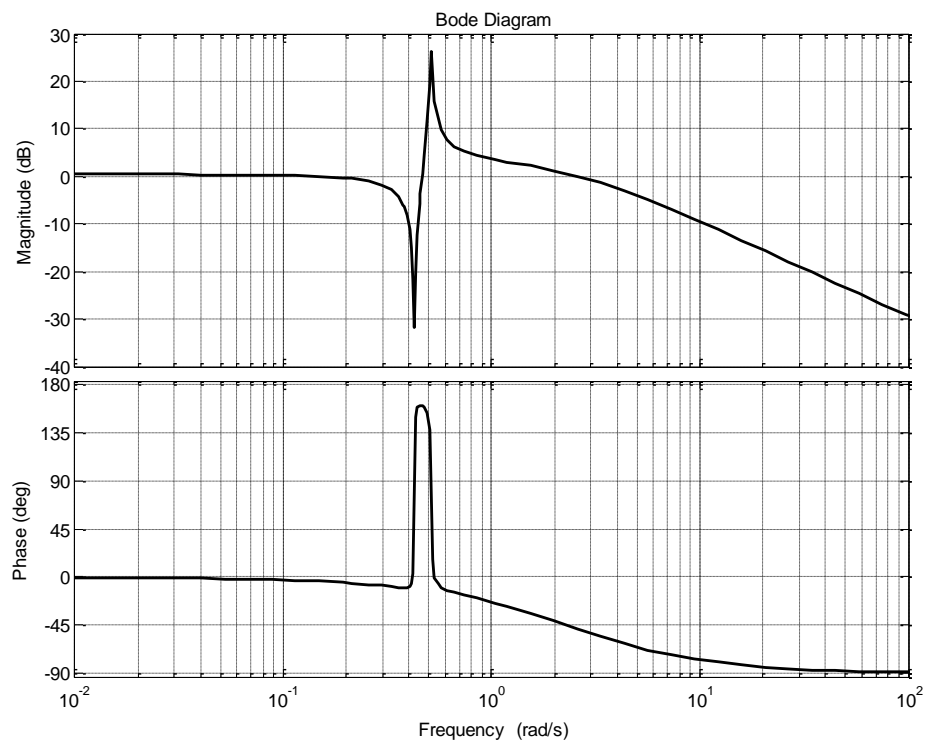


Рис. 2. Логарифмические частотные характеристики термоанемометрической измерительной системы  $W_t(s)$

Из анализа ЛЧХ на рис. 2 видно, что функция практически терпит броски амплитуды и фазы на частоте  $\omega_p \approx 0,5$  рад/с. Это объясняет высокую колебательность переходного процесса в измерительной системе (см. рис. 1).

Результаты моделирования скорректированной измерительной системы приведены на рис. 3.

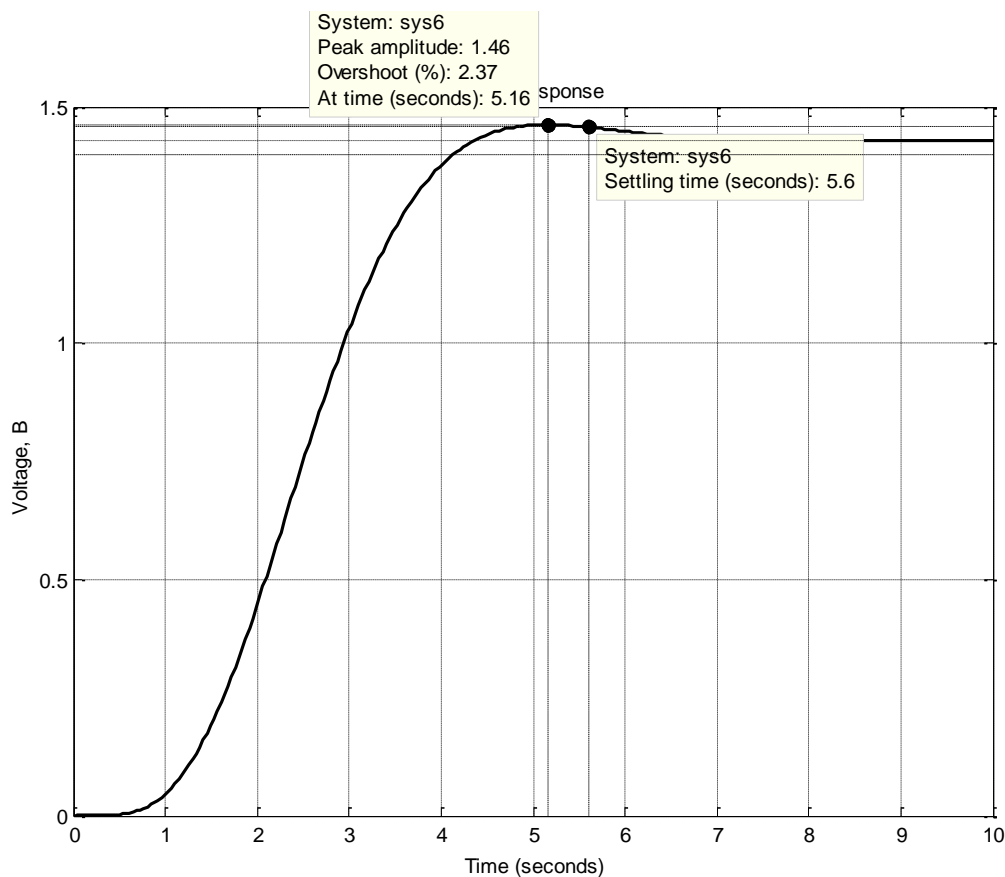


Рис. 3. График переходного процесса термоанемометрической измерительной системы с регулятором  $W_r(s)$

Применение синтезированного регулятора  $W_r(s)$  компенсирует характерные изменения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик термоанемометрической измерительной системы и придает ей свойства, характерные для стандартного распределения Бесселя.

Таким образом, регулятор  $W_r(s)$ , синтезированный с применением полиномиального фильтра Бесселя четвертого порядка в качестве желаемой передаточной функции, обеспечил существенное улучшение показателей качества переходного процесса термоанемометрической измерительной системы: быстродействие увеличилось практически в 100 раз, и время установления составило 5,6 с; перерегулирование снизилось до 2,37 %.

Эксплуатация измерительной системы с полученным регулятором в условиях воздействия на чувствительный элемент пульсаций скорости

потока обуславливает эффективное применение термоанемометра постоянной температуры для измерений в турбулентных потоках с большой относительной интенсивностью турбулентности.

### Источники

1. Watmuff J.H. An investigation of the constant-temperature hot-wire anemometer / J.H. Watmuff // Exp. Therm. Fluid Sci. – 1995. – Vol. 11. – P. 117–134.

2. Малев Н.А. Синтез регулятора измерительного контура автоматического компенсатора для измерения термоЭДС / Н.А. Малев, О.В. Погодицкий // Актуальные проблемы электронного приборостроения: матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – Т. 10. – С. 220–222.

3. Погодицкий О.В. Расчет и моделирование электроприводов с регуляторами различной конфигурации: лабораторный практикум / Н.А. Малев, Д.Д. Ахунов, А.Н. Цветков. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 156 с.

### DAMPING HOT-WIRE MEASURING SYSTEM USING FILTER BESSEL POLYNOMIAL

MALEV N.A., POGODITSKY O.V.

*The object of the research is Hot-wire measuring system for measuring the flow rate of the different gas atmospheres. The paper analyzes the transfer function of the constant temperature anemometer in the presence of pulsation flow. In order to improve the quality of measurements based on the Bessel filter polynomial synthesized controller, providing a smooth transition process at the required accuracy.*

*Keywords: anemometer, transfer function, Bessel filter, transient.*

УДК 62-585.3

### РЕАЛИЗАЦИЯ ДАТЧИКА СКОРОСТИ ПО ФОРМЕ ТОКА ПОТРЕБЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

МИТЧЕНКО Д.И., ТПУ, студент, dimon-96.96@mail.ru

ШИЛИН А.А., ТПУ, д.т.н., aa\_shilin@mail.ru

*Представлен метод реализации датчика скорости по форме тока потребления коллекторного двигателя. Предложена идея использования управляемого узкополосного фильтра для точного измерения периода*

*первой гармоники. При настройке фильтра предложено использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье для оценки резонансной частоты фильтра. Основные положения подтверждены результатами моделирования.*

*Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, разностное уравнение, управляемый фильтр.*

В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) при обработке различного рода материалов одним из основополагающих факторов качества обработки материалов является стабилизация частоты вращения шпинделя. В современных коллекторных двигателях стабилизация частоты осуществляется благодаря встроенному датчику скорости [1]. Зачастую значительную долю стоимости самого шпинделя составляет стоимость датчика скорости. В работе предлагаются математические методы для решения задачи стабилизации частоты вращения без использования датчика, при этом оценка частоты вращения получается из формы тока потребления двигателя.

Идея оценки скорости вращения коллекторного двигателя по форме тока потребления основывается на том, что конструкция коллекторного двигателя предполагает переключение контактных групп пропорционально скорости вращения ротора [2]. Во время переключения и замыкания магнитных потоков протекают разные токи, следовательно, форма тока также имеет периодическую составляющую, кратную частоте вращения.

Рассмотренное в работе [2] решение может быть применено для маломощных двигателей, где допустимо управление напряжением с помощью аналогового управляемого источника питания. Для более мощных двигателей напряжение формируется с помощью управляемого импульсного источника с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). На рис. 1 представлены упрощенная схема измерения тока и исполнительная силовая часть, заимствованная из схемотехнических решений импульсных источников питания.

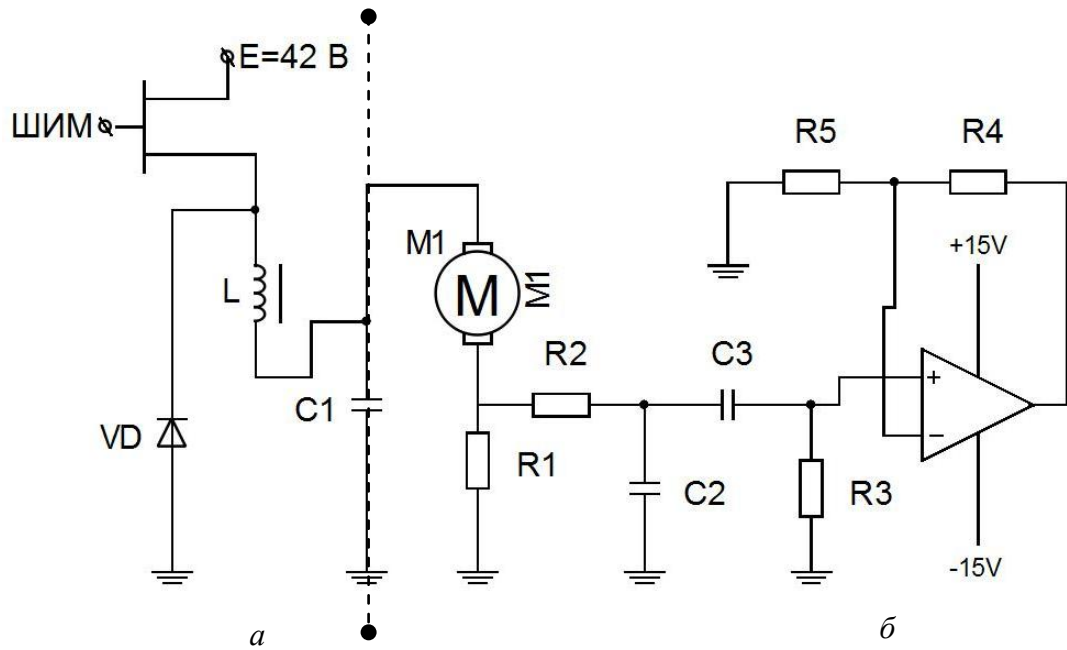


Рис. 1. Исполнительная силовая часть (а) и схема измерения тока (б)

Данные осциллограммы (рис. 2) представлены на одном из профессиональных форумов при обсуждении упомянутой проблемы [3].

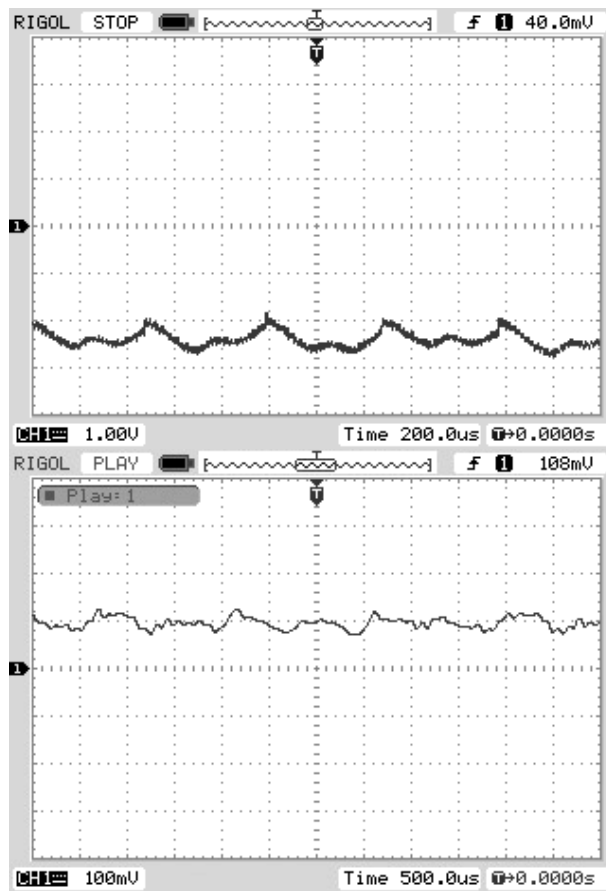


Рис. 2. Осциллограммы формы тока в коллекторном двигателе

Как видно из формы тока потребления, представленного на рис. 2, существует достаточно хорошо выраженная первая гармоника, частоту которой можно визуальнo оценить. Однако создание устройства, которое способно качественно и точно вычислить данную частоту с помощью операционных усилителей и фильтров, не представляется возможным, поскольку фильтры должны быть перестраиваемые как по полосе пропускания, так и по частоте. С появлением современных недорогих микропроцессоров со встроенными средствами реализации ШИМ и аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) реализация управляемых фильтров стала возможной. Поэтому задача реализации измерения частоты вращения по форме тока стала актуальной и доступной.

Для решения данной задачи в статье предполагается реализация структурной схемы (рис. 3) на базе микропроцессора STM-32. Полоса пропускания настроенного узкополосного фильтра (УПФ) в какой-то момент времени может не включать первую гармонику в силу ряда причин. К примеру: возможно резкое изменение частоты вращения шпинделя по причине изменения нагрузки на валу, в этом случае работа контура подстройки частоты УПФ невозможна. Для восстановления работы контура необходимо предварительно вычислить частоту УПФ. По этой причине в структуре системы измерения частоты на рис. 3 присутствует схема оценки частоты первой гармоники с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Использование данных частотного спектра измеренного тока дает возможность оценить положение первой гармоники для предварительной настройки УПФ. В дальнейшем при условии, что частота первой гармоники присутствует в полосе пропускания УПФ, имеется возможность оценить первую гармонику в виде «чистой» синусоиды, где переход через ноль становится однозначно определяемым. Следовательно, после фиксации моментов перехода сигнала через ноль с помощью таймера можно вычислить с достаточной точностью частоту оборотов шпинделя.

На рис. 3 также присутствуют элементы контура замкнутой системы управления частотой оборотов шпинделя, включающие ПИД регулятор и элементы замкнутой системы управления. Методы реализации данных программных блоков широко освещены в научной и учебной литературе [4, 5].



Предложенная структурная схема предполагает возможность измерения частоты в условиях значительного шума наведенного тока потребления шпинделя. Для обоснования предложенного метода оценки частоты оборотов рассмотрим результаты моделирования, где форма сигнала принята с худшими условиями для определения первой гармоники.

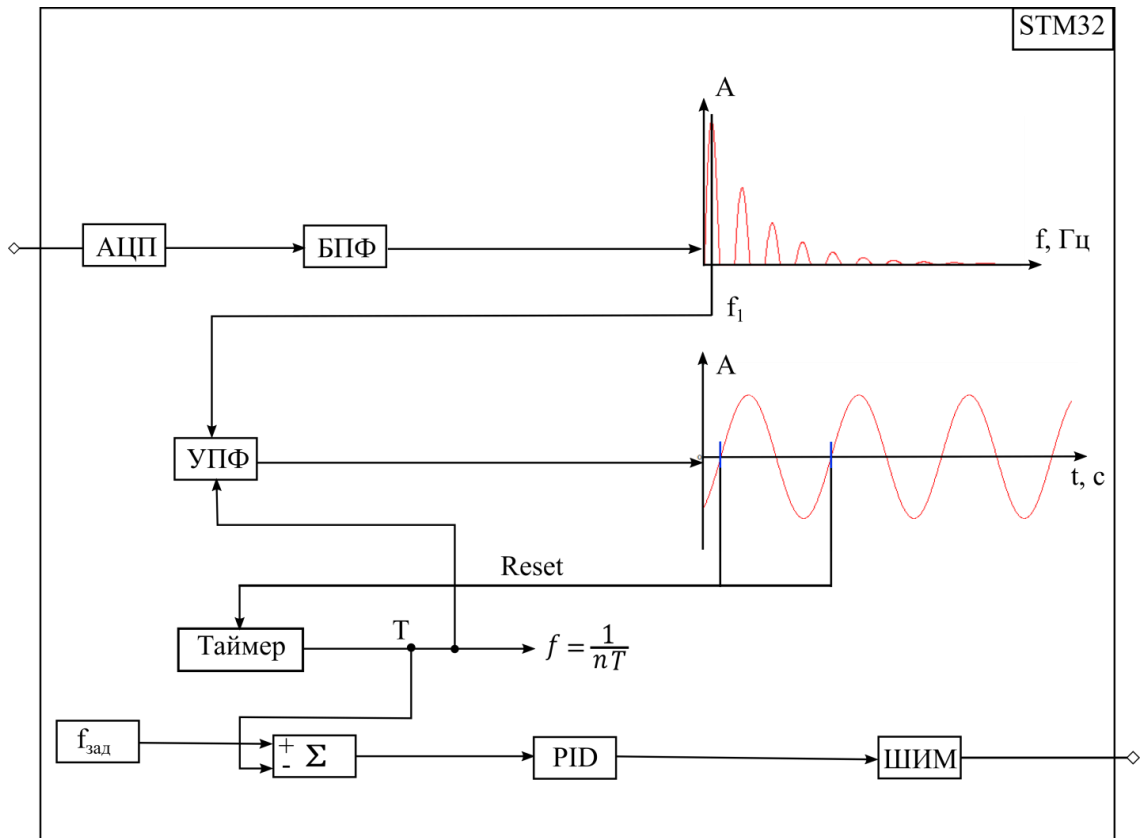


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия элементов микропроцессора STM32

С использованием математических инструментов программной среды MatLab было выполнено моделирование работы БПФ, где в качестве исходного сигнала рассматривался ток, полученный с помощью осциллографа. Далее, при заведомом ухудшении формы тока добавлением гармоник ШИМ и обычного шума (рис. 4, а) был получен частотный спектр (рис. 4, б). Создать алгоритм вычисления частоты первой гармоники из полученного спектра несложно. К примеру, можно, сравнивая с уровнем 150 мВ, определить частоты, пересекающие этот уровень. В результате будут определены две гармоники сигнала. В нашем случае интересует первая гармоника, вторая нам известна – это частота ШИМ. Следовательно, представленный алгоритм способен однозначно определить частоту УПФ.

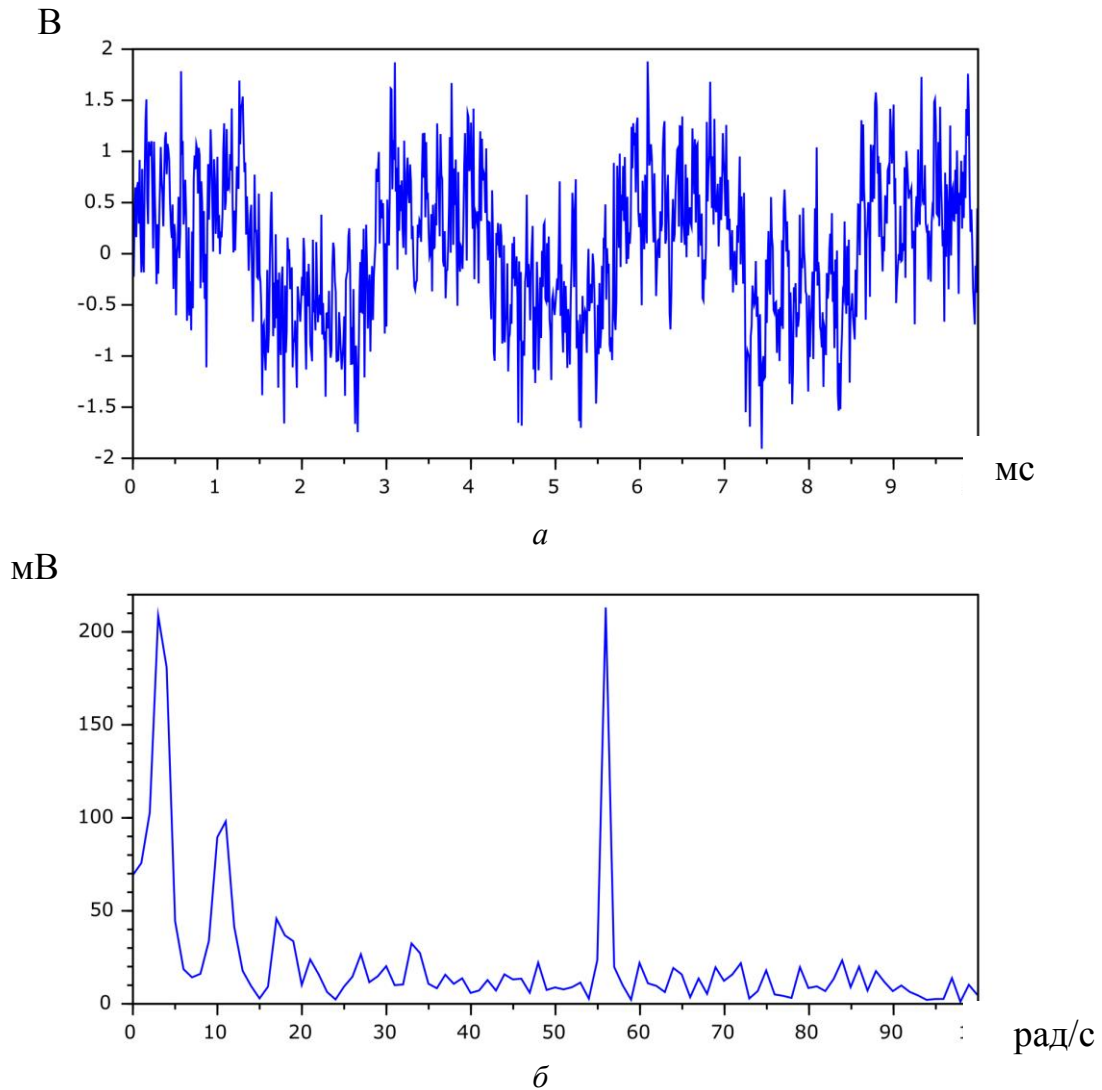


Рис. 4. Сигнал в условиях шума (*a*) и после БПФ (*б*)

После того можно получить чистую синусоиду, чтобы оценить частоту первой гармоники с достаточной точностью. Это становится возможным после ее выделения с помощью узкополосного фильтра (УПФ). Однако при этом существует необходимость в использовании управляемого УПФ, что возможно реализовать на разностных уравнениях в рамках микропроцессора. На данный момент существует большое количество микропроцессоров, на базе которых возможно организовать различные фильтры, БПФ и т.д. В рамках практического использования шпинделей не исключена ситуация резкого возрастания нагрузки и, следовательно, резкого изменения частоты. Быстродействия системы перестройки УПФ может не хватить, в таком случае изменение частоты выходит за рамки полосы пропускания УПФ.

В этом случае в алгоритм работы замкнутого контура потребуется включить повторную процедуру поиска частоты первой гармоники с помощью БПФ [6], и в более широком диапазоне оценить частоту первой гармоники возможно с помощью быстрого преобразования Фурье [6]. Исходный код для БПФ существует в открытом доступе во многих системах, в том числе и в SciLab.

### Реализация узкополосного фильтра на микропроцессоре

Для реализации узкополосного фильтра потребуются разностные уравнения, удобные для программирования, описывающие дифференциальные уравнения фильтра.

Поскольку разностные уравнения можно получить из дифференциальных уравнений, рассмотрим схему резонансного контура (рис. 5), построенную на  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементах.

Параметры резонансного контура связаны с частотой ( $L$ ,  $C$ -элементы) и шириной пропускания (отношение  $R$  к  $L$ ).

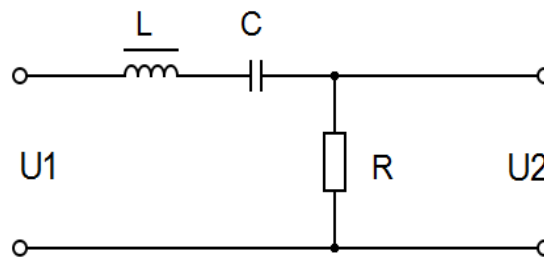


Рис. 5. Структурная схема УПФ, построенная на  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементах

Составим дифференциальное уравнение для  $RLC$ -цепи, представленной на рис. 5:

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{L}{R} \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{1}{CR} U_2 + \frac{du_2}{dt}, \quad dt = \Delta t. \quad (1)$$

Также можно получить частотную характеристику, используя преобразование Лапласа:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{CRs}{1 + CRs + LCs^2} = \omega(s) \rightarrow A, \quad s \Rightarrow j\omega. \quad (2)$$

Разностное уравнение можно получить с помощью билинейного Z-преобразования, однако в силу простоты ДУ мы воспользуемся выражениями дифференциала в конечных интервалах:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{U_i(t) - U_i(t - \Delta t)}{\Delta t}; \quad (3)$$

$$\frac{d^2u_2}{dt^2} = \frac{U_2(t + \Delta t) - 2U_2(t) + U_2(t - \Delta t)}{\Delta t^2}. \quad (4)$$

Далее, после подстановки дифференциалов в конечных интервалах (3) и (4) в уравнение (1) можно получить значение выхода  $U_2(t)$  на следующем шаге:

$$U_2(t + \Delta t) = 2U_2 - U_2(t - \Delta t) - \frac{U_2}{CL} \Delta t^2 + \frac{R}{L}(U_1(t) - U_2(t))\Delta t. \quad (5)$$

Чтобы задать частоту резонанса УПФ, достаточно зафиксировать  $L = \text{const}$  и вычислить значение  $C$  из заданной частоты  $f$ :

$$C = \frac{1}{2\pi fL}. \quad (6)$$

Выбор полосы пропускания УПФ задается добротностью контура, а именно отношением  $L/R$ . Следовательно, ширина полосы пропускания пропорциональна значению  $R$ .

Значение параметра  $R$  можно выбирать из следующих соображений: слишком большое значение  $\Delta f$  приведет к сильному искажению сигнала, но при этом вероятность потерять частоту при резких изменениях нагрузки на шпиндель уменьшается. Соответственно, слишком малое значение  $\Delta f$  приведет к увеличению вероятности потери частоты, но при этом качество синусоиды первой гармоники улучшается.

Потеря частоты первой гармоники в УПФ делает необходимым очередное обращение к процедуре вычисления БПФ, которое требует значительных вычислительных ресурсов. Во время работы БПФ контур управления частотой не работает.

Интерес представляет задача поиска оптимальной ширины полосы пропускания  $\Delta f$  при разных амплитудах помех от ШИМ и самого коллекторного двигателя. Реализация остальных элементов структурной схемы (рис. 3) не представляет сложности.

В результате в данной работе были предложены методы использования математической теории реализации программных элементов, в частности метод реализации вычислений узкополосного фильтра, для решения задачи стабилизации частоты вращения коллекторного двигателя по форме тока потребления, где в качестве датчика частоты используется первая гармоника спектра потребляемого тока. Рис. 2 и 3 достаточно для формирования схематического решения, которое можно дополнить средствами связи с ПК для выполнения научно-исследовательских работ по созданию подобных систем. В частности, средства связи можно использовать для передачи временных рядов измерения тока в современных системах математического анализа, таких как MatLab, где можно качественно выполнить анализ и синтез алгоритмов устойчивого определения частоты вращения шпинделя.

### Источники

1. Ридико Л. Усилитель мощности с микроконтроллерной системой управления / Л. Ридико // Схемотехника. – 2001. – № 4. – С. 3.
2. Holtz J. Sensorless control of induction motor drives / J. Holtz // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90(8). – P. 1359–1394.
3. Воронин С. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://model.exponenta.ru/epivod/glv\\_020.htm](http://model.exponenta.ru/epivod/glv_020.htm) (дата обращения 14.09.2016).
4. Филимонов П. Реализация целочисленного БПФ на процессорах с архитектурой ARM / П. Филимонов // Схемотехника. – 2001. – № 3. – С. 2–8.
5. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В.Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97.
6. Форум разработчиков электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electronix.ru/forum/lofiversion/index.php/t113215.html> (дата обращения 14.09.2016).
7. Programming manual STM32F10xxx/20xxx/21xxx/L1xxxx. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming\\_manual/5b/ca/8d/83/56/7f/40/08/CD00228163.pdf/files/CD00228163.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming_manual/5b/ca/8d/83/56/7f/40/08/CD00228163.pdf/files/CD00228163.pdf) (дата обращения 14.09.2016).

## IMPLEMENTATION OF THE SPEED SENSOR BY THE FORM OF CURRENT COMMUTATOR MOTOR CONSUMPTION

MITCHENKO D.I., SHILIN A.A.

*This paper presents a method for the implementation of the speed sensor by the form of current commutator motor consumption. The idea of using the Managed narrowband filter to accurately measure the period of the first harmonic was proposed. The algorithm of fast Fourier transform for the evaluation of the resonance frequency of the filter was proposed for filter settings. The main provisions are confirmed by simulation results.*

*Keywords: fast Fourier transform, difference equation, controllable filter.*

УДК 621.311.61

## АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ МОРСКИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

МУЛЛАХМЕТОВ Ш.Ш., КГЭУ, магистрант, juicedreams1@gmail.com

САФИН А.Р., КГЭУ, доцент, sarkazan@bk.ru

*В настоящее время линейные генераторы используются в области морской энергетики для преобразования энергии морских волн. Энергия морских волн считается доступным и возобновляемым источником энергии. Волны представляют возносимые по вертикали движения воды, поэтому выходная мощность устройства, вырабатывающего энергию, может быть смоделирована с частотой волны 5-10 с. Благодаря достижениям в области силовой электроники стало возможным производство энергии с максимальной эффективностью и максимальной мощностью питания для получения энергии от волн.*

*Преобразование энергии моря/океана охватывает волны, приливы и отливы, а также течения, которые могут служить для получения электрической энергии. Существуют различные механические устройства, которые преобразуют волны в электрическую энергию. Некоторые устройства преобразуют волновое движение воды в электрическую энергию с помощью гидравлической системы на роторном генераторе, что добавляет промежуточный механизм, который приводит к потерям и более частым обслуживаниям системы с увеличившимся количеством движущихся частей.*

*Основная идея заключается в преобразовании энергии волн с помощью технологии прямого привода с использованием линейных электрических машин.*

*Ключевые слова: энергетическая установка, малая энергетика, электрическая машина, возвратно-поступательная электрическая машина, комбинированные энергоустановки, гибридные силовые установки, свободно-поршневой двигатель, линейный генератор, увеличение кпд, снижение расхода топлива, снижение вредных выбросов.*

В последние годы проблема нехватки энергии требуется все большего внимания. Природные запасы нефти, газа и кокса завершаются. Кроме того, ископаемые виды топлива загрязняют окружающую среду, что особенно побуждает к новым исследованиям о возобновляемой энергетике. Так, согласно прогнозам, примерно к 2050 году 15 % мирового производства электроэнергии [1] может быть получено с помощью энергии волн, сейчас же волновая энергия стремительно развивается. Таким образом, сочетание возобновляемых источников энергии и полезных ископаемых топлива частично решает проблемы загрязнения окружающей среды и нехватки электрической энергии.

Устройства, использующие энергию волны, преобразуют кинетическую энергию волны, зависящую от силы самой волны, в электрическую. Это сила будет перемещать буй-поплавок вертикально вдоль оси, создавая относительные движения между компонентами генератора (рис. 1).

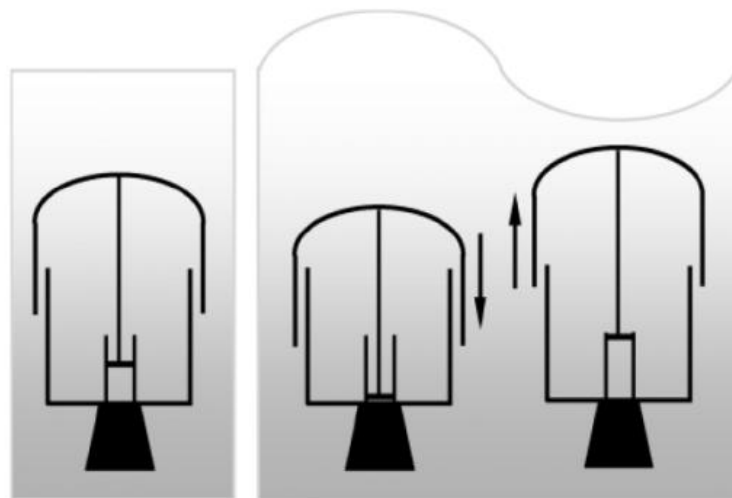


Рис. 1. Принцип работы линейного генератора

Сила волн будет двигать буй-поплавок линейно с какой-либо скоростью, а относительные движения между постоянными магнитами и катушками будут генерировать электрическую энергию. Относительные движения постоянных магнитов по отношению к катушке в прямом приводе являются основой, на которой и производится электрическая энергия (рис. 2).

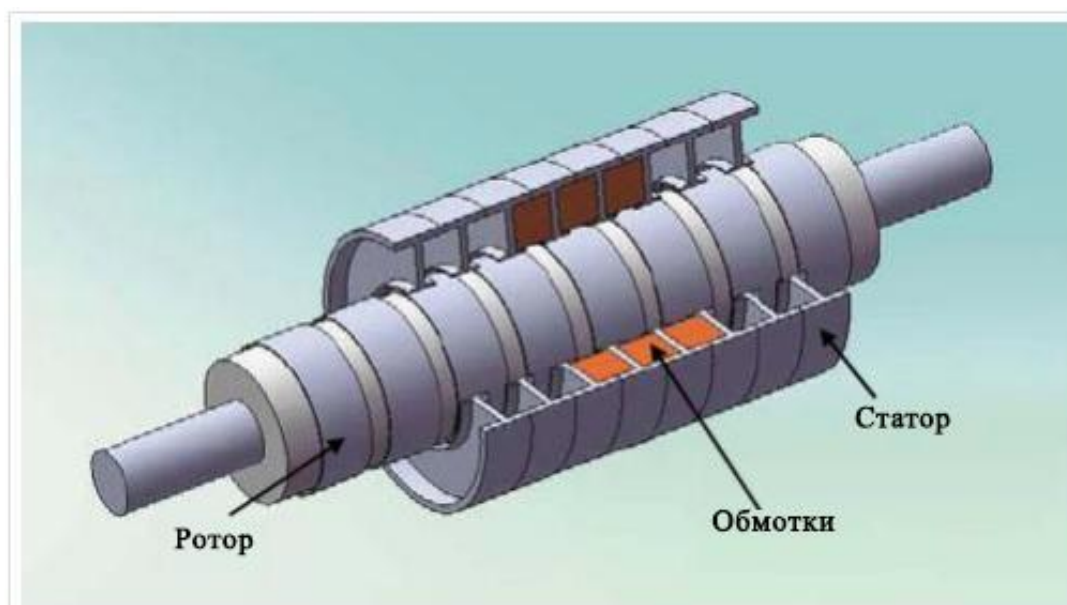


Рис. 2. Общий вид линейного генератора

Силовая электроника стремительно развивается, что дает толчок для производства современных устройств, которые были не возможны еще несколько лет назад. Новые материалы и методы производства сделали возможным применение более высоких частот коммутации, увеличение рабочих токов, применение более высокого напряжения и возможностей питания.

С различными полупроводниковыми устройствами можно контролировать активную и реактивную мощность, поступающую из генератора. Силовая электроника линейного генератора будет выдавать постоянное напряжение на выходе, а также может служить для аккумуляции энергии.

Использование линейного генератора актуально для электроснабжения плавучих нефтегазовых комплексов, где он может выступать резервным источником электропитания. Электроснабжение комплекса подготовки нефти и газа осуществляют централизованной подачей электроэнергии по подводному кабелю или с помощью автономной электростанции, установленной на морской платформе.



При использовании же автономных источников питания в качестве топлива может применяться попутный газ, а жидкое горючее применяют только как резервное. Но разные климатические условия нефтяных платформ и большая удаленность от берега приводят к тому, что электроснабжение не всегда может быть обеспечено, что вынуждает использовать автономные источники (дизель-генераторы и т.д.).

Линейный генератор может выступать не только в качестве автономного источника, но и применяться для электроснабжения собственных нужд подстанции нефтяной платформы.

Задачей технического предложения является применение линейного генератора в качестве автономного источника электроэнергии в труднодоступных регионах для плавучих нефтяных платформ, а также прибрежных районов и коммуникаций (сигнальные маяки, плавучие станции и т.д., и т.п.).

Поставленная задача может быть решена за счет выполнения линейного генератора в виде буя (буй-генератор), который будет вырабатывать электроэнергию за счет вертикальных перемещений на волнах. К потребителю от генератора электричество подается по подводному кабелю. Параметры буя могут быть адаптированы к различным условиям окружающей среды (дна океана и глубины).

Отличие от автономного источника, используемого на платформах, в том, что данный линейный генератор не требует никакого горючего топлива и работает только за счет энергии морских волн. Следовательно, за счет отказа от дизель-генераторов появляется свободное пространство на платформе, которого и так бывает не много. Также линейный генератор, выполненный в виде буя, может информировать о навигационных опасностях морские суда по пути следования при установке на него специального оборудования.

В нашем случае буй-генератор находится на определенном удалении от нефтяной платформы, но также можно зафиксировать его на несущих конструкциях платформы, только в этом случае на конструкцию будут передаваться нагрузки, которые принимает на себя генератор, что заставляет делать несущие конструкции более массивными и дорогостоящими.

В среде MatLab была создана модель буй-генератора, в качестве отправных данных рассматривались три состояния моря: первое – малая высота волны, второе – средняя высота волны, третье – большая высота волны. Для первого случая рассматривалась средняя высота волны в 1,2 м и период 7 с, второго – высота волны 3,5 м и период 9,5 с, третьего – 5,5 м и период 12,5 с.

Для трех состояний были получены выходные данные мощности для генератора: 75 кВт для малой высоты волны и 200 кВт для большой высоты волны.

Принимая во внимание, что средняя извлеченная механическая мощность 75 кВт используется в качестве максимального предела механической мощности, аналогично к средней извлеченной механической мощности, полученной при 200 кВт, в качестве максимального предела механической мощности. Поэтому 75 кВт номинальной мощности является лучшим выбором для размеров электрической машины. Это лучше, потому что электрическая машина с меньшей номинальной мощностью (75 кВт) дешевле по сравнению с более крупной, в дополнение к этому производительность электрической машины лучше, когда она работает близко к номинальной мощности. В этом случае будут меньшие капиталовложения и меньшие потери мощности внутри электрической машины, потому что выработка лучше, следовательно, и сила, преобразующаяся из механической энергии в электрическую, может быть выше при небольшом размере машины.

С учетом различных местоположений буй-генератора в зависимости от степени волнения волн, можно выбрать значения предела мощности, которые будут реализованы в электрической машине.

В дальнейшем планируется более детальное моделирование буй-генератора в среде MatLab с учетом параметров статора, транслятора с постоянными магнитами, массы корпуса и преобразовательного устройства (выпрямитель, инвертор).

### Источники

1. Хитерер М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб.: Корона Принт, 2013. – 386 с.

2. Кецарис А.А. Вопросы рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением / А.А. Кецарис, В.И. Духанин // Материалы 77-й Междунар. науч.-техн. конф. ААИ. – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – С. 36–42.

3. Xiao J. Motion characteristic of a free piston linear engine / J. Xiao, L. Qingfeng, Z. Huang // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87(4). – P. 1288–1294.

4. Song Y. Comparison research on different injection control strategy of CI free piston linear generator in one-time starting process / Y. Song [et al.] // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 61. – P. 1597–1601.

5. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – Красноярск, 2013.

УДК 621.311.6

## **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В ТЭК**

МУХАМЕТГАЛЕЕВ Т.Х., КНИТУ, к.т.н., доцент, banzay-13-13@yandex.ru  
ШТЯГИН С.Н., КНИТУ, магистрант, stuffchik1992@gmail.com

*Рассмотрены различные виды высоковольтных преобразователей частоты, представлены их классификация, достоинства и недостатки для регулирования мощного электропривода.*

*Ключевые слова: высоковольтный преобразователь, инвертор, двухтрансформаторная схема, регулирование частоты вращения, трансформатор, каскадная схема.*

Одним из важных условий укрепления и развития экономики страны является наращивание производства. Важной частью российской экономики на современном этапе являются предприятия топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Поэтому актуальна задача повышения эффективности работы оборудования предприятий ТЭК. В последние годы в промышленности идет активное внедрение высоковольтных преобразователей частоты (ВПЧ) для управления скоростью асинхронных и синхронных двигателей большой мощности. Подобные регулируемые электроприводы могут найти эффективное применение при бурении скважин, на мощных насосах и компрессорах, используемых при транспортировке нефти и газа. Поэтому перед ВПЧ ставятся такие проблемы, как достижение наибольшей эффективности: высокие КПД и cosφ, обеспечение наилучшего спектрального состава входных и выходных токов, а также и синусоидального выходного напряжения высокого качества. И важной проблемой остается достижение наименьшей стоимости ВПЧ.

## Классификация высоковольтных преобразователей частоты

Создание современных систем автоматизации технологических процессов связано с внедрением частотно-регулируемого привода высокого напряжения. Рассмотрим подробнее структурные схемы и топологии ВПЧ.

Как правило, выделяют следующие структуры: высоковольтный непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) и высоковольтный двухзвенный преобразователь частоты.

### Непосредственный преобразователь частоты

НПЧ – это, следуя из названия, ВПЧ, где преобразование частоты и напряжения происходит без преобразования напряжения из переменного в постоянное, т.е. сразу попадая из сети через управляемые элементы (УЭ) в двигатель. УЭ выполнены на незапираемых SCR-тиристорах. Управление осуществляется путем отпирания группы тиристоров, тем самым подключаются статорные обмотки электродвигателя к сети. Но данный тип широко не применяется из-за множества недостатков:

1) несинусоидальное «пилообразное» выходное напряжение, формируемое из «вырезанных» участков синусоид напряжения питающей сети;

2) частота выходного напряжения находится в диапазоне от 0 до 25 Гц;

3) малый диапазон регулирования – не более 1:10;

4) несинусоидальное напряжение на выходе вызывает электрические потери, снижение момента, перегрев в двигателе, так как является источником высших гармоник;

5) низкий коэффициент мощности, как следствие – большие потери в питающей сети;

6) потребность в применении компенсирующих устройств приводит к повышению массогабаритных показателей и общей стоимости преобразователя частоты.

Достоинствами НПЧ являются:

1) высокий КПД – 98,5 %;

2) большая перегрузочная способность, что позволяет работать с большими напряжениями и токами;

3) относительно дешевая конструкция, если не учитывать дополнительное оборудование [1].

Принципиальная схема НПЧ представлена на рис. 1.

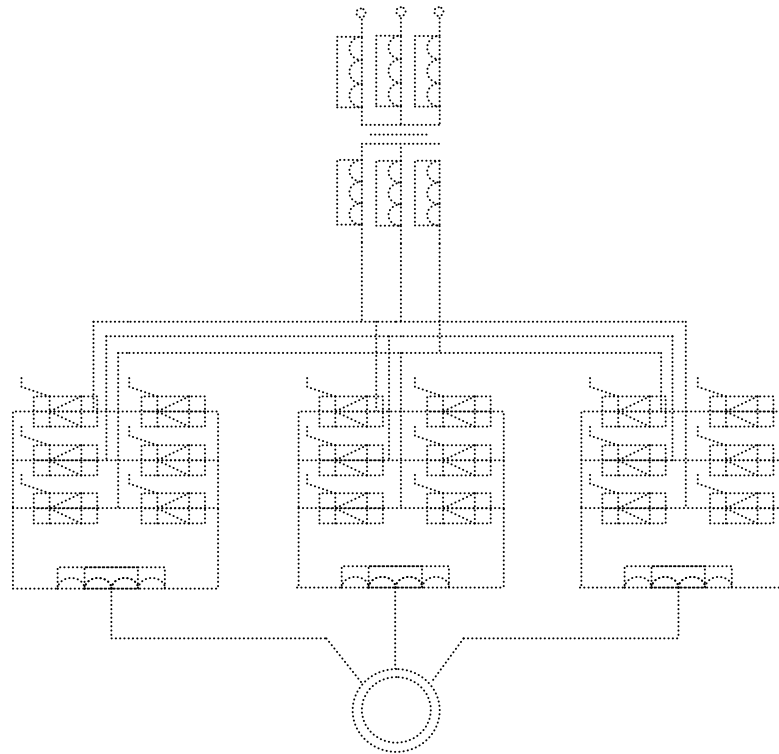


Рис. 1. Принципиальная схема непосредственного преобразователя частоты

### Двухзвенный преобразователь частоты

К двухзвенным высоковольтным ПЧ можно отнести следующие системы: двухтрансформаторная схема с АИН, ВПЧ на основе АИТ, каскадная схема с фазосдвигающим трансформатором.

Высоковольтные преобразователи частоты, реализованные по двухтрансформаторной схеме, как, собственно, и видно из ее названия, строятся на двойной трансформации напряжения при помощи понижающего (Т1) и повышающего (Т2) высоковольтных трансформаторов.

Принципиальная схема данного преобразователя частоты представлена на рис. 2.

Входное трехфазное синусоидальное напряжение питающей сети поступает на понижающий силовой трансформатор Т1, преобразующий его в 3-фазное напряжение 400 (660) В. Данное напряжение подается на низковольтный преобразователь частоты (ПЧ). Далее трехфазное напряжение требуемой частоты и амплитуды с выхода ПЧ поступает на повышающий трансформатор Т2, для того чтобы получить высокое напряжение, необходимое для питания высоковольтного мощного электродвигателя. Двойная трансформация позволяет применять для регулирования частоты относительно дешевый низковольтный

преобразователь частоты, состоящий из неуправляемого выпрямителя, индуктивно-емкостного фильтра и трехфазного мостового инвертора из IGBT-модулей.

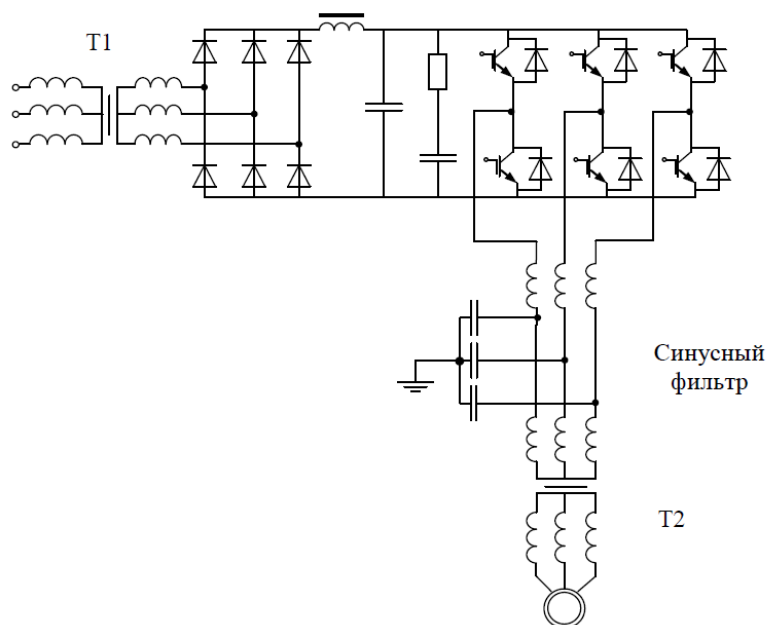


Рис. 2. Принципиальная схема двухтрансформаторного преобразователя частоты

Однако в выходном напряжении низковольтного преобразователя частоты присутствуют пиковые перенапряжения, и, чтобы защитить от пробоя изоляцию первичной обмотки повышающего трансформатора, на выходе ПЧ устанавливается трехфазный синусоидальный фильтр. Вследствие повышенных токов, разводка низковольтной части преобразователя требует кабелей большого сечения, что приводит к заметному увеличению массогабаритных характеристик такого рода устройств. Преобразователи, выполненные по данной схеме, имеют ограничения в диапазоне регулирования частоты вращения электродвигателя как вверх, так и вниз от номинальной частоты. Это связано с тем, что снижение частоты на выходе преобразователя приводит к увеличению насыщения сердечника, а следовательно, к его перегреву и нарушению расчетного режима работы выходного трансформатора T2. Поэтому при снижении частоты заметно падает и КПД данного высоковольтного преобразователя частоты, делая невозможным общее энергосбережение. Диапазон регулирования будет ограничен в пределах 0,5 – 1 от номинальной частоты вращения. И для расширения диапазона регулирования используют трансформаторы с увеличенным сечением магнитопровода, но это увеличивает стоимость, массу

и габариты трансформатора. При увеличении же выходной частоты растут потери в самом сердечнике Т2 на перемагничивание и вихревые токи. Входной же трансформатор Т1 для питающей сети представляет собой индуктивную нагрузку, поэтому для получения удовлетворительного коэффициента мощности данного высоковольтного преобразователя частоты требуется использовать дополнительные конденсаторы коррекции  $\cos \varphi$  [2, 3].

Таким образом, основными недостатками двухтрансформаторных преобразователей являются плохие массогабаритные показатели, меньшие по отношению к другим схемам КПД и надежность, а также весьма малый рабочий диапазон регулирования (1:2). Ряд мощностей подобной схемы ограничивается максимально возможной мощностью используемого низковольтного ПЧ, которая составляет у разных производителей от 500 до 1000 кВт [4].

Подход большинства производителей к топологии ВПЧ с АИТ можно свести к следующим принципиальным решениям:

- 1) выполнение АИТ по мостовой схеме на однооперационных (незапираемых) SCR-тиристорах (включаемых по управлению и выключаемых с помощью конденсаторов);
- 2) выполнение АИТ на полностью управляемых (включаемых и выключаемых по управлению) симметричных тиристорах (GTO, SGCT).

ВПЧ с АИТ, содержащие SCR-тиристоры, имеют 2 схемы реализации: российскую, с узлом принудительной коммутации, и американскую – с параллельными конденсаторами.

Принципиальная схема АИТ с тиристорно-диодным узлом принудительной коммутации представлена на рис. 3.

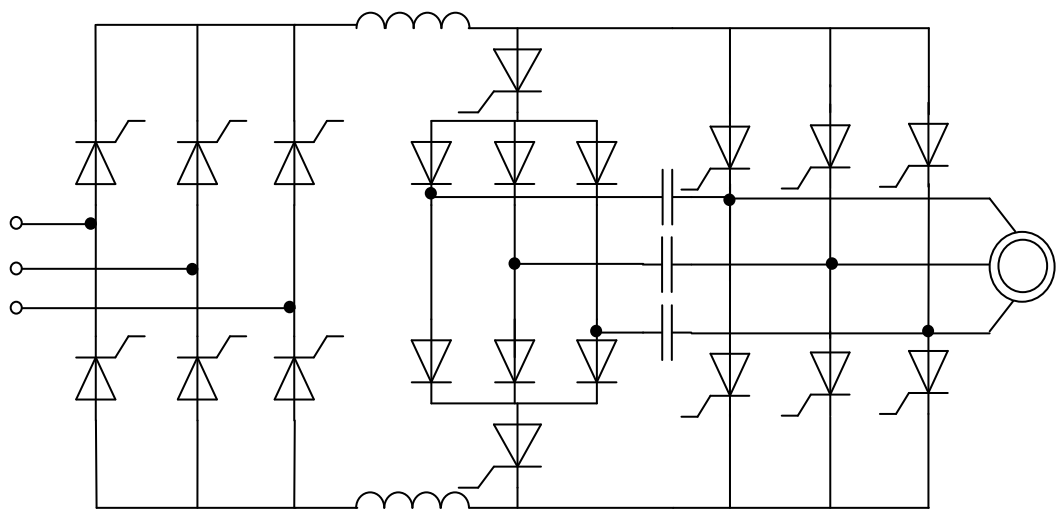


Рис. 3. Принципиальная схема АИТ с тиристорно-диодным узлом принудительной коммутации

Одним из первых ВПЧ были созданы АИТ на SCR-тиристорах, переключение которых обеспечивается введением так называемой дополнительной ЭДС в контур коммутации, источником которой служат конденсаторы.

Несмотря на принудительную коммутацию конденсаторов, пик напряжения в схеме напряжения создается в два этапа, и амплитуда напряжения, прикладываемая к статору при нагрузке двигателя в 90–95 %, не превышает 1,25–1,27 амплитуды напряжения линейного.

К недостаткам данной схемы можно отнести коммутационные пики выходного напряжения, несинусоидальный выходной ток, как следствие, наблюдение высших гармоник в выходном токе и напряжении.

Американская схема представлена на рис. 4, где коммутация происходит при помощи параллельных конденсаторов, но у них есть и другая роль – обеспечение «естественной» коммутации вентилях, которая возможна, если первая гармоника тока статора двигателя опережает выходное напряжение инвертора тока.

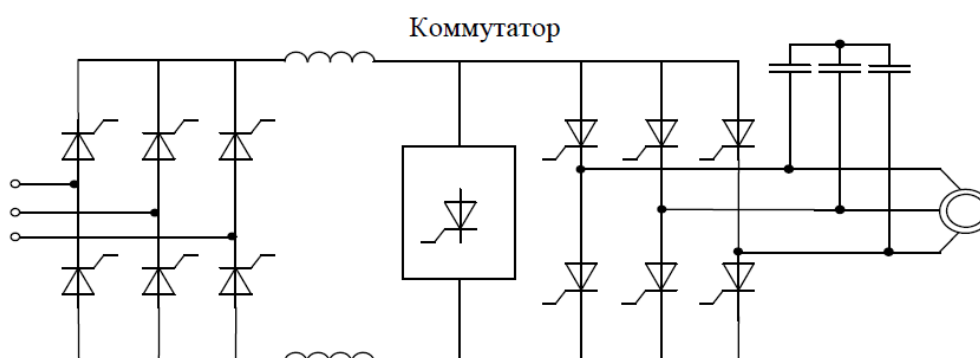


Рис. 4. Принципиальная схема АИТ с параллельными конденсаторами

Поскольку часто используемые приводы основаны на асинхронном двигателе, который является активно-индуктивной нагрузкой, параллельные конденсаторы обеспечивают компенсацию индуктивного характера нагрузки, переключая вентили в режиме «естественной» коммутации. Но данная компенсация возможна только в определенном диапазоне частот ЭП. Что касается параллельных конденсаторов, то выбирать их следует так, чтобы обеспечивался опережающий фазовый сдвиг тока для диапазона выходной частоты инвертора тока примерно 20–50 Гц. Если частоты меньше данного диапазона, то условия коммутации ухудшаются, и для ее обеспечения используется узел принудительной коммутации (коммутатор).



Коммутатор обеспечивает режим Multi-swith (прерывание тока) от пусковых частот вплоть до частоты 20–25 Гц, закорачивает звено постоянного тока, давая вентилям инвертора восстановить запирающие и управляющие свойства. В качестве коммутатора прерывателя могут быть применены высоковольтные ключи на SCR-тиристорах с принудительной коммутацией. Для уменьшения колебаний электромагнитного момента при низких частотах электропривода ток инвертора с помощью режима Multi-swith можно модулировать.

К достоинствам данной схемы можно отнести достаточно «гладкие» формы выходных напряжения и токов; относительно невысокую стоимость SCR-тиристорov. Данная схема позволяет применять стандартные двигатели практически без разгрузки мощности (моменту на валу).

ВПЧ с АИТ, содержащие GTO-, SGCT-тиристоры (включаемые и выключаемые по управлению), по-другому называемые АИТ с ШИМ, представлена на рис. 5.

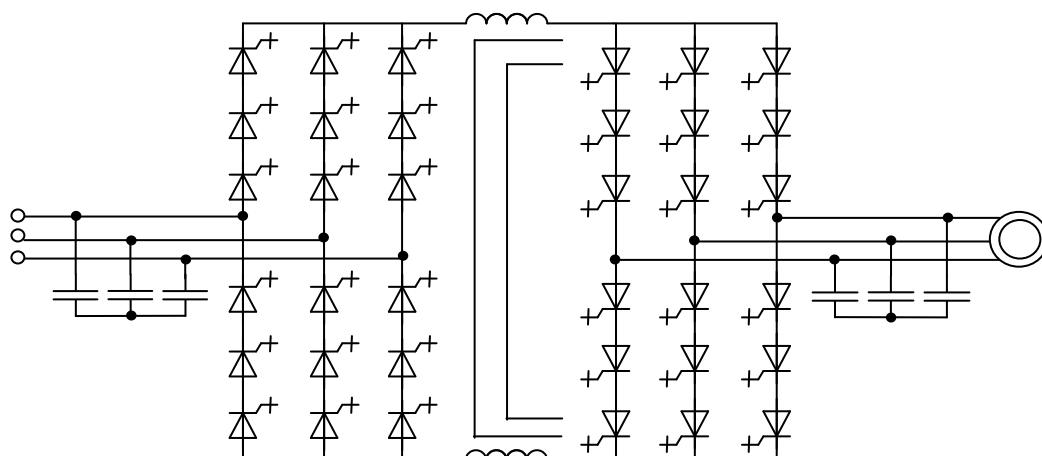


Рис. 5. Принципиальная схема АИТ на GTO-тиристорах с ШИМ

Применение ШИМ позволило получить близкие к синусоидальной форме инвертируемые токи и напряжения, поскольку конденсаторный фильтр, поглощая высокочастотные гармоники, обеспечивает формирование в двигателе квазисинусоидальных тока и напряжения.

Электромагнитную совместимость с сетью электроснабжения обеспечивают либо традиционными способами, такими как увеличение эквивалентной фазности сетевого выпрямителя, либо применением в качестве сетевого выпрямителя активного буфера. Потребление таким выпрямителем из сети практически активного тока квазисинусоидальной формы с низким содержанием высших гармоник решает задачу

сопряжения мощных высоковольтных ПЧ со «слабыми» сетями электроснабжения. Но есть такие недостатки, как повышенные габариты и стоимость [5].

Следующим шагом на пути к улучшению выходного напряжения, а также и условий ЭМС является каскадная схема АИН с фазосдвигающим трансформатором.

Структура такого преобразователя представлена на рис. 6. Она содержит входной фазосдвигающий трансформатор с  $n$  вторичных обмоток,  $n$  АИН, состоящих из трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя, LC-фильтра и четырех IGBT-транзисторов с обратными диодами. Секции АИН подключены последовательно, а количество силовых модулей для одной фазы, питающей обмотку статора, варьируется. Фазовый сдвиг между напряжениями соседних обмоток зависит от количества фаз в схеме. К примеру, при реализации схемы в три группы по шесть обмоток фазовый сдвиг будет составлять 10 эл. градусов, а между первой и шестой – 50 эл. градусов.

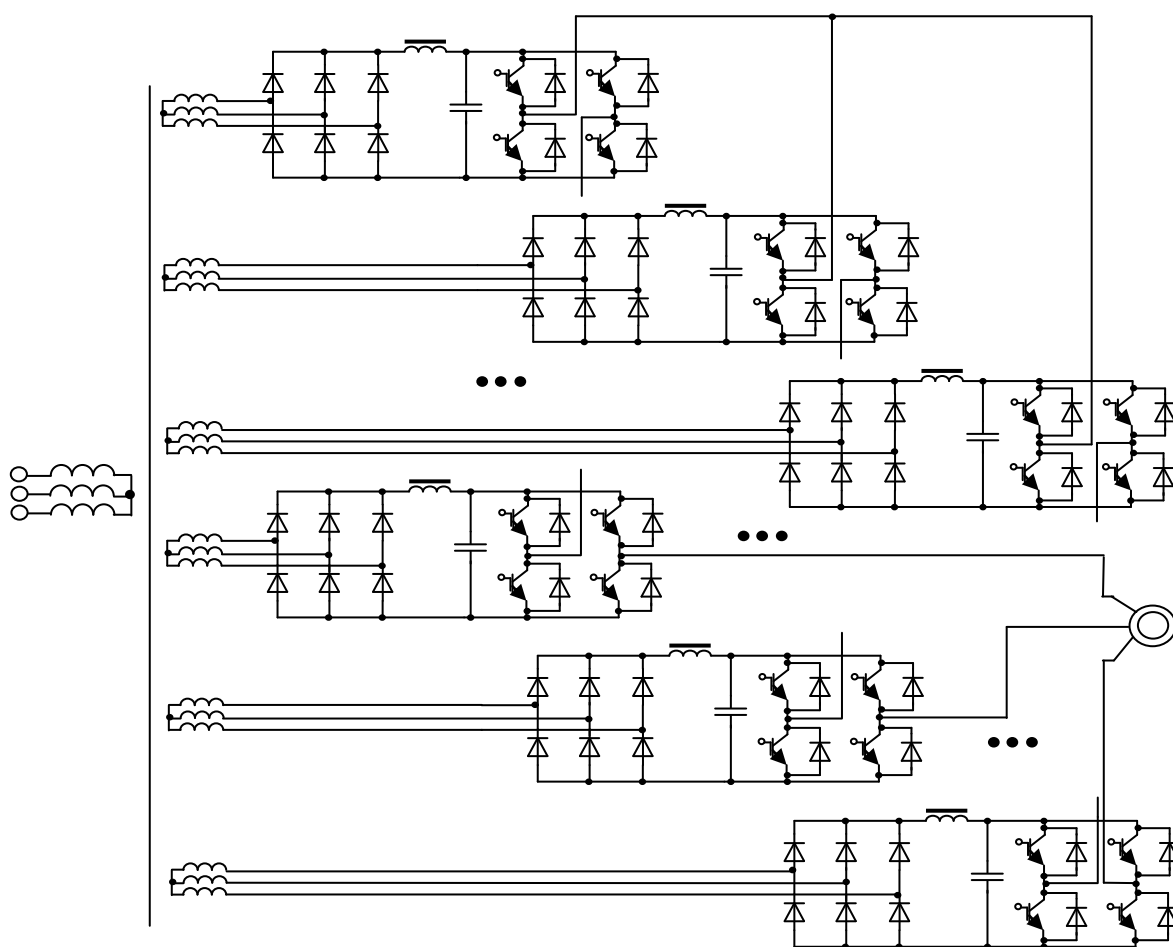


Рис. 6. Принципиальная схема каскадного преобразователя частоты с фазосдвигающим трансформатором

Существует такая конструктивная особенность, как неразъемность конструкции, т.е. невозможность отделения преобразовательной части от фазосдвигающего трансформатора. И вторая особенность: при мощностях от 2400 кВА устанавливают не один, а два фазосдвигающих трансформатора [6].

К достоинствам данной схемы можно отнести следующее:

- 1) синусоидальная форма напряжения позволяет подключать любые электродвигатели без применения специальных фильтров;
- 2) генерируемое напряжение в питающую сеть содержит малое количество гармоник, т.е. коэффициент мощности данной установки равен 0,95;
- 3) амплитуды высших гармоник сведены к минимуму, поэтому увеличения потерь не происходит;
- 4) КПД – 98 %;
- 5) диапазон регулирования частоты 1:50.

К недостаткам данной схемы можно отнести сложность конструкции, высокие массогабаритные показатели, большую стоимость.

Таким образом, путем решения поставленных проблем является установка дополнительного фильтрующего оборудования, применение различных схемных решений при конкретных технологических процессах, внедрение новейших полупроводниковых элементов для уменьшения стоимости преобразователей и улучшения их КПД.

Как известно, наилучшим ВПЧ является преобразователь, реализованный на каскадной схеме АИН с фазосдвигающим трансформатором, так как он включает в себя лучшее отношение цены и качества, имеет почти синусоидальное выходное напряжение, малое количество высших гармоник, высокие КПД и коэффициент мощности.

### **Источники**

1. Преобразователи частоты ТМ-drive на напряжение 6–10 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://market.elec.ru>.
2. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua>.
3. Довганюк И.Я. Опыт и перспективы применения приводов с регулируемой частотой на ТЭС и насосных станциях централизованного теплоснабжения / И.Я. Довганюк, А.В. Каржев // Электрические станции. – 98–103 (2007).

4. Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем / Г.Б. Лазарев // Новости электротехники. – 2–3 (2007).

5. Тиристорные преобразователи частоты: назначение, типы, структурная схема. Коротко о частотно-регулируемом приводе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://knowledge.allbest.ru>.

6. Rodriguez J. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications / Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 3-4 (2006).

## **HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS FOR MOTOR CONTROL IN TEC**

MUHAMETGALEEV T.H., SHTYAGIN S.N.

*Various types of high-frequency transducers, their advantages and disadvantages for the regulation of a powerful electric drive.*

*Keywords: high-voltage converter, an inverter, two-transformer circuit, speed control, transformer, a cascade scheme.*

УДК 621.316.98

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ ВЛ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ УДАРОВ МОЛНИЙ**

ПАРАМОНОВ М.А., ОАО «Сетевая компания», [paramonov@inbox.ru](mailto:paramonov@inbox.ru)

УСАЧЕВ А.Е., КГЭУ, д.ф.-м.н., профессор,  
[aleksandr\\_usachev@rambler.ru](mailto:aleksandr_usachev@rambler.ru)

ЮДИЦКИЙ Д.М., ООО «НПК “Силеста”», к.т.н.,  
[yuditskiydm@mail.ru](mailto:yuditskiydm@mail.ru)

*Приводится статистика грозовых отключений воздушных линий 6–220 кВ в ОАО «Сетевая компания». На основании обработки статистических данных делается вывод о существовании на каждой ВЛ участков с повышенной плотностью ударов молний. Обосновывается целесообразность применения грозопеленгационных систем для уточнения карт грозовой активности, а также оценивается зависимость наличия участков с повышенной плотностью ударов молний от рельефа местности.*

*Ключевые слова: удар молнии, электрические сети, грозоупорность, воздушная линия электропередачи, автоматическое повторное отключение, грозовое отключение, недоотпуск электроэнергии.*

В настоящее время проблема защиты воздушных линий (ВЛ) 6–220 кВ от грозовых отключений остается актуальной. Ежегодно с наступлением грозового сезона происходят систематические отключения ВЛ из-за ударов молний. Анализ показал, что в ОАО «Сетевая компания» – организации, занимающейся передачей и распределением электроэнергии на территории Республики Татарстан, доля отключений, обусловленных воздействием атмосферного электричества на объекты электросетевого комплекса, от общего количества аварийных отключений составляет 10,58 %. Отключения могут происходить по разным причинам: обрыв молниезащитного троса при ударе молнии в трос, перекрытие гирлянды изоляторов, обрыв гирлянды изоляторов, обрыв провода.

В ОАО «Сетевая компания» в сетях 0,4–220 кВ вследствие грозовых воздействий в 2015 г. было зафиксировано 713 отключения, в 2016 г. – 564 грозовых отключения. Наибольшее количество отключений приходится на сети среднего напряжения 10 кВ (рис. 1). При рассмотрении доли грозовых отключений в общем количестве аварийных отключений для каждого класса напряжения становится видно, что для сетей 35 кВ почти четверть всех аварийных отключений обусловлены грозой (рис. 2).

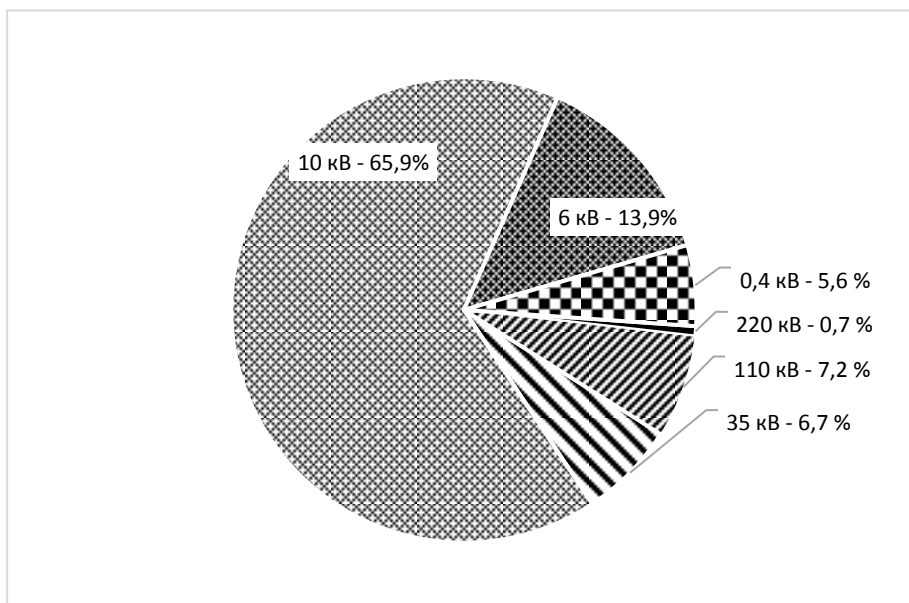


Рис. 1. Соотношение количества грозовых отключений по классам напряжения сети, %

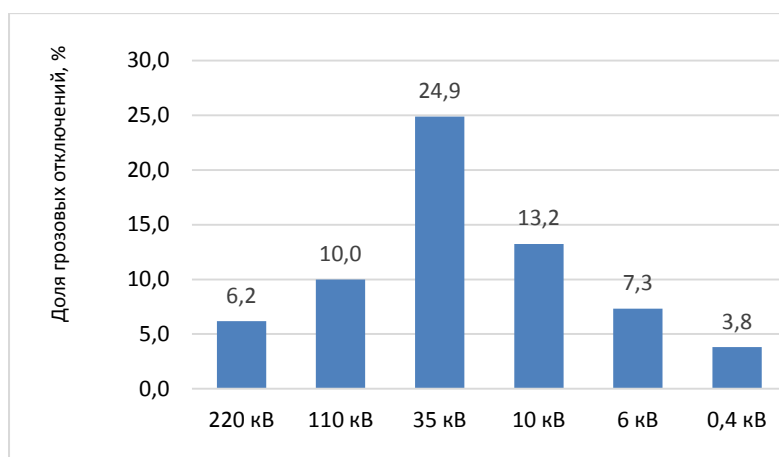


Рис. 2. Доля грозовых отключений в общем количестве аварийных отключений для каждого класса напряжения, %

Доля недоотпуска электрической энергии из-за воздействия атмосферного электричества на электросетевые объекты в 2015 г. составила 126 561 кВт · ч, что составляет 6,2 % от всего недоотпуска. При этом время простоя оборудования, обусловленное грозовыми отключениями и их ликвидацией, превысило 700 ч, что составляет 9,8 % от всего годового простоя оборудования (рис. 3, 4).

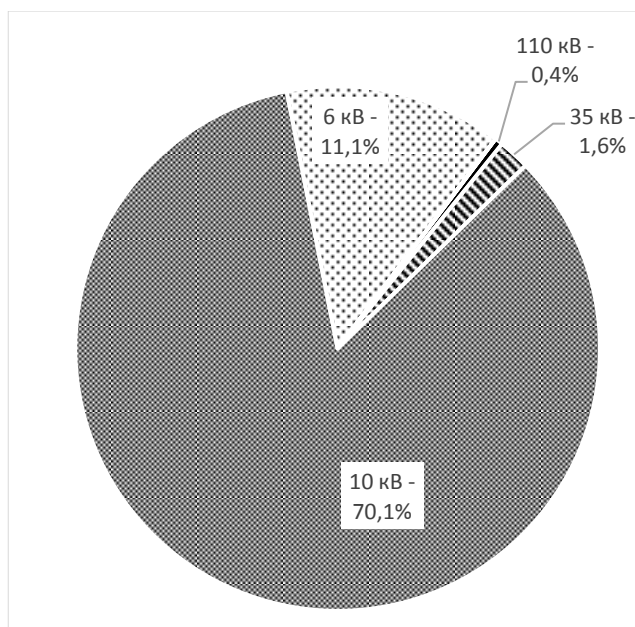


Рис. 3. Соотношение продолжительности простоя из-за грозы по классам напряжения сети, %

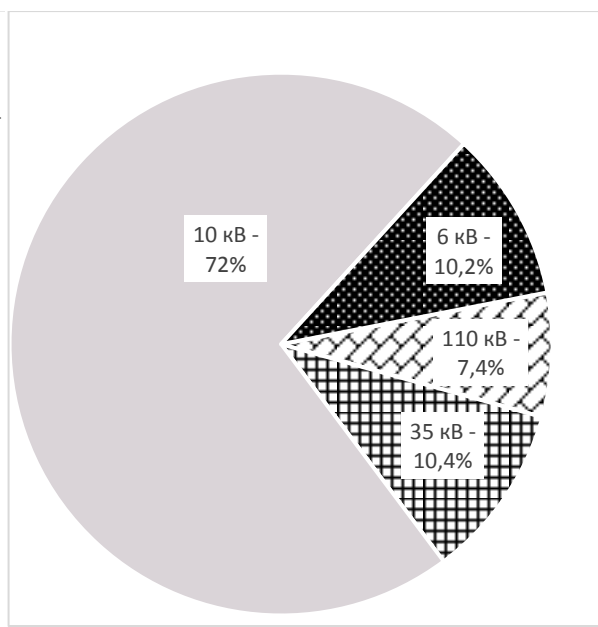


Рис. 4. Соотношение недоотпуска электроэнергии из-за грозы по классам напряжения сети, %

Из приведенных данных видно, что наибольший недоотпуск электроэнергии из-за воздействия грозы характерен для распределительных сетей 10 кВ. Наиболее вероятной причиной данного факта

является высокая степень износа распределительных сетей, невысокая степень закольцованности фидеров, высокая доля неуспешных АПВ (таблица).

### Успешность АПВ при грозовых отключениях

$U_{НОМ}$ , кВ	220	110	35	10	6
Успешность АПВ, %	100	81	45	15	30

В настоящее время при проведении расчетов грозоупорности ВЛ применяются данные об удельной плотности ударов молний, полученные еще в СССР, хотя, как показывает практика, они могут разительно отличаться от фактических данных. В современных условиях развития микропроцессорной техники, метеорологических наблюдений и грозопеленгационных систем появляется возможность получать данные о плотности ударов молний по всей длине существующих ВЛ с точностью до 300 м. Опыт применения грозопеленгационных систем показывает, что распределение ударов молний вдоль ВЛ имеет зоны аномальной концентрации [1]. Причиной этого являются неоднородности рельефа местности, экранирование трассы ВЛ лесными массивами и т.д.

При разработке проектной документации для строительства каждой ВЛ проводятся как геологические, так и геодезические изыскания – делается так называемый продольный профиль трассы, на котором осуществляется проектная расстановка опор по всей трассе (рис. 5).

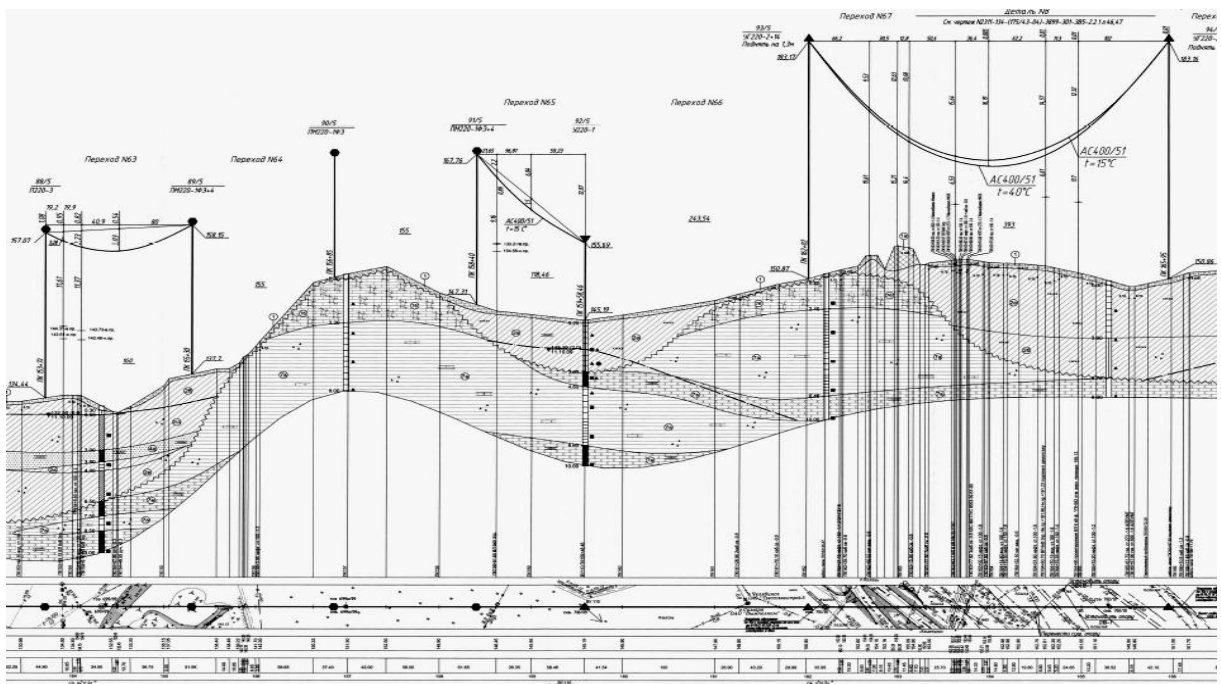


Рис. 5. Фрагмент продольного профиля ВЛ-220 кВ

Как можно увидеть из рис. 5, по ходу трассы ВЛ ввиду неоднородности рельефа опоры могут располагаться на разной высоте относительно друг друга, что, в свою очередь, может оказать влияние на распределение плотности ударов молнии по ВЛ. Данные различия в изменении высоты установки опор ВЛ не учитываются при проектной оценке грозоупорности линий, хотя учет этих данных может дать более ясную картину о наличии участков с наибольшей концентрацией ударов молний относительно всей длины ВЛ.

Согласно [2], большая часть территории Республики Татарстан имеет районы со среднегодовой продолжительностью гроз 40 – 60 ч и 60 – 80 ч. Данные величины эквивалентны удельной плотности ударов молнии в землю 4 и 5,5 ударов/(км<sup>2</sup>·год) соответственно [3].

В ОАО «Сетевая компания» проведено климатическое районирование территории Республики Татарстан по среднегодовой продолжительности гроз в часах и построена региональная карта районирования территории Республики Татарстан по средней годовой продолжительности гроз в часах (рис. 6). Значения параметров климатических условий определяются путем обработки соответствующих многолетних данных наблюдений метеорологических станций согласно [4]. Продолжительность наблюдений на метеорологических станциях за характеристиками климатических условий по метеостанциям составляет 38–70 лет. Была проведена вероятностно-статистическая обработка многолетних данных наблюдений метеорологических станций за интенсивностью грозовой деятельности на территории Республики Татарстан.

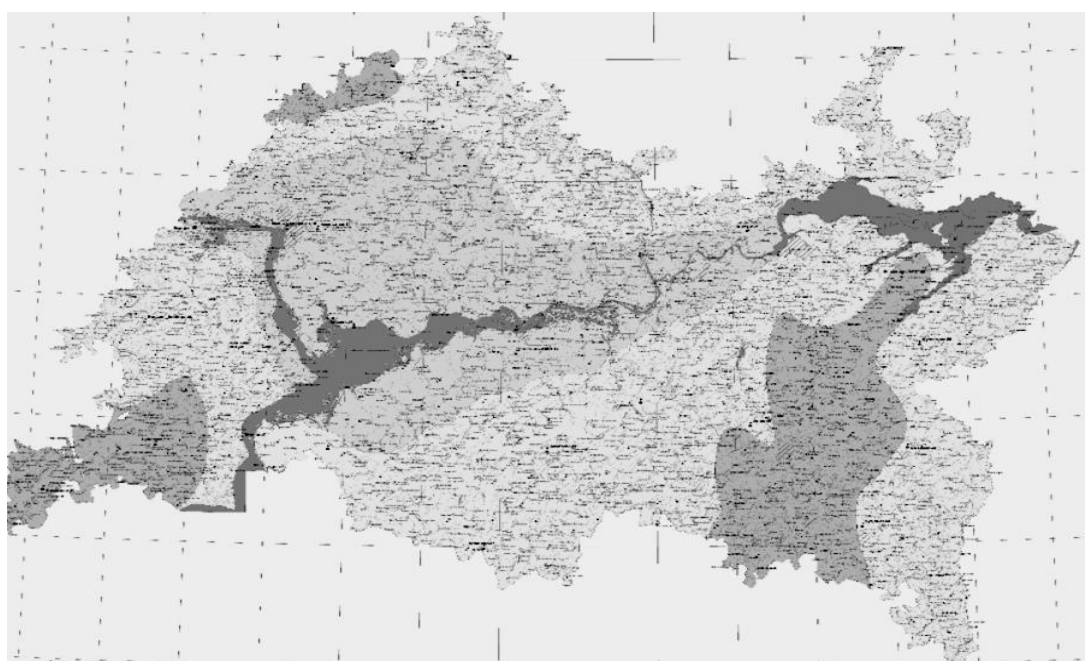


Рис. 6. Карта грозовой активности Республики Татарстан



На карте районирования Республики Татарстан по среднегодовой продолжительности гроз в часах выделены 3 района с продолжительностью гроз в интервалах: 20–40, 40–60 и 60–80 ч. Преобладающая часть территории республики расположена в районе со среднегодовой продолжительностью гроз 40–60 ч. Территория с продолжительностью гроз в часах в интервале 20–40 ч выделена вдоль Куйбышевского водохранилища до Камского водохранилища. Районы с продолжительностью гроз 60–80 ч распложены в восточной части (на возвышенностях), на юго-западе, а также сюда относится незначительный район на северо-западе республики.

Сопоставление карты грозовой активности с рельефом местности указывает на зависимость интенсивности гроз от высоты рельефа. Так, большую часть территории занимает равнина со слабо волнистой поверхностью, сильно расчлененной овражной сетью. Вершины отдельных холмов поднимаются до абсолютных отметок немного более 200 м. Для этих районов характерна грозовая активность 20–60 грозовых часов. На крайнем западе и юго-востоке территории находятся Приволжская (230 м) и Бугульминско-Белебеевская (343 м) возвышенности, для которых характерна наибольшая грозовая активность.

Интересно отметить, что результаты измерений молниевой активности международной грозопеленгационной системой GLD-360 в 2012–2014 гг. на территории Татарстана показали, что фактическая годовая удельная плотность ударов молний варьируется от 0,5 до 4 ударов/(км<sup>2</sup>·год). При этом на большей части территории Республики Татарстан была зарегистрирована удельная плотность ударов молний от 0,5 до 2 ударов/(км<sup>2</sup>·год).

Описанные обстоятельства указывают на целесообразность уточнения данных по плотности ударов молний в районах прохождения трасс ВЛ с целью координации молниезащиты и обеспечения должной надежности электроснабжения потребителей. Полученная информация позволит выделить участки ВЛ, на которых необходимо обратить особое внимание на систему грозоупорности и заземления опор.

Таким образом, аварийные отключения в электрических сетях, обусловленные воздействием грозы, составляют более 10 % всех аварийных отключений. При этом львиная доля всех грозовых отключений происходит в распределительных сетях 6–10 кВ. Эти отключения обуславливают основную часть грозового недоотпуска электроэнергии.

Уточнение данных по распределению плотности ударов молнии позволяет снизить погрешность проводимых расчетов грозоупорности ВЛ, задать оптимальный запас надежности, выявить участки ВЛ с наибольшей плотностью ударов молнии, а также корректировать место прохождения трассы еще на стадии проектно-изыскательных работ.

Применение систем грозопеленгации в электросетевом комплексе целесообразно для уточнения данных о распределении плотности ударов молнии, определения участков ВЛ, подверженных наибольшей грозовой активности. Все это позволит проводить регламентные работы по повышению грозоупорности отдельных участков ВЛ, а также оптимизировать выбор трасс на стадии предпроектных работ.

### Источники

1. Андреев Н.К. Опыт использования данных систем НАМОС при анализе грозовых отключений ВЛ / Н.К. Андреев, А.Б. Боярский // Сб. докл. 5-й Рос. конф. по молниезащите, 2016. С. 24–38.

2. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., раздел 2, глава 2.5. – М.: НЦ ЭНАС, 2003.

3. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций (утв. Приказом Минэнерго РФ от 30.06.2003 № 280).

4. Справочник по климату СССР. Вып. 12, ч. 5, Облачность и атмосферные явления.

5. Справочник по климату СССР. Вып. 12, ч. 7, Температура почвы, туманы, грозы, метели, град. Метеорологические данные за отдельные годы.

6. Метеорологические ежемесячники. Вып. 12. 1961–2013 гг.

7. Лебедев А.Н. Продолжительность гроз на территории СССР / А.Н. Лебедев, А.М. Носова // Труды ГГО. – 1980. – Вып. 441.

8. Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 3, Грозная деятельность на территории СССР. – М.; Л.: Энергия, 1964 (Труды ВНИИЭ; вып. 19).

9. Анализ и обобщение данных по климатическим характеристикам территории Российской Федерации для определения нагрузок на ВЛ, разработка и составление каталога: отчет ВНИИЭ. – М., 1998.

**ABOUT THE POSSIBILITIES OF IDENTIFYING SITES OF  
OVERHEAD LINES WITH HIGH LIGHTNING ACTIVITY DENSITY**  
PARAMONOV M.A., USACHYOV A.E., YUDITSKIY D.M.

*This article contains statistics on lightning outages overhead lines 6–220 kV. Based on statistical data processing concludes the existence at each overhead line plots with high density of lightning strikes. There is expedience of application of lightning detection systems to refine maps of thunderstorm activity, as well as the dependence of the estimated availability of plots with high density of lightning from the terrain.*

*Keywords: lightning, electrical grid, lighting-surge proofness, overhead line, automatic high-speed reclosing, lightning outage, undersupply of energy.*

УДК 62.83.52

**БОРЬБА С ПРОСАДКАМИ НАПРЯЖЕНИЯ НА КРУПНОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРИВОДНОЙ ТЕХНИКИ DANFOSS**

ПАРФЕНОВ И.Ю., ООО «Стэк Мастер», parfenov@stekmaster.ru  
ГАВРИЛИН Д.А., ООО «Стэк Мастер», gavrilin@stekmaster.ru  
МАЛАЦИОН А.С., ООО «Стэк Мастер», к.т.н., malatsion@stekmaster.ru

*Рассмотрено решение проблемы борьбы с кратковременными просадками напряжения, влияющими на работу преобразователей частоты и приводящими к недопустимому простоям оборудования и остановке технологического процесса.*

*Ключевые слова: просадки напряжения, преобразователь частоты, автоматический ввод резерва, пуско-наладочные работы, «Данфосс», kinetic back up, load sharing.*

Компания «Стэк Мастер», с 2001 г. имея большой опыт работы в сфере автоматизации производства, предлагает промышленным предприятиям и организациям комплексные решения и услуги в области энерго- и ресурсосбережения, автоматизации, внедрения передовых технологий, проектирования и поставки высококачественного оборудования.

Исторически сложилось, что специалисты компании «Стэк Мастер» тесно сотрудничают с фирмой Danfoss. Приводная техника датской фирмы Danfoss отличается надежностью, удобством эксплуатации и обслуживания, наличием специальных встроенных функций для различных применений.

Фирма «Стэк Мастер» занимается разработкой и производством станций управления серии СУГН (рис. 1), комплексной автоматизацией и диспетчеризацией систем водоснабжения и водоотведения в различных производственных процессах. Занимается также внедрением приводной техники на мешалках, конвейерах, вентиляторах, насосах, компрессорах, обследованием объектов, пуско-наладочными работами, вводом систем в эксплуатацию, обучением обслуживающего персонала.



Рис. 1. Станция управления вентилятором градирни с использованием контроллера Segnetics и преобразователя частоты Danfoss производства компании «Стэк Мастер»

В данной статье речь пойдет о пуско-наладочных работах, в результате которых удалось найти решение проблемы борьбы с кратковременными просадками напряжения, влияющими на работу преобразователей частоты и приводящими к недопустимому простоем оборудования и остановке технологического процесса.

На одном из заводов нефтехимического комплекса Республики Татарстан на сетевые насосы установлены преобразователи частоты Danfoss насосной серии FC-202. Питание поступает от АВР, к которой

подключено два ввода. На заводе по статистике раз в неделю происходит просадка на одном из вводов. В момент просадки и переключения АВР некоторые преобразователи частоты (ПЧ) уходят в аварию. Обычно это авария А7 – превышение напряжения питания в звене постоянного тока или авария А13 – превышение пикового тока инвертора (около 200 % от номинального тока).

Несколько лет назад в связи этой проблемой на ПЧ были установлены опции D (цепи управления ПЧ запитываются от отдельного источника питания 24 В) и задействованы функции кинетического бэкапа (Kinetic Backup). При просадках привод останавливался и заново запускался.

Функция Kinetic Backup позволяет преобразователю частоты оставаться в рабочем состоянии в момент просадок и кратковременных отключений питающего напряжения. При отключении питающего напряжения преобразователь частоты не теряет связь с двигателем, а использует его как генератор, при этом скорость вращения механизма в каждый момент времени после отключения питающего напряжения известна и постепенно снижается.

Кинетическая энергия нагрузки на валу электродвигателя питает преобразователь частоты. При восстановлении питающего напряжения преобразователь частоты продолжит работу с электродвигателем с той скорости, на которой электродвигатель находился в момент подачи напряжения, и в том режиме, в котором находился до отключения напряжения.

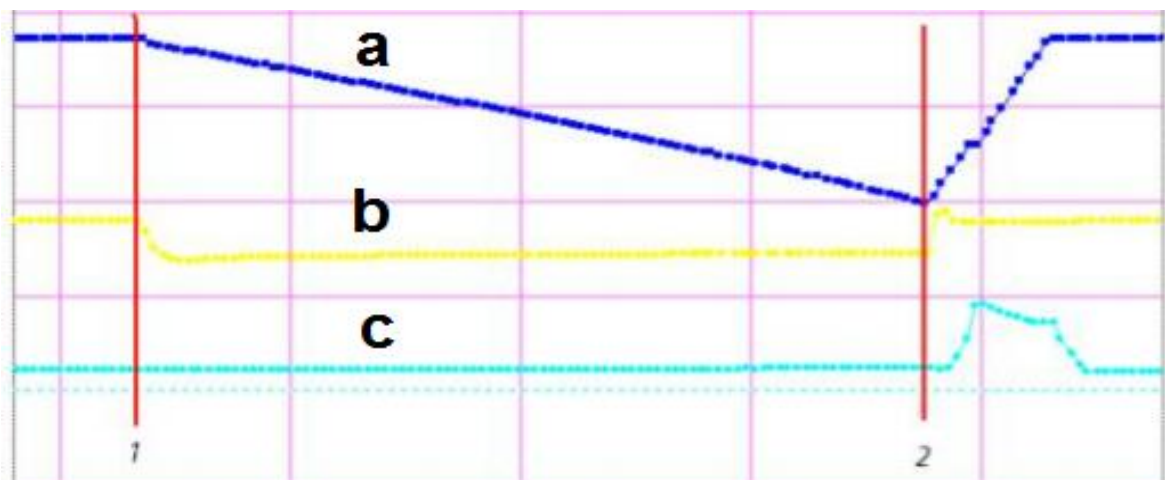


Рис. 2. Принцип работы функции Kinetic Backup: *a* – скорость электродвигателя; *b* – напряжение в звене постоянного тока; *c* – ток электродвигателя

На рис. 2 отображены параметры системы «преобразователь частоты – электродвигатель». В момент времени  $1$  происходит отключение питающего напряжения, и скорость электродвигателя начинает падать, но напряжение в звене постоянного тока находится на уровне, достаточном для поддержания ПЧ в рабочем состоянии. В момент времени  $2$  происходит восстановление питающего напряжения, и преобразователь частоты продолжит работу в том режиме, в котором работал до перерыва питания.

Для успешной работы функции необходимо знать параметры схемы замещения электродвигателя и быть уверенными в том, что совокупность момента инерции и момента сопротивления нагрузки, приведенных к валу электродвигателя, сможет обеспечить должное время работы. Параметры схемы замещения электродвигателя необходимы ПЧ для расчета естественной электромеханической характеристики двигателя и определения текущей рабочей точки на этой характеристике, и, как следствие, оптимальной работы функции Kinetic Backup.

Необходимым условием работы функции является наличие достаточного момента инерции механизма на валу электродвигателя. В случае, когда момент инерции слишком большой, во время работы функции Kinetic Backup может возникнуть перенапряжение в звене постоянного тока и произойдет отключение ПЧ – функция Kinetic Backup в таком случае работать не будет. Также может возникнуть ситуация, когда момента инерции недостаточно для обеспечения работы функции Kinetic Backup. Происходит отключение питающего напряжения, и ПЧ сразу отключается – это обусловлено недостатком энергии, которая поступает в преобразователь частоты. Так, напряжение, при котором отключится ПЧ (напряжение питания 3-фазное, 380–480 В), составляет 265 В. Напряжение, при котором начинает работать функция Kinetic Backup, выбирает пуско-наладчик, и в среднем оно составляет около 342 В. От правильных настроек будет зависеть работа всей системы, и не всегда ее удастся наладить с первого раза.

В прошлом году завод заменил АВР на быстродействующую (БАВР), и снова появилась проблема. Преобразователь частоты неадекватно отрабатывает функцию кинетического бэкапа и уходит в аварию, что увеличивает убытки производства.

Насосная нагрузка характеризуется низкой инерционностью и высоким моментом сопротивления. Таким образом, использование

возврата энергии в данном применении невозможно из-за отсутствия последней. Однако время просадки напряжения крайне мало ввиду установки быстрого БАВР. Улучшить работу ПЧ можно путем использования другой математической модели Flux (стандартно используется векторная модель управления VVC+) и более тонкой настройкой преобразователя. Ввиду того, что модель управления Flux присутствует только в преобразователях частоты серии FC-302, на имеющихся преобразователях заменены плата управления и силовая плата.

Были учтены параметры ограничения выходной частоты до 55 Гц, ограничение генераторного режима до 30 %, напряжение работы включения кинетического резервирования – 360 В, а также включены функции снижения номинальных характеристик частоты и тока при дисбалансе сети и перегрузке инвертора.

Проведенные эксперименты показали адекватность проведенных настроек. При кратковременной просадке напряжения ПЧ снижал скорость вращения двигателя, экономя тем самым энергию, а после восстановления напряжения выходил на исходную скорость. И самое главное: ПЧ не останавливал насос и не уходил в аварию.

Таким образом, во время пуско-наладочных работ с использованием специальной программы МСТ-10 для конфигурирования ПЧ и просмотра режимов его работы в реальном времени удалось решить поставленную задачу – минимизацию последствий просадок напряжения.

## **FIGHTING UNDERVOLTAGE AT THE LARGE INDUSTRIAL ENTERPRISES WITH USE OF FREQUENCY CONVERTERS DANFOSS**

**MALATSION A.S., PARFENOV I.Y., GAVRILIN D.A.**

*The solution of problems of struggle against transient voltage dips affecting the operation of frequency inverters and resulting in unacceptable downtime and stop the process.*

*Keywords: undervoltage, frequency converter, automatic transfer, commissioning, Danfoss, Kinetic back up, Load sharing.*

УДК 621.3.084

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ИСКАЖАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

РЕЗНИЧЕНКО В.В., СПбГАСУ, к.т.н., 12356788@mail.ru  
ДЕМИДОВ В.П., СПбГАСУ, к.т.н., доцент, dvp52@mail.ru  
ДЕМИДОВ Г.В., АО «ВНИИРА», инженер-программист,  
kimuriell@gmail.com

*Рассматривается возможность применения аналоговых электроизмерительных приборов для измерения электрических показателей (тока и напряжения) на строительных объектах с учетом особенностей многих типов электрооборудования, представляющих из себя искажающую (нелинейную) нагрузку. Это, в частности, установки дуговой и контактной сварки, газоразрядные лампы, вентильные статические преобразователи. Производится анализ основных типов традиционных электроизмерительных приборов, получивших наибольшее распространение при промышленных измерениях показателей переменного тока, а именно приборов следующих систем: электродинамической, электромагнитной, магнитоэлектрической (с выпрямителем), индукционной, а также электростатической. На основе проведенного анализа сделан вывод о допустимости применения аналоговых электроизмерительных устройств для измерения тока и напряжения в электрических сетях с искажающей нагрузкой в отдельных случаях, но в общем случае рекомендуется применение современных цифровых приборов.*

*Ключевые слова: искажающая нагрузка, несинусоидальные ток и напряжение, высшие гармоники, спектр сигналов, электроизмерительный прибор, действующее значение тока и напряжения.*

Значительное количество потребителей энергии на строительных объектах относится к искажающей нагрузке. Это установки дуговой и контактной сварки, газоразрядные лампы, статические преобразователи и т.п. Потребители, имеющие в своем составе нагрузки, вырабатывающие несинусоидальный ток, преобразуют часть электроэнергии синусоидального тока в энергию несинусоидального тока и возвращают ее в сеть.



При измерении в цепях с несинусоидальными электрическими величинами возникает вопрос о типах применяемых приборов. На выбор типа электроизмерительного прибора влияют, в частности, следующие обстоятельства:

- что необходимо измерять (действующие значения несинусоидальных электрических показателей (тока или напряжения) во всем спектре измеряемых сигналов; средние или амплитудные значения сигналов; действующие значения несинусоидального тока (напряжения) в некотором диапазоне частот или для какой-либо одной гармоники [1]);

- спектральный состав сигнала (нечетные гармоники, четные, наличие постоянной составляющей, наивысший возможный порядок, непрерывный спектр в диапазоне частот);

- допустимая погрешность измерения, условия проведения измерений и т.п.

Все аналоговые электроизмерительные приборы, предназначенные для работы на промышленной частоте, градуируются обычно в действующих значениях тока или напряжения синусоидальной формы, независимо от принципа действия. Однако приборы различных систем по-разному реагируют на несинусоидальный ток, т.е. имеют различную зависимость вращающего момента от формы тока или напряжения, что и является основным источником погрешности при измерении несинусоидальных токов.

Рассмотрим зависимость вращающего момента от формы тока наиболее распространенных типов аналоговых приборов.

В энергетике до недавнего времени традиционно считалось, что гармоники выше 13-го порядка рассматривать не надо. Этой гармонике соответствует частота  $13 \cdot 50 = 650$  Гц [1]. Значит, все приборы, применяемые для измерения несинусоидальных токов, должны без погрешностей измерять переменный ток с частотой до 650 Гц.

Однако специалисты компании Schneider Electric считают, что компенсация гармоник до 13-го порядка обязательна, а для обеспечения эффективной компенсации следует учитывать гармоники до 25-го порядка (1250) Гц. Можно предположить, что в будущем потребуются учет более высоких гармоник, поскольку те же специалисты Schneider Electric считают, что гармонические токи выше 50-го порядка незначительны и их измерением можно пренебречь, т.е. более низкие гармоники все же следует учитывать [2].

Наибольшее распространение при промышленных измерениях получили приборы переменного тока следующих систем: электродинамической, электромагнитной, магнитоэлектрической (с выпрямителем), индукционной и реже – электростатической и термоэлектрической.

Вращающий момент в приборах электродинамической системы создается взаимодействием электродинамических сил, возникающих между неподвижными и подвижной катушками, обтекаемыми измеряемым током. Известно, что вращающий момент прибора электродинамической системы не зависит от фазы гармоник относительно друг друга и относительно основной. Выводы справедливы и для случая, когда в измеряемой цепи одновременно протекают синусоидальные токи от разных источников разной частоты. При отсутствии переменной составляющей вращающий момент пропорционален произведению постоянных токов, протекающих по катушкам.

Приборы электродинамической системы выполняются как амперметры, вольтметры и ваттметры. Частотная применимость их в зависимости от типов ограничивается частотами порядка 1000...2000 Гц, т.е. они могут быть пригодны для измерения гармоник тока промышленной частоты.

Вращающий момент амперметра электродинамической системы равен

$$M_{\text{вр}} = k(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) = k \sum_1^n I_n^2 = kI^2, \quad (1)$$

где  $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$ .

Аналогично для вольтметра

$$M_{\text{вр}} = k(U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots) = k \sum_1^n U_n^2 = kU^2, \quad (2)$$

где  $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$ .

Таким образом, вращающий момент электродинамических приборов (амперметров и вольтметров) пропорционален сумме квадратов действующих значений токов (напряжений) всех гармоник, содержащихся в измеряемом несинусоидальном токе (напряжении), включая постоянную составляющую, независимо от взаимных фазовых сдвигов токов и напряжений.

Иначе говоря, показания электродинамических приборов (амперметров и вольтметров) зависят от действующего значения измеряемых величин (токов и напряжений) несинусоидальной формы.

Для ваттметров электродинамической системы могут быть два случая измерения мощности при несинусоидальном характере электрических величин:

- 1) ток и напряжение имеют несинусоидальную форму;
- 2) напряжение синусоидальное, а ток не синусоидален (или наоборот).

В первом случае (обе электрические величины не синусоидальны):

$$M_{\text{вр}} = k \sum_1^n I_n U_n \cos \varphi_n. \quad (3)$$

Из последнего выражения следует, что электродинамический ваттметр измеряет сумму активных мощностей всех гармоник тока и напряжения несинусоидальной формы независимо от разностей фаз гармоник.

Во втором случае электродинамический ваттметр имеет следующий вращательный момент:

$$M_{\text{вр}} = k I_1 U_1 \cos \varphi_1, \quad (4)$$

так как средние значения всех произведений с синусами, содержащими аргументы разных периодов, равны нулю. Следовательно, если одна из электрических величин (напряжение или ток) синусоидальна, то электродинамический ваттметр будет измерять мощность первой гармоники.

Все выводы, касающиеся электродинамических приборов, относятся также и к приборам ферродинамической системы. При этом следует учесть, что верхний предел по частоте у этих приборов ниже, чем у приборов электродинамической системы (максимум 400..500 Гц) [3]. Поэтому ферродинамические приборы в меньшей мере пригодны для измерения несинусоидальных электрических величин.

Амперметры и вольтметры электромагнитной системы так же, как и электродинамические приборы, измеряют действующее значение тока (напряжения) несинусоидальной формы независимо от начальных фаз гармоник.

Однако частотный диапазон этих приборов ограничен, как и диапазон ферродинамических приборов, из-за наличия стального сердечника и большой индуктивности катушки (для вольтметров). Современные амперметры переменного тока класса точности 0,5 имеют номинальную область частот от 40 до 100 Гц и расширенную до 500...1000 Гц в зависимости от конкретного типа прибора. Номинальная область частот вольтметров составляет 40...60 Гц, а расширенная – 200...400 Гц.

Выпрямительные приборы магнитоэлектрической системы со встроенным выпрямителем состоят из выпрямителя, включенного в цепь измеряемого переменного тока, и измерителя магнитоэлектрической системы, измеряющего выпрямленный ток. Шкала выпрямительного прибора обычно градуируется в действующих значениях синусоидального тока (напряжения).

Вращающий момент в приборах магнитоэлектрической системы создается механическим взаимодействием тока, протекающего по подвижной катушке (рамке), расположенной между полюсами постоянного магнита, с магнитным потоком в зазоре. Поскольку магнитная индукция в зазоре постоянна, то мгновенное значение вращающего момента равно

$$m_{вр} = ki, \quad (5)$$

т.е. момент пропорционален первой степени тока.

При синусоидальном токе мгновенные значения выпрямленного тока принимают последовательно все значения амплитуды положительной волны синусоиды. В силу инерционности подвижная система прибора (рамка) не успевает следовать всем значениям мгновенного тока и отклоняется на некоторый угол, пропорциональный среднему значению выпрямленного тока за первый полупериод. Поскольку обычно используются двухполупериодные схемы выпрямления, то во второй полупериод и далее этот процесс повторяется.

Поскольку среднее значение ординаты синусоиды за полупериод в общем случае, как известно, выражается через амплитудное значение тока  $I_m$  таким образом:

$$I_{ср} = \frac{2I_m}{\pi} \cos \varphi, \quad (6)$$

то средний вращающий момент прибора за период будет пропорционален среднему значению тока по модулю, т.е.

$$M_{\text{ср}} = kI_{\text{ср}}\cos\varphi. \quad (7)$$

При несинусоидальном токе, представленном тригонометрическим рядом разложения, средний момент прибора будет равен

$$\begin{aligned} M_{\text{вр}} &= \frac{k}{T} \int_0^{T/2} (I_{M,1} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{M,2} \sin(2\omega t + \psi_2) + I_{M,3} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots) \Delta t = \\ &= k(I_{\text{ср}1} \cos \psi_1 + I_{\text{ср}2} \cos \psi_2 + I_{\text{ср}3} \cos \psi_3 + \dots), \end{aligned} \quad (8)$$

или

$$M_{\text{вр}} = k \sum_0^n (I_{\text{ср},k} \cos \psi_k). \quad (9)$$

То есть выпрямительный двухполупериодный прибор измеряет сумму средних значений по модулю всех гармоник периодического тока (напряжения) несинусоидальной формы, причем показания прибора зависят от фазы гармоник относительно основной, т.е. от формы тока (напряжения).

Как указывалось выше, шкала выпрямительных приборов градуируется в действующих значениях синусоидального тока (хотя момент вращения пропорционален среднему значению выпрямленного тока), т.е. градуировка произведена для коэффициента формы кривой тока  $k_{\text{ф}} = 1,11$ . Так как для несинусоидальной кривой коэффициент формы имеет другое значение, то при несинусоидальной форме кривой тока (напряжения) показания выпрямительного прибора будут неверными, то есть неизбежна погрешность измерения. Так, например, при острой форме измеряемого тока выпрямительный прибор будет показывать меньше, а при тупой – больше.

Вращающий момент таких выпрямительных приборов пропорционален среднему значению измеряемого периодического напряжения (тока) любой формы, причем градуировка выполняется непосредственно в среднеквадратичных значениях напряжения или тока (с учетом извлечения квадратного корня), т.е.

$$M_{\text{вр}} = k \sum_0^n U_k^2 = kU^2. \quad (10)$$

Таким образом, выпрямительные приборы со среднеквадратической характеристикой измеряют действующее значение напряжения (тока) независимо от начальных фаз гармоник.

Вращающий момент электростатического вольтметра возникает за счет взаимодействия электрического поля, пропорционального измеряемому напряжению, на неподвижную обкладку конденсатора. Мгновенное значение вращающего момента

$$m_{\text{вр}} = \frac{1}{2} u^2 \frac{\Delta C}{\Delta \alpha}, \quad (11)$$

где  $u$  – мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора;  $C$  – емкость конденсатора в зависимости от угла  $\alpha$  поворота подвижной обкладки.

Для установившегося положения  $\Delta C / \Delta \alpha = \text{const}$  и по аналогии с электродинамической системой для общего случая, когда измеряемое напряжение содержит любые гармоники и постоянную составляющую, средний вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = k \sum_0^n U_k^2 = kU^2, \quad (12)$$

т.е. вольтметр электростатической системы измеряет действующее (а не амплитудное) значение напряжения любой формы независимо от начальных фаз гармоник, включая постоянную составляющую. Показания прибора правильны и при измерении напряжения постоянного тока. Электростатические вольтметры пригодны для широкой области частот (вплоть до мегагерц).

Приборы индукционной системы предназначены для измерений только в цепях переменного тока. В отличие от приборов других систем, индукционные приборы могут быть применены в цепях только с одной определенной частотой, и незначительное отклонение этой частоты от номинальной приводит к большим погрешностям.

Из сказанного можно сделать следующий вывод. Применение аналоговых электроизмерительных устройств для измерения тока и напряжения в электрических сетях с искажающей нагрузкой в отдельных случаях может считаться допустимым, но в общем случае более целесообразно применение современных цифровых приборов.

### Источники

1. Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение / Г.П. Минин. – М.: Энергия, 1979.
2. Епифанов С.Н. Электроизмерительные приборы: справочно-методическое пособие / С.Н. Епифанов. – Киров: ВятГУ, 2005.
3. Измерение и устранение гармоник. Техническая коллекция Schneider Electric. Вып. № 30.

### EVALUATION OF ELECTRICAL PARAMETERS BY DISTORTING LOAD

REZNICHENKO V.V., DEMIDOV V.P., DEMIDOV G.V.

*The article discusses the possibility of the use of analog electrical measuring instruments for measuring electrical parameters (voltage and current) on construction sites, taking into account the features of many types of electrical equipment, which are distorting (non-linear) load. In particular, the installation of arc and resistance welding, gas discharge lamps, gate static converters. An analysis of basic types of traditional electrical measuring instruments with the highest distribution in industrial dimensions AC indicators, namely devices for the following systems: electrodynamic, electromagnetic, magnetolectric (with rectifier), induction, as well as electrostatic. On the basis of the analysis concluded that the admissibility of the application of analogue electrical measuring devices for measuring current and voltage in electrical circuits with distorting stress in individual cases, but generally it is recommended to use modern digital devices.*

*Keywords: distorting load, non-sinusoidal current and voltage harmonics, the spectrum of signals device operating current and voltage value.*

УДК 62-83:621.313.3

## МОДЕРНИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

САВОСТЕЕНКО Н.В., ЮУрГУ (НИУ), магистрант

КОСТЕНКО Р.В., ОАО «Челябоблкоммунэнерго» в г. Копейске, мастер  
механоэнергокомплекса

АРХИПОВА Н.С., ЮУрГУ (НИУ), магистрант

БУХАНОВ С.С., ЮУрГУ (НИУ), магистрант

*Рассматривается модернизация насосной станции (НС), установленной на котельной № 4 г. Копейска «Челябоблкоммунэнерго», с применением частотно-регулируемого электропривода. Приведена и описана технологическая схема НС. Рассмотрены и приведены формулы, поясняющие основные характеристики НС, построены характеристики режимов ее работы. Раскрывается суть частотного регулирования электроприводов НС, рассмотрены основные функции автоматического регулирования. Описывается основная структура автоматизированной НС и приводятся примеры применения данного метода автоматизации.*

*Ключевые слова: автоматизированная насосная станция, частотное регулирование электропривода насоса.*

### Назначение насосных станций

НС – это совокупность электрического и гидравлического комплексов, в которых происходит превращение энергии электрической в энергию потока жидкости и осуществление контроля этого процесса. Необходимость применения НС объясняется следующими преимуществами [1–3]:

- простота эксплуатации оборудования;
- возможность контролировать пропускную способность жидкости при различных режимах работы;
- продление срока эксплуатации технологически важных объектов;
- сокращение затрат на монтаж, оборудование и эксплуатацию;
- определенная степень надежности и, следовательно, требуемая степень бесперебойности работы;
- позволяет непрерывно работать при постоянных изменениях объема, уровнях потребления жидкости и варьировании потребителей.



В наше время НС широко используются в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Их можно охарактеризовать различными функциональными возможностями, разнообразием схем подключения насосов при совместной работе, варьируемыми параметрами, бесперебойностью работы и другими показателями.

Технологическая схема одной из типовых НС приведена на рис. 1. Во входной коллектор НС поступает жидкость, в резервуаре происходит процесс ее аккумуляции. Далее происходит откачка воды с помощью насосов в выходной коллектор НС, и жидкость попадает в магистральный трубопровод, на следующем этапе происходит процесс распределения жидкости потребителям или подача на вход последующей НС. Задвижки, установленные на входном и напорном патрубках насоса, служат для разделения насоса и трубопровода. Так называемый обратный клапан устанавливается на выходном патрубке насоса для предотвращения реверсного течения жидкости через насос. Электрические двигатели применяются для регулирования насосов и задвижек. На рис. 1 представлена таблица с перечнем регулируемых параметров для каждого из технологических объектов НС. Приведенные в таблице параметры будут изменяться в зависимости от условий применения НС и потребляемой мощности насосных установок [4].

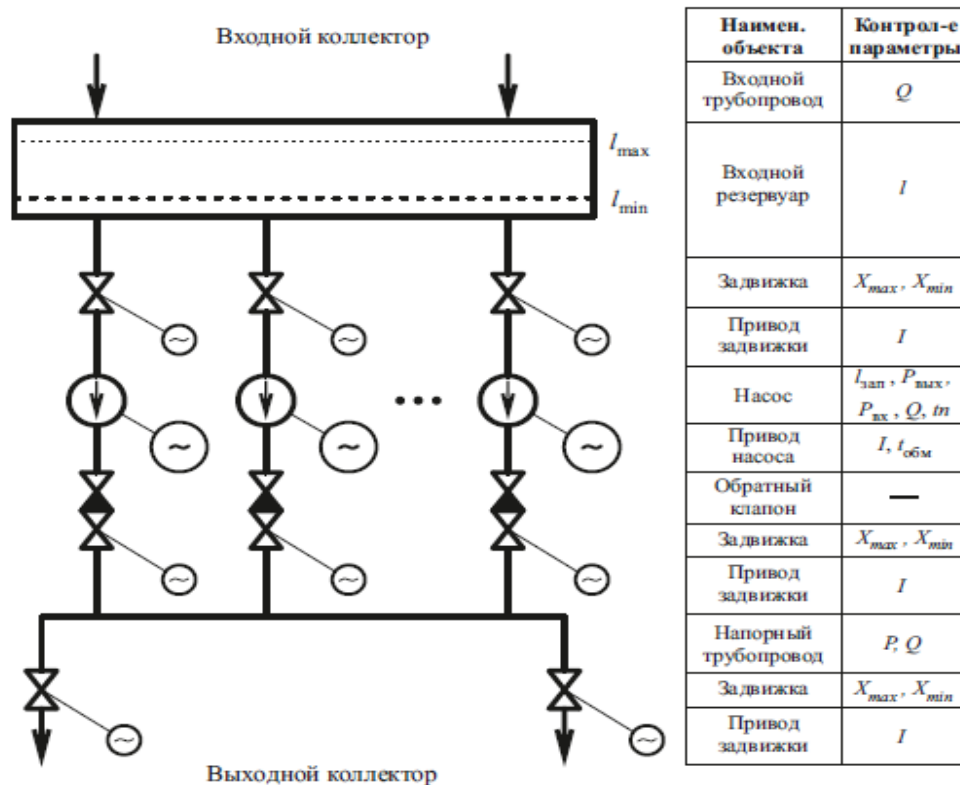


Рис. 1. Технологическая схема типовой НС

## Характеристики НС

Рассматривая НС, можно выделить несколько основных характеристик, определяющих зависимости выходных параметров уровня подачи и давления жидкости от времени и входной подачи жидкости, а также от ряда возмущающих факторов. Данные характеристики показывают изменение режима работы НС в рабочем процессе.

Анализ характеристик НС осуществляется на основе разработанной математической модели [5]. Для  $m$  количества насосов, работающих параллельно, можно записать уравнения системы в следующем виде.

Динамические показатели процесса изменения уровня жидкости в резервуаре:

$$S \frac{dl}{dt} = Q_{\Sigma ВХ} - Q_{\Sigma ВЫХ} - Q_{У}(P_{ВЫХ}), \quad (1)$$

где  $l$  и  $S$  – высота жидкости и площадь занимаемой поверхности жидкости в резервуаре соответственно;  $Q_{\Sigma ВХ}$  и  $Q_{\Sigma ВЫХ}$  – результирующие подачи жидкости на входе и выходе НС соответственно;  $Q_{У}(P_{ВЫХ})$  – подача утечек, задаваемая в функции от выходного давления  $P_{ВЫХ}$ .

Баланс уровня подаваемой жидкости на выходе НС:

$$AQ = 0, \quad (2)$$

где  $A = [11 \dots 1 - 1 - 1]$  – узловая вектор-строка размерностью  $m + 2$ ;  $Q = [Q_1 Q_2 \dots Q_m Q_{\Sigma ВЫХ} Q_{У}]^T$  – вектор-столбец подач всех жидкостей, суммирующихся на выходе НС.

При последовательном соединении таких элементов, как насос и задвижка, с учетом регулирования частоты вращения насоса  $\omega_i$  и варьирования положением задвижки  $x_{zi}$  может возникать перепад давления, который определяется зависимостью:

$$\Delta P_i = \Delta P_i(Q_i, \omega_i) - \Delta P_{zi}(Q_i, x_{zi}), \quad (3)$$

баланс силы напоров жидкостей на выходе НС:

$$P_{ВХ}(l) + \Delta P_i = P_c + P_d(Q_{\Sigma ВЫХ}), \quad (4)$$

где  $P_{ВХ}(l)$  – давление, создаваемое насосами на входе, которое зависит от количества жидкости во входном резервуаре;  $P_c$  и  $P_d(Q_{\Sigma ВЫХ})$  –

статическое противодействие и динамический перепад давления в гидравлической сети соответственно [6].

Для наглядного пояснения формул рассмотрим систему, работающую на 3 насосах. Качественные характеристики изменения рабочих параметров НС приведены на рис. 2, в данной системе осуществляется регулирование частоты вращения рабочего колеса одного из насосов. Характеристика 1-го вида принадлежит группе насосов, а гидромагистраль имеет характеристику 4-го вида. Опишем процесс увеличения подачи воды и давления в магистрали. Для начала используется лишь один частотно-регулируемый электропривод насоса. Так как подача воды должна достигать значения  $Q_1$ , то, соответственно, для обеспечения определенного уровня давления увеличивается частота вращения рабочего колеса насоса до  $\omega_1$ . Для обеспечения большего значения подачи воды и уровня давления происходит следующее: питание электродвигателя первого насоса отключается от преобразователя частоты и подключается на сеть, а к выходным цепям преобразователя частоты коммутируется следующий электродвигатель насоса, и частота вращения рабочего колеса увеличивается до необходимого уровня.

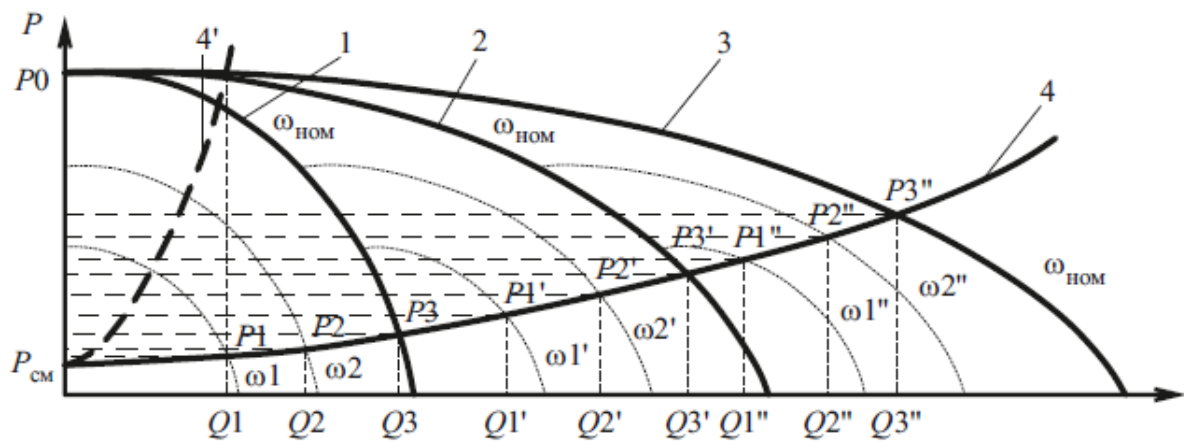


Рис. 2. Комбинированное регулирование режима работы НС

### Основные функции автоматической системы регулирования НС

Проектирование НС различных назначений осуществляется, согласно требованиям СНиП, как правило, с учетом управления без «постоянного» участия рабочего персонала: автоматического – в зависимости от технологических параметров (уровня воды в емкостях, давления или расхода воды в сети); дистанционного (телемеханического) – из пункта управления; местного – с периодическим участием персонала для передачи на пункт управления необходимых сигналов.

Управление регулируемого электропривода с использованием таких параметров, как создаваемое давление в магистрали, расход воды или уровень воды в резервуарах, в основном следует осуществлять автоматически [7].

Основное внимание в НС должно акцентироваться на автоматизации следующих вспомогательных процессов: промывки вращающихся сеток по заданной программе, регулируемой по времени или перепаду уровней, откачки дренажных вод по уровням воды в приемке, электроотопления по температуре воздуха в помещении, а также вентиляции.

### Структура автоматизированной НС

В работе проводилась модернизация НС, установленной на котельной № 4 г. Копейска «Челябоблкоммунэнерго». На рис. 3 показана упрощенная структурная схема подключения электрооборудования и цепей автоматики НС с применением частотно-регулируемых электроприводов насосов [8].

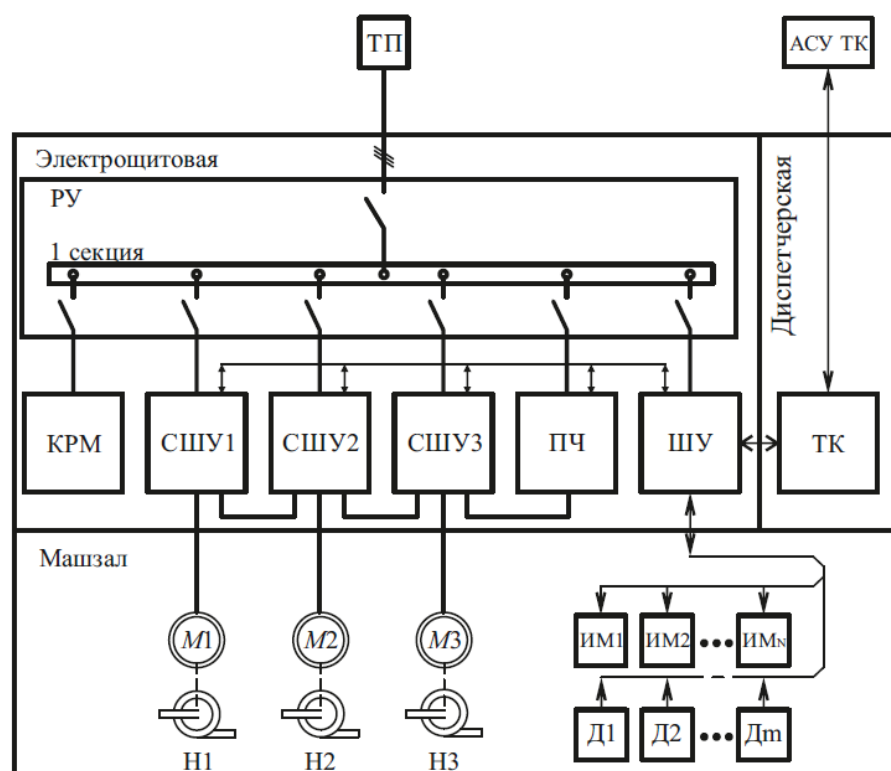


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной НС

Трансформаторная подстанция ТП обеспечивает электроснабжение НС. Силовое электрооборудование подключается к распределительному устройству РУ, к которому подведены основные шины питания. Здесь же располагают средства учета потребляемой электроэнергии.

Все силовое электрооборудование располагают в электрощитовой НС. Там располагают силовые шкафы управления СШУ, преобразователь частоты ПЧ и, если это необходимо, компенсатор реактивной мощности КРМ. Коммутационный аппарат расположен в силовом шкафу управления, к нему подключаются цепи питания электродвигателя М центробежного насоса Н – либо к выходным цепям преобразователя частоты, либо к шине РУ. Основное и вспомогательное оборудование располагается в машинном зале НС. Насосы Н1–Н3, приводные электродвигатели М1–М3 входят в состав основного оборудования. Вспомогательное оборудование необходимо для корректной работы технологического процесса и состоит из такого оборудования, как: дренажные, пожарные, вакуум-насосы; задвижки; вентиляторы; обогреватели и др. Исполнительные механизмы ИМ1–ИМ<sub>n</sub> позволяют осуществить управление оборудованием.

Датчики Д1–Д<sub>m</sub> используются для получения информации о параметрах оборудования, что позволяет регулировать их.

В шкаф управления ШУ заводятся цепи управления и измерительных сигналов от оборудования НС. Здесь же к технологическому контроллеру ТК подключаются объединенные в одну информационную линию цепи управления.

Для реализации алгоритма управления НС и передачи информации автоматизированной системой управления технологическим комплексом АСУ ТК используется технологический контроллер [9].

Рассмотренные в статье принципы построения автоматизированных НС с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом могут быть применены на НС различного назначения.

Таким образом, благодаря проведенной модернизации удалось достичь снижения показателей потребления электроэнергии, возможности плавного регулирования частоты вращения электродвигателей насосов с учетом предъявляемых требований со стороны технологического процесса, снизить вероятность аварий питающей сети и механического оборудования, что увеличивает безремонтный срок работы технологического объекта.

## Источники

1. Лобачев П.В. Насосы и насосные станции / П.В. Лобачев. – М.: Стройиздат, 1990.
2. СНиП 2.04.02-84. Насосные станции. Электрооборудование, технологический контроль, автоматизация и системы управления.

3. Попкович Г.С. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / Г.С. Попкович, М.А. Гордеев. – М.: Высш. шк., 1986.

4. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии / под ред. М.Я. Басалыгина, В.С. Копырина. – М.: Металлургия, 1991.

5. Журавлев А.М. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2014.– Т. 14, № 1. – С. 66–70.

6. Пат. 2138689 РФ. Способ управления работой системы центробежный насос и вакуумный насос и газоотделяющий центробежный насос / Р. Войтто, В. Реййо, В. Веса; опубл. 29.05.1996.

7. Рагинов Н.М. Устройства плавного запуска электродвигателей насосов буровых установок и насосов поддержания пластового давления / Н.М. Рагинов // Бурение и нефть. – 2007. – № 12. – С. 38–39.

8. Усынин Ю.С. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2012.– № 37(296). – С. 30–33.

9. Бычков А.Е. Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах / А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2011. – Т. 15, № 15. – С. 62–66.

### **MODERNIZATION OF THE PUMPING STATION**

**SAVOSTEENKO N.V., KOSTENKO R.V., ARHIPOVA N.S.,  
BUHANOV S.S.**

*The article reviews approach of the modernization of the pumping station (PS) with variable frequency drive. Shows and describes the technological scheme of the pumping station. Are considered and the formulas explaining the main features of the PS, built characteristic modes of operation of the pumping station. Considered the main idea of the frequency regulation of the electric drive of the pumping station reveals the main function of the automatic control. Describes the basic structure of the automated PS and provides examples of the use of the automation method.*

*Keywords: automate pumping station, frequency regulation of the electric drive.*

УДК 681.2.083

## **РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО ДЕФЕКТОСКОПА ДЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

САФАРГАЛИЕВ Р.Ф., ТюмГУ, студент, ruslan.safargaliev@mail.ru

ГРИГОРЬЕВ Б.В., ТюмГУ, к.т.н., b.v.grigorev@utmn.ru

НОВИКОВ В.Ф., ТИУ, д.ф.-м.н., novik1937@mail.ru

*В данной работе мы изучили возможность регистрации изменения толщины стенок труб действующего газопровода с помощью магнитного толщиномера. Исследования показали, что по локальному магнитному полю рассеяния можно фиксировать возникновение и рост дефекта в результате пылевой эрозии стенки изогнутого газопровода. Чувствительность предлагаемого метода составляет 15 А/м на 1 мм толщины. Установлено, что феррозондовый метод позволяет фиксировать возникновение и рост дефекта в результате пылевой эрозии стенки изогнутого газопровода.*

*Ключевые слова: эрозия, коррозия, неразрушающий контроль, трубопровод, дефект, магнитное поле, магнитный метод контроля, внутритрубная диагностика, магнитограмма, поле рассеяния, намагничивание, размагничивание, напряженность.*

Коррозия и эрозия в оборудовании топливно-энергетического комплекса ежегодно обходятся в миллиарды долларов – это и расходы на незапланированное отключение установок и трубопроводов, и неэффективная эксплуатация или снижение добычи нефти и газа, и повышение расходов на ремонт, и уплата штрафов. Эксперты [1] полагают, что сумму убытков от коррозии и эрозии можно снизить на 20–25 %, и использование современных технологий обнаружения, оценки и мониторинга эрозии и коррозии является здесь важным фактором.

Эрозия стали происходит от механического воздействия на ее поверхность быстро движущихся частиц жидкостей, песчинок твердых тел, взвесей, газовых пузырьков и т.п. Частицы вещества, ударяясь о материал стенки, разрушают ее поверхностный слой, толщина стенки постоянно уменьшается равномерно или в виде локальных мест разрушения (язв, раковин, кратеров, каверн и т.п.). В результате такого

износа могут возникнуть опасные внутренние механические напряжения в стенках трубопроводов, которые могут стать выше допустимых даже при нормальных рабочих нагрузках, т.е. без отклонения от нормального режима технологии и эксплуатации [2]. Особое внимание следует уделять эрозионному износу элементов трубопроводов, заполненных химически агрессивными веществами, поскольку участки эрозионно-коррозионных поражений являются не только концентраторами напряжений, но и возможными источниками зарождения трещин, возникновение которых возможно при взаимодействии углеродистых и низколегированных сталей, например с аммиаком или другой агрессивной средой. Появление трещин может привести к хрупкому разрушению трубопровода [3, 4].

Для оценки технического состояния трубопроводов осуществляют контроль толщины их стенки акустическими, рентгеновскими, магнитными (магнитопорошковыми) и тензометрическим методами [2–4]. К недостаткам этих методов относятся: необходимость подготовки поверхности, создание идеального контакта датчика с поверхностью, а также трудности использования внутритрубных приборов-дефектоскопов на криволинейных участках и невозможность определения размеров эрозионных участков. Преимущественно контроль толщины стенки трубы проводят в местах, указанных в типовых или индивидуальных программах диагностирования, в специальных инструкциях, а также в зонах интенсивного коррозионно-эрозионного износа металла, в местах выборок дефектов и на поверхности вмятин или выпучин.

Таким образом, актуальность проведенных исследований определяется необходимостью совершенствования средств и методов выявления эрозионных участков стальных трубопроводов и контроля их геометрических размеров. Применение магнитного (феррозондового) метода контроля эрозионной убыли стали позволит повысить разрешающую способность устройств дефектоскопии, обеспечивая безопасную эксплуатацию трубопроводных систем. Феррозондовые датчики представляются как наиболее перспективные преобразователи для индикации аварийного уменьшения толщины стенки стального трубопровода в местах проявления эрозии.

Целью данной работы является разработка магнитного дефектоскопа для ТЭК, исследование магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности стали в области ее поверхностного эрозионного дефекта.



В ходе проводимых исследований решались следующие задачи:

- исследование возможностей магнитного метода по обнаружению мест эрозийного износа стальной пластины со стороны ее бездефектной поверхности;
- отработка методики намагничивания стальной пластины с моделью эрозийного дефекта и сканирования ее магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности вдоль бездефектной поверхности;
- сравнительный анализ результатов ультразвукового и магнитного исследований;
- разработка намагничивающего устройства для трубопровода, проведение магнитной дефектоскопии (по аналогии с пластиной);
- проведение ультразвуковой толщинометрии стальной пластины отвода трубопровода при наличии в ней эрозийного дефекта.

Для проведения исследований мы изготовили пластинчатый образец прямоугольной формы из стали 3, в котором вдоль оси симметрии  $OO_1$  были высверлены две конусообразные лунки глубиной 2,5 и 3 мм, имитирующие эрозийный дефект (рис. 1).



*a*



*б*

Рис. 1. Внешний вид (*a*) пластинчатого образца с искусственными дефектами типа «кратер» или «лунки» и его поперечное сечение – *б* (длина пластины – 147 мм, ширина – 58 мм, толщина – 9 мм)

Если такой образец с дефектом поместить во внешнее магнитное поле (намагнитить), то в нем возникнет собственное магнитное поле, часть силовых линий которого из-за различия магнитных проницаемостей стали и воздуха выйдет наружу, огибая место с дефектом (рис. 2).

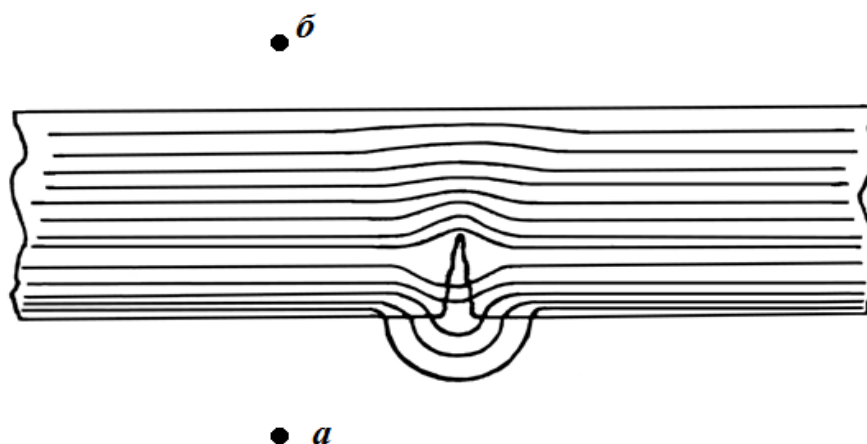


Рис. 2. Линии магнитной индукции поля стального пластинчатого образца с дефектом:  
*a, б* – соответственно дефектная и бездефектная поверхности стальной пластины

В работе [5] показан пример расчета магнитного поля над дефектом стальной пластины вдоль поверхности *a*, результаты которого представлены на рис. 3.

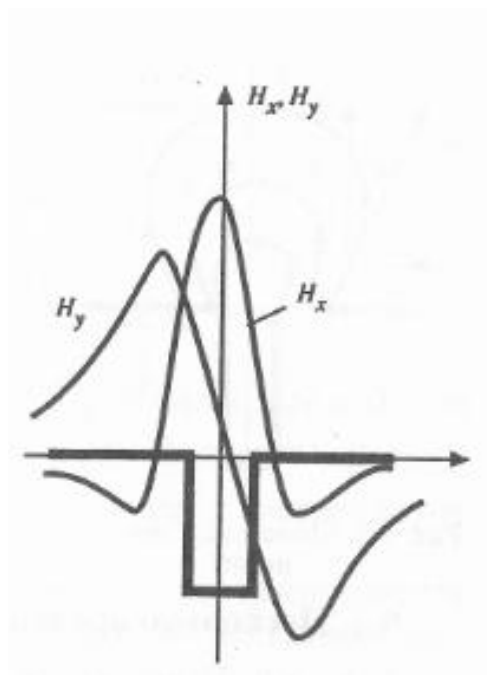


Рис. 3. Распределение тангенциальной ( $H_x$ ) и нормальной ( $H_y$ ) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния вдоль поверхности стальной пластины с дефектом типа трещины

Как видно, тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля рассеяния над дефектом в его границах не изменяет знак. Поэтому  $H_x$  будет более информативным параметром при выявлении эрозийных дефектов стали со стороны ее бездефектной поверхности  $b$ .

В практике магнитной внутритрубной дефектоскопии трубопроводов их намагничивание и сканирование магнитного поля осуществляется со стороны внутренней поверхности, содержащей эрозийные дефекты. Такой способ контроля толщины стенки трубы трудно реализуем на упруго-изогнутых участках, наиболее подверженных действию абразива. Для того чтобы уйти от использования внутритрубных дефектоскопов на изогнутых участках трубопроводов при определении толщины их стенок, необходимо разработать метод выявления мест эрозийной убыли стали с наружной поверхности трубы. Поэтому научной новизной настоящей работы является исследование возможности магнитного метода по обнаружению эрозии с внешней поверхности трубы на участках изменения ее геометрии. Для этого в соответствии с методикой, предлагаемой в работе [5], был проведен расчет магнитного поля над дефектом стальной пластины относительно поверхности  $b$  (см. рис. 2). Результат такого расчета показан на рис. 4.

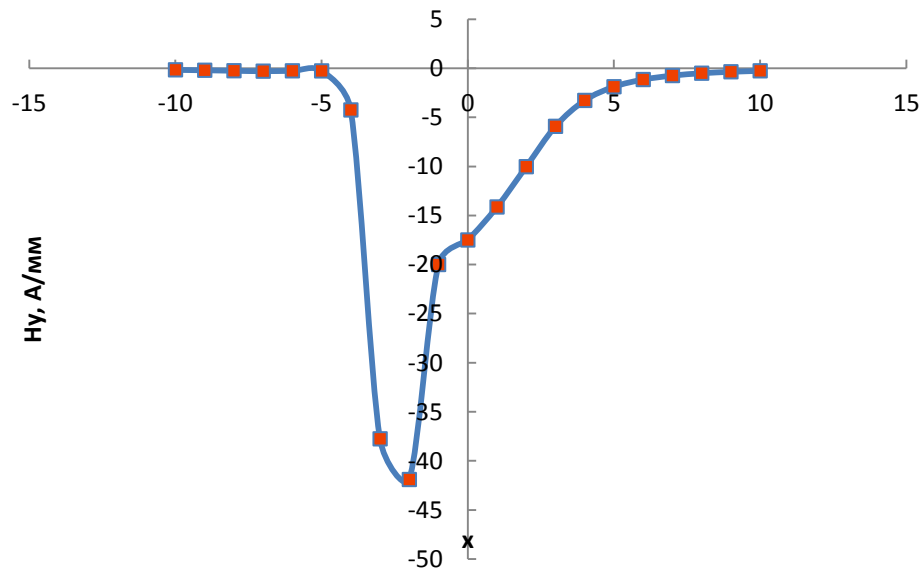


Рис. 4. Распределение тангенциальной ( $H_x$ ) составляющей напряженности магнитного поля рассеяния вдоль неизношенной поверхности  $b$  стальной пластины над дефектом

В области дефекта величина тангенциальной составляющей  $H_x$  напряженности магнитного поля рассеяния стального образца имеет выраженный максимум. Следовательно, эта величина может быть

индикатором наличия эрозийного дефекта на внутренней поверхности отвода трубопровода. По форме зависимости можно оценочно представить рельеф такого дефекта.

Особо важную роль при реализации магнитного метода контроля толщины необходимо уделять способу намагничивания и устройству намагничивания. В ходе проводимых исследований применялось П-образное намагничивающее устройство для пластины на базе постоянного магнита  $\text{SmCo}_5$ , разработанное нами намагничивающее устройство для отвода. Одним из требований, предъявляемых к таким устройствам в ходе проводимых исследований, является их способность промагничивать образец на всю его толщину.

На рис. 5 показана смоделированная в программе ELCUT Student 6.0 картина линий магнитной индукции поля, создаваемого таким намагничивающим устройством внутри исследуемой стальной пластины.

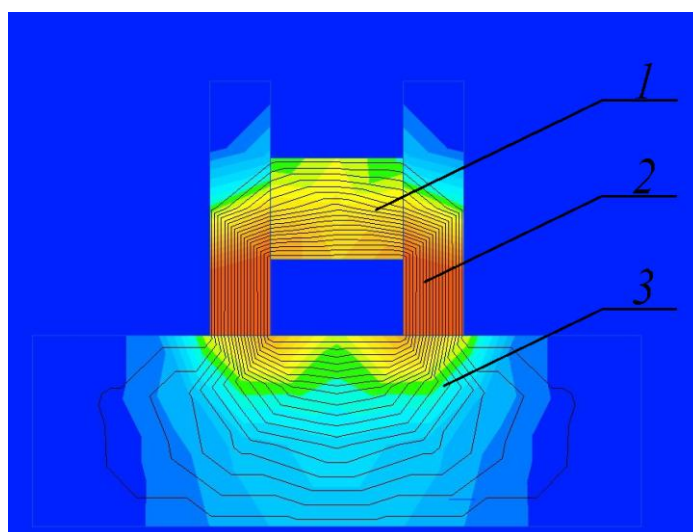


Рис. 5. Картина линий магнитной индукции поля внутри контролируемого объекта с наибольшей их густотой, показанной красным цветом, и наименьшей, показанной фиолетово-синим: 1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – объект контроля (стальная пластина)

Как видно из рис. 5, магнитное поле, создаваемое намагничивающим устройством, проникает на всю толщину стальной пластины. Для проверки такой способности намагничивающего устройства был проведен эксперимент, в ходе которого стальная пластина без каких-либо дефектов, из того же материала и аналогичных размеров, что и основной исследуемый образец, размагничивалась, измерялись тангенциальная ( $H_x$ ) и нормальная ( $H_y$ ) составляющие напряженности ее магнитного поля вдоль всей поверхности. Затем П-образное намагничивающее устройство

размещалось на одной ее поверхности и удалялось, а с противоположной стороны измерялись  $H_x$  и  $H_y$ . Результаты этого эксперимента показаны на рис. 6.

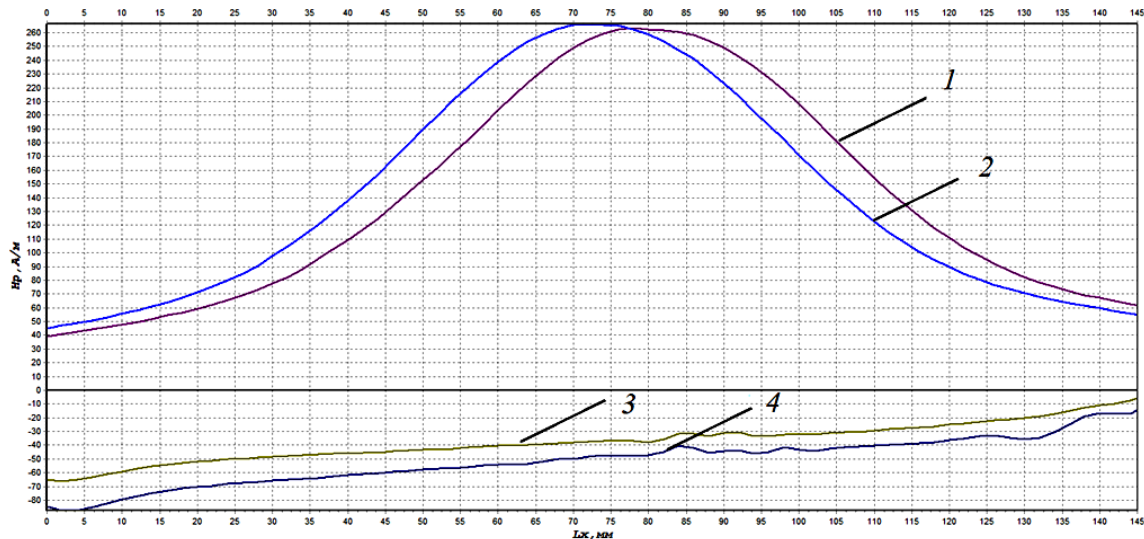


Рис. 6. Распределение нормальной ( $H_x$ ) и тангенциальной ( $H_y$ ) составляющих магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности вдоль одной поверхности стальной пластины, не имеющей поверхностных дефектов: 1, 2 –  $H_x$  и  $H_y$  соответственно после приставного намагничивания П-образным устройством, размещенным на ее другой поверхности; 3, 4 – то же самое после размагничивания пластины в убывающем переменном магнитном поле

После размагничивания магнитное поле в центре стальной пластины в точках с координатами  $L_x$  от 60 до 100 мм можно считать относительно однородным. У краев пластины заметны наибольшие количественные изменения обеих составляющих магнитного поля без смены их знака. Очевидно, это связано с влиянием краевого эффекта. После размещения и удаления намагничивающего устройства в центре пластины появляется область ее максимального намагничивания, в которой  $H_x$  возросла в 7,5, а  $H_y$  – в 6 раз. Следовательно, применение такого устройства в исследованиях на образце с дефектом позволит осуществлять его намагничивание на всю толщину – от бездефектной поверхности до поверхности с моделью эрозийного дефекта.

Эксперимент по исследованию магнитного поля рассеяния стального пластинчатого образца с моделью эрозийного дефекта включал в себя следующие этапы:

- 1) подготовка пластинчатого образца с моделями эрозийных дефектов в виде конусообразных лунок;
- 2) размагничивание образца убывающим переменным магнитным полем, доведение его магнитного поля до состояния равновесия;

3) измерение тангенциальной ( $H_{x0}$ ) и нормальной ( $H_{y0}$ ) составляющих напряженности магнитного поля пластины на бездефектной поверхности вдоль линии, соединяющей лунки;

4) намагничивание пластины со стороны бездефектной поверхности перпендикулярно оси симметрии, проходящей через лунки, которые при этом будут находиться по центру между полюсами остаточной намагниченности;

5) измерение тангенциальной ( $H_x$ ) и нормальной ( $H_y$ ) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности пластины вдоль оси симметрии, проходящей через лунки со стороны ее бездефектной поверхности.

Эрозийные дефекты в виде лунок на поверхности стальной пластины создавались пошаговым высверливанием, после каждого акта размагничивания, намагничивания и измерения. С каждым шагом увеличивался их размер как в глубину – от 0,5 до 2,5 мм, так и в ширину – от 4 до 8,5 мм. Это было необходимо для исследования возможности магнитного метода не только выявлять эрозийные дефекты, но и оценивать их геометрические размеры.

Для измерения напряженности магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности на поверхности пластинчатого образца применялся измеритель концентрации напряжений ИКН-6М-8, снабженный феррозондовыми датчиками магнитного поля, ориентированными вдоль нормали и касательной к исследуемой поверхности, а также сканирующим устройством, позволяющим автоматизированно с шагом в 1 мм регистрировать уровень магнитного поля.

Пластина располагалась так, чтобы ее ось симметрии, проходящая через лунки, была ориентирована вдоль магнитного меридиана Земли. В этом случае намагниченность полосы будет перпендикулярна магнитному меридиану. В результате влияние горизонтальной составляющей магнитного поля Земли на показания магнитометра исключалось, а вертикальная составляющая поля Земли измерялась отдельно и в дальнейшем учитывалась в получаемых на образце результатах измерения нормальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной полосы.

Результаты исследования магнитного поля рассеяния стального пластинчатого образца с моделью эрозийных дефектов при трехкратном увеличении их размеров показаны на рис. 7.



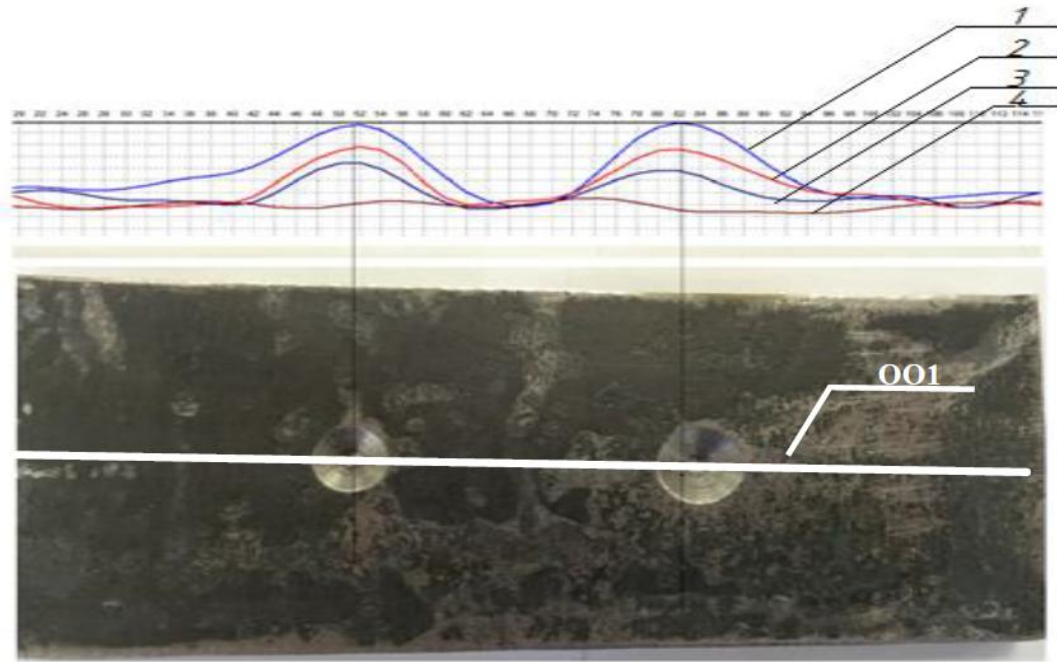


Рис. 7. Распределение тангенциальной ( $H_x$ ) составляющей напряженности магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности образца вдоль оси симметрии  $OO_1$  на бездефектной поверхности: 1 – максимальные значения глубины и ширины лунок (2,5 и 8,5 мм); 2 – лунки среднего значения размеров (1,5 и 6 мм); 3 – минимальная глубина и ширина (0,5 и 4 мм); 4 – лунки отсутствуют

На диаграмме рис. 7 видна зависимость распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности образца от размеров его эрозийных дефектов. В местах их нахождения на кривых распределения появляется выраженный максимум, обусловленный появлением поля дефекта. Поперечное сечение образца в месте расположения эрозийного дефекта можно разбить на две части: воздух и сталь. В его воздушной части плотность линий магнитной индукции из-за более высокого магнитного сопротивления существенно снизится, а в стали соответственно возрастет, что приводит к уплотнению линий индукции, находящихся ниже основания дефекта. Существенно меньшая часть линий пройдет через воздушный зазор – полость дефекта. Оставшаяся часть магнитных линий неминуемо преодолит дефект по воздуху вне границ образца, магнитное поле как бы «вываливается» за поверхность образца. Суммарное поле всех «магнитных зарядов»  $H_d$  называют магнитным полем рассеяния дефекта или полем дефекта. Магнитное поле рассеяния дефекта – это локальное магнитное поле, возникающее в зоне дефекта вследствие поляризации его границ.

На рис. 8 показана зависимость тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния образца в местах нахождения дефектов от их глубины. Из графика следует наличие корреляции между напряженностью поля остаточной намагнитченности и глубиной лунки.

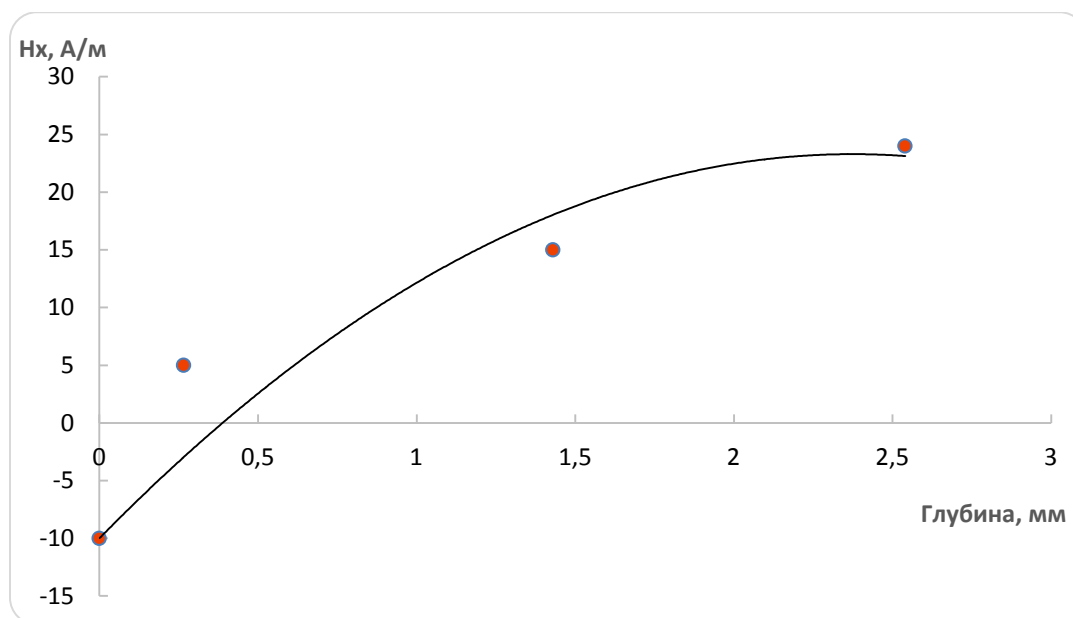


Рис. 8. Зависимость тангенциальной составляющей ( $H_x$ ) напряженности магнитного поля рассеяния образца в местах нахождения дефектов от их глубины

Результаты измерения толщины пластины в предполагаемом месте расположения дефектов ультразвуковым методом представлены графически на рис. 9.

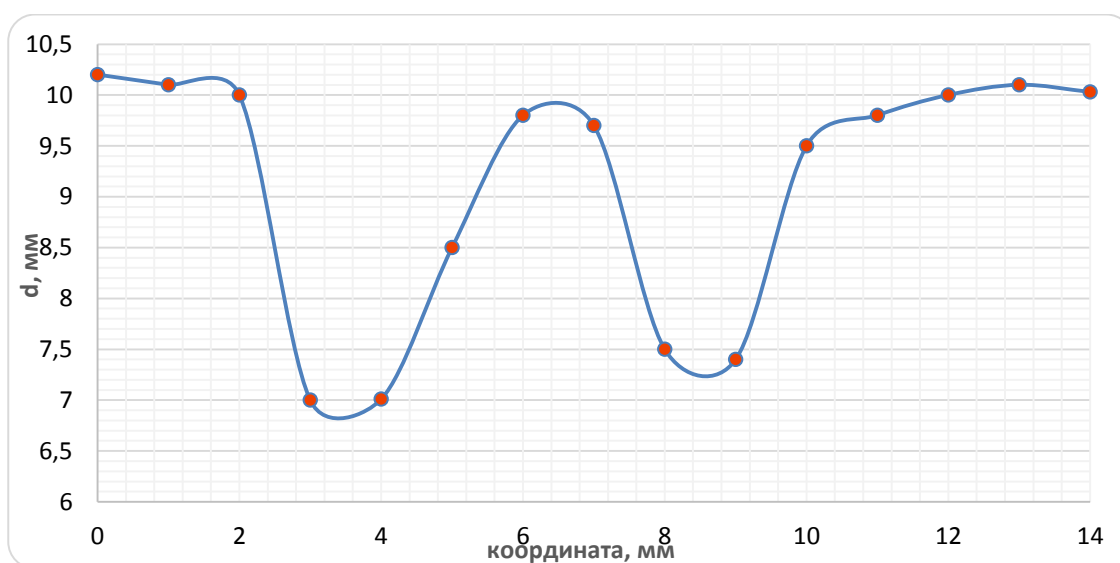


Рис. 9. Толщина  $d$  стальной пластины в разных точках ее поверхности вблизи участка дефектов по результатам ультразвуковой диагностики



По завершении опытов на модельном образце – пластине и изготовления намагничивающего устройства мы перешли к основной задаче нашей работы: разработке магнитного метода контроля толщины стенки металла трубопровода. Мы произвели измерения на 5 отводах, 4 были без дефекта и один с дефектом. Намагничивание производилось аналогично пластине.

После того как образец был намагничен, мы записали магнитограмму распределения тангенциальной составляющей магнитного поля  $H_x$ , которая представлена на рис. 10.

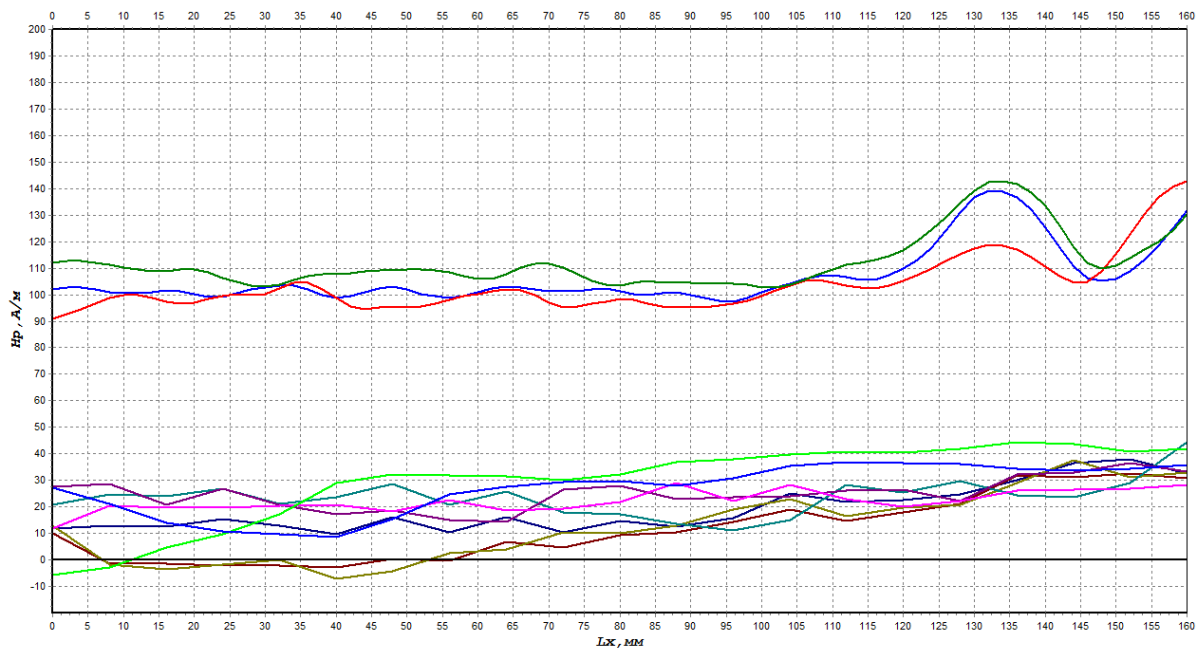


Рис. 10. Магнитограмма распределения тангенциальной ( $H_T$ ) составляющей магнитного поля рассеяния вдоль оси сканирования на поверхности отводов

Для того чтобы оценить сигнал от дефекта, мы добавили на рис. 10 сигналы от отводов без дефекта.

Из графика видно, что в области от 125 до 145 мм наблюдается резкий скачок значения тангенциальной составляющей магнитного поля  $H_x$  отвода с эрозийным кратером. Это явление вызвано тем, что в данной области находится дефект. Изменение поля составило 40 А/м. Для оценки погрешности эксперимента мы производили серию измерений, что тоже изображено на рис. 10, погрешность составила 17 %.

Чтобы подтвердить достоверность результата нашего опыта, мы произвели ультразвуковую толщинометрию стенки отвода в предполагаемой области нахождения дефекта. Полученные данные изображены на рис. 11.

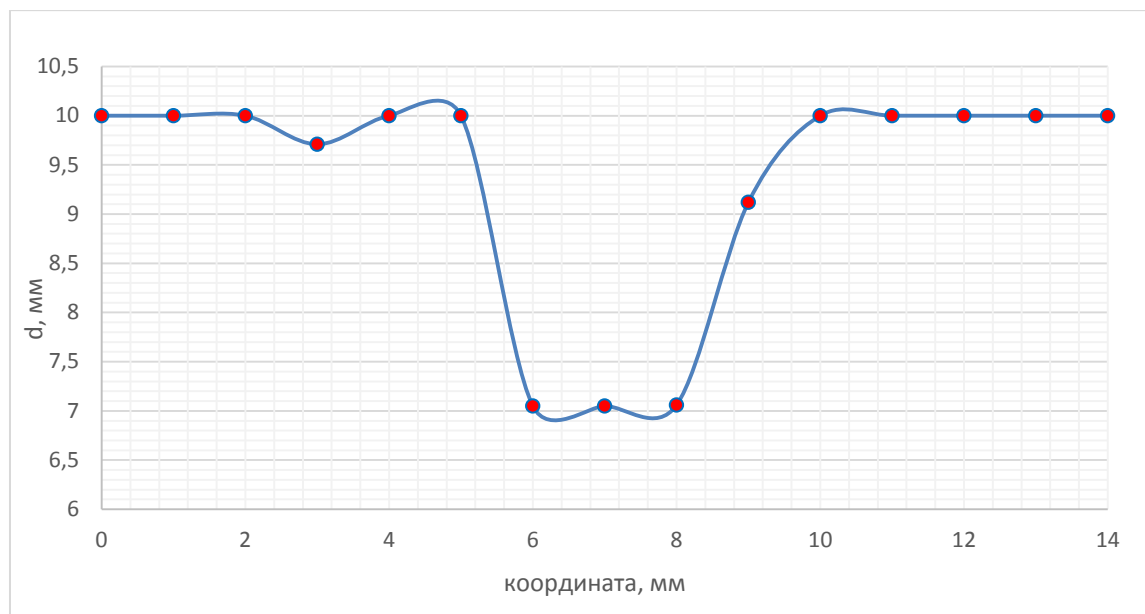


Рис. 11. Зависимость толщины стенки металла отвода от координаты измерения

По результатам ультразвуковой толщинометрии, в предполагаемом месте дефект был обнаружен. Таким образом, доказывается возможность магнитного метода выявлять места эрозийного износа, вызванные наличием дефектов в этих областях. Чувствительность метода равна 15 (А/м) /см.

### Выводы

1. По характеру распределения магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности вдоль бездефектной поверхности стальной пластины (отвода) обнаружены места расположения эрозийных дефектов.

2. Показано, что в области нахождения эрозийного дефекта на поверхности стальной пластины (отвода) характеристики ее магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности претерпевают резкие численные изменения.

3. становлено, что с ростом глубины эрозийного дефекта стальной пластины (отвода) тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля остаточной намагниченности увеличивается, а расширение площади эрозийного дефекта приводит к изменению формы пика, позволяя оценочно определить форму дефекта.

4. Результаты измерения ультразвуковым дефектоскопом толщины стальной пластины и отвода в области эрозийного дефекта удовлетворительно коррелируют с характером распределения в ней тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния.

5. Объектами практического применения исследуемого в работе магнитного метода по обнаружению участков с эрозийным износом являются газо- и нефтетранспортные трубопроводные системы.

### Источники

1. Коррозия и эрозия. Решения для обнаружения, измерения и мониторинга. Sensing&Inspection Technologies.ge-mcs.com

2. РД 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов (утв. Госгортехнадзором России 09.07.01). – М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002.

3. РД 09-244-98. Инструкция по проведению диагностирования технического состояния сосудов, трубопроводов и компрессоров промышленных аммиачных холодильных установок (утв. Госгортехнадзором России 20.11.98). – М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002.

4. ПБ 10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (утв. Госгортехнадзором России 18.04.95). – М.: ПИО ОБТ, 1996. – 242 с.

5. Щербинин В.Е. Магнитный контроль качества металлов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996.

6. Лукьянов В.А. Ультразвуковая толщинометрия и дефектоскопия / В.А. Лукьянов, Е.В. Петрусенко. – М.: РГУ нефти и газа, 2002. – 13 с.

7. ГОСТ Р ИСО 10543-99. Трубы стальные напорные бесшовные и сварные горячехотянутые. Метод ультразвуковой толщинометрии.

8. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении / Е.Ф. Кретов // Технология машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 44–47.

9. Лежин С.М. Центральное растяжение и сжатие. Кручение / С.М. Лежин [и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – 32 с.

### DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC FLAW DETECTOR FOR FUEL AND ENERGY COMPLEX

SAFARGALIEV R.F., GRIGOREV B.V., NOVIKOV V.F.

*In this work, we have studied the possibility of registration of the change of the thickness of the pipe wall, the existing pipeline using a magnetic thickness gauge. Studies have shown that the local magnetic field scattering to measure the emergence and growth of a defect in the result of dust erosion of the wall of*

*a curved pipeline. The sensitivity of the proposed method is 15 A/m at 1mm thickness. It is established that the fluxgate method allows capturing the emergence and growth of a defect in the result of dust erosion of the wall of a curved pipeline.*

*Keywords: erosion, corrosion, NDT, pipeline, defect, magnetic field, the magnetic inspection method, in-line inspection, magnetogram, field scattering, magnetization, demagnetization, tension.*

УДК 004 + 621.398

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

СЕРДЦЕВА А.В., УлГТУ, аспирант, aksiniaserdzeva@gmail.com

МУРЗАКОВ Д.Г., УлГТУ, аспирант, mdglab@bk.ru

БАЙРАМОВ Н.В., УлГТУ, студент, bnaib8@mail.ru

*Чистые помещения становятся неотъемлемой частью производства в современном мире. Они востребованы в различных областях деятельности, таких как: медицина, фармацевтика, химическая, пищевая, аэрокосмическая промышленность, машиностроение и микроэлектроника. При организации системы кондиционирования воздуха, отвечающей необходимому классу чистоты (ИСО 1 – 9), необходимые затраты на модернизацию способны оправдать себя путем улучшения качества продукции, эксплуатационных показателей объекта управления, повышения уровня безопасности технологического процесса и энергоэффективности.*

*Ключевые слова: чистые помещения, автоматическое поддержание микроклимата, система кондиционирования воздуха.*

Чистое помещение – это помещение, снижающее до минимума поступление, генерацию и накопление пылевых частиц. Это достигается, во-первых, подачей в чистое помещение больших объемов воздуха, фильтруемого высокоэффективными фильтрами [1]. В технологических процессах, где важна защита самого процесса и его продукта от микрозагрязнений, которые могут вывести изготавливаемую продукцию

из строя и даже стать источником опасности для людей, вплоть до возникновения аварийных ситуаций, необходим постоянный инструментальный контроль за наличием в технологической среде микрозагрязнений и динамикой их изменений. От концентрации частиц в воздухе может зависеть конечный результат всего производства.

В основе чистого помещения всегда лежит установка кондиционирования воздуха, чаще каркасно-панельного типа; для высоких классов чистоты необходима установка прецизионных кондиционеров для осуществления следующих режимов обработки воздуха: очистка, нагрев, рециркуляция, охлаждение, увлажнение. Средством достижения поставленных целей служит управление электродвигателем приточного и вытяжного вентилятора с помощью преобразователей частоты, поддержание постоянного значения полного давления в сети воздухопроводов, в целом – построение системы управления на основе серийно выпускаемых средств цифровой техники с элементной базой высокой степени интеграции, использование развитых унифицированных сетевых средств передачи информации.

Необходимо обеспечить специальные меры по энергосбережению, которые учитывают особенности чистых помещений и включают в себя:

- обоснование кратностей воздухообмена без чрезмерно высоких значений, в том числе из-за неоправданно жестких требований ко времени восстановления;

- снижение расхода воздуха в нерабочее время;

- определение действительно необходимых расходов воздуха при испытаниях и во время эксплуатации и регулирование расходов воздуха до минимальных значений, основываясь на этих данных;

- эксплуатация чистого помещения при сниженных расходах энергии при условии соблюдения требований к классу чистоты;

- подтверждение возможности работы при сниженных расходах энергии путем текущего контроля чистоты и повторных аттестаций [2].

Автоматизация системы кондиционирования позволит провести указанные энергосберегающие мероприятия и при этом сохранить запроктированный класс чистоты путем осуществления постоянного мониторинга концентрации частиц в воздухе с помощью оптического счетчика частиц. Сигнал с счетчика поступает на контроллер, в котором полученная информация обрабатывается, и подается управляющий сигнал на воздушные заслонки и двигатели приточного и вытяжного вентиляторов, тем самым повышается/понижается кратность воздухообмена.

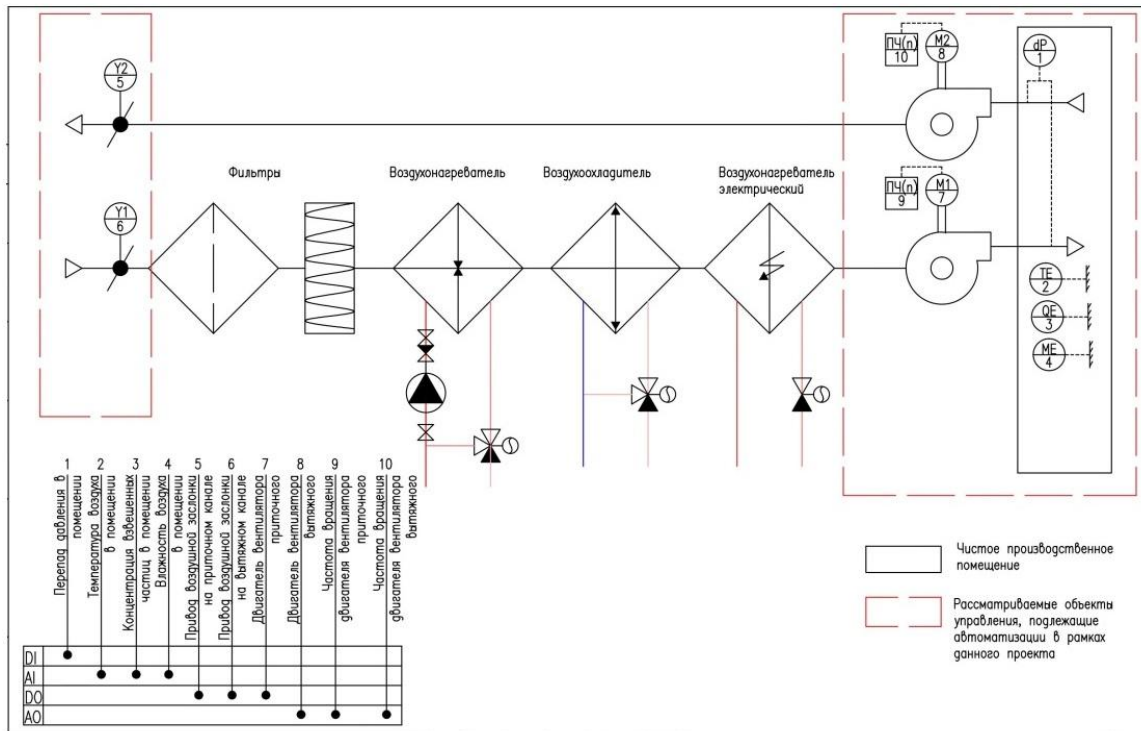


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации

### Описание алгоритма работы АСУ ТП (рис. 1)

Сигнал с датчика температуры (TE) обрабатывается специальным температурным модулем ввода и передается в цифровом виде в ПЛК. Сигнал о состоянии концентрации взвешенных частиц (QE) в помещении обрабатывается специальным модулем ввода аналоговых сигналов и передается в ПЛК, аналогично поступает информация о текущем значении влажности воздуха в помещении (ME). В чистых производственных помещениях необходимо поддерживать повышенное давление относительно давления вне данных помещений, в случае превышения значения уставки формируется сигнал о возникновении перепада давления (dP), который обрабатывается ПЛК.

В автоматическом режиме работы при выходе контролируемого значения температуры за допустимые пределы или при повышении концентрации взвешенных частиц, или при выходе контролируемого значения влажности за допустимые пределы формируется сигнал на включение двигателя приточного вентилятора и передается на преобразователь частоты (ПЧ). Задание частоты вращения двигателя рассчитывается программой ПЛК в зависимости от текущих значений сигналов с датчиков, далее сигнал задания частоты передается в ПЧ, посредством которого происходит управление электродвигателем

приточного вентилятора. При достижении определенного перепада давления воздуха происходит включение двигателя вытяжного вентилятора для замещения воздуха в помещении и недопущения большого напора воздуха. В случае формирования сигнала о недопустимом превышении давления ( $dP$ ) в помещении двигатель приточного вентилятора отключается, вытяжной вентилятор продолжает работать, снижая давление до допустимого. Условие включения приточного вентилятора также зависит от изменения температуры, от превышения концентрации частиц в воздухе или от изменения влажности воздуха в помещении. Значение частоты вращения двигателя вытяжного вентилятора также зависит от концентрации, и управление аналогично приточному вентилятору.

Также реализована сигнализация аварийного состояния вытяжного вентилятора.

Если при работающем двигателе вытяжного вентилятора через заданное время, за которое давление в помещении должно уравниваться, сигнал перепада давления не снимается, то формируется сигнал «Авария». Сигнал «Авария» снимается при устранении неисправности или иной причины и подтверждении устранения.

Данная система автоматизации микроклимата может быть реализована на серийно выпускаемых элементах промышленной автоматики. В нашем случае был разработан лабораторный стенд (рис. 2) с возможностью имитации основных параметров воздуха помещения. При разработке применялось оборудование производства Mitsubishi Electric, которое удовлетворяет условиям быстрого действия и точности обработки требуемых сигналов.



Рис. 2. Лабораторный стенд

Температура в помещении измеряется первичным преобразователем (датчиком) и обрабатывается специальным модулем FX2N-2LC, предназначенным как для обработки сигналов с различного типа датчиков, так и для регулирования температуры.

Преобразователь давления вычисляет разность показаний и формирует сигнал для модуля CPU.

Для обработки сигналов с датчиков влажности и концентрации взвешенных частиц применяется модуль аналогового ввода FX2N-4DA. Модуль может быть сконфигурирован на прием унифицированных сигналов в виде тока или напряжения.

Формирование сигналов задания частоты вращения двигателей производится модулем аналогового вывода FX2N-5A.

Управление двигателями осуществляется частотными преобразователями FR серии A. Сигнал задания, принимаемый в виде тока, пропорционален требуемой частоте вращения.

### **Источники**

1. Чистые помещения / под ред. А.Е. Федотова. – М.: АСИНКОМ, 2003. – 576 с.
2. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации / В. Уайт. – М.: Клинрум, 2002. – 304 с.

### **THE DESIGN OF THE ENERGY EFFICIENT AUTOMATED MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM IN CLEAN ROOMS SERDTSEVA A.V., MURZAKOV D.G., BAYRAMOV N.V.**

*Nowadays cleanrooms become an integral part of the manufacturing today. They are demanded in various fields such as medicine, pharmacy, chemical, food, aerospace, mechanical engineering and microelectronics. The organization of an air conditioning system that responds the required cleanliness class (ISO 1-9), the necessary upgrade expenses can justify itself by improving product quality, improving the operational performance of the control object, increasing the level of security of the process, improving energy efficiency.*

*Keywords: clean rooms, automatic maintenance of microclimate, the air conditioning system.*



УДК 62-83:622.691.4

## **НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

СЕРЕБРЯКОВ А.В., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, к.т.н.  
КРЮКОВ О.В., АО «Гипрогазцентр», д.т.н., доцент,  
o.kryukov@ggc.nnov.ru

*Рассмотрены вопросы проектирования эффективных и достоверных систем оперативного управления и диагностики электродвигателей электроприводных компрессорных станций. Представлена статистика выхода из строя наиболее ответственных установок газотранспортных систем. Разработана методология и архитектура искусственных нейронных сетей для получения прогнозных моделей электрических машин. Приведены примеры нейро-нечеткого управления техническим состоянием и параметрами машин. Получены тесты секционированных сетей, модели метода анализа динамики спектральных составляющих, прогнозирование величин тока и температур статора. Сопоставительные результаты моделирования традиционных и нейронных регуляторов объектов магистрального транспорта газа с учетом различных эксплуатационных факторов работы позволили выработать рекомендации по применению метода искусственных нейронных сетей.*

*Ключевые слова: электроприводные компрессорные станции, газоперекачивающий агрегат, система электроснабжения, искусственные нейронные сети, тесты секционированных сетей, модели прогнозирования величин тока и температур статора.*

Приоритетным направлением повышения технико-экономической эффективности, экологической безопасности и надежности функционирования технологических процессов в топливно-энергетическом комплексе является оснащение локальных объектов современным электротехническим оборудованием и интеграция их в АСУ ТП [1, 2]. В первую очередь это относится к внедрению САУ с частотно-регулируемым электроприводом при транспортировке газа [3–5]. Сегодня более 70 % оборудования нефтегазовой промышленности имеет срок службы свыше 15 лет, оснащено нерегулируемыми системами без мониторинга, что

приводит к перерасходу электроэнергии, вредному воздействию на окружающую среду и исполнительные механизмы, снижая их долговечность. Несмотря на специфику отраслевого применения оборудования ТЭК, оснащение его автоматизированным электроприводом с преобразователями частоты и интеграция его в рамках АСУ ТП обеспечивает оптимизацию режимов работы каждого объекта, энерго- и ресурсосбережение, а также надежность.

Главной задачей эффективного транспорта газа является обеспечение требуемой производительности компрессорных станций (КС) в условиях изменяющихся условий подачи и потребления газа [6, 7]. Это необходимо для поддержания оптимального давления в магистральном газопроводе и обеспечения надежной работы газотранспортной системы. Примерами успешной реализации специалистами АО «Гипрогазцентр» проектов и технических решений с использованием программно-технических средств и систем автоматизации в области АСУ ТП объектов магистрального транспорта газа являются результаты исследований по энергоэффективному управлению электроприводными газоперекачивающими агрегатами (ЭГПА) методами инвариантных [8, 9] и нейронных систем [10, 11].

Разработаны и проанализированы структурные схемы искусственных нейронных сетей (ИНС) наблюдателя с разным количеством нейронов в среднем слое в системе частотного регулирования асинхронного приводного электродвигателя ЭГПА для измерения поведения тока ротора, основанного на задании тока статора [12, 13]. Проведено исследование погрешности работы ИНС наблюдателя в системе управления частотой асинхронного двигателя с помощью инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В качестве источника питания электропривода используется автономный инвертор. К фазе А выхода инвертора с ШИМ подключена обучаемая нейронная сеть, которая на базе ряда значений тока фазы предсказывает, каким будет ток в роторе двигателя. Доказано, что ИНС, обученная на зашумленных сигналах инвертора с ШИМ, может служить надежным и объективным наблюдателем. Время обучения и уровень погрешности зависят от количества нейронов в скрытом слое. Показано, что при заданном высоком уровне погрешности ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) существует оптимум на количество нейронов по времени обучения.

Проведен структурно-параметрический синтез и исследован в статических и динамических режимах нейросетевой прогнозирующий регулятор с 20 нейронами в скрытом слое скорости вращения приводного двигателя, обладающий повышенным качеством регулирования скорости

по сравнению с традиционным ПИ-регулятором, с обработкой возмущения по нагрузке при меньших значениях тока статора и вращающего момента.

Проведено сравнительное исследование оценок скорости двигателя ЭГПА в системе адаптивного управления по эталонной модели с использованием искусственной нейронной сети с компенсацией и без компенсации изменения сопротивления статора. Установлено, что система управления с компенсацией изменения сопротивления статора улучшает точность оценок скорости в пять раз и повышает устойчивость этой системы к изменению параметров двигателя даже на очень низких (ползучих) частотах вращения.

Разработаны и проанализированы реализации контроллера для векторного управления скоростью вращения приводного электродвигателя ЭГПА. Построена в программе MatLab полная математическая модель электропривода различной мощности. Выполнено сопоставление качества регулирования ПИ- и ИНС-регуляторов скорости. Установлена более высокая эффективность предлагаемого ИНС-контроллера по сравнению с эффективностью ПИ-регулятора.

Первая идентификация устройства была проведена с использованием панели инструментов ИНС. После идентификации были сгенерированы данные путем сравнения входных и выходных сигналов. Сеть обучалась с этими данными для получения оптимальных значений веса и постоянной составляющей с помощью функции `trainlm` (Левенберга – Маркарта обратного распространения ошибки). Веса и постоянные составляющие (пороговые величины) были применены к ИНС-прогнозирующему контроллеру.

По величинам тока двигателя, крутящего момента и скорости на холостом ходу и с нагрузкой эффективность ИНС-регулятора оказалась лучше, чем у ПИ-регулятора скорости. При этом показано, что ИНС-контроллер является более устойчивым к возмущениям по нагрузке, чем ПИ-регулятор. Эффективность ИНС-регулятора по определенным характеристикам значительно лучше, чем у ПИ-регулятора при тех же условиях. Поэтому доказано в целом, что качество регулирования ИНС-регулятора значительно лучше, чем у ПИ-регулятора.

Применение адаптивных систем управления на базе ИНС может дать существенно более точные оценки и быть более робастной по отношению к изменению параметров системы. Двухслойная ИНС в данном случае заменяет настраиваемую модель и механизм адаптации в обычной системе управления, но эталонная модель продолжает оставаться нужной для оценки потокосцепления ротора, которая в дальнейшем используется в качестве источника сигнала подстройки скорости.

Идентификатор на основе ИНС чувствителен к вариациям параметров, особенно на низких частотах вращения агрегата. Для решения этой проблемы и для того, чтобы сделать систему менее чувствительной к вариациям параметров, строится идентификатор значения сопротивления статора в новой эталонной модели, в которой сопротивление статора могло бы быть оценено в реальном времени.

Сравнение всех результатов имитационного моделирования показывает, что обычная система адаптивного управления работает эффективно, когда значения параметров системы точно известны и не изменяются во время работы. Система же с двухслойной ИНС может улучшить эффективность системы, но в условиях постоянства ее параметров. Эти системы подвержены воздействию небольших изменений параметров, которые возникают в процессе реальной работы. После внесения в структуру системы идентификатора эффективность системы значительно улучшается, что делает ее пригодной для практического применения.

Таким образом, системы, использующие ИНС-регуляторы, показывают лучшие характеристики по сравнению с традиционными САР по потребляемому току и энергии, уменьшается нагрузка на оборудование, повышается срок службы. Поэтому дальнейшее внедрение ИНС-регуляторов рекомендуется для проектировщиков оборудования нефтегазовых систем.

### Источники

1. Milov V.R. Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72(5). – P. 1095–1101.

2. Васенин А.Б. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Труды 8-й Междунар (19-й Всерос.) конф по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 404–409.

3. Крюков О.В. Диагностика электромеханической части ветро-энергетических установок / О.В. Крюков, А.В. Серебряков, А.Б. Васенин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 549–552.

4. Крюков О.В. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций / О.В. Крюков, Д.Г. Репин // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84–87.

5. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин / О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.
6. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations / O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135–140.
7. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: труды 9-й Междунар. конф. SICPRO-2012 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2012. – С. 222–236.
8. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.
9. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.
10. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.
11. Серебряков А.В. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: труды конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб., 2012. – С. 467–469.
12. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем / О.В. Крюков // Интеллектуальные системы: труды 11-го Междунар симпозиума / под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458–463.
13. Крюков О.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

**NEURAL NETWORK MANAGEMENT OF POWER SUPPLY  
OF THE MAIN GAS PIPELINES  
SEREBRYAKOV A.V., KRYUKOV O.V.**

*Questions of design of effective and reliable systems of operational management and diagnostics of electric motors of electrodriving compressor stations are considered. The statistics of failure of the most responsible installations of gas transmission systems is presented. The methodology and architecture of artificial neural networks is developed for receiving expected models of electrical machines. Examples of neuro and indistinct management of technical condition and parameters of cars are given. Tests of the partitioned networks, models of a method of the analysis of dynamics of spectral components, forecasting of sizes of current and temperatures of the stator are received. Comparative results of modeling of traditional and neural regulators of objects of the main transport of gas taking into account various operational factors of work have allowed to develop recommendations about application of a method of artificial neural networks.*

*Keywords: electrical driving compressor stations, the gas-distributing unit, system of power supply, artificial neural networks, tests of the partitioned networks, models of forecasting of sizes of current and temperatures of the stator.*

УДК 620.179.18

**КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ПО ПАРАМЕТРАМ ПЕТЕЛЬ  
МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА**

СОКОЛОВ Р.А., ТИУ, студент, falcon.rs@mail.ru

НОВИКОВ В.Ф., ТИУ, д.ф.-м.н., профессор, Novik1937@mail.ru

НЕРАДОВСКИЙ Д.Ф., ТИУ, старший преподаватель, denner81@mail.ru

*В процессе эксплуатации изделия из стали подвергаются различным механическим и термическим воздействиям, что вызывает рост усталостных изменений, вследствие чего происходит преждевременное старение материала, зачастую приводящее к техногенным катастрофам. Поэтому важно контролировать свойства стали и изделий из стали. Методика, предлагаемая в качестве дополнительного средства контроля, основана на явлении магнитного гистерезиса и была опробована на стали 34ХНЗМ. Данная сталь применяется для изготовления деталей, испытывающих в процессе эксплуатации высокие давления и температуры до 500 °С.*

*Предлагается использовать петли магнитного гистерезиса ферромагнетиков, полученных путем квазистатического перемангничивания. В этом случае ток намагничивания и размагничивания, а значит, и напряженность магнитного поля описывается пилообразной функцией времени. Тогда становится возможным представить петлю гистерезиса в виде однозначной функции напряженности поля, пропорциональной времени. Для полученных функций выполнено дискретное преобразование Фурье.*

*В данной работе исследуются корреляционные зависимости Фурье-спектра петель гистерезиса стали от структуры и механических свойств стали. К структурным изменениям в стали при ее термической обработке можно отнести, например, снятие напряжений, выделение карбидов и их изменение. Указанные превращения в стали существенно сказываются на форме петли, а так как гармонический Фурье-спектр чувствителен к изменению формы сигнала, то метод Фурье-анализа может служить дополнительным средством неразрушающего контроля структурных изменений в сталях вместе с измерением коэрцитивной силы, твердости и других параметров.*

*Ключевые слова: гармонический анализ, магнитная структуроскопия, магнитный гистерезис, коэрцитивная сила, твердость, аустенит, мартенсит, амплитуда гармоник, температура отпуска, твердый раствор.*

Свойства магнитных материалов зависят от их химического состава, способа изготовления и термической обработки.

Магнитные свойства материала могут изменяться в процессе изготовления, механической или термической обработки, когда происходят изменения структуры материала. Поэтому для решения вопроса о методике получения магнитных материалов с заданными свойствами важную роль играет изучение процессов, происходящих в строении магнитного материала.

Механические и термические воздействия на сталь на этапах производства и эксплуатации изделий часто вызывают рост усталостных изменений, что приводит к преждевременному старению материала и, как следствие, различного рода техногенным катастрофам.

На производстве причинами, приводящими к внутренним напряжениям, возникающим при пластической деформации, являются: протяжка, прокатка или волочение. При этом происходит уменьшение магнитной проницаемости материала [1]. После такой обработки материал находится в неоднородно-напряженном состоянии, напоминающем напряженное состояние после фазового превращения. Напряжения в материале почти всегда можно снять посредством отжига для повышения проницаемости материалов, пластически деформированных при изготовлении.

Также для магнитных параметров является важным влияние примесей. На рис. 1 представлены кривые намагничивания сталей с различным содержанием углерода: нижняя кривая получена на малоуглеродистой (мягкой) стали, содержащей 0,2 % С; средняя – на электротехнической стали, содержащей около 0,02 % С и отожженной примерно при 900 °С. Если данную сталь отжигать в течение нескольких часов при 1400 °С, то содержание углерода уменьшается в ней до 0,001 %, другие примеси также удаляются. Очищенный таким способом материал дает верхнюю кривую. Здесь использованы следующие обозначения:  $B$  – индукция внутреннего магнитного поля, измеренная в Гауссах (1 Гаусс =  $10^{-4}$  Тл);  $H$  – напряженность внешнего намагничивающего поля, измеренная в Эрстедах (1 Эрстед =  $10^3/4\pi$  А/м).

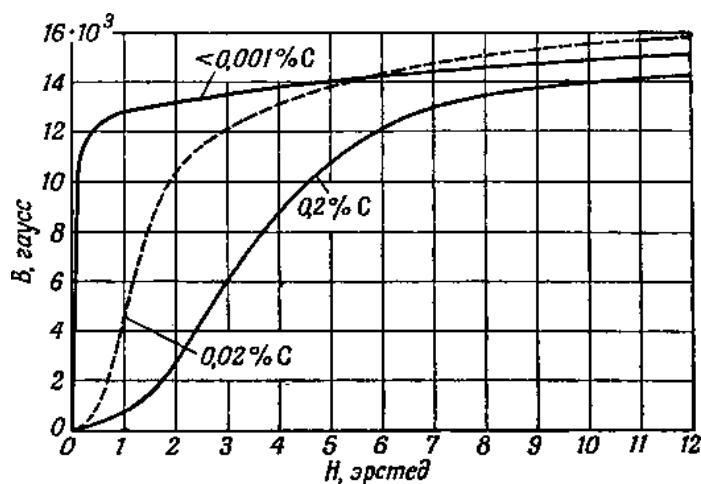


Рис. 1. Влияние примесей на магнитные свойства железа (отжиг в водороде при температуре 1400 °С уменьшает содержание углерода с 0,02 до 0,001 % и менее [1])

Контроль свойств стали является неотъемлемым процессом на производстве. Для контроля структуры и качества магнитных сталей используются магнитные методы нарушающего контроля, составляющие основу магнитной структуроскопии.

В магнитной структуроскопии для контроля состояния материала снимаются петли магнитного гистерезиса, состоящие из большого числа экспериментальных точек. Но только некоторые из этих точек применяются для целей неразрушающего контроля: коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, релаксационная коэрцитивная сила, дифференциальная магнитная проницаемость и др.

Приведенные выше магнитные параметры ферромагнетика, а также механические и структурные свойства связаны корреляционной зависимостью [2–4], которая устанавливается экспериментально. Часто коэффициенты корреляции для этих зависимостей не очень велики.

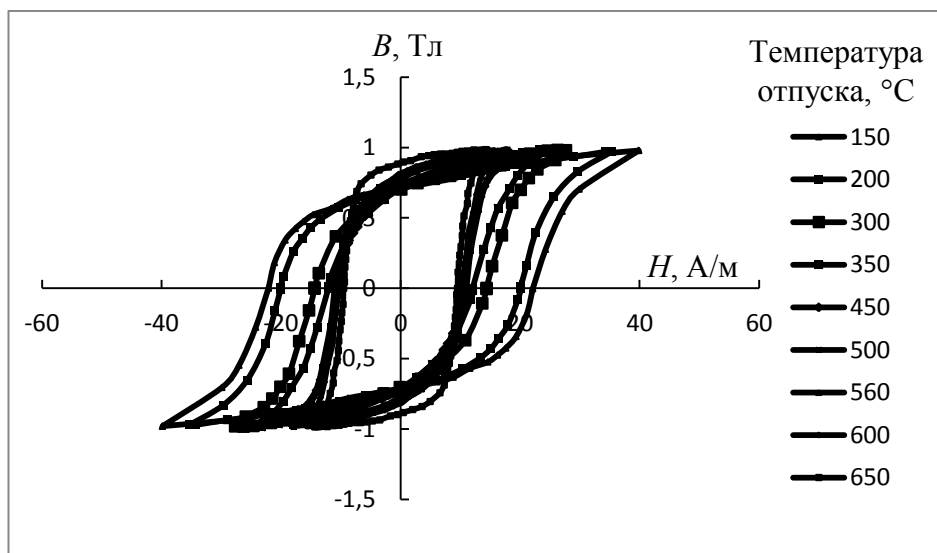


В структуроскопии также хорошо известны и апробированы методы, основанные на анализе ЭДС индукции в измерительной катушке с помощью цифрового анализатора спектра или дискретного преобразования Фурье [5]. Полученные гармоники Фурье-спектра ЭДС связываются с изменением структурных свойств материала. В этом случае фактически используются все точки петли магнитного гистерезиса.

Однако при таком виде анализа существуют факторы, снижающие достоверность результатов, а именно – наличие вихревых токов, которые ограничивают глубину промагничивания и искажают амплитуду и фазу выходного сигнала.

Целью работы является исследование возможности использования преимуществ гармонического анализа петель магнитного гистерезиса, полученных методом квазистатического перемагничивания.

Квазистатические петли гистерезиса ферромагнетиков можно снимать с помощью современных магнитометров (например, модель КРМ-Ц-МА). В такого рода приборах (как и в предлагаемой работе) ток намагничивания и размагничивания, а следовательно, и напряженность поля описываются некоторой пилообразной функцией. Это позволяет сделать замену  $t = H/k$ . Симметрично отобразим нисходящую (верхнюю) ветвь петли относительно вертикальной прямой, проходящей через точку  $H_{\max}$  (рис. 2). Таким образом, получается представление петли гистерезиса в виде функции  $f(H) = f(kt)$ , для которой может быть выполнено дискретное преобразование Фурье [6, 7].



a

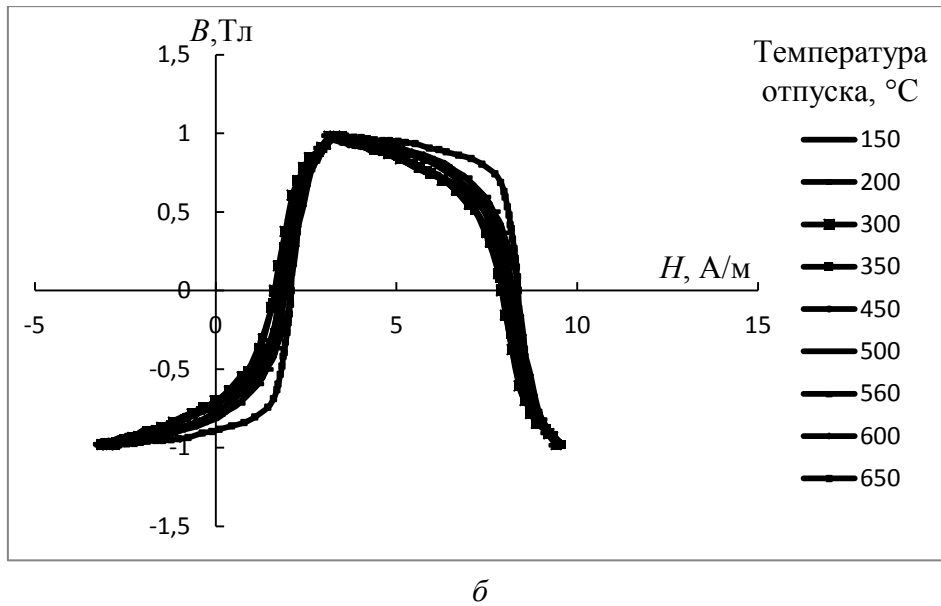


Рис. 2. Петли гистерезиса стали 34ХНЗМ, отпущенной при различных температурах: *a* – в исходном виде; *б* – развернутые петли, приведенные к периоду  $2\pi$

Рассчитаны амплитуды первой, третьей, пятой, седьмой гармоник петель гистерезиса стали 34ХНЗМ в зависимости от температуры отпуска (рис. 3). На данном рисунке буквой *A* обозначены безразмерные амплитуды гармоник Фурье-спектра.

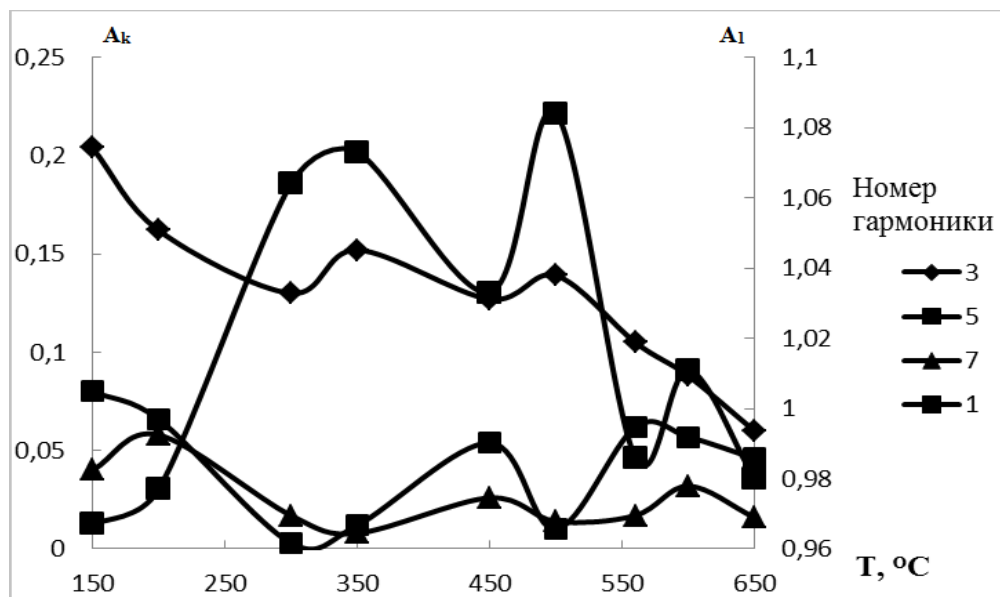
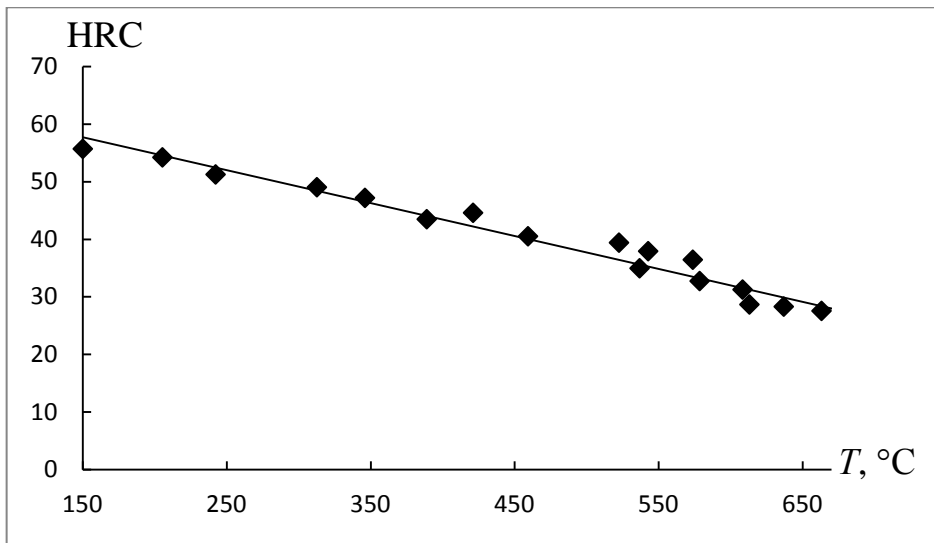


Рис. 3. Зависимости амплитуд  $A_1$ ,  $A_k$  ( $k = 3, 5, 7$ ) нечетных гармоник Фурье-спектра петель гистерезиса для стали 34ХНЗМ от температуры отпуска

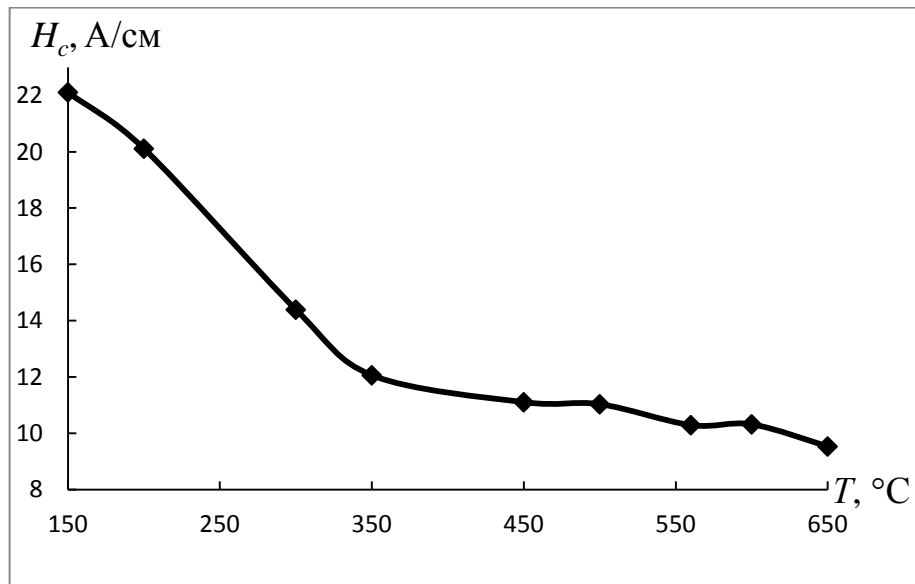
В работах [2, 8] показано, что в диапазоне температур отпуска от 150 до 250 °С для стали 34ХНЗМ наблюдается изменение намагниченности насыщения, обусловленное процессом распада мартенсита,

интенсивно протекающим при температуре около 200 °С и продолжающимся при более высоких температурах, заходящим в область температур 300–325 °С, и одновременным процессом распада остаточного аустенита и снятием закалочных напряжений.

Такой отпуск сопровождается резким изменением структуры стали и соответствующим изменением физических свойств [9], что можно рассмотреть на примере коэрцитивной силы и твердости, зависимости для которых приведены на рис. 4.



*a*



*б*

Рис. 4. Величина твердости (а) и коэрцитивной силы  $H_c$  (б) для стали 34ХНЗМ, отпущенной при различных температурах

Из приведенного графика для амплитуд третьей, пятой, седьмой гармоник можно заметить, что соответствующие им амплитуды существенно убывают в данном диапазоне температур. Сравнивая зависимости амплитуд гармоник и величины коэрцитивной силы и твердости от температуры отпуска, можно заметить корреляционную зависимость между их величинами.

При дальнейшем повышении температуры отпуска в диапазоне 250–450 °С происходит распад мартенсита на цементит и феррит, сопровождающийся уменьшением закалочных напряжений, происходит рост карбидных частиц, форма их начинает приближаться к равноосной [10]. Искажения решетки твердого раствора снижаются. Закономерная ориентировка решеток  $\alpha$ -фазы и цементита сохраняется до температуры 650–680 °С [11, 12]. В этом диапазоне происходит небольшой рост амплитуд третьей, пятой, седьмой гармоник, а также замедление падения величины коэрцитивной силы. Для амплитуды первой гармоники в данном диапазоне температур наблюдается рост и падение.

В интервале температур 450 – 650 °С происходит рекристаллизация матрицы, легирование цементита карбидообразующими химическими элементами, очищение решетки  $\alpha$ -Fe от углерода и коагуляция карбидных частиц, т.е. растворение мелких карбидных частиц и рост более крупных, происходит снижение пластических свойств и ударной вязкости, что объясняется дроблением блоков  $\alpha$ -фазы. Эти процессы взаимосвязаны и ведут к росту среднего размера частиц [13]. При температурах 550–600 °С имеет место растворение карбидов из-за повышения предела растворимости углерода в  $\alpha$ -Fe, происходит снятие напряжений, обусловленное завершением процесса измельчения блоков, а следовательно, и устранение искажений решетки, вызванных их связанностью [14]. На графиках этому соответствует падение амплитуды нечетных гармоник, а также дальнейшее падение величины твердости и коэрцитивной силы. Также можно заметить корреляционную зависимость между амплитудой пятой гармоники и величиной коэрцитивной силы в этом интервале температур, которая проявляется в возрастании значений этих величин при температуре 500 и 600 °С.

В интервале температур 350– 50 °С могут происходить коагуляция и сфероизация карбидных частиц, связанные с повышением температуры или продолжительности отпуска [14, 15]. В этой области температур наблюдается рост величины амплитуды седьмой гармоники. Пик дисперсионных напряжений, обусловленный обособлением кристаллов карбидов от твердого раствора, приходится на диапазон 400–500 °С. В данной области температур амплитуда первой гармоники возрастает.

Таким образом, можно говорить о том, что представленные результаты отражают чувствительность гармонических составляющих к структурным изменениям в стали и соответствующим им изменениям твердости и коэрцитивной силы, а именно – снятие напряжений, выделение карбидов, их изменение в результате увеличения температуры отпуска, что может служить дополнительным средством неразрушающего контроля структурных изменений в сталях.

### Источники

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – С. 5–15.
2. Михеев М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – С. 50–75.
3. Бида Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката / Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 252 с.
4. Михеев М.Н. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1985. – № 3. – С. 3–21.
5. Пономарев Ю.Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем, с учетом магнитного гистерезиса. IV. Применение к неразрушающему контролю / Ю.Ф. Пономарев // Дефектоскопия. – 1986. – № 7. – С. 67–78.
6. Белашов В.Ю. Эффективные алгоритмы и программы вычислительной математики / В.Ю. Белашов, Н.М. Чернова. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. – 160 с.
7. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином. Лаборатория базовых знаний, 2003. – 484 с.
8. Горкунов Э.С. Магнитные и электрические свойства сталей 18ХНВА, 34ХНЗМ и У9А в зависимости от режима термообработки / Э.С. Горкунов, М.Н. Михеев, Ф.Н. Дунаев // Дефектоскопия. – 1975. – № 3. – С. 119–126.
9. Бида Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. С. 79–84.
10. Могутнов Б.М. Термодинамика сплавов железа / Б.М. Могутнов, И.А. Томилин, Л.А. Шварцман. – М.: Metallurgia, 1984. – 208 с.

11. Михеев М.Н. Структура и физико-механические свойства сталей / М.Н. Михеев [и др.]. – Свердловск: Ин-т физики металлов Уральского научного центра АН СССР, 1981. – 31 с.

12. Кузнецов И.А. Магнитные, электрические и механические свойства высокохромистых сталей после различных термических обработок / И.А. Кузнецов, М.Н. Михеев // ФММ. – 1959. – Т. 7, № 4. – С. 514–526.

13. Курдюмов В.Г. Превращения в железе и стали / В.Г. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. – М: Наука, 1977. – 238 с.

14. Белоусов М.В. Превращения при отпуске стали / М.В. Белоусов, В.Т. Черепин, М.А. Васильев. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.

15. Бида Г.В. Магнитные свойства и возможность неразрушающего контроля закаленных и отпущенных высокохромистых сталей / Г.В. Бида, Е.Ю. Сажина, Т.П. Царьков // Дефектоскопия. – 1996. – № 8. – С. 21–29.

## **CONTROL OF STEEL STRUCTURE BY PARAMETERS MAGNETIC HYSTERESIS LOOP**

**SOKOLOV R.A., NOVIKOV V.F., NERADOVSKY D.F.**

*During the operation, steel products are under various mechanical and thermal impacts, that can cause the growth of fatigue changes, and as a result, premature aging of the material can happen. It leads to technosphere disasters. That's why, it is important to control the properties of steel and steel products. The method proposed as an additional means of control is based on the phenomenon of magnetic hysteresis and was tested on steel 34HN3M. This steel is used for manufacturing of different components operating at temperatures up to 500 °C and high pressure.*

*It is suggested to use a magnetic hysteresis loop of ferromagnetic materials, obtained by quasi-static magnetization. In this case, the current magnetization and demagnetization and hence the magnetic field, is described sawtooth function of time. Then it becomes possible to provide a hysteresis loop in the form of a single-valued function of the field strength that is proportional to the time period. Discrete Fourier transformation is applied for the obtain the given functions.*

*In this paper we study the correlations of the Fourier spectrum of the hysteresis loops of steel, dependent on a change of its structure and mechanical properties. The structural changes in the steel during its thermal processing may include, for example: stress relief, precipitation of carbides and their changing. The aforementioned changes in steel greatly affects the shape of the loop, out as a harmonic Fourier spectrum is sensitive to the waveform change, the method of*

*Fourier analysis may provide an additional means of nondestructive inspection of structural changes in the steels, together with the measurement of coercive force, hardness and other parameters.*

*Keywords: harmonic analysis, magnetic structurescopy, magnetic hysteresis, coercive force, hardness, austenite, martensite, amplitude of the harmonics, tempering temperature, solid solution.*

УДК 621.3:656.56

## **СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПОДАЧЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

СТЕПАНОВ С.Е., АО «Гипрогазцентр», к.т.н.  
КРЮКОВ О.В., АО «Гипрогазцентр», д.т.н., доцент,  
o.kryukov@ggc.nnov.ru

*Представлен комплексный анализ современных проблем и особенностей функционирования электромеханических систем с синхронными машинами в двигательном режиме при работе на объектах компрессорных станций магистральных газопроводов. Проанализированы возможные резервы расширения функциональных возможностей электрических машин на основе применения силовой преобразовательной и микропроцессорной техники. Получены результаты формализации физических процессов в двигателях и генераторах в виде математических моделей с перспективами реализации алгоритмов в микропроцессорных системах. Предложены схмотехнические и алгоритмические способы улучшения энергетических и динамических характеристик электромеханических систем. Представлены результаты компьютерного моделирования переходных процессов некоторых групп технологических агрегатов с вентиляторным моментом на валу – центробежных нагнетателей компрессорных станций.*

*Ключевые слова: магистральный газопровод, компрессорная станция, синхронная машина, моделирование, устойчивость, угол нагрузки.*

В энергетических отраслях современной отечественной и зарубежной промышленности для предприятий ГЭС, ГРЭС, ТЭС, АЭС синхронные машины мегаваттного класса (СМ) длительно и эффективно работают в качестве основных генераторов и электроприводов воздуходувок, буровых установок, компрессоров, насосов, шаровых

мельниц, прокатных станов и прочих ответственных механизмов [1, 2].  
целом, например, в газовой промышленности суммарная мощность синхронных электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) магистрального транспорта газа составляет более 6000 МВт, или 18 % от общей установленной мощности Единой газотранспортной системы России [3–5]. Нагрузка их может длительное время оставаться постоянной, а момент на валу машин изменяется незначительно и плавно в функции сезонного потребления газа, колебаний температуры окружающего воздуха или перехода на другие графики транспорта газа и зачастую носит случайный характер [6–8].

В то же время на металлургических заводах работает другая группа машин с единичной установленной мощностью до 20 МВт, которая характеризуется частым чередованием резких колебаний нагрузки, вызывающих качания ротора с перспективами выпадения двигателей из синхронизма. Кроме того, эта нестабильность СМ являются причиной колебаний активной и реактивной мощностей, вызывая недопустимые стандартами изменения напряжения и частоты сети соответственно.

Сохранение устойчивой и энергоэффективной работы системы во всем диапазоне в этих условиях является главной целью функционирования СМ, что достигается при решении следующих задач векторного управления координатами электропривода [9, 10]:

- роста перегрузочной способности и повышения стабильности режима СМ при сбросе (набросе) нагрузки или снижении напряжения (частоты) питающей сети;

- компенсации амплитуд механических колебаний ротора в переходных процессах при изменениях параметров «в малом» и «в большом»;

- стабилизации минимальных потерь мощности в электроприводных и генераторных системах и питающей сети во всем диапазоне реальных нагрузок;

- подавления пульсаций активной и реактивной мощности и напряжения в питающей сети.

В связи с тем, что одновременное решение всех указанных задач затруднительно из-за наличия единственного канала управляющего воздействия через систему возбуждения СМ, закон управления током возбуждения необходимо выбирать в соответствии с детерминированным или стохастическим характером нагрузки системы [11, 12].

Для синхронных машин с постоянной или медленно изменяющейся нагрузкой задание на ток возбуждения формируется в соответствии с векторной диаграммой статического режима СМ в зависимости



от нагрузки на валу двигателя и напряжения питающей сети. При этом регулятор возбуждения настраивается на поддержание постоянства реактивной мощности или коэффициента мощности СМ. Однако такой регулятор не позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при быстро меняющихся нагрузках, которые вызывают значительные качания ротора СМ.

Синхронный электропривод с резко переменной нагрузкой на валу с точки зрения повышения динамической устойчивости и эффективного гашения качаний ротора должен иметь систему автоматического регулирования (САР) возбуждения, которая работает в функции угла нагрузки  $\delta$  СМ и его производной. Информация о мгновенном значении угла нагрузки позволяет прогнозировать момент выпадения СМ из синхронизма и своевременно форсировать возбуждение, тем самым предотвращая асинхронный ход двигателя. Демпфирование колебаний ротора осуществляется посредством форсировок возбуждения в соответствии со значением скорости изменения угла нагрузки  $\delta$  на валу.

Непосредственное измерение угла нагрузки  $\delta$  с использованием магнитоэлектрических или вращающихся датчиков положения ротора требует серьезного вмешательства в конструкцию СМ, что повышает стоимость электропривода и снижает его эксплуатационную надежность. Наиболее приемлемым вариантом решения данной проблемы является использование методов косвенного определения угла нагрузки  $\delta$  с помощью микроконтроллерного идентификатора (МКИ), с малой погрешностью вычисляющего угол  $\delta$  без использования датчиков на валу СМ [13, 14]. Такой МКИ должен быть нечувствителен к разбросу параметров электромагнитной цепи СМ, адекватен во всех режимах векторного управления электроприводом и надежен в эксплуатации.

Для вычисления угла нагрузки  $\delta$  по аналитическим формулам напряжение статора  $U_s$  и ток возбуждения  $i_f$  измеряются непосредственно, а потокосцепление  $\Psi_f$  вычисляется косвенно. Активный  $i_{sy}$  и реактивный  $i_{sx}$  токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в соответствующих физических координатах.

Регулятор тока САР возбуждения СМ ЭГПА компенсирует постоянную времени обмотки возбуждения, чем обеспечивает требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения. Регулятор реактивного тока (реактивной мощности) необходим для обеспечения энергоэкономичного режима работы двигателя. В тех случаях, когда узел нагрузки не испытывает дефицита реактивной мощности, оптимальным является режим работы СМ с  $\cos \varphi$ , близким к 0,9, не связанный с потреблением реактивной мощности из сети и обеспечивающий

минимум электрических потерь и благоприятный тепловой режим двигателя. Регулятор напряжения обеспечивает стабилизацию напряжения в узле нагрузки путем изменения величины реактивной мощности, потребляемой или генерируемой двигателем в сеть.

Регулирование тока возбуждения в целях демпфирования качаний ротора осуществляется по углу нагрузки  $\delta$  и его производной, которые являются параметрами, непосредственно влияющими на устойчивость двигателя. Угол нагрузки  $\delta$  и его производная вычисляются МКИ в трехконтурной САР возбуждения СМ.

Для косвенного измерения угла нагрузки  $\delta$  используются сигналы датчика тока возбуждения ротора, датчика напряжения возбуждения, датчиков тока и напряжения статора. Для проверки работоспособности идентификатора угла нагрузки в среде Simulink была разработана имитационная модель СМ с микроконтроллерным идентификатором угла  $\delta$  и его производной. В результате моделирования работы микропроцессорного идентификатора при сбросе и набросе нагрузки СМ были получены временные зависимости угла нагрузки  $\delta$  и скольжения ротора (производной  $\delta$ ). При компьютерном моделировании было введено допущение, что параметры схемы замещения СМ известны точно и являются неизменными, а помеха на входе интегратора отсутствует.

Приведены результаты имитационного моделирования системы в MatLab, которые свидетельствуют о высокой точности разработанной САР и алгоритмов косвенного измерения угла  $\delta$  по токам и напряжениям в статорных контурах СМ ЭГПА и в его обмотке возбуждения без использования дорогостоящих и сложных датчиков, размещенных внутри и на валу электрической машины. Также представлены результаты внедрения разработанного микроконтроллерного идентификатора угла нагрузки в электроприводном газоперекачивающем агрегате одной из компрессорных станций магистрального транспорта газа ПАО «Газпром».

### Источники

1. Пужайло А.Ф. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода / А.Ф. Пужайло, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2(50). – С. 98–106.

2. Серебряков А.В. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: труды конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб., 2012. – С. 467–469.

3. Крюков О.В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 53–58.

4. Milov V.R. Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72(5). – P. 1095–1101.

5. Крюков О.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

6. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations / O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135–140.

7. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: труды 9-й Междунар. конф. SICPRO-2012 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2012. – С. 222–236.

8. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.

9. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: труды 10-й МНТК / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2015. – С. 368–386.

10. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.

11. Степанов С.Е. Система возбуждения синхронных двигателей турбокомпрессоров с идентификатором угла нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. – 18 с.

12. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

13. Крюков О.В. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В. Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная

электроника: труды 4-й ВНИК / под общ. ред. В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

14. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин / О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

## **MEANS OF OPTIMIZATION OF MANAGEMENT OF GAS-GIVING MAIN GAS PIPELINES**

STEPANOV S.E., KRYUKOV O.V.

*The complex analysis of modern problems and features of functioning of electromechanical systems with synchronous cars in the motive mode during the work on objects of compressor stations of the main gas pipelines is submitted. Possible reserves of expansion of functionality of electrical machines on the basis of use of the power converting and microprocessor equipment are analysed. Results of formalization of physical processes in engines and generators in the form of mathematical models with the prospects of realization of algorithms in microprocessor systems are received. Circuitry and algorithmic ways of improvement of power and dynamic characteristics of electromechanical systems are offered. Results of computer modeling of transition processes of some groups of technological units with the ventilatory moment on a shaft – centrifugal superchargers of compressor stations are presented.*

*Keywords: main gas pipeline, compressor station, synchronous car, modeling, stability, loading corner.*

УДК 621.22

## **ПРОЕКТ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ ПАРУСНОГО ТИПА**

СУШКОВ С.Л., КГЭУ, студент, joejohnson94@mail.ru

РУДАКОВ А.И., д.т.н., профессор, rud-38@mail.ru

*Развитие энергетики в настоящее время направлено на расширенное применение нетрадиционных источников: солнца, ветра, биотоплива и др., среди которых энергия ветра занимает наиболее важное место. Использование энергии ветра перспективно. Ее использование*

*экологически безопасно, что является одним из главных вопросов человечества. Использование ветрогенераторов парусного типа очень распространено в наши дни, они обладают рядом преимуществ над ветрогенераторами других типов, хотя и у них есть свои недостатки.*

*Ключевые слова: ветроэнергетическая электроустановка, ветрогенератор, ветряк, КИЭВ, ветер.*

Ветроэлектрические установки преобразуют энергию ветра в электрическую энергию. Пульсирующий характер скорости ветра, действующей на ветроколесо ветродвигателя, обуславливает изменчивость развиваемой мощности. В общем случае ветроагрегаты, не снабженные аккумуляторами энергии, вырабатывают энергию нестандартного качества, когда выходные параметры – напряжение и частота тока – колеблются в широких пределах. Использовать такую энергию можно для подъема воды с помощью центробежных или вихревых насосов.

Ветроэлектронасосные агрегаты наиболее просты и работают надежно в случае использования асинхронных короткозамкнутых двигателей и центробежных насосов. Сказанное относится в первую очередь к использованию трехфазной системы переменного тока. Таким образом, ветронасосный агрегат с электрической трансмиссией должен состоять из генератора трехфазного переменного тока, короткозамкнутого асинхронного двигателя и центробежного или другого ротационного насоса. Режим и эффективность работы такого агрегата в значительной степени определяются типом генератора и системой его возбуждения.

Асинхронный генератор с самовозбуждением от конденсаторов наиболее прост по конструкции, не имеет контактов трения и машинного возбуждения.

Таким образом, использование ветра в качестве источника электрической энергии эффективно.

Парусный ветрогенератор начинает работать при самой низкой скорости ветра 1–2 м/с, можно даже сказать, и при штиле. Это дает возможность парусному ветрогенератору, в отличие от более быстроходных ветрогенераторов, работать, а не ждать более сильных ветров.

Ветроэнергетическая электроустановка парусного типа отличается удивительной простотой конструкции. Вал ветряка – на подшипниках, естественно, на валу – ступица. К ступице прикреплены «мачты», обычно

от 8 до 24, а от мачт отходят косые паруса из прочной тонкой материи, как правило, синтетической. Другая часть паруса крепится шкотами, которые выполняют и роль регуляторов угла поворота парусов, и роль противштормовой защиты, т.е. самое примитивное парусное вооружение, проще, чем на самой простой яхте.

Именно эта простота конструкции и не позволяет отправлять парусный ветряк в архив технических достижений человечества. Для переносного, перевозного, походного, аварийного варианта парусный ветряк – достаточно достойная конструкция. В собранном варианте он представляет собой упаковку не больше, чем палатка. Паруса свернуты, мачты сложены. Даже 2-метровый парусный ветряк на ветре в 5 м/с даст верных 25–40 Вт энергии, чего с лихвой хватит для заряда аккумуляторов и связной и навигационной аппаратуры, да и для незамысловатой системы освещения на мощных светодиодах хватит.

Парусные ветрогенераторы хоть и имеют невысокий коэффициент использования энергии ветра, проще говоря, КПД, но они при малых скоростях ветра имеют хороший крутящий момент, что в сочетании с ветроколесом большого диаметра позволяет через мультипликатор из генератора «выжимать» неплохую мощность. Часто такие ветрогенераторы используют для отопления или подъема воды напрямую с механической передачей прямо на насос.

Ветроэнергетическая электроустановка парусного типа – одна из самых простых, но в то же время одна из самых неэффективных существующих ветряков. КИЭВ (коэффициент использования энергии ветра) парусного ветряка не может быть выше 20 % даже теоретически. Это означает, что вы будете получать только 1/5 часть мощности ветрового потока, попадающего на лопасти парусного ветряка. К счастью, только низким КИЭВ недостатки парусного ветряка и ограничиваются.

Стационарные парусные ветряки строят изначально большими именно из-за их невысокого КИЭВ – не менее 5–6 м диаметром, иначе нет смысла. Такой ветряк уже стабильно будет выдавать до 2–3 кВт энергии в сутки, и при рачительном ее использовании их можно превратить в 3–5 кВт осветительной энергии (например, для освещения теплицы или парника), а при использовании теплового насоса – в 5–6 кВт тепловой энергии, что позволит отапливать небольшой садовый домик в 20–30 м<sup>2</sup> и серьезно экономить топливо.

### Источники

1. Андрианов В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов [и др.] // ГЭИ. – 1960.
2. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: курс лекций / В.А. Агеев. – М., 2004.
3. Янсон Р.А. Ветроустановки: учеб. пособие / Р.А. Янсон; под ред. М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

УДК 658.264

### **КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММ ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА<sup>§</sup>**

ТАРАСОВА В.В., ООО «Инженерно-технический центр ГОРИСС»,  
инженер-программист, charming\_cerl@rambler.ru

АФАНАСЬЕВ В.В., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, д.т.н., профессор,  
avvteo@mail.ru

КАЛИНИН А.Г., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н., humanoid1984@yandex.ru

КОВАЛЕВ В.Г., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н., доцент, espp21@mail.ru

ТАРАСОВ В.А., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н., доцент, tarwol@yandex.ru

ФЕДОРОВ Д.Г., ООО «Инженерно-технический центр ГОРИСС», главный  
инженер, denisfg@yandex.ru

*Создан программно-технический комплекс мониторинга и управления теплоснабжением зданий и сооружений с использованием программируемого контроллера. Автоматизированный тепловой пункт регулирует потребляемую системой отопления здания мощность, необходимую для компенсации тепловых потерь, а также позволяет осуществлять дежурное и прогнозное управление.*

*Ключевые слова: математические модели, отопление, адаптивное управление, программируемый контроллер, автоматизированный тепловой пункт.*

---

<sup>§</sup> Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грант УМНИК № 5749 ГУ/2015.

Повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения зданий и сооружений является важной и актуальной задачей. Оптимальное управление энергопотреблением позволит снизить расход тепловой энергии на отопление зданий и сооружений. В настоящее время в существующих системах централизованного теплоснабжения качественное регулирование мощности систем отопления многих зданий осуществляется только изменением температуры теплоносителя согласно температурному графику. Качественное регулирование даже при полном соблюдении температурного графика не может обеспечить комфортных условий и эффективного использования тепловой энергии в широком диапазоне изменения температуры наружного воздуха.

Применяемые в настоящее время системы управления отоплением не всегда обеспечивают требуемые комфортные условия – происходят перетопы, вызывающие перерасход тепловой энергии, и недотопы, вызывающие перерасход электроэнергии, потребляемой для поддержания комфортной температуры в помещениях. Низкое качество регулирования тепловой мощности вызвано несовершенством алгоритмов управления, основанных на упрощенных математических моделях, и использованием усредненных теплофизических характеристик объектов. Каждое здание и сооружение представляет собой сложную систему со множеством взаимосвязанных элементов ограждающих конструкций и систем теплоснабжения, в которых протекают нестационарные процессы тепломассопереноса, и характеризуется индивидуальными теплофизическими характеристиками (статической и динамической удельной отопительной характеристиками) и статическими и динамическими параметрами системы отопления [1].

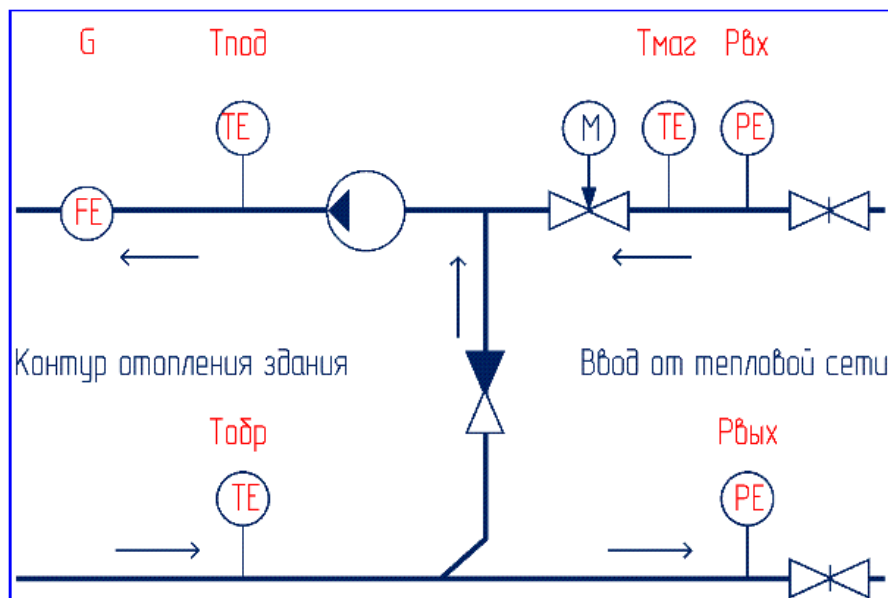
Во избежание перетопов и недотопов необходимы алгоритмы адаптивного управления теплоснабжением, учитывающие реальные характеристики объектов, погодно-климатические и функциональные условия. Такие алгоритмы могут быть реализованы в системах автоматического управления с программируемыми контроллерами с использованием реальных статических и динамических характеристик объектов [2].

Автоматические системы управления теплоснабжением предъявляют особые требования к математическим моделям тепловых процессов в зданиях и сооружениях. Математические модели должны быть легко реализуемы на персональных компьютерах и программируемых контроллерах, должны быть пригодны для работы в оперативном режиме реального времени, не усложняться при получении новой информации об управляемом объекте.



Программно-технический комплекс мониторинга и управления отоплением зданий и сооружений включает в себя математические модели и программы для расчета статических и динамических процессов теплопередачи в системах отопления и ограждающих конструкциях, определения реальных удельных отопительных характеристик и статистической обработки параметров режимов систем теплоснабжения, а также автоматизированный тепловой пункт с серийным программируемым контроллером ОВЕН ПЛК-150 и совместимую измерительную периферию ОВЕН [2].

Использованный программируемый контроллер позволяет реализовывать различные алгоритмы управления отоплением зданий и сооружений, учитывающие индивидуальные теплофизические характеристики здания, погодно-климатические и функциональные условия, статические и динамические параметры системы отопления. При этом параметры алгоритмов и сами алгоритмы можно менять за несколько минут дистанционно с серверного ПК, связь которого с ПЛК осуществляется при помощи Ethernet. Данные с ПЛК поступают на сервер, что позволяет проводить их обработку с помощью самых различных программных продуктов и передавать сведения о режимах работы системы отопления в Internet (рисунок).



Мнемосхема теплового пункта в сети Internet

Взаимодействие ПЛК с CODESYS или SCADA благодаря инструментам визуализации позволяет наблюдать изменение основных технологических показателей режима в наглядной графической форме

в режиме реального времени, задавать вручную или автоматически значения требуемой температуры внутри помещения и прогнозной температуры наружного воздуха, а также за несколько минут дистанционно обновлять и менять программу, установленную в контроллере. Программа в CODESYS позволяет считывать хранящийся во внутренней памяти ПЛК архив данных в виде простого текстового файла для дальнейшей обработки.

Автоматизированный тепловой пункт позволяет непрерывно контролировать текущие параметры режима работы, рассчитывать фактическую потребляемую мощность системы отопления здания, фактическую мощность тепловых потерь, а также мощность тепловых потерь при заданной температуре помещения и при прогнозной температуре наружного воздуха. Фактическая мощность системы отопления:

$$P_{\text{факт}} = G_2 \rho c (T_{\text{под}} - T_{\text{обр}}), \quad (1)$$

где  $G_2$  – объемный расход воды в контуре отопления здания;  $\rho$  – плотность воды;  $c$  – удельная теплоемкость воды;  $T_{\text{под}} - T_{\text{обр}}$  – разность температур подающей и обратной воды в контуре системы отопления здания.

Для обеспечения внутри помещения заданной температуры мощность системы отопления должна компенсировать тепловые потери здания, определяемые как

$$P_{\text{пот}} = q_0 V (T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}), \quad (2)$$

где  $q_0$  – удельная отопительная характеристика здания;  $V$  – отапливаемый строительный объем;  $T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}$  – разность фактической или желаемой заданной внутренней температуры воздуха внутри здания и непрерывно измеряемой фактической температуры наружного воздуха.

Задание желаемой температуры помещения по времени суток и дням недели позволяет обеспечить рабочее и дежурное отопление по выходным и праздничным дням, а также в ночное время. Если в качестве  $T_{\text{нар}}$  использовать прогнозную температуру наружного воздуха, то по формуле (2) определяется мощность тепловых потерь при прогнозной температуре.

Для соблюдения теплового баланса здания или сооружения регулятор адаптивного управления отоплением должен обеспечивать

выполнение равенства фактической мощности системы отопления и потребной мощности системы отопления с учетом технологического и бытового поступления тепловой энергии:

$$P_{\text{факт}} = P_{\text{пот}} - P_{\text{пост}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{пост}}$  – мощность технологического и бытового поступления в здание и сооружение тепловой энергии.

Существенное отличие разработанного алгоритма от типовых в том, что заданная температура воздуха внутри здания не определяет в явном виде положение регулирующего клапана, а лишь участвует в расчете его положения с учетом текущих параметров объекта и внешней среды. Управление осуществляется по возмущению, когда возмущающим фактором является переменная температура наружного воздуха или новая заданная температура в здании. Для обеспечения равенства (3) дополнительно применяется управление по отклонению с использованием обратной связи по фактической мощности системы отопления.

Автоматизированный тепловой пункт определяет и поддерживает мощность системы отопления, необходимую для компенсации тепловых потерь и обеспечения комфортных условий при существующих температурах наружного воздуха и воздуха в помещении, а также при заданной температуре в помещении, что позволяет осуществлять дежурное отопление. Вместо реального изменения температуры наружного воздуха возможно задание прогнозной температуры, а также одновременное задание желаемой температуры в помещении и прогнозной температуры. Необходимые для выбора режимов дежурного отопления и работы по прогнозу постоянные времени ограждающих конструкций определяются из расчета на математической модели нестационарного температурного поля стены [3], который позволяет определить передаточную функцию для температуры слоя на любой глубине стены и получить зависимость от времени среднеинтегральной температуры стены:

$$T_{sr}(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(x, \tau) dx, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина стены.

Среднеинтегральная температура характеризует изменение во времени теплового состояния ограждения и аккумулированного стеной тепла при переходе от одного теплового режима к другому. Постоянная

времени среднеинтегральной температуры кирпичной стены толщиной 0,5 м составляет 23 часа. Передаточная функция для среднеинтегральной температуры может быть использована в качестве параметра систем регулирования автоматизированных тепловых пунктов и определения удельной динамической тепловой характеристики здания и сооружения [4].

Предусмотрен переход с автоматического управления на дистанционное ручное, когда напряжение на управляющем клапане определяется положением движка на визуальной панели сервера, при этом система только контролирует и фиксирует все параметры режима.

Используемая в алгоритме адаптивного управления удельная отопительная характеристика зависит от коэффициентов теплопередачи элементов ограждений и геометрических параметров здания и сооружения. Статическая удельная тепловая характеристика здания с учетом его геометрических и теплофизических параметров может быть рассчитана по формуле [1]:

$$q_{ст} = \frac{P[k_{ст} + g_0(k_{ок} - k_{ст})]}{A} + \frac{0,9k_{пот} + 0,6k_{пол}}{h}, \quad (5)$$

где  $P$  – периметр здания, м;  $g_0$  – коэффициент, учитывающий остекление (отношение площади остекления к площади ограждения);  $A$  – площадь здания, м<sup>2</sup>;  $h$  – высота здания, м;  $k_{ок}$ ,  $k_{ст}$ ,  $k_{пот}$ ,  $k_{пол}$  – соответственно коэффициенты теплопередачи окон, стен, потолков, полов, Вт/(м<sup>2</sup> · К), которые могут быть определены математическим моделированием [5] или инструментальными замерами при энергетическом обследовании зданий и сооружений.

Расчеты по формуле (5) позволяют теоретически определить статическую удельную тепловую характеристику любого здания с учетом его геометрических параметров, формы, площади остекления и коэффициентов теплопередачи элементов ограждения, которые рассчитываются по специальной программе в С# для расчета параметров процессов теплопередачи через ограждения [5]. Регрессионный анализ архива данных ПЛК позволяет определять реальную отопительную характеристику здания и сооружения и ввести ее в программу ПЛК для коррекции алгоритма управления. Обработка данных по отопительному периоду 2015 – 2016 гг. позволила определить расход тепла на отопление и фактическую удельную отопительную характеристику здания, в котором установлен автоматизированный тепловой пункт. Результаты проведенных

экспериментальных исследований показали, что система автоматического управления и разработанные алгоритмы позволяют обеспечивать в здании комфортные условия в течение всего отопительного периода без перетопов и недотопов [2]. Ведется мониторинг и анализ режимов системы отопления и сбор статистических данных для оценки экономической эффективности.

### Источники

1. Афанасьев В.В. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений / В.В. Афанасьев [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 20–29.

2. Тарасова В.В. Адаптивное управление режимом теплоснабжения здания с помощью автоматизированного теплового пункта / В.В. Тарасова [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 117–123.

3. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий / В.В. Тарасова // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8. – С. 265–269.

4. Тарасов В.А. Динамические тепловые характеристики ограждающих конструкций / В.А. Тарасов [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 124–131.

5. Расчет параметров процессов теплопередачи через ограждения с учетом теплопроводности, конвекции и излучения: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014618236 от 13.08.2014 / ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»; В.В. Тарасова, В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов.

**COMPLEX OF MATHEMATICAL MODELS AND PROGRAMS  
FOR BUILDING ADAPTIVE HEATING CONTROL VIA PLC  
TARASOVA V.V., AFANASYEV V.V., KALININ A.G., KOVALEV V.G.,  
TARASOV V.V., FEDOROV D.G.**

*Created a software and hardware solution for monitoring and control of heating of buildings and structures with the use of a programmable controller. Automated heater controls consumption of the building heating system of the power needed to compensate for heat loss and allows the house and predictive management.*

*Keywords: mathematical models, heating, adaptive control, programmable controller, an automated thermal point.*

УДК 621

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ВОЗДУШНО-ГРАВИТАЦИОННОГО СКОРОСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ СУХИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

УСМАНОВ Н.В., ООО НИПИ «Технополис», инженер, химик-технолог,  
info@t-nipi.ru

ДАГАЕВ К.В., ООО НИПИ «Технополис», инженер-конструктор, КГЭУ,  
магистрант, virgil2610@mai.ru

*В настоящее время у многих людей возникает много вопросов о качестве того или иного товара, материала, услуги. К таким товарам и материалам можно отнести и жилье, будь то частный дом или многоквартирный. Люди всегда будут интересоваться тем, как был построен дом: монолит, панельный или кирпичный. Эти вопросы присутствуют в нашей жизни, чтобы увеличивать нашу уверенность в безопасности и качестве построенного дома. Но мало кто задумывался над вопросами, насколько качественные строительные смеси использует компания-застройщик и насколько они крепки и надежны.*

*Просмотрев большое количество информации об оборудовании, которое используют для смешивания сухих сыпучих материалов, авторы пришли к выводу, что они несовершенны. Их самые главные недостатки – это высокое энергопотребление, ограниченные объемы емкостей для смешивания и в связи с этим низкая производительность. Был проведен анализ путей решения данных недостатков и разработан универсальный воздушно-гравитационный скоростной смеситель.*

*Ключевые слова: мобильность, высокая степень перемешивания и гомогенизации, энергопотребление, производительность, универсальность, спираль Архимеда, широкая область применения, высокая износостойкость, высокая производительность.*

### Актуальность

В настоящее время для смешивания сухих сыпучих материалов используют мешалки. Их большое разнообразие, но у всех есть свои недостатки. К самым большим недостаткам промышленных мешалок сухих сыпучих материалов относятся:

- небольшой объем емкостей для смешивания;
- большое энергопотребление;
- малая производительность;
- низкий уровень смешивания.

Для решения данных недостатков были проведены анализы, по результатам которых авторы пришли к выводу, что можно и даже нужно сделать мешалку, которая была бы мобильной, могла бы работать с большими объемами сухих сыпучих материалов и при этом быть менее затратной и более производительной, с улучшенными качествами смешивания.

Универсальный воздушно-гравитационный скоростной смеситель актуален тем, что его габариты и способы установки позволяют ему быть более мобильным и подходить к работе как в ленточных конвейерах, так и просто во время строительства домов и других сооружений на месте строительства.

### **Недостатки и пути их решения**

1. Небольшой объем емкостей для смешивания. Данный недостаток – это один из важнейших характеристик любой мешалки или смесителя. Он отвечает за производительность в целом, так как объем емкости постоянно требует времени ожидания смешивания. Еще один немаловажный фактор – время загрузки этой емкости.

Универсальный воздушно-гравитационный скоростной смеситель выполнен в виде рамы, сваренной из стальных балок, в которую встроены два вала со спиралью, позволяющие устанавливать его как на конвейерных лентах, так и на месте строительства здания или сооружения.

2. Большое энергопотребление. Большое энергопотребление также связано с объемом емкости, так как большие объемы требуют большей тяги от двигателей на валах для их смешивания. В скоростном смесителе не имеется никакой емкости, и поэтому двигатели затрачивают меньше электроэнергии.

3. Малая производительность. Малая производительность обусловлена тем, что объемы смесей ограничиваются относительно малыми габаритами емкостей, высоким энергопотреблением, а также постоянной затратой времени на заполнение объема емкости после каждого смешивания.

Решением этой проблемы является хорошая пропускная способность универсального воздушно-гравитационного скоростного смесителя в связи с его технологическим исполнением в виде рамы, в которой расположены валы со спиралью Архимеда, которые и решают следующий недостаток многих мешалок низкого уровня смешивания. В универсальном воздушно-гравитационном скоростном смесителе перемешивание компонентов происходит воздушно-гравитационно, в нисходящем потоке сыпучих

материалов, воздушной среде, при очень больших оборотах вала рабочего органа (1500 об/мин), благодаря этому достигаются одновременно следующие очень важные эксплуатационные параметры:

- высокая степень перемешивания и гомогенизации смеси сыпучих материалов на межзерновом уровне по сравнению с другими;
- работа в непрерывном потоке;
- дробление крупных включений до размеров основной массы;
- малые габариты и вес смесителя, что немаловажно при реконструкции производств, стесненных производственных пространствах;
- малые удельные нормы расхода электроэнергии: суммарная установленная мощность электродвигателей составляет не более 8–15 кВт при производительности 30–120 т/ч.

Дробление достигается благодаря тому, что крупные частицы, попадая в рабочий орган, работающий на высоких оборотах, приобретают высокую кинетическую энергию и отбрасываются вверх, таким образом, они находятся в камере до уменьшения их размеров, сопоставимых с основной массой перемешиваемого материала.

Немаловажными из положительных качеств скоростного смесителя являются:

1. Высокая износостойкость рабочих органов благодаря тому, что:

- поверхность рабочего инструмента работает только на удар;
- рабочим инструментом является сам перемешиваемый, дробимый материал за счет соударения между частицами с высокой кинетической энергией.

Только около 20 % материала соприкасается с рабочим инструментом, оставшаяся масса материала перемешивается, дробится за счет соударения частиц с высокой кинетической энергией, при этом происходит перемешивание материала на межзерновом уровне.

2. Универсальность. Заменяя тип рабочего органа, можно смеситель использовать для однородного, глубокого гомогенного перемешивания различных материалов, например:

- исходного карьерного песка, включая мерзлые глыбы;
- сухой тонкомолотой негашеной извести и песка с карьерной влажностью;
- высокоактивной силикатной смеси, состоящей из тонкомолотой извести, песка с влажностью до 10 % с температурой до 70 °С после силосов;
- сухих строительных смесей;
- кормовых добавок в производстве комбикормов;
- химических компонентов и др.

3. Широкая область применения:

- в производстве силикатного кирпича, в том числе в производстве цветного силикатного кирпича;



- газосиликатобетона (ГСБ), ячеистого бетона;
- бетонных, железобетонных изделий, строительных растворов;

особенно эффективно использовать смесители серии «БУРАН» для предварительного гомогенного перемешивания исходных сухих материалов до увлажнения;

- сухих строительных смесей;
- в цементном производстве;
- в бетоно- и растворосмесительных узлах;
- в гипсовом производстве;
- в пищевой, нефтехимической и других областях.

4. Высокая производительность: 30 – 120 т/ч.

5. Отсутствие расходных материалов. Не требуется замена быстро изнашиваемых деталей. Так, на одном из ЗСК смеситель проработал более 4 лет без замены рабочих органов. Рабочий орган смесителя можно заменить в течение 20–40 мин, что важно для непрерывных технологических процессов. Ну и, так как не бывает идеальных двигателей, скоростной смеситель имеет свои недостатки.

Недостатком смесителя является то, например, что, когда смеситель располагается в пересыпном узле между двумя транспортерными лентами, при остановке нижней ленты рабочее пространство смесителя быстро заполняется и создает нагрузку для электропривода, превышая ее паспортные данные по нагрузке в несколько раз. Это может привести к перегреву и сгоранию электродвигателя, если не срабатывает тепловая или токовая защита. Поэтому при монтаже скоростного смесителя необходимо синхронизировать работы ленточных конвейеров и скоростного смесителя. При остановке нижнего ленточного транспортера должен отключаться электродвигатель скоростного смесителя.

Ну и, конечно, куда же без его экономической ценности и окупаемости.

### **Расчет срока окупаемости статическим методом без учета изменения стоимости денежных средств с течением времени**

При расчете используется формула вида

$$PP = K_0 / CF_{ст},$$

где  $PP$  – срок окупаемости в годах;  $K_0$  – сумма первоначально вложенных средств, руб.;  $CF_{ст}$  – ежегодные средние поступления, которые являются результатом реализации проекта, руб./год.

Расчет ежегодных средних поступлений:

$$CF_{\text{ст}} = Gm,$$

где  $G$  – количество производимой продукции в сутки, т/сут.;  $m$  – цена продукции, руб./т.

На рынке органоминеральные удобрения имеют цену от 20 руб./кг при розничной реализации в небольших фасовках. При восьмичасовом рабочем дне с производительностью пилотной установки 1 т/ч в сутки получим 8 т. Количество рабочих дней в году – 246 (за 2016 г.). Таким образом, ежегодные средние поступления:

$$CF_{\text{ст}} = 12 \cdot 500000 = 6 \text{ млн руб./год.}$$

Срок окупаемости:

$$PP = \frac{500000}{6000000} = 0,083.$$

УДК 621.314

## **ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА\*\***

ФЕДОРОВ О.В., НГТУ, д.т.н., профессор, nntu@nntu.nnov.ru

СЕМЕНОВ А.С., Политехнический институт (филиал) СВФУ, к.ф.-м.н.,  
доцент, mptisvfu@mail.ru

ЕГОРОВ А.Н., СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО), начальник  
участка, itsk@alrosa.ru

*Данная статья посвящена вопросам измерения и анализа показателей качества электрической энергии при проведении энергетического обследования (энергоаудита) учебно-лабораторного корпуса. Поставлены задачи измерения показателей качества электроэнергии. Рассмотрены вопросы обеспечения норм качества электроэнергии и определен перечень измеряемых характеристик согласно*

---

\*\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова» (регистрационный номер заявки 516).

*требованиям ГОСТ 32144-2013. Получены и проанализированы результаты измерений, относящиеся к продолжительным изменениям характеристик и к случайным событиям: отклонение частоты, медленные изменения напряжения, колебания напряжения и доза фликера, несинусоидальность напряжения, в том числе гармонические составляющие, несимметрия напряжения, прерывания напряжения, провалы и перенапряжения, импульсные напряжения. Также были измерены активная и реактивная мощности, коэффициент мощности, фазовые углы между током и напряжением. Сделаны выводы и заключения по полученным результатам.*

*Ключевые слова: электрическая энергия, показатели качества, энергетическое обследование, энергоаудит, электромагнитная совместимость, медленные изменения напряжения, провалы напряжения, перенапряжение, гармоники.*

К основным задачам измерения и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) при проведении энергетического обследования относятся: обнаружение помех и их оценка; регистрация измеренных числовых характеристик в целях обработки и отображения результатов; оценка измеренных значений показателей качества электроэнергии на соответствие установленным требованиям; определение источника помех; проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии. Для организации измерений необходимо определить вид контроля, точку осуществления измерений и виды контролируемых ПКЭ. В зависимости от длительности наблюдения можно выделить два вида организации контроля: периодический и постоянный [1, 2]. Отличие постоянного контроля от периодического заключается в непрерывности времени измерений и обработки результатов.

Возможны два варианта реализации поставленной задачи по измерению и анализу ПКЭ: система мониторинга, основанная на методах виртуального моделирования физических процессов [3–5]; система мониторинга, основанная на применении контрольно-измерительных приборов [6]. На сегодняшний день методы виртуального моделирования широко применяются во всех областях науки и производства, так как они позволяют оперативно и с наименьшими затратами получать определенные параметры конечного результата. Основным преимуществом второго варианта системы мониторинга ПКЭ является высокая точность, так как метод основан на измерениях

физических величин [7–14]. Также исследования, направленные на использование этого метода, позволяют определить принципиально новые требования к приборам учета и мероприятиям, обеспечивающим оптимизацию ПКЭ [15].

Объектом исследования в данной научной работе являлся учебно-лабораторный корпус Политехнического института (филиала) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном. Измерения показателей качества электроэнергии проводились в рамках ежегодного энергетического обследования здания.

Измерения ПКЭ и их дальнейший анализ проводились согласно требованиям ГОСТ 32144-2013 [16] с использованием приборов «Ресурс-UF2М» и программного обеспечения «Ресурс-UF2Plus». Приборы были установлены в двух местах: в узле ввода учебно-лабораторного корпуса (УЛК) и на трехфазном источнике питания лабораторного стенда.

В качестве результатов измерений приведем данные, относящиеся к продолжительным изменениям характеристик и к случайным событиям: отклонение частоты, медленные изменения напряжения, колебания напряжения и доза фликера, несинусоидальность напряжения, в том числе гармонические составляющие, несимметрия напряжения, прерывания напряжения, провалы и перенапряжения, импульсные напряжения. Также покажем результаты измерения активной и реактивной мощности, коэффициента мощности, фазовых углов между током и напряжением. Измерения, согласно требованиям ГОСТа, проводились в течение семи дней. Для наглядного сравнения приведем данные в рабочий и выходной день.

1. Отклонение частоты: в рабочий день отклонений частоты, выходящих за требования ГОСТа, не наблюдалось; в выходной день в районе 15:00 наблюдались отклонения частоты. В этот момент времени значения частоты колебались от 49,67 до 50,74 Гц, что превышает допустимое значение на 0,34 Гц в течение 100 % времени измерения.

2. Медленные изменения напряжения. Фазные напряжения: в рабочий день значения отклонения по фазе С превышают допустимое значение 10 % и достигают 11,95 %, что в 1,2 раза больше нормы; в выходной день превышение достигает 13,12 %, что в 1,3 раза больше нормы. Показания на фазах А и В не превышают допустимого значения. Межфазные напряжения: в рабочий день значения отклонения не превышают допустимого значения; в выходной день в отдельные часы превышение допустимого значения достигает 10,84 %, что в 1,08 раза больше нормы.

3. Колебания напряжения и доза фликера: в рабочий день показания кратковременной дозы фликера в целом колеблются возле нормативного значения 1,38 и лишь в районе 15:00 происходит увеличение до 1,95; в выходной день наблюдаются более частые и более сильные превышения допустимого значения, максимальная величина которых в районе 01:30 составляет 5,5 pst. Соответствие по длительной дозе фликера ни в рабочий, ни в выходной день не выполняются, величина достигает 1,18, что превышает значение 1,0 за весь интервал измерений.

4. Несинусоидальность напряжения. Коэффициенты гармонических составляющих: показания коэффициентов  $n$ -х гармонических составляющих и суммарный коэффициент и в рабочий, и в выходной дни за весь период измерений не превышал допустимых значений для всего ряда гармоник трехфазной сети. Коэффициент искажения синусоидальности: показания коэффициентов искажения синусоидальности фазных и межфазных напряжений не превышает допустимого значения, которое равно 8 %.

5. Несимметрия напряжения: коэффициент несимметрии по обратной последовательности и в рабочий, и в выходной дни не превышает допустимого значения, и его максимум составляет 0,9 %, тогда как коэффициент несимметрии по нулевой последовательности в рабочий день превышает допустимое значение, которое составляет 4 %, за весь период измерения на 0,69 и составляет 4,69 %.

6. Случайные события: за весь период измерений прерываний, провалов, перенапряжений и импульсных напряжений не наблюдалось.

7. Значения активной и реактивной мощности: в рабочий день значение активной мощности ярко выражено увеличивается в рабочее время с 08:30 до 17:30 в среднем с 4,5 до 9 кВт (в 2 раза), тогда как в выходной день такого значительного увеличения не происходит, и лишь в период с 19:00 до 21:00 происходит увеличение в среднем с 4,5 до 6 кВт, что связано с уборкой учебных помещений.

8. Коэффициент мощности: показания коэффициента мощности, как в рабочий, так и выходной день, в целом являются соответствующими требованиям и не опускаются ниже 0,93. В рабочий день в отдельные периоды времени коэффициент мощности достигает значения 1, это связано с работой большого количества люминесцентных ламп.

9. Фазовые углы между током и напряжением: показания фазовых углов между токами и напряжениями в рабочий и выходной день примерно равны и составляют по фазам: А – 450, В – 150, С – 00.

В заключение подведем итоги по соответствию измеренных показателей качества электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013.

В рабочий день соответствие качества электроэнергии выполняется: по отклонению частоты, по несинусоидальности напряжения, по несимметрии напряжения по обратной последовательности; не выполняется: по медленному изменению напряжения, по колебаниям напряжения и дозам фликера, по несимметрии напряжения по нулевой последовательности. В выходной день соответствие качества электро-энергии выполняется: по несинусоидальности напряжения, по несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности; не выполняется: по отклонению частоты, по медленному изменению напряжения, по колебаниям напряжения и дозам фликера. Хотелось бы отметить, что прерываний, провалов, перенапряжений и импульсных напряжений, характеризующихся случайными процессами в системе электроснабжения, за весь период измерения зафиксировано не было.

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдается существенное перенапряжение по всем фазам. Отклонения частоты скорее можно отнести к единичным случайным процессам, чем к периодическому несоответствию. Отклонение коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности имеет место быть, но величина не является критичной и обуславливается высоким значением перенапряжения.

Работа по измерению ПКЭ при проведении энергетического обследования УЛК будет в дальнейшем продолжена. Для выявления причин высоких значений перенапряжения измерения будут проведены в двух точках: на трансформаторной подстанции, находящейся поблизости от учебно-лабораторного корпуса, и на узле ввода УЛК.

### **Источники**

1. Кузнецов Н.М. Теоретические основы выбора показателей качества электрической энергии по обеспечению электромагнитной совместимости в распределительных системах электроснабжения: отчет о НИР; код ГРНТИ № 52.01.84 / Н.М. Кузнецов, А.С. Семенов, В.С. Шипулин. – Мирный: МПТИ (ф) СВФУ, 2012. – 85 с.

2. Кузнецов Н.М. Качество электрической энергии горных предприятий: монография / Н.М. Кузнецов [и др.]. – М.: Академия Естествознания, 2012. – 68 с.

3. Семенов А.С. Разработка системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // Мир современной науки. – 2013. – № 1(16). – С. 12–15.

4. Шипулин В.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника / В.С. Шипулин, А.С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 344–347.
5. Семенов А.С. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий: монография / А.С. Семенов, В.М. Хубиева, Н.Н. Кугушева. – М.: Перо, 2015. – 100 с.
6. Карташев И.И. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография / И.И. Карташев [и др.]. – М.: Перо, 2013. – 142 с.
7. Семенов А.С. Разработка системы мониторинга показателей качества электроэнергии горных предприятий / А.С. Семенов // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 11. – С. 68–73.
8. Semenov A.S. Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry / A.S. Semenov // Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Academic Conference / Ed. by Yan Maximov. – 2012. – P. 301–304.
9. Semenov A.S. Measurement and analysis parameters quality of electric energy on the mining enterprises / A.S. Semenov // Science and Society: The Collection 4<sup>th</sup> International Conference on Science and Technology Held by SCIEURO in London, 26 June 2014. – Printed and Bound by Berforts Information Press Ltd, UK. – 2014. – P. 22–28.
10. Кузнецов Н.М. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях / Н.М. Кузнецов, А.С. Семенов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4–2. – С. 295–299.
11. Кузнецов Н.М. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника / Н.М. Кузнецов [и др.] // Горный журнал. – 2014. – № 1. – С. 23–26.
12. Семенов А.С. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике / А.С. Семенов, Н.М. Кузнецов // Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31–34.
13. Семенов А.С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трехфазного источника питания / А.С. Семенов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–6. – С. 1210–1215.
14. Семенов А.С. Измерение и анализ показателей качества электрической энергии потребителей промышленных предприятий / А.С. Семенов [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6(84). – С. 480–485.

15. Семенов А.С. Выбор контрольно-измерительной техники для регистрации показателей качества электроэнергии / А.С. Семенов, В.А. Бондарев // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 414–416.

16. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

## **MEASUREMENT AND ANALYSIS OF POWER QUALITY INDICATORS EDUCATIONAL LABORATORY BUILDING**

FEDOROV O.V., SEMENOV A.S., EGOROV A.N.

*This article is devoted to study measurement and analysis of electric power quality in energy audit of educational laboratory building. The task of measurement of electric power quality. The problems of ensuring the quality standards of electricity and list of the measured characteristics in accordance with the requirements of GOST 32144-2013. Obtained and analyzed the results of measurements relating to long changes in the characteristics and random events: frequency deviation, slow voltage changes, voltage fluctuations and flicker, nonsinusoidality voltage, including harmonics, unbalance voltage, interruption voltage, dips and over-voltage, pulse voltage. There were also measured active and reactive power, power factor, phase angles between current and voltage. The findings and conclusions on the obtained results.*

*Keywords: electric energy, power quality, energy audit, electromagnetic compatibility, slow voltage changes, voltage failures, over-voltage, harmonics.*

УДК 621.315.2

## **ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

ХАБЕТДИНОВА М.И., КГЭУ, магистрант, milya-habetdinov@mail.ru

*Представлен метод частичных разрядов диагностики кабельных линий.*

*Ключевые слова: частичный разряд, диагностика, неразрушающий метод диагностики, искорковый анализатор.*



Метод частичных разрядов является наиболее интересным и перспективным на сегодня в диагностике изоляции электро-оборудования.

Частичный разряд – это искровой разряд очень маленькой мощности, который образуется внутри изоляции или на ее поверхности в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. Частичные разряды появляются в слабом месте кабельной линии под воздействием переменного напряжения и приводят к постепенному развитию дефекта и разрушению изоляции.

Частичный разряд – это частичный электрический пробой в диэлектрическом материале, который возникает в газовых и водяных включениях внутри изоляции, в результате чего образуется пространство между проводником и экраном. Единица измерения частичного разряда – пикокулон (пКл). Критерием, общим для всех производителей новых средневольтных кабелей из СПЭ-изоляции, является 5 пКл. При этом участки кабеля с уровнем частичных разрядов 100 пКл и выше использовать нельзя.

В зависимости от целей и классификации испытаний, измерение частичных разрядов может проводиться как в процессе нормальной работы энергетического оборудования, без вывода его из эксплуатации (режим «on-site»), так и при выведенном из эксплуатации оборудовании (режим «off-site»), при использовании малогабаритных источников испытательного напряжения различных форм.

Основная опасность частичных разрядов связана со следующими факторами:

- невозможностью их выявления методом обычных испытаний повышенным выпрямленным напряжением;
- риском их быстрого перехода до состояния пробоя и, как следствие, созданием аварийной ситуации на кабеле.

Частичные разряды разрушают изоляцию кабеля, медленно и незаметно выводят сам кабель из строя. Его полное разрушение – всего лишь вопрос времени, это может занять и несколько часов, и несколько дней, и даже несколько лет.

Наиболее частые источники частичных разрядов – это разделки концевых и соединительных муфт (рис. 1).

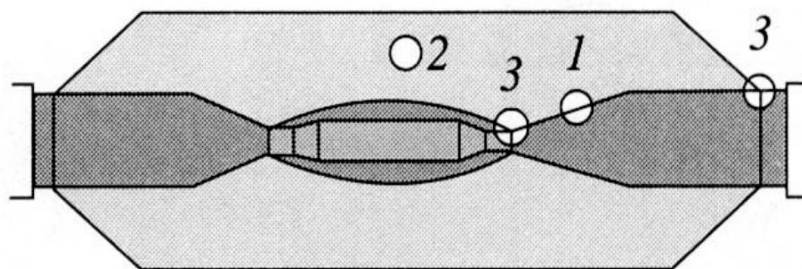


Рис. 1. Щели (1), пустоты (2) и пустоты с проводниками (3) в муфтах

Измерение частичных разрядов и определение их источника позволяет существенно повысить достоверность диагностики изоляции кабелей тем, что выявляет места и участки с явно выраженной дефектностью изоляции. Метод измерения частичных разрядов, в свою очередь, обеспечивает получение достоверной информации об ошибках монтажа или изменениях электрических свойств какого-либо участка изоляции кабеля, которые еще не привели к пробое. Вовремя определив место образования частичных разрядов, возможно отремонтировать кабель, прежде чем он станет совершенно непригодным для использования и повлечет аварию и перебой в электроснабжении.

С другой стороны, у данного метода есть ряд ограничений и недостатков:

1. Основную массу всего кабельного хозяйства энергосетевых предприятий России составляют кабели со сроком службы в несколько десятков лет. Испытание данных кабелей повышенным напряжением приводит к значительному ухудшению их состояния и к сокращению остаточного ресурса кабеля.

2. В настоящее время существует проблема качества прокладки и монтажа концевых и соединительных гарнитур, вводимых в эксплуатацию кабельных линий: зачастую состояние таких линий даже хуже, чем проложенных десятки лет назад, и данные линии также нежелательно подвергать интенсивной нагрузке.

3. Положительные результаты испытаний повышенным напряжением не гарантируют последующей безаварийной работы кабельных линий. Как правило, в ближайшие месяцы после испытаний некоторые из успешно прошедших испытания линий выходят из строя, что связано с разрушением изоляции частичными разрядами.

4. На данный момент существует много вопросов, касающихся испытаний кабельных линий 110 кВ и выше с изоляцией, например, из сшитого полиэтилена, а именно: чем испытывать и как.

Как известно, согласно Европейским стандартам при испытаниях кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена испытательное напряжение рассчитывается по следующей формуле:

$$U_{\text{исп}} = 3U_0,$$

где  $U_0 = U_{\text{ном}} \sqrt{3}$  – фазное напряжение.

Сущность метода измерения частичных разрядов заключается в следующем.

В момент появления частичного разряда в кабельной линии возникает два коротких импульсных сигнала, длительности которых составляют десятки-сотни наносекунд. Эти импульсы распространяются к разным концам кабельной линии. Измеряя импульсы, достигшие начала кабеля, можно определить расстояние до места их возникновения и уровень.

Основными узлами измерительной схемы являются: компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях и высоковольтный адаптер.

Компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях может быть выполнен в виде совокупности измерительного блока и портативного компьютера (как показано на рис. 2) или в виде специализированного измерительного прибора.



Рис. 2. Структурная схема измерений в кабельных линиях

Высоковольтный адаптер служит для развязки компьютерного анализатора и источника воздействующего напряжения.

Так, короткие импульсы напряжения, распространяющиеся в кабельной линии, беспрепятственно проходят на вход рефлектометра или на выход частичных разрядов, но не попадают в низкочастотный (50 или меньше герц) источник напряжения.

В то же время напряжение  $(1...1,2)U_{\text{раб}}$  от источника беспрепятственно поступает на кабельную линию. В качестве воздействующего напряжения может служить напряжение промышленной сети или напряжение от источника сверхнизкой частоты.

Фирмой СТЭЛЛ был разработан и изготовлен в виде самостоятельного прибора компьютерный анализатор дефектов – ИДК (индикатор дефектов кабелей). Этот прибор испытывался на атомных электростанциях России и в энергопредприятиях некоторых зарубежных стран.

Последовательность анализа дефектов кабельной линии с частичными разрядами и представление результатов измерений на примере прибора ИДК показаны на рис. 3.

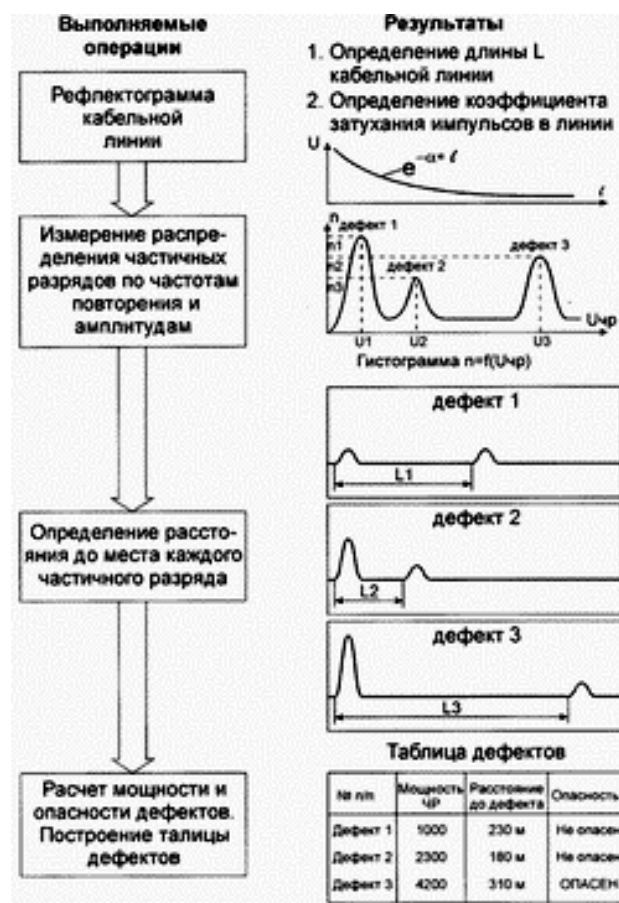


Рис. 3. Последовательность анализа дефектов кабельной линии с частичными разрядами и представление результатов измерений

Сначала кабельная линия отключается от источника воздействующего напряжения, вызывающего появление частичных разрядов. При помощи кнопки «Кн» на высоковольтном адаптере (или специального устройства) проверяют разряженность кабельной линии. Компьютерный анализатор включают в режим импульсного рефлектометра и снимают рефлектограмму кабельной линии. По рефлектограмме определяют длину кабельной линии и коэффициент затухания импульсов в линии. Затем переключают компьютерный анализатор в режим измерения частичных разрядов.

Далее снимают гистограмму – распределение частоты следования  $n$  импульсов частичных разрядов от амплитуд импульсов от частичных разрядов  $U_{ч.р.}$ , пришедших к началу кабельной линии. По гистограмме  $n = f(U_{ч.р.})$  можно сделать вывод о наличии и количестве слабых мест (потенциальных дефектов) в кабельной линии. Так, на рис. 3 показана гистограмма кабельной линии с тремя потенциальными дефектами.

Дефект 1 имеет самую высокую частоту следования  $n_1$  и самую маленькую амплитуду импульсов  $U_1$ . Соответствующие параметры имеют дефекты 2 и 3.

По амплитуде импульсов частичных разрядов, представленных на гистограмме, еще нельзя делать вывод о мощности частичного разряда в месте дефекта, так как пока неизвестно расстояние до него.

В то же время известно, что импульсы частичных разрядов, имея малые длительности, сильно затухают при распространении по кабельной линии. Поэтому следующим шагом является измерение расстояния до каждого из дефектов. Компьютерный анализатор дефектов позволяет измерить расстояние до каждого из дефектов  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  и сохранить их в памяти. Далее, на основе гистограммы и данных о расстоянии до каждого из дефектов, компьютерный анализатор вычисляет мощность частичных разрядов в каждом из дефектов и строит сводную таблицу дефектов. Указанная таблица может быть вызвана на экран компьютерного анализатора.

В настоящее время на рынке представлены различные диагностические измерительные системы. Они значительно различаются видом источника напряжения и методом диагностики. При невыполнении обязательных требований система регистрации частичных разрядов просто не в состоянии обеспечить выделение сигналов частичных разрядов из помех, обеспечить надежную локализацию и идентификацию дефектов.

## **Приборы HVPD для измерения частичных разрядов**

Первый в мире ручной прибор для online-диагностики частичных разрядов (OLPD) с возможностью управления через Android-приложение – OLPD Manager. Эта уникальная, не имеющая аналогов в мире технология ручного тестирования PDS Insight измеряет уровни частичных разрядов, количество импульсов и накопительную активность частичных разрядов на частоте 50/60 Гц для того, чтобы критичность любого частичного разряда была оценена. Благодаря сочетанию трех типов датчиков частичных разрядов (TEV, HFCT и AA), устройство подходит для online-диагностики частичных разрядов большинства типов электростанций среднего и высокого напряжения, включая силовой кабель, КРУ, двигатели, генераторы и трансформаторы.

Система HVPD Longshot служит для осуществления локализации дефектов кабельных линий и мониторинга оборудования под напряжением до 750 кВ в режимах онлайн и оффлайн. Прибор предназначен для применения как в исследовательских лабораториях, так и в производственных условиях, на стендах приемо-сдаточных испытаний промышленных предприятий.

Прибор Shirla является новейшей разработкой компании Baug и предназначен для испытания кабелей и их оболочек напряжением до 10 кВ, предварительной локации мест повреждений, а также точного определения местоположения дефектов оболочек с использованием метода шагового напряжения. Измерения проводятся при помощи специального измерительного моста по методу Мюррея и Глейзера. При помощи встроенного источника высокого напряжения постоянного тока Shirla может осуществлять предварительную локацию как низкоомных, так и высокоомных повреждений кабелей.

Неразрушающие методы контроля позволяют получить информацию о состоянии кабельных линий без ухудшения их работоспособности. А наблюдение за параметрами в динамике позволяет сделать более уточненный прогноз работы кабеля.

Непрерывная неразрушающая диагностика как эффективный способ изучения возникающих дефектов способна, в первую очередь, модернизировать производство электрооборудования.

**DIAGNOSTICS OF CABLE BUSES BY METHOD OF PARTIAL DIGITS  
KHABETDINOVA M.I.**

*The method of partial digits of diagnostics of cable busses is in-process presented.*

*Keywords: partial digit, diagnostics, non-destructive method of diagnostics, a spark is an analyzer.*

УДК 621.31

**ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ГАРМОНИК ВХОДНОГО ТОКА  
МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ  
РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

ХАБИБУЛЛИН А.И., УГНТУ, студент, aydarhabibullin@gmail.com  
ДРАЧЕВ А.Н., УГНТУ, студент, drachev.2011@mail.ru  
РЯБИШИНА Л.А., УГНТУ, к.т.н, ryabli@yandex.ru

*Рассматриваются вопросы возникновения высокочастотных помех при работе высоковольтных преобразователей частоты. Анализируется принцип формирования напряжения автономного инвертора напряжения. Показано, как нагрузка автономного инвертора напряжения и выпрямителей влияет на гармонический состав входного тока многоуровневого преобразователя частоты.*

*Ключевые слова: многоуровневый преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, высшие гармоники входного тока.*

В современных экономических условиях во всех отраслях промышленности актуальны вопросы энергосбережения и оптимизации потребления электроэнергии. На сегодняшний день до 65 % всей вырабатываемой в РФ электроэнергии потребляется промышленными предприятиями, главными энергопотребителями которых являются мощные высоковольтные электродвигатели (ЭД). Современным направлением оптимизации режимов работы промышленного электропривода является внедрение частотного регулирования. И если преобразователи частоты (ПЧ) для низковольтных электродвигателей (ЭД) уже стали доступными и получили широкое распространение в промышленности, то высоковольтные многоуровневые преобразователи по-прежнему остаются дорогостоящими и сложными по конструкции [1].

При работе любого преобразователя частоты одним из важнейших свойств является уровень помех, генерируемых как в направлении электродвигателя, так и в направлении сети. Наличие помех вызывает перегрев обмоток, преждевременное старение изоляции, увеличение потерь мощности, снижение КПД и т.д. Подавление высших гармоник входного тока и выходного напряжения при работе как низковольтных, так и высоковольтных преобразователей частоты является актуальной задачей.

Совершенствование многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ) связано с совершенствованием качеств выходного напряжения при минимизации потерь в инверторном блоке [2]. Причиной данных потерь является многократное переключение силовых ключей. Использование многоуровневых схем преобразователя частоты позволит снизить потери в инверторном блоке [3].

На рис. 1 представлена схема многоуровневого преобразователя частоты. Преобразователь состоит из входного многообмоточного трансформатора Т, системы управления СУ и нескольких уровней силовых ячеек  $1 \dots n$ , каждая из которых представляет собой автономный инвертор напряжения (рис. 2). Параллельно каждой из силовых ячеек включен шунтирующий байпасный ключ К, который замыкается в случае неисправности ячейки. Наиболее сложным и дорогостоящим элементом МУПЧ является входной многообмоточный трансформатор (иногда называемый многофазным), число вторичных обмоток которого в каждой фазе соответствует количеству уровней выходного напряжения (обычно применяется схема с шестью уровнями) [4]. Фазовый сдвиг между напряжениями соседних обмоток при эквивалентной 18-фазной схеме составляет  $10^\circ$ . При этом фазовый сдвиг, например, между первой и шестой обмотками группы составляет  $50^\circ$ .

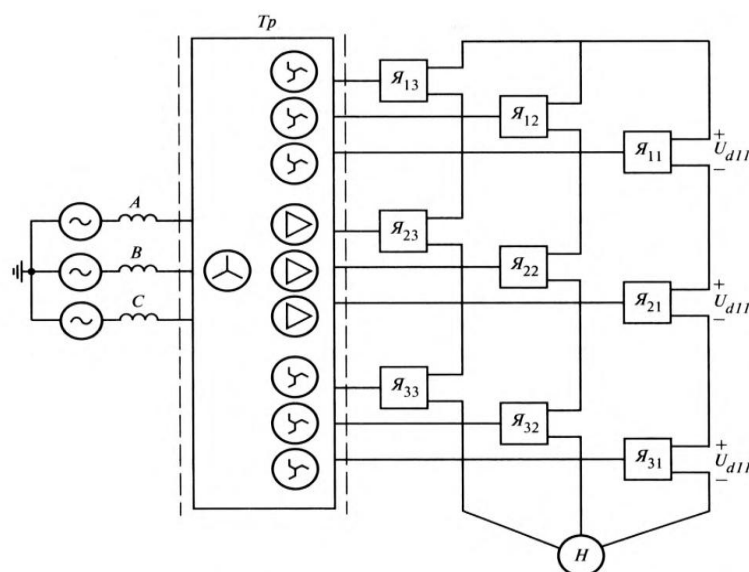


Рис. 1. Схема многоуровневого преобразователя частоты



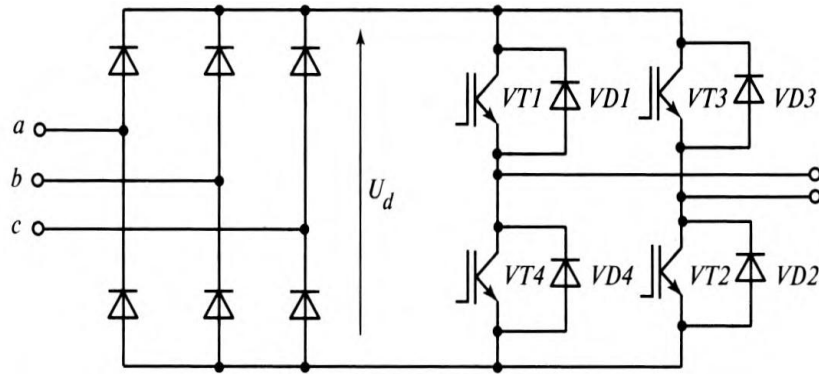


Рис. 2. Схема одной ячейки многофазного преобразователя

Каждая из вторичных обмоток трансформатора подключена к силовой ячейке, состоящей, как показано на рис. 2, из диодного выпрямителя и однофазного автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), выполненного на биполярных транзисторах с изолированным затвором – IGBT. В случае неисправности какой-либо ячейки дефектная ячейка шунтируется (выводится из работы), а управление оставшимися ячейками автоматически корректируется, сохраняя симметрию выходного напряжения между тремя фазами. Этим обуславливается весьма высокая надежность МУПЧ [5].

При работе МУПЧ посредством согласованного управления силовыми ячейками всех уровней в каждой фазе формирует выходное напряжение, максимально приближенное по форме к гармоническому. Рассмотрим форму выходного напряжения МУПЧ и его частотный спектр на примере преобразователя с числом уровней  $n = 5$  и выходной частотой 50 Гц (рис. 3).

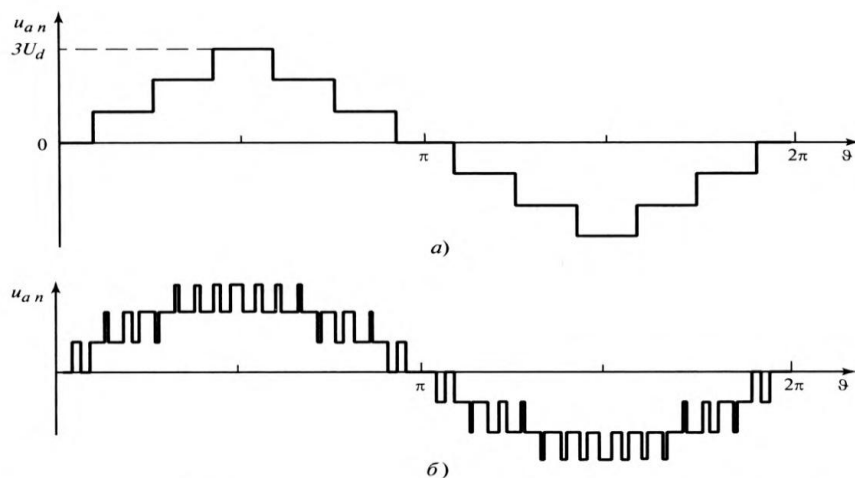


Рис. 3. Выходное напряжение фазы ячейко-цепочечной трехуровневой схемы

Помехи, вносимые ПЧ в сеть, отрицательно влияют на работу других потребителей электроэнергии [1]. Использование однофазных АИН приводит к появлению во входном токе выпрямителей субгармоник с частотами, кратными выходной частоте. Особую сложность представляет расчет гармоник тока с наличием распределения нагрузки в процессе регулирования выходного напряжения.

Принцип работы многоуровневого ПЧ в том, что выходное напряжение фазы МПЧ образуется как сумма импульсов напряжений отдельных АИН, сдвинутых по несущей частоте. При всем при этом наряду с основной гармоникой складываются и высшие гармоники (5, 7-я и т.д.). Чтобы достичь высокого качества выходного напряжения, необходимо несущую частоту принимать достаточно высокой. Даже при минимальной несущей частоте 600 Гц возникают значительные потери на переключение ключей.

Рассмотрим амплитудное регулирование с использованием многоуровневой синусоидальной ШИМ, когда среднее значение выходного напряжения фазы МПЧ на интервале модуляции изменяется по синусоидальному закону. Известно, что активная мощность, передаваемая АИН в нагрузку, определяется первыми гармониками его выходного напряжения  $U(1)$  и тока  $I(1)$ . Таким образом, загрузка в процессе регулирования выходного напряжения МПЧ при постоянном выходном токе однозначно определяется  $U(1)$ .

Нагрузка АИН и выпрямителей влияет на гармонический состав входного тока МПЧ. Если исключить потери мощности в АИН, получаем равенство мощностей на входе  $P_d$  (потребляемой от выпрямителя) и выходе  $P_n$ , где  $U(1)$ ,  $I(1)$  – действующие значения первых гармоник выходного напряжения и тока АИН;  $U_d$ ,  $I_d$  – напряжение и ток на входе АИН.

В звене постоянного тока МПЧ для подавления высших гармоник входного тока эффективными являются многофазные (12, 18 и т.д.) схемы выпрямления. Рассмотрим влияние загрузки выпрямителей на эффективность подавления гармоник. Входной ток 12-фазной схемы выпрямления (вторичные обмотки трансформатора соединены по схемам «звезда» и «треугольник» с количеством витков  $w_1$  и  $w_2 = \sqrt{3}w_1$ ), при количестве витков первичной обмотки  $w$  коэффициент трансформации  $n = w/w_1$ .

Амплитуды гармоник тока зависят от загрузки АИН, и полное подавление гармоник с кратностями 5, 7, 17, 19 достигается только при идентичной загрузке АИН. Поэтому амплитудное регулирование

неэффективно. Для эффективного подавления высших гармоник с кратностями 5, 7, 11, 13 необходимо, чтобы выпрямители питали АИН одного уровня напряжения разных фаз МПЧ при одинаковой нагрузке. Следует отметить еще один фактор – наличие во входном токе выпрямителя, работающего на однофазный мостовой АИН [4], субгармоник с частотой  $\omega_c = 2\omega_2 - \omega$  ( $\omega_2, \omega$  – частоты, соответственно, выходного напряжения МПЧ и сети). Субгармоники возникают при пульсациях входного напряжения АИН с частотой  $2\omega_2$ . Подавление субгармоник возможно при соответствующей организации звена постоянного тока [3]. Эффективное подавление субгармоник во входном токе МПЧ достигается при междуфазовой их компенсации без сдвига напряжений, при питании выпрямителей АИН одного уровня в разных фазах МПЧ от вторичных обмоток трансформатора с одинаковой фазой напряжений.

При этом все АИН в фазе МПЧ формируют одинаковые по фазе и амплитуде первой гармоники импульсы напряжения, которые сдвинуты по несущей частоте. Напряжение фазы МПЧ равно сумме напряжений АИН. Таким образом, наряду с основной гармоникой суммируются и высшие 5 и 7-я гармоники. Это доказывает целесообразность использования ШИМ с высокой частотой для уменьшения значительных потерь на переключение ключей АИН.

При избирательном формировании напряжения АИН со сдвигом по основной гармонике напряжений инверторов в фазе каскадного МПЧ минимальное количество переключений достигается при амплитудном регулировании, когда полуволна выходного напряжения формируется в виде 1 импульса. Гармонический состав при данной модуляции при относительной длительности импульса 5/6: 5-я гармоника составляет 5,36 %, 7-я – 3,87 %, 11-я – 9,09 %, 13-я – 7,69 %. Из условия симметрии следующим шагом является введение двух дополнительных импульсов, положение которых характеризуется углами  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . При использовании однополярной модуляции добавляется только одно переключение ключей.

Эффективное подавление 5 и 7-й гармоник возможно практически во всем диапазоне регулирования первой гармоники, для 11 и 13-й – только в узком диапазоне регулирования (0,9...1). Для подавления гармоник более высокого порядка (11-й и выше) целесообразно осуществлять формирование напряжений АИН со сдвигом на угол  $\gamma$  по основной гармонике. Исследования показали, что следует выбирать промежуточное значение  $\gamma$  из условия одновременного максимального подавления 11 и 13-й гармоник [2]. Анализ показывает, что такое условие достигается

при  $\gamma = \pi/6n$ . Соответствующие значения  $K_{o(k)}$  при этом приведены в таблице. Наличие сдвига по основной гармонике обуславливает некоторое снижение основной гармоники. Однако это снижение незначительно [6].

#### Коэффициент ослабления гармоник

$N$	2	3	4	5	6
$K_{o(1)}$	1,009	1,010	1,011	1,011	1,011
$K_{o(5)}$	1,260	1,313	1,331	1,340	1,344
$K_{o(7)}$	1,643	1,781	1,832	1,855	1,868
$K_{o(11)}$	7,661	9,495	10,190	10,520	10,704
$K_{o(13)}$	7,661	10,510	11,620	12,158	12,456
$K_{o(17)}$	1,644	3,094	3,714	4,023	4,196
$K_{o(19)}$	1,261	3,094	3,921	4,341	4,580

Рассмотренный принцип формирования напряжения отдельного АИН при эффективном подавлении 5 и 7-й гармоник имеет ограниченный диапазон регулирования. Причина – возрастание доли 11 и 13-й гармоник в процессе регулирования. Поэтому, чтобы ограничить значение этих гармоник на уровне 5–10 % с учетом значения  $K_o$ , диапазон регулирования первой гармоники напряжения АИН должен не превышать  $Um_{(1)} = 0,2 - 1$ . Таким образом, за счет одинаковой загрузки всех 5 или 3, или 2 АИН в процессе регулирования выходного напряжения обеспечивается эффективное подавление гармоник входного тока.

#### Источники

1. Гузеев Б.В. Современные высоковольтные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей / Б.В. Гузеев, М.И. Хакимьянов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2011. – № 3. – С. 441–449. – Режим доступа: [http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev_1.pdf).
2. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти: учеб. пособие для вузов / В.А. Шабанов. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2009. – 156 с.
3. Шавелкин А.А. Улучшение характеристик каскадного многоуровневого преобразователя частоты / А.А. Шавелкин. – Донецк: Изд-во ДонНТУ. – С. 28–31.

4. Шабанов В.А. Понятие устойчивости электротехнических комплексов транспорта нефти и нефтепродуктов при нарушениях в системе электроснабжения / В.А. Шабанов, В.Ю. Алексеев, Р.З. Юсупов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий. – Уфа, 2009. – С. 237–244.

5. Гузеев Б.В. Структурные схемы современных высоковольтных преобразователей частоты / Б.В. Гузеев, М.И. Хакимьянов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2012. – № 2. – С. 4–11. – Режим доступа: [http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev_2.pdf).

6. Шабанов В.А. Проектирование электроснабжения установок и предприятий нефтяной отрасли: учеб. пособие для вузов / В.А. Шабанов. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2009. – С. 220–224.

7. Шабанов В.А. Перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. – 63 с.

## **EFFECTIVE SUPPRESSION OF MULTI-LEVEL FREQUENCY OUTPUT CURRENT VARIABLE SPEED DRIVES**

KHABIBULLIN A.I., DRACHEV A.N.

*The problems of the emergence of high-frequency interference in the work of high-frequency transducers. The principles of formation of autonomous voltage inverter voltage. It is shown as a stand-alone load voltage of the inverter and the rectifier effect on the harmonic structure of the input current multi-level inverter.*

*Keywords: multi-level frequency converter, standalone inverter voltage, input current harmonics.*

УДК 544.452

## **РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В СФЕРЕ ЖКХ**

ХАЛИУЛИН Р.Р., КНИТУ–КАИ, аспирант, [steel-toreto@mail.ru](mailto:steel-toreto@mail.ru)  
ПАВЛОВ Г.И., КНИТУ–КАИ, д.т.н., профессор, [pavlov16@mail.ru](mailto:pavlov16@mail.ru)

*В связи с климатическими условиями в весенне-осенний периоды происходят значительные разрушения асфальтобетонных покрытий*

*автомобильных дорог и улично-дорожной сети из-за наличия на них воды и снега. Во избежание дорожно-транспортных происшествий и дальнейшего разрушения дорожного полотна эксплуатационные организации дорожной отрасли, независимо от погодных условий, систематически проводят ямочный ремонт. Одним из важнейших факторов качественного проведения ямочного ремонта является отсутствие на дефектных участках грязи, песка, снега и воды. Для выполнения этого регламента работ необходимо выдуть, высушить и нагреть основание и кромки ям и выбоин. Этого можно добиться, например, использованием так называемой термогазодинамической установки. Отличительной особенностью предлагаемой установки является ее автономность – для работы установки не требуется электричества. Высоконапорная газовая струя формируется не электровентилятором, а мотовентилятором, приводимым в движение мини-ДВС. Для получения нагретых газов к мотовентилятору монтируется специально разработанное для этих целей горелочное устройство.*

*Представленная работа связана с разработкой горелочного устройства, обеспечивающего короткий факел пламени. Такие горелочные устройства в настоящее время не выпускает ни одна компания (это ноу-хау).*

*Учитывая сложность физико-химических процессов, происходящих при горении топлива в горелочных устройствах, преобладающим методом исследований является экспериментально-теоретический. Теоретические исследования проводились с использованием программного комплекса ANSYS-Fluent.*

*Ключевые слова: горелочное устройство, термогазодинамическая установка, горение.*

Из-за нагрузок и перегрузок материалы дорожного покрытия изнашиваются и стареют. Износ происходит и по другим причинам, например из-за изначально невысокого качества материалов, не технологичного выполнения дорожно-строительных операций. Распространенной технологической ошибкой является недостаточное уплотнение дорожного полотна, из-за чего со временем образуются неровности, деформации, шелушения, выкрашивания, трещины, сколы, выбоины, ямы (рис. 1).



Рис. 1. Ямочные разрушения на дорогах

Практика установила, что ежегодно локальный текущий ремонт покрытия требуется для 2–3 % общей площади дороги (рис. 2). Когда серьезные повреждения и дефекты достигают 12–15 %, общепринято ставить на ремонт все 100 % этой площади. Систематическое «лечение» дорожного покрытия осуществляют разными методами, средствами и материалами, что в совокупности определяет качество, срок службы и стоимость, т.е. эффективность ремонтных работ, главная цель которых – обеспечить на дороге безопасное движение автотранспорта с разрешенной правилами дорожного движения скоростью.



Рис. 2. Локальный текущий ремонт покрытия



Выбор технологического метода ямочного ремонта должен отвечать определенным требованиям или критериям. Заделка дефекта должна быть высокого качества и соответствовать требуемым показателям плотности, прочности, ровности и шероховатости основной части покрытия. Отремонтированный участок в результате правильно проведенной работы прослужит долго. Для соблюдения технологического процесса ремонта дорожного покрытия необходимо наличие или доступность требуемых материалов, машин и установок. В зависимости от погодных условий выбирают метод ремонта, простой или сложный, но в любом случае он должен соответствовать критериям оперативности для своевременного открытия дорожного движения. И, естественно, ремонтные работы должны быть низкочастотными.

В России на большей части дорог с усовершенствованным типом покрытий уложен асфальтобетон (95–96 %), поэтому основное количество и наибольшее разнообразие ремонтных материалов, машин, технологий и новых разработок относится именно к асфальтобетонным покрытиям.

Самым доступным и распространенным методом их ремонта является ямочный ремонт горячей асфальтобетонной смесью, поскольку в распоряжении дорожных служб имеется широкая сеть заводов по производству асфальта и все традиционные исходные материалы (щебень, песок, минеральный порошок, битум), необходимые для приготовления смеси.

При использовании горячей технологии качество заделки дорожного покрытия очень высокое, но этот метод ремонта зависит от погодных условий и точности соблюдения технологии, в том числе жесткого температурного режима (рис. 3).



Рис. 3. Ремонт покрытия при плохих погодных условиях и ремонт покрытия при нагреве асфальтобетона



Одним из важнейших факторов качественного проведения ямочного ремонта является отсутствие на поверхностях ремонтируемых участков песка, снега и воды. Для выполнения этого регламента работ необходимо выдуть, высушить и нагреть основание и кромки ям и выбоин.

Это может обеспечить разрабатываемая термогазодинамическая установка. Основной термогазодинамической установки является короткофакельное вихревое горелочное устройство.

Испытательный стенд предназначен для экспериментального определения параметров факела пламени (геометрических размеров, светимости пламени и газового состава) в зависимости от различных факторов, таких как дальнобойность струи горючего газа, подаваемого в камеру смешения хордально, частота упорядоченных пульсаций газового потока. Общий вид испытательного стенда показан на рис. 4.

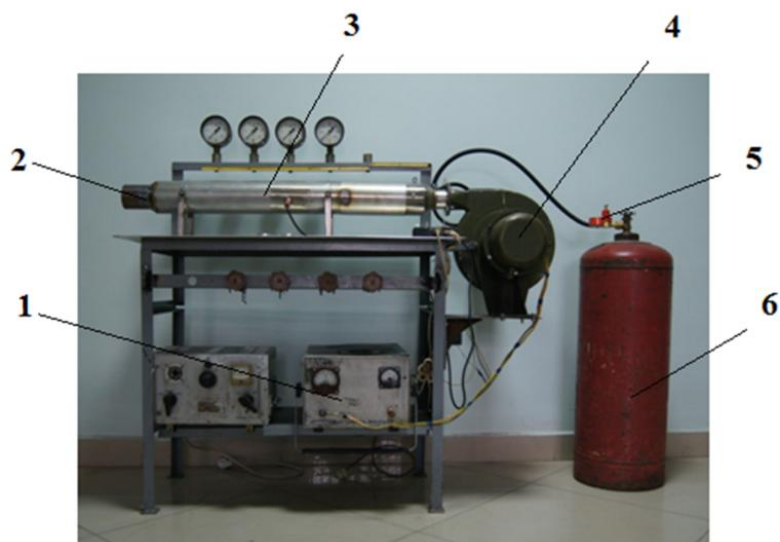


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда: 1 – пульт управления; 2 – сопло; 3 – горелочный узел; 4 – электровентиль; 5 – газовый редуктор; 6 – баллон с пропаном

Принципиальная схема испытательного стенда приведена на рис. 5. Испытательный стенд представляет собой раму сварной конструкции, на которой при помощи двух стоек крепится горелочный узел 1.

Газовое топливо (пропан) в горелочный узел подается по трубопроводу. Расход газа регулируется при помощи редуктора 7. Воздух в горелочный узел надувается электровентилем 3. Напряжение питания электровентильатора 4 регулируется с пульта управления 1.

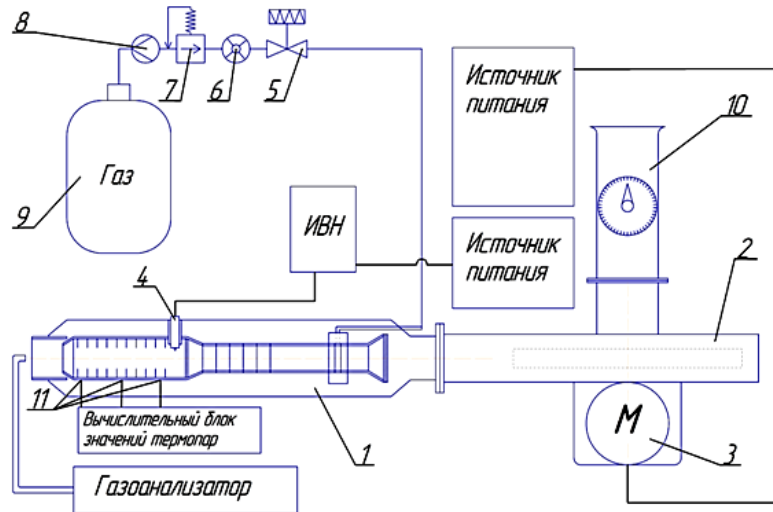


Рис. 5. Принципиальная схема испытательного стенда: 1 – горелочный узел; 2 – воздушный канал; 3 – электроventильатор; 4 – запальная свеча; 5 – ventиль; 6 – расходомер газа; 7 – редуктор; 8 – обратный клапан; 9 – баллон с пропаном

На рис. 6 представлена схема горелочного устройства, установленного на испытательном стенде. В форкамере установлены ребра в виде кольцевых пластин, которые позволяют создать турбулентные пульсации для эффективного сжигания топлива на короткой длине.

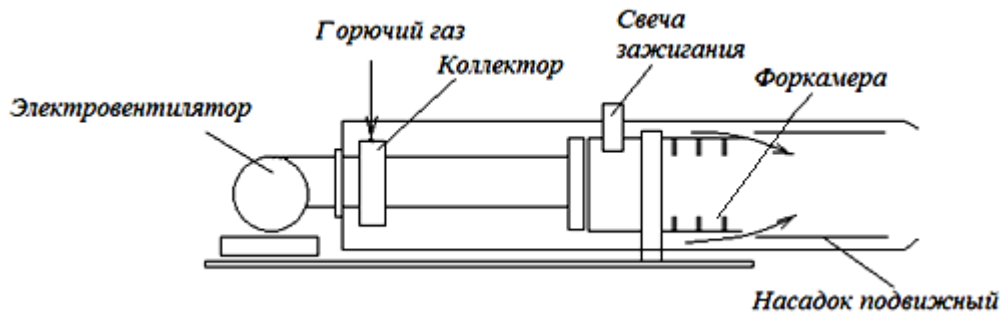


Рис. 6. Схема горелочного устройства

Горелочный узел (рис. 7) состоит из камеры смешения 3, форкамеры 2, камеры сгорания 1.

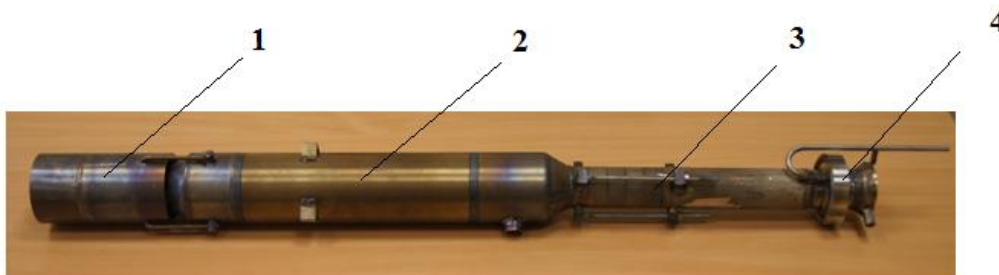


Рис. 7. Внешний вид горелочного узла

Камера смешения 3 имеет разборную конструкцию. Основными элементами камеры смешения являются основание с газовым коллектором и удлинительные кольца. Удлинительные кольца к камере смешения фиксируются при помощи трех шпилек (рис. 8).

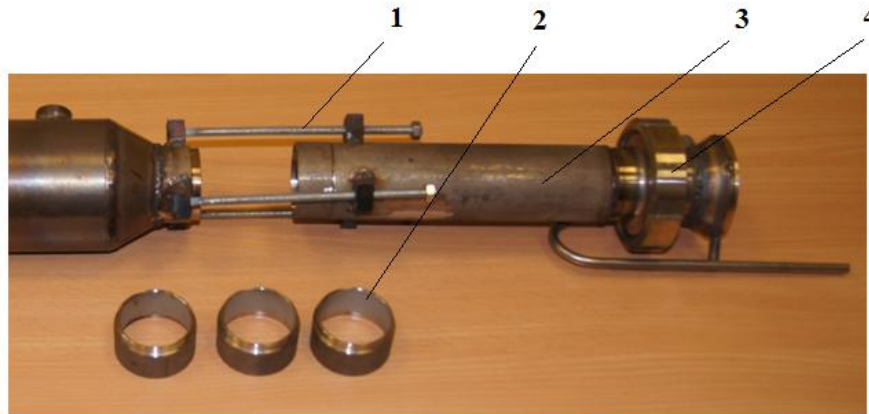


Рис. 8. Камера смешения: 1 – шпильки; 2 – удлинительные кольца; 3 – основание камеры смешения; 4 – газовый коллектор

Испытательный стенд работает следующим образом. Электро-вентилятором в камеру смешения подается воздух. Расход воздуха регулируется изменением частоты вращения вала двигателя. Горючий газ в газовый коллектор подается из баллона. Необходимый расход горючего газа, подводимого в камеру смешения, устанавливается редуктором. Поджиг газовой смеси осуществляется электросвечой. Воспламенившаяся газовая смесь в форкамере двигается в сторону камеры сгорания. При этом, благодаря кольцам, газовый поток сильно турбулизируется. Продукты термического разложения углеводородного топлива, истекающие из форкамеры, направляются в камеру сгорания. Через кольцевой зазор в камеру сгорания подводится воздух для горения. В камере сгорания происходят окислительно-восстановительные процессы, интенсивность протекания которых также зависит от степени турбулизации потока.

Расчетные исследования горелочного устройства проводились в программном комплексе ANSYS-Fluent. Количество ячеек составляло от 1,5 до 2 млн. Расчеты проводились на  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  RNG и  $k-\epsilon$  Realisable. На рис. 9 представлено распределение температуры по тракту горелки. Коэффициент избытка воздуха в основной камере составлял  $\alpha = 0,6$ ; далее подводился вторичный воздух до  $\alpha = 1,2$ .

Из теории и практики сжигания топлив известно, что для его эффективного сжигания необходимо выполнить три главных условия:

- 1) обеспечить стехиометрическое соотношение горючего газа и окислителя воздуха;
- 2) интенсивно перемешивать газоздушную смесь;
- 3) грамотно охладить продукты сгорания.

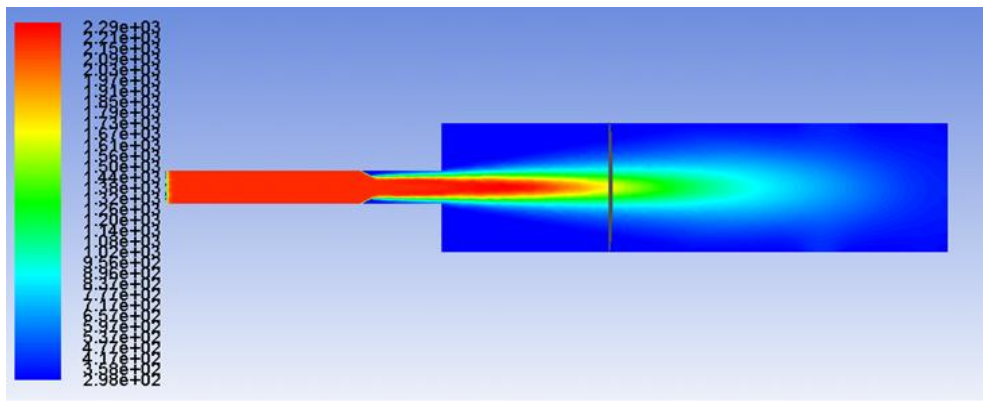


Рис. 9. Распределение температуры по тракту горелочного устройства

В предлагаемом горелочном устройстве эти условия обеспечиваются организацией упорядоченных турбулентных пульсаций в реагирующей топливоздушной смеси в жаровой трубе горелки. Технически упорядоченные вихри генерируются оребрением внутренней стенки жаровой трубы. Кроме того, упорядоченные турбулентные пульсации обеспечивают короткий факел, являющийся важным фактором в обеспечении необходимой температуры газовой струи у поверхности асфальтного покрытия [1–6].

Для сокращения длины факела в горелочной камере были установлены турбулизирующие кольца. Исследовались кольца с различными диаметрами проходных сечений. Установка трех колец с диаметром, в два раза меньшим диаметра горелочной камеры, позволила сократить длину факела в 4 раза (рис. 10).

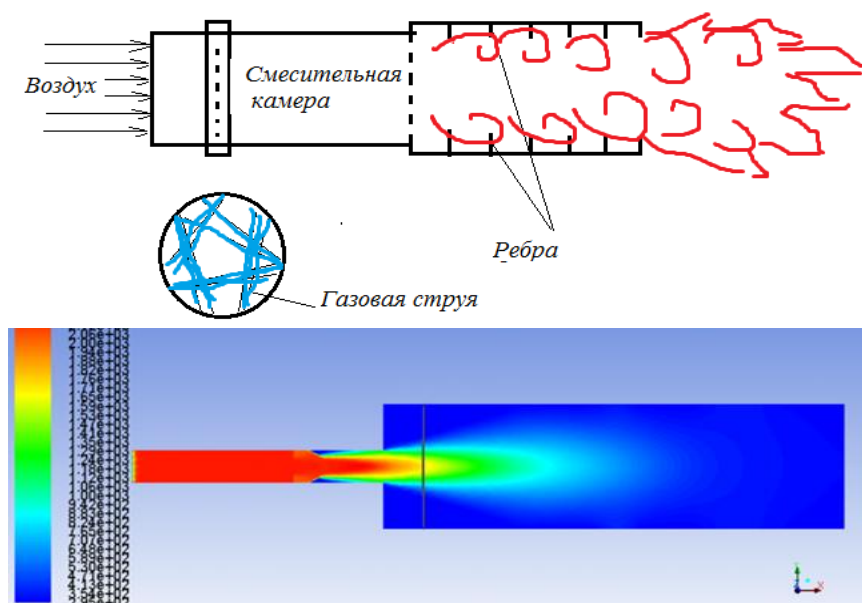


Рис. 10. Распределение температуры с установленными турбулизирующими кольцами

Разработанное короткофакельное вихревое горелочное устройство входит в состав термогазодинамической установки (ТГДУ) «Самум» (рис. 11), предназначенной для выполнения дорожно-строительных работ и ямочного ремонта на автомобильных дорогах. ТГДУ «Самум» может провести очистку и нагрев кромок дорожного покрытия, очистку и высушивание разрушенных участков автомобильной дороги, удаление наледи и замерзшей грязи с металлических дорожных ограждений, узлов и агрегатов дорожно-строительной техники при их обслуживании и ремонте.



Рис. 11. Термогазодинамическая установка «Самум»

Особенностью конструкции данного оборудования является его мобильность и габариты. Установка размещается на передвижной металлической раме. Воздух для сжигания углеводородной жидкости вырабатывает мотовентилятор, который входит в состав установки. Запуск установки производится в ручном режиме от искровой свечи. Скорость обработки зависит от размеров ремонтируемого участка дороги. Температура газов легко регулируется в диапазоне от 200 до 600 °С. По сравнению с аэродромной газоструйной установкой (рис. 12), «Самум» имеет преимущества по габаритам, массе и удобству использования.



Рис. 12. Аэродромная газоструйная установка



На основе наукоемкой технологии сжигания углеводородного топлива и двигателестроения мини-ДВС разработан опытно-промышленный образец термогазодинамической установки (ТГДУ) «Самум».

Благодаря высокой мобильности, автономности, простоте в эксплуатации и обслуживании ТГДУ «Самум» может найти широкое применение в городском хозяйстве: при выполнении дорожно-строительных работ; ямочном ремонте; ремонте мягкой кровли; удаления в зимнее время наледи на перекрестках и на других участках дорог; очистки грязи с дорожных ограждений и т.д.

### Источники

1. Моделирование течения газового потока в вихревом горелочном устройстве // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. – 2014.

2. О перспективах использования озона для снижения выбросов вредных веществ отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2013»: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., 19–21 ноября 2013 г. – Казань: Изд-во КГТУ–КАИ, 2013.

3. Разработка испытательного стенда для исследования вопросов смесеобразования горючих газов в воздушном потоке // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности (АКТО-2014), 5 – 8 авг. 2014 г.: междунар. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014.

4. Моделирование течения топливовоздушной горелки камеры сгорания газотурбинного двигателя // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности (АКТО-2014): междунар. науч.-практ. конф., 5 – 8 авг. 2014 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014.

5. О механизме генерации упорядоченных турбулентных пульсаций при сжигании газозвушной смеси // Проблемы теплообмена и гидродинамики в электромашиностроении: 9-я Школа-семинар молодых ученых и специалистов академии РАН В.Е. Алемасова, 10-12 сент. – М.: Изд-во: РАН, 2014.

6. Моделирование процессов в камерах сгорания ГТД // Инновации. Технологии. Производство: междунар. технолог. форум, 23–25 марта, 2015. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2015.

## **DEVELOPMENT OF MOBILE THERMOGASDYNAMIC DEVICE FOR SOLVING PROBLEMS IN THE HOUSING SECTOR**

**KHALIULIN R.R., PAVLOV G.I.**

*Due to the climatic conditions in spring and autumn are significant destruction of asphalt concrete pavement of roads and road network to the availability to them of water and snow. To avoid road - traffic accidents and further destruction of the roadway maintenance organizations road sector, regardless of the weather conditions are systematically carried out patching. One of the most important factors of quality of patching is a lack of repair areas on the surfaces of the presence of sand, snow and water. To accomplish this, the rules need to work to blow, dry and heat the base and edges of pits and potholes. It can provide termogazodinamycal installation TGDI "Samum".*

*Keywords: burner device, gas-dynamic thermal device, burning.*

УДК 621

## **ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ТЕРМОСТАТОВ НА ОБЪЕКТАХ ПАО «ТАТНЕФТЬ»**

**ХАЛЯПОВ И.И., НГДУ «Бавлынефть», инженер-энергетик**

Система отопления представляет собой комплекс элементов, необходимых для обогрева помещений. Основными элементами являются генераторы теплоты, теплопроводы, отопительные приборы. Передача теплоты осуществляется с помощью теплоносителей – нагретой воды, пара или воздуха.

При определении тепловой нагрузки систем отопления учитывают особенности теплового режима помещений. В помещениях с постоянным тепловым режимом, к которым относятся промышленные, жилые и общественные здания, сельскохозяйственные постройки, тепловую нагрузку определяют из теплового баланса.

В помещениях с переменным режимом при определении тепловой нагрузки различают два периода – рабочий и нерабочий. В нерабочее время необходимость в отоплении может отсутствовать.

Во всех случаях при расчете мощности систем отопления необходимо учитывать минимальные почасовые тепловыделения. Кроме того, системы отопления должны обеспечивать нормируемые параметры воздуха к началу рабочего периода. Отопление, рассчитанное только на период нерабочего времени, называют дежурным отоплением.

Требования к системам отопления следующие.

1. Санитарно-гигиенические: системы отопления должны обеспечивать внутри помещения заданную температуру воздуха равномерно по объему рабочей зоны помещения. Температуры внутренних поверхностей наружных ограждений и нагревательных приборов должны находиться в пределах нормы. Система должна быть безопасной и бесшумной в работе, должна обеспечивать наименьшее загрязнение вредными выделениями помещений и атмосферного воздуха.

2. Экономические: системы отопления должны обеспечивать минимум затрат по сооружению и эксплуатации. Показателями экономичности являются также расход материала, затраты труда на изготовление и монтаж. Экономичность системы определяется технико-экономическим анализом вариантов различных систем и применяемого оборудования.

3. Строительные: системы отопления должны соответствовать архитектурно-планировочному решению помещений. Размещение отопительных элементов должно быть увязано со строительными конструкциями.

4. Монтажные: элементы систем отопления должны изготавливаться преимущественно в заводских условиях, детали унифицированы, затраты труда на сборку минимальны.

5. Эксплуатационные: система отопления должна быть надежной в поддержании заданных температур воздуха. Надежность системы обуславливается ее долговечностью, безотказностью, простотой регулирования управления и ремонта.

Эффективное управление отоплением является жизненно важной частью рациональной работы котла и системы отопления. Грамотное использование элементов управления снизит потребление энергии агрегатом при создании комфортной температуры, избегая перегрева помещений. Для регулирования уровня температуры в системе отопления используется такое устройство, как терморегулятор для котла. От его наличия зависит, насколько эффективно будет использоваться потребление энергоресурсов (электроэнергии или природного газа) котлом отопления для создания комфортной температуры в помещении. До 20 % объема потребляемых энергоносителей можно экономить, применяя такого рода автоматику. Терморегулятор имеет еще одно название: термостат – устройство для автоматического поддержания температуры на заданном уровне (рис. 1).





Рис. 1. Программируемый хронотермостат фирмы Imit Blue

Принцип работы термостата основан на включении или отключении котла отопления. Прибор контролирует нагревание теплоносителя или окружающего воздуха. Чувствительный элемент устанавливается с обеспечением теплового контакта на конструкцию, температуру которой необходимо контролировать. Исполнительный элемент устанавливается в систему, подающую топливо (для газового котла – клапан и трубка подачи газа к горелке). Связываются элементы термостата между собой обычно либо электрической цепью, либо механической тягой. При изменении состояния чувствительного элемента вырабатывается сигнал, воздействующий через связь на исполнительный элемент, который перекрывает подачу газа в горелку и, используя встроенный или внешний датчик, отправляет сигнал на отключение или включение автоматического блоку котла отопления (рис. 2, 3).

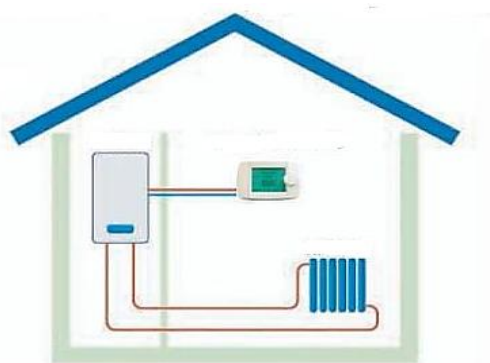


Рис. 2. Схема установки термостата

Если температура теплоносителя или воздуха поднимается чуть выше заданного значения, то поступает сигнал отключения, а после его опускания ниже установленного уровня сигнал подается на включение отопительного оборудования. Устройства очень просты в управлении

и несмотря на это являются надежным средством управления климатом. Преимуществом использования такой отопительной системы является экономия энергоресурсов, будь то газ или электроэнергия.

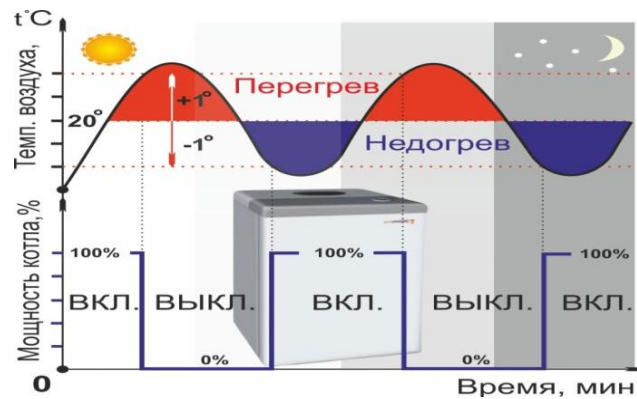


Рис. 3. Принцип работы программируемого термостата

По функциональному своему назначению терморегуляторы делятся на ручные и программируемые. По исполнению терморегуляторы бывают беспроводные и проводные. В зависимости от требования к питанию: напряжение питания постоянного тока; батарейки ААА; напряжение питания переменного тока. По степени защиты корпуса от внешних воздействий: взрывозащищенное исполнение (NEMA 7 и 9) исключит и повреждение корпуса, и выход из строя прибора; общепромышленное исполнение корпуса (IP66). По типу выходного сигнала: быстродействующий переключатель SPDT (однополюсный на 2 направления), визуальная индикация 1 А при 24 В переменного тока 50/60 Гц. По диапазону измерения: в положительном диапазоне; с диапазоном работы в отрицательных температурах.

В 2014 г. специалистами ООО «Диагностика-ЭнергоСервис» были внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию программируемые термостаты Imit Blue с целью снижения затрат на электропотребление на нужды обогрева бригадных домов и сушильных помещений НГДУ «Бавлынефть» (рис. 4).

Для реализации проекта выполнено следующее:

1) произведен монтаж 107 термоконтроллеров и 44 прибора учета в бригадных домах и сушильных помещениях ДНС для регулирования работы электрических котлов в зависимости от температуры в помещениях (таблица);

2) произведено обучение персонала бригадных домов по корректной эксплуатации;

3) распоряжением по цехам назначены ответственные за исправное состояние термоконтроллеров.



Рис. 4. Установленные термоконтроллеры в бригадных домиках  
ДНС НГДУ «Бавлынефть»

### Перечень объектов монтажа термоконтроллеров и приборов учета

Объекты монтажа	ЦДНГ-1		ЦДНГ-2		ЦДНГ-3		ЦДНГ-4		ЦППД		ЦППН		УАКЗ	
	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета	Термоконтроллеры	Приборы учета
ЦЕХ	ЦДНГ-1		ЦДНГ-2		ЦДНГ-3		ЦДНГ-4		ЦППД		ЦППН		УАКЗ	
Бригадный дом	3	6	8	8	5	4	3	3	17	14	9	9	-	-
Сушилка	8	-	15	-	7	-	6	-	-	-	-	-	1	-
Будки КИПиА	17	-	0	-	3	-	2	-	-	-	2	-	1	-
Итого	28		23		15		11		17		11		2	

Установлен следующий температурный режим в помещениях с оборудованием:

- 1) для бригадных домов:
  - с 16:00 до 4:00 следующего дня, в праздничные и выходные дни температура воздуха в помещении +12 °С (согласно ГОСТ № 30494-2011);
  - в рабочие дни с 4:00 до 16:00 температура воздуха в помещении +22 °С (согласно СП № 44.13330.2011);
- 2) для сушильных помещений:
  - с 16:00 до 6:00 следующего дня температура воздуха в помещении +33 °С (согласно СП № 44.13330.2011);
  - в рабочие дни с 6:00 до 16:00 температура воздуха в помещении +12 °С (согласно ГОСТ № 30494-2011);

3) для будок КИПиА:

– круглосуточно температура воздуха в помещении +6 °С.

После установки данного оборудования экономия электроэнергии составила 110,532 тыс. кВт·ч на 303,965 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости – 4,65 года при капитальном вложении 980,90 тыс. руб.

В 2015 г. идентичное оборудование установлено на объектах НГДУ «Азнакаевскнефть», также есть первые результаты. После установки данного оборудования экономия электроэнергии составила 675,416 кВт·ч на 1594 тыс. руб. Срок окупаемости – 1,3 года при капитальном вложении 1744,1 тыс. руб.

Преимущества термостата:

– можно дистанционно управлять работой отопительного оборудования;  
– за счет оперативной работы термостата после изменения настроек датчик подает сигнал и происходит изменения существующих температур в помещении;

– прибор удерживает нужную температуру в помещении, создавая атмосферу уюта и комфорта;

– при подключении термостата отпадает необходимость в постоянном контроле работы котла и его регулировании;

– экономия денежных средств за счет экономии расхода энергоресурсов и быстрая окупаемость прибора.

УДК 620.424.1

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В LMS AMESIM**

ХИСМАТУЛЛИН Р.М., КНИТУ–КАИ, keht0001@yandex.ru

САЛАХОВ Р.Р., КНИТУ–КАИ, к.т.н., rrsalakhov@kai.ru

ХАЙРУЛЛИН А.Х., КНИТУ–КАИ, н.с., azat-meh@mail.ru

ГУРЕЕВ В.М., КНИТУ–КАИ, профессор, fix\_m@mail.ru

*Представлен материал по обобщению существующих когенерационных установок, анализ газопоршневых агрегатов. Даны варианты повышения характеристик газопоршневых двигателей в составе мини-ТЭЦ. Обозрена адаптивная система охлаждения ДВС с использованием электропривода водяной помпы, также составлена численная модель данной системы в программном комплексе LMS AMESim.*

*Ключевые слова: когенерация, мини-ТЭЦ, теплообмен, адаптивная система охлаждения, ДВС, моделирование, LMS AMESim, водяная помпа.*

В России на фоне существенного роста цен на электрическую и тепловую энергию все большее распространение получают малые когенерационные установки. Эти небольшие теплоэлектростанции одновременно вырабатывают электрическую и тепловую энергию и полностью решают вопрос автономного энергоснабжения широкого круга потребителей. Также они востребованы там, где нет централизованного тепло- и электроснабжения, а это немалая территория России.

Одной из основных составляющих мини-ТЭЦ является привод электрогенератора, которым могут быть двигатели внутреннего сгорания или микротурбины. Наиболее оптимальный вариант – газопоршневой двигатель внутреннего сгорания, отличающийся следующими достоинствами:

- небольшой срок окупаемости;
- низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии;
- сниженный уровень выбросов окислов азота, который можно устранить полностью при работе ДВС на богатой смеси с последующим дожиганием продуктов сгорания в котле;
- более высокий, по сравнению с ГТУ, ресурс работы, достигающий 150 – 200 тыс. ч;
- низкий уровень капитальных затрат и эксплуатационных расходов на производство энергии;
- простота перехода с одного вида топлива на другой.

На современном российском рынке малых энергетических установок широко представлены ведущие зарубежные производители при довольно скудном количестве отечественных разработок. Наиболее распространены следующие производители: Caterpillar, Jenbacher (рис. 1), Wartsila, Tedom и т.п.

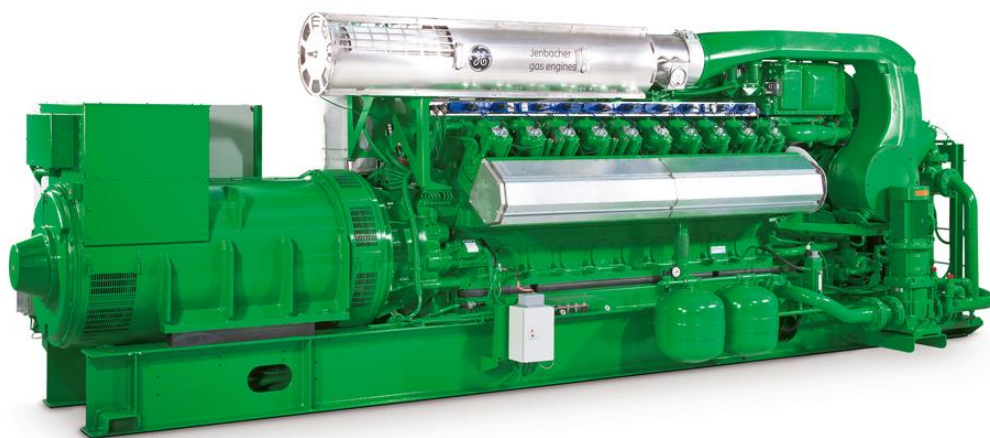


Рис. 1. Газопоршневая мини-ТЭЦ с двигателем GE Jenbacher



В НИИ «Энергоэффективных технологий» КНИТУ им. А.Н. Туполева в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» реализован проект по созданию высокоэффективной когенерационной установки на базе газопоршневого двигателя, работающей совместно с парокompрессионным тепловым насосом. В качестве привода электрогенератора выступает серийный двигатель КАМАЗ 820.20-200, который позволяет получить на номинальном режиме работы 100 кВт электрической мощности и 174 кВт тепловой, в системе утилизации. Часть вырабатываемой электроэнергии идет на привод парокompрессионного теплового насоса, в котором вода для нужд системы отопления нагревается до 70 °С. Далее вода попадает в блок утилизации теплоты ДВС, где догревается до требуемой температуры – 90 °С. Внешний вид разработанной установки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Когенерационная установка с приводом от газопоршневого двигателя КАМАЗ в цехе Казанского филиала ООО «КамЭнергоРемонт»

Стоит отметить, что КПД двигателя КАМАЗ не столь высок и имеет значение около 30 %, если учесть, что КПД ДВС ведущих производителей достигает 38 %, то становится очень актуальным вопрос повышения эффективности.

Довольно распространенным решением увеличения эффективности работы ДВС является турбонаддув [1], однако повышение удельного давления в рабочей камере ДВС приводит к повышению напряжений в цилиндропоршневой группе (ЦПГ), впоследствии появляются микротрещины.

Также у подобных установок остановка работы после длительной эксплуатации вызывает термические напряжения с последствиями в виде микротрещин. Для избежания подобных проблем необходимо после выключения двигателя определенное время оставлять работающей систему охлаждения, что возможно лишь при жидкостном насосе, имеющем привод, не зависящий от коленчатого вала.

В последнее время наиболее остро встает вопрос об экологичности используемого оборудования. ДВС выбрасывает в окружающую среду немало вредных веществ, поэтому одной из основных задач при проектировании новых, более совершенных ДВС, является выполнение все более жестких экологических норм и требований.

Для достижения необходимых экологических показателей ДВС требуется снижение общей тепловой напряженности конструкции и поддержание оптимальной температуры ЦПГ. Одним из способов решения является перевод ДВС на адаптивные системы охлаждения.

Адаптивная система охлаждения (АСО) – совокупность устройств, обеспечивающих подвод охлаждающей среды к нагретым деталям двигателя и отвод от них в атмосферу лишней теплоты, которая должна обеспечивать наиболее выгодную степень охлаждения и возможность поддержания в требуемых пределах теплового состояния двигателя при различных режимах и условиях работы. Основным агрегатом подобных систем – насос с регулируемым электроприводом. Разработку подобных насосов уже ведут такие известные мировые бренды, как Valeo, Wahler, DANACorp., Delphi, EWP и др.

Численная модель была построена в программном комплексе LMS AMESim, которая представляет собой комплексную платформу 1D многодисциплинарного системного моделирования и оптимизации характеристик устройств [2]. На рис. 3 представлена функциональная модель АСО ДВС в составе тригенерационной установки.

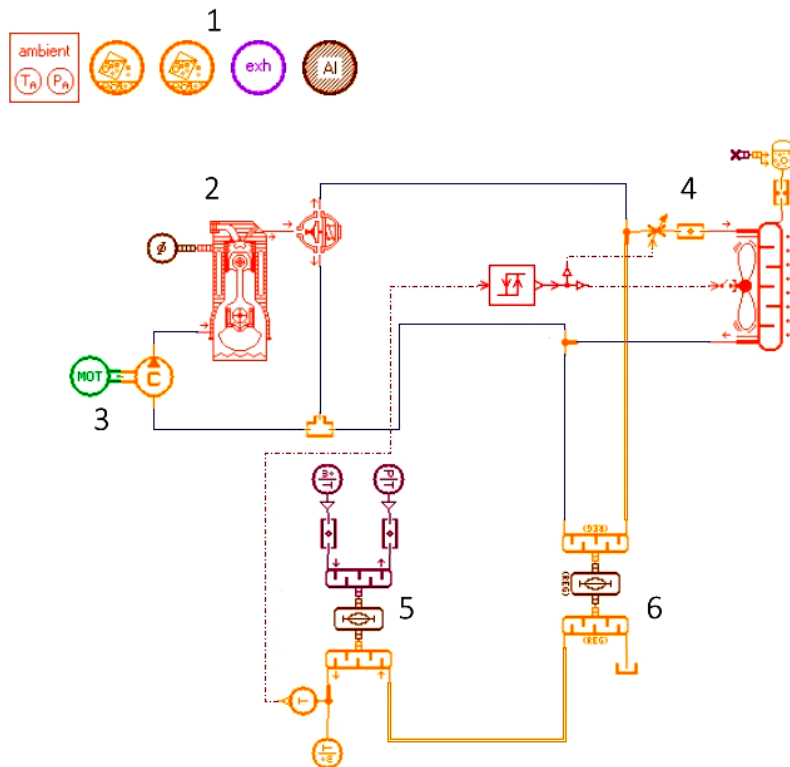


Рис. 3. Функциональная модель АСО ДВС: 1 – подмодели, описывающие свойства жидкостей, продуктов сгорания, металла и окружающей среды; 2 – двигатель с термостатной коробкой; 3 – регулируемая жидкостная помпа; 4 – радиатор системы охлаждения; 5 – ТА продукты сгорания – вода; 6 – ТА охлаждающая жидкость – вода

### Источники

1. Численное моделирование газодинамических процессов в турбокомпрессоре транспортного дизеля / Р.Р. Хасанов, А.Х. Хайруллин, В.М. Гуреев // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: 5-я Междунар. конф.: тез. докл. – 2015. – С. 207–208.

2. Численное и экспериментальное исследование теплообмена в системе утилизации теплоты мини-ТЭЦ с газопоршневым приводом / Р.Р. Салахов [и др.] // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: 5-я Междунар. конф.: тез. докл. – 2015. – С. 209–210.

3. Гимадиев А.Г. LMS Imagine.lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах: учебное пособие / А.Г. Гимадиев, П.И. Грешняков, А.Ф. Синяков. – Самара, 2014. – 136 с.

4. Моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в кожухотрубном теплообменном аппарате / Р.Ш. Мисбахов [и др.] // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11-12. – С. 75–80.

5. Теплообменные аппараты: учеб. пособие / Б.Е. Байгалиев [и др.]. – Казань, 2012. – 69 с.



## **MODELLING OF MODIFIED COGENERATION POWER PLANT IN LMS AMESIM**

**SALAKHOV R.R., KHISMATULLIN R.M., GUREEV V.M.,  
HAIRULLIN A.H.**

*The article presents data on the generalization of existing cogeneration plants, analysis of gas piston units. Versions of gas engines improve performance as part of a mini-CHP. Surveyed adaptive cooling the internal combustion engine with electric water pump, also composed of a numerical model of the system in the software LMS Amesim complex.*

*Keywords: Cogeneration, CHP, heat transfer, adaptive cooling system, the internal combustion engine, simulation, LMS AMESim, water pump.*

УДК 621.313:656.56

## **НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ МОНОБЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ**

**ХЛЫНИН А.С., АО «Гипрогазцентр», инженер  
КРЮКОВ О.В., АО «Гипрогазцентр», д.т.н., доцент,  
o.kryukov@ggc.nnov.ru**

*Предложены новые конструктивные разработки электродвигателей мегаваттного класса для интегрированных исполнений агрегатов нефтегазовой отрасли. Проведен анализ основных преимуществ асинхронных и синхронных машин в электроприводах газоперекачивающих агрегатов. Рассмотрены особенности конструкций интегрированных электродвигателей с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Показаны эффективные результаты реализации безредукторных и безмасляных технологий для повышения функциональных возможностей, надежности, энергоэффективности и экологичности наиболее ответственных электромеханических систем.*

*Ключевые слова: электродвигатель, конструкция, ось вращения, электропривод, газоперекачивающий агрегат.*

Разработка и создание новых отечественных машин переменного тока мегаваттного класса обусловлены задачами повышения надежности

и энергоэффективности [1, 2]. Это всегда было актуально и для электроприводов газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [3, 4], начиная с ввода в эксплуатацию первых магистральных газопроводов (МГ) «Саратов – Москва» и «Дашава – Москва». На ранних этапах использовались как нерегулируемые синхронные приводы, так и частично регулируемые установки на базе систем ПЧ–АД и машин двойного питания.

Современный этап развития приводных двигателей ЭГПА связан со сменой аппаратной базы и технологий электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники. Рассмотрены особенности применения новых конструкций машин ЭГПА компрессорных станций (КС) и исследования по энергоэффективности, экологичности и надежности [5–7].

Главным элементом любого ЭГПА является электрическая машина мегаваттного класса. Именно ее энергетические и динамические характеристики, функциональные возможности, надежность и ресурс эксплуатации определяют конкурентоспособность и технико-экономические показатели ЭГПА в целом.

Все современные электродвигатели ЭГПА – синхронные (СД) и асинхронные (АД) – являются частными случаями «обобщенной машины переменного тока» (двигателя двойного питания).

Отечественными предприятиями, занимающимися разработкой высоковольтных машин для ЭГПА, являются ЗАО «РЭП Холдинг» г. Санкт-Петербург и ООО «Электротяжмаш-Привод» (г. Лысьва). Среди зарубежных фирм мегаваттные двигатели производят АВВ, консорциум Alstom (Converteam) – MAN Turbo, MELCO (Mitsubishi Electric Corporation), General Electric (GE), Siemens. Опыт промышленной эксплуатации данных машин в нефтегазовом комплексе для мощных и энергоемких механизмов, в том числе ЭГПА мегаваттного класса, показал перспективы их применения [8–10].

Для анализа современного этапа перехода от преимущественного использования синхронных машин в ЭГПА на асинхронные рассмотрим основные достоинства каждого типа двигателей.

Преимуществами синхронных машин являются:

- наивысшие энергетические характеристики – КПД,  $\cos \varphi$  (минимальные потери мощности в стали и меди статора синхронной машины);
- стабильная скорость, равная круговой частоте вращения поля;
- предельная производительность без потерь мощности по нагрузке;

- надежность и долговечность работы (большой зазор в расточке статора не влияет на величину потребляемой реактивной мощности);

- меньшая зависимость устойчивости работы от колебаний напряжения сети;

- возможность независимого регулирования реактивной мощности;

- инвариантность абсолютно жесткой характеристики по нагрузке.

Преимуществами асинхронных машин являются:

- простота конструкции машины со сроком службы 50 лет;

- минимальные массогабаритные показатели и стоимость АД;

- высокая надежность в отсутствии контактных колец;

- возможность создания безредукторного высокоскоростного электропривода на основе активного электромагнитного подвеса (ЭМП) ротора и отсутствие системы маслоснабжения;

- взрывобезопасное исполнение, возможность установки двигателя и нагнетателя в одном помещении при сокращении общих площадей;

- возможность компоновки АД в едином корпусе с нагнетателями и обдувом обмоток статора перекачиваемым природным газом;

- низкие эксплуатационные расходы и расходы на все виды ремонта.

Разработка новых конструкций приводных электродвигателей ЭГПА связана с ужесточением требований надежности и энергоэффективности надежности в целом компрессорных установок. Модернизация и замена конструкций приводных двигателей существующих ЭГПА позволяет получить новые конкурентные возможности.

1. За счет применения ЭМП роторов повышаются показатели надежности и ресурс ЭГПА, снижаются затраты на обслуживание и ремонты.

2. Снижается износ механического и электротехнического оборудования благодаря снятию ограничений на число пусков и остановов.

3. Снижается вероятность возникновения поломок и помпажа благодаря плавному изменению режимов работы КС.

4. Прямое соединение «электродвигатель – нагнетатель» на базе высокоскоростных машин.

5. Исключается из компоновки установок ЭГПА мультипликатор (повышающий редуктор).

6. Исключается система смазки подшипников двигателя и компрессора и необходимость запасов масла, его охлаждение и риски возгорания.

7. Значительно сокращаются площади под установку ЭГПА с 40 м<sup>2</sup> (газотурбинный) и 24 м<sup>2</sup> (типовой ЭГПА) до 12 м<sup>2</sup> для мощностей 12,5 МВт.

8. Повышается готовность агрегата к пуску, снижается время и энергетические затраты пуска.

9. Исключается выработка шеек валов ротора АД применением ЭМП.

10. Повышается точность отработки задания при дистанционном управлении ЭГПА с переходом к безлюдным технологиям обслуживания оборудования и улучшаются условия труда.

Высокооборотный двухполюсный асинхронный электродвигатель с кованным высокопрочным ротором на ЭМП при номинальной скорости до 9 500 об/мин имеет отвод тепла посредством перекачиваемого газа. Электродвигатель горизонтальной формы IM 1001(B3) класса IP 44 имеет ЭМП ротора производства ОАО «Корпорация ВНИИЭМ» и датчики виброскорости и положения ротора, давления и реле потока воздуха, а также термодатчики в обмотках [11, 12].

Сердечник статора выполнен из электротехнической листовой стали толщиной 0,5 мм EI 31 с удельным уровнем потерь 1,3 Вт/кг. Внутренний диаметр статора – 530 мм, внешний диаметр – 1200 мм, длина – 620 мм. Обмотка петлевая, двухслойная, с изоляцией класса F с транспозицией. Статор с обмоткой уложен в корпус (ванну), сваренную из стальных листов и профилей. Подшипники помещены в торцовых частях ванны. Ванна закрыта отдельной крышкой, на которой укреплена вентиляционная надстройка. Корпус является одновременно шумозащитным кожухом.

Сердечник ротора выполнен из высокопрочных листов стали толщиной 4 мм с закрытыми пазами для роторных стержней. Стержни изготовлены из круглой меди диаметром 23 мм. Количество пазов – 34. Под стержнями находятся вентиляционные каналы. Стержни приварены в лобовой части в короткозамкнутые кольца из высокопрочной бронзы. На кольцах с натягом насажены стальные бандажи. Для возможной балансировки на ротор насажено четыре балансировочных кольца.

В условиях повышения требований к минимизации массогабаритных показателей КС для компактности «пятна застройки», обеспечению безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней спецочистки и увеличению надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки приводных двигателей ЭГПА в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем.

Конструктивно АД имеет компактную обмотку статора с жидкостным охлаждением и массивный ротор. Технология с компактными торцевыми обмотками применялась ранее для тихоходных АД специального назначения и впервые применена для высокоскоростных электроприводов [13, 14].

Таким образом, новые конструктивные решения электродвигателей переменного тока мегаваттного класса с горизонтальной и вертикальной осями вращения позволяют повысить надежность и энергоэффективность электроприводов основных технологических установок, работающих в важнейших отраслях промышленности, включая нефтегазовую.

### Источники

1. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.

2. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» / О.В. Крюков // Идентификация систем и задачи управления: труды 10-й МНТК / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2015. – С. 368–386.

3. Крюков О.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

4. Васенин А.Б. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Труды 8-й Междунар. (19-й Всерос.) конф. По автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 404–409.

5. Крюков О.В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 53–58.

6. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления: Труды 9-й Междунар. конф. SICPRO-2012 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2012. – С. 222–236.

7. Захаров П.А. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

8. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations / O.V. Kryukov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135–140.

9. Milov V.R. Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72(5). – P. 1095–1101.

10. Серебряков А.В. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: труды конф. / под ред. С.Н. Васильева. – СПб., 2012. – С. 467–469.

11. Пужайло А.Ф. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода / А.Ф. Пужайло, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2(50). – С. 98–106.

12. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин / О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

13. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.

14. Крюков О.В. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В. Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды 4-й ВНКП / под общ. ред. В.Ю. Островляника. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

## **NEW DESIGNS OF CLOSE-COUPLED FOR ELECTRICAL DRIVE OF GAS COMPRESSOR UNITS**

KHLYNIN A.S., KRYUKOV O.V.

*New constructive developments of electric motors of megawatt class for the integrated executions of the units of oil and gas industry are offered. The analysis of the basic advantages of asynchronous and synchronous machines of electric drives of gas compressor units has been carried out. There considered the features of designs of the integrated electric motors with horizontal and vertical axes of rotation. The effective results of realization of gearless and oil free technologies for increase of functionality, reliability, power efficiency and ecological compatibility of the most essential electromechanical systems have been shown.*

*Keywords: electric motor, design, rotation axis, electric drive, gas compressor unit.*

УДК 621.3.014.7

## **АЛГОРИТМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА, ПОРОЖДАЕМОГО КОММУТАЦИЯМИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

ХУЗЯШЕВ Р.Г., КГЭУ, к.ф.-м.н., доцент

КУЗЬМИН И.Л., Филиал АО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана, к.т.н.

НОВИКОВ С.И., КГЭУ, 090390ns@mail.ru

*Описан алгоритм регистрации сигнала переходного процесса, рождаемого как однофазным замыканием на землю, так и нормальными коммутационными процессами. Регистрация осуществляется с помощью датчиков напряжения, которые установлены на воздушной линии электропередач.*

*Ключевые слова: замыкания на землю, датчик тока и напряжения, регистрация переходного процесса, цифровой алгоритм, амплитудно-частотная характеристика.*

Для определения места однофазного замыкания на землю (далее – ОЗЗ) в сетях с разветвленной топологией предлагается использовать волновой метод, основанный на регистрации времени прихода сигнала напряжения переходного процесса (далее – ПП), рождаемого в месте возникновения ОЗЗ [1]. Результаты моделирования и экспериментальных измерений показывают, что сигнал ПП, рождаемый как ОЗЗ, так и нормальными коммутационными процессами, описывается комбинацией гармонических колебаний дискретных частот, величины которых находятся в диапазоне от единиц до сотен килогерц. Все колебания генерируются одновременно в момент начала ПП. Каждое колебание фиксированной частоты затухает в течение 3–4 периодов, поэтому визуально на осциллограмме сперва фиксируется ВЧ-колебание, а затем более низкочастотное. Примеры экспериментально зафиксированных на разработанном программно-аппаратном комплексе (далее – датчик) сигналов ПП [1] приведены на рис. 1. Для снятия первичной информации о

фазном напряжении на воздушной линии электропередач используется емкостный делитель напряжения, в котором в качестве высоковольтного плеча выступает линейный подвесной изолятор, а в качестве низковольтного плеча – конденсатор [2]. Период дискретизации входного сигнала составляет 1,085 мкс, длительность регистрации – 10 мс, разрядность АЦП – 8 бит.

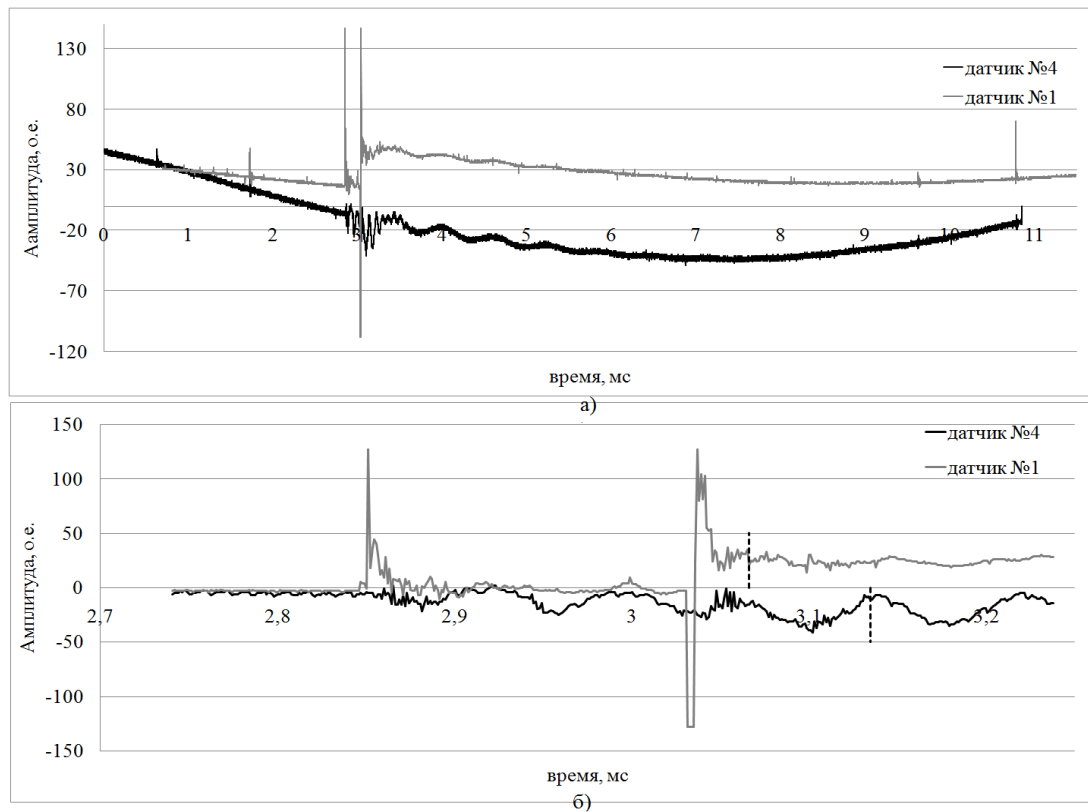


Рис. 1. Осциллограммы, зарегистрированные датчиками в единой шкале времени:  
*a* – общий вид; *б* – увеличенный масштаб переходного процесса с указанием зарегистрированных отсчетов по пусковому алгоритму

Амплитуда сигнала каждой частоты варьируется в широком диапазоне, что обусловлено большим количеством влияющих факторов, и составляет от единиц процента до трехкратного превышения амплитуды сигнала напряжения промышленной частоты, на фоне которого регистрируется ПП. Поэтому перед разработчиком программно-аппаратного комплекса по определению места ОЗЗ, основанного на волновом методе, стоит задача разработки пускового алгоритма, гарантированно регистрирующего сигнал ПП в условиях малого отношения сигнал/шум. В работе сравниваются известные алгоритмы обнаружения сигналов переходного процесса, оптимальные по двум параметрам: по максимальной величине отношения «сигнал/шум» и по количеству вычислительных операций в алгоритмах фильтрации сигналов.



Для регистрации переходного процесса на фоне синусоидального сигнала промышленной частоты в датчике реализован пусковой алгоритм на основе цифрового фильтра [3], который обрабатывает входные оцифрованные отсчеты по формуле:

$$Y(i, n) = X(i) - X(i - n), \quad (1)$$

где  $X(i)$  и  $Y(i)$  – отсчеты входных и выходных сигналов;  $i$  – номер отсчета исследуемого сигнала;  $n$  – разница номеров отсчетов, участвующих в реализации алгоритма цифрового фильтра. Пусковой (дифференциальный) алгоритм имеет программируемую уставку, как по амплитуде, так и по времени. Для срабатывания пускового алгоритма датчика амплитуда выходного сигнала (1) должна превысить программируемый порог срабатывания, выбираемый в диапазоне 2–100 относительных единиц, после чего проверяется уставка по времени, а именно количество превышений порога срабатывания, которое программируется от 1 до 100 отсчетов. За начало переходного процесса принимается точка, для которой выполняется условие как по амплитуде, так и по времени срабатывания.

Классическая теория обработки сигналов [4] говорит, что в условиях нормального шума максимальное отношение сигнал/шум получается при оптимальном алгоритме обработки входной смеси сигнала и шума. В решаемой нами задаче обнаружения сигнала переходного процесса первая компонента шума в виде синусоиды частотой 50 Гц является основным шумом, а сигнал переходного процесса – полезным сигналом.

Амплитудно-частотная характеристика (далее – АЧХ) оптимального фильтра представляет собой функцию, комплексно-сопряженную со спектром эталонного сигнала, а импульсная характеристика является зеркальным отображением временной функции эталонного сигнала. Оптимальный фильтр численно реализуется соответствующим выбором коэффициентов нерекурсивного цифрового фильтра. Выходной сигнал оптимального цифрового фильтра описывается выражением

$$Y(i) = \sum_{p=0}^{m-1} \left( \sin \left( \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} p \right) X \left( i - \frac{f_{дp}}{mf_0} \right) \right), \quad (2)$$

где  $X(i)$  и  $Y(i)$  – отсчеты входных и выходных сигналов;  $i$  – номер отсчета исследуемого сигнала;  $m$  – количество коэффициентов, участвующих в реализации алгоритма цифрового фильтра, равномерно распределенных на интервале периода синусоиды;  $p$  – номер коэффициента, участвующего в реализации алгоритма цифрового фильтра;  $f_0$  – частота эталонного сигнала, описывающая оптимальный фильтр;  $f_{д}$  – частота дискретизации входного сигнала.

Для применения оптимальной обработки сигнала необходимо освободиться от наиболее значительной по амплитуде, фиксированной по частоте компоненты шума синусоидального напряжения частотой 50 Гц. Совместим эту процедуру с оптимальной обработкой входного полезного сигнала. Как было сказано выше, начало ПП описывается синусоидальным сигналом, частота которого меняется в достаточно широких пределах. При этом задача выделения ПП может быть выполнена обработкой любой синусоидальной компоненты, описывающей начало ПП. Для моделирования пускового алгоритма в качестве коэффициентов оптимального фильтра выберем отсчеты синусоидальной функции длиной в один период. Для оценки амплитуды выходного сигнала шума будем использовать АЧХ оптимального фильтра. Для оценки амплитуды выходного полезного сигнала будем использовать переходную характеристику (ПХ) – зависимость максимальной выходной амплитуды от частоты полезного сигнала  $f$ , т.е. реакции оптимального фильтра на передний фронт ступенчатого периодического полезного сигнала частотой  $f$ .

Для анализа отношения сигнал/шум на выходе оптимального фильтра при произвольной величине  $m$  можно получить АЧХ  $A(f)$  и ПХ  $P(f)$  как численно, так и аналитически в предположении, что входной сигнал описывается неограниченным количеством периодов. Для упрощенного получения этой аналитической зависимости без применения квадратурной обработки сигнала выберем такую начальную фазу входного сигнала, которая дает максимальное значение выходного сигнала оптимального фильтра. АЧХ оптимального фильтра для  $m = \infty$  определяется формулой

$$A(f) = \left| \int_{-\frac{1}{2f_0}}^{\frac{1}{2f_0}} \sin(2\pi f_0 t) \sin(2\pi f t) dt \right| = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{f-f_0}{f_0}\right)}{2\pi(f-f_0)} - \frac{\sin\left(\pi \frac{f+f_0}{f_0}\right)}{2\pi(f+f_0)} \right|. \quad (3)$$

При регистрации сигнала переходного процесса всегда наступает момент, когда цифровой фильтр первыми отсчетами уже начал обрабатывать переходной процесс, а последними отсчетами еще обрабатывает сигнал промышленной частоты, в результате чего выходной сигнал в начале и в конце переходного процесса будет отличен от нуля в независимости от частоты сигнала. Данный эффект учитывает передаточная характеристика. Для сигналов, частота которых меньше эталонной частоты цифрового алгоритма  $f < f_0$ , передаточная характеристика совпадает с АЧХ оптимального фильтра и определяется формулой (3). Если частота сигнала больше эталонной частоты цифрового алгоритма  $f > f_0$ , то передаточная характеристика определяется формулой

$$P(f) = \left| \int_{-\frac{1}{2f}}^{\frac{1}{2f}} \sin(2\pi f_0 t) \sin(2\pi f t) dt \right| = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{f-f_0}{f}\right)}{2\pi(f-f_0)} - \frac{\sin\left(\pi \frac{f+f_0}{f}\right)}{2\pi(f+f_0)} \right|. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены АЧХ оптимального фильтра с эталонной частотой 5, 20, 100 и 500 кГц при  $m = \infty$ . Для наглядности АЧХ оптимальных фильтров выровнены по максимальной амплитуде. Максимальная амплитуда выходного сигнала образуется, когда частота входного сигнала равна эталонной частоте оптимального фильтра:  $f = f_0$ . Для такой частоты отношение сигнал/шум будет максимальным.

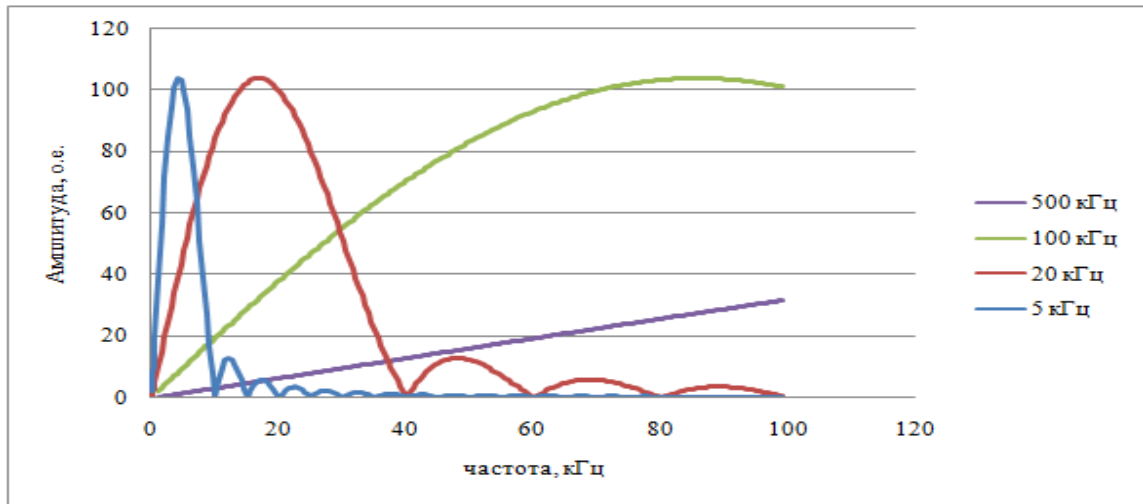


Рис. 2. АЧХ оптимального фильтра с  $f_0$ , равной 5, 20, 100 и 500 кГц и  $m = \infty$

На рис. 3 представлены ПХ оптимального фильтра с эталонной частотой 5, 20, 100 и 500 кГц и  $m = \infty$ . Для наглядности ПХ выровнены по максимальной амплитуде. Максимальная амплитуда выходного сигнала образуется, когда частота входного сигнала равна эталонной частоте оптимального фильтра:  $f = f_0$ . Для такой частоты отношение сигнал/шум будет максимальным.

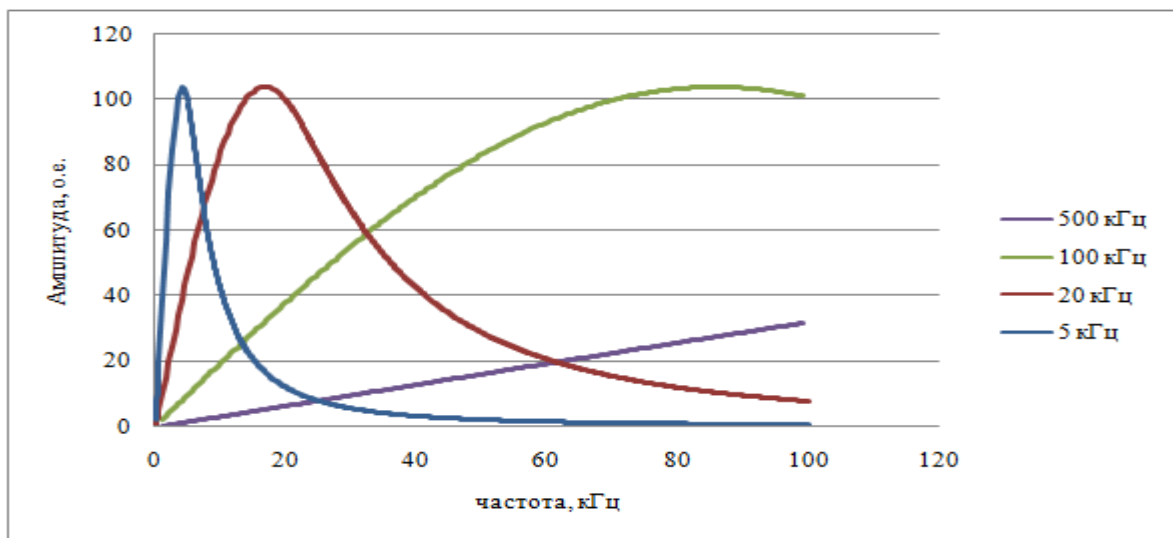


Рис. 3. ПХ оптимального фильтра с  $f_0$ , равной 5, 20, 100 и 500 кГц и  $m = \infty$

Для анализа отношения сигнал/шум на выходе дифференциального алгоритма при произвольной величине  $n$  можно получить АЧХ  $A(f)$  как численно (пропуская через фильтр гармонические сигналы произвольной частоты), так и аналитически. У дифференциального алгоритма нет зависимости от начальной фазы и от количества коэффициентов, так как он представляет собой разность двух отчетов, разделенных интервалом  $n$ . Поэтому дифференциальный алгоритм является частным случаем оптимального фильтра с количеством коэффициентов  $m = 2$ , АЧХ которого описывается формулой

$$A(f) = \left| 2 \sin \left( \frac{\pi f n}{f_d} \right) \right|. \quad (5)$$

На рис. 4 изображена АЧХ дифференциального алгоритма при  $n = 100, 50, 10$  и  $1$ . Передаточная характеристика дифференциального алгоритма, которая была определена численным способом и аналогична передаточной характеристике оптимального фильтра, показана на рис. 5.

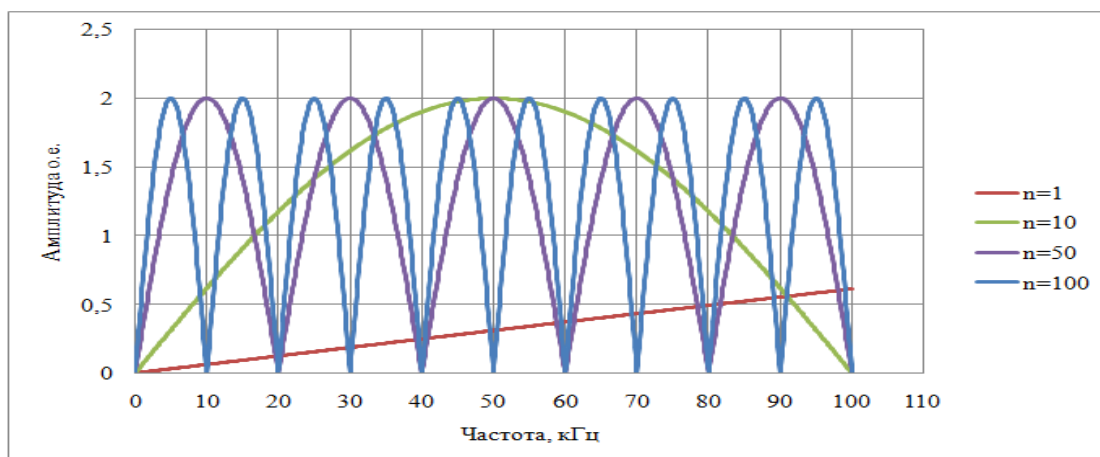


Рис. 4. АЧХ дифференциального алгоритма для  $n$ , равного 100, 50, 10 и 1

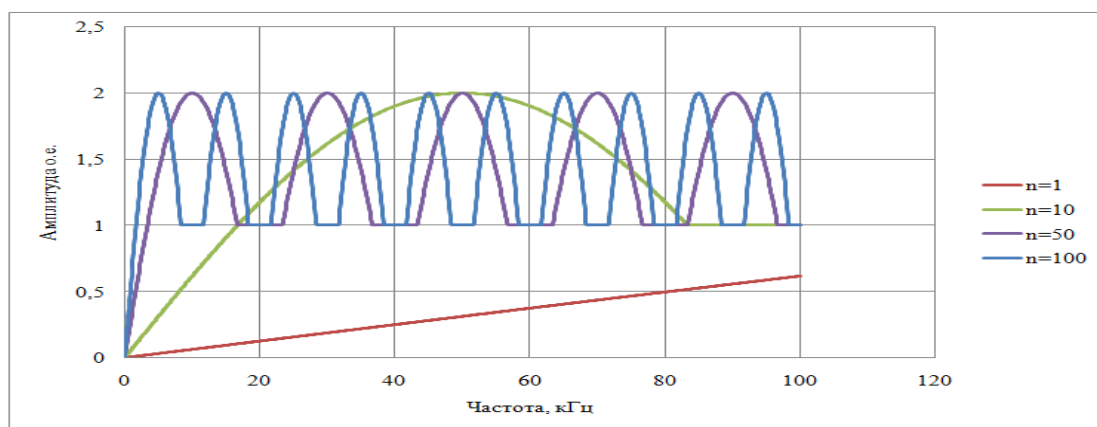


Рис. 5. ПХ дифференциального алгоритма для  $n$ , равного 100, 50, 10 и 1

Для полученных аналитически АЧХ упомянутых выше фильтров легко оценить величину сигнал/шум на выходе пускового алгоритма и на выходе оптимального фильтра. Отношение сигнал/шум выходного сигнала описывается отношением  $P(f)/A(f_{50})$ , где  $P(f)$  – коэффициент пропускания выходного полезного сигнала частотой  $f$ , полученный с помощью передаточной характеристики;  $A(f_{50})$  – коэффициент пропускания выходного сигнала промышленной частоты 50 Гц, полученный с помощью АЧХ. В табл. 1 и 2 представлено отношение сигнал/шум для оптимального фильтра и для дифференциального алгоритма соответственно.

Таблица 1

Отношение сигнал/шум оптимального фильтра (численно)

$f_0$ , кГц	Частота полезного сигнала, кГц			
	5	20	100	500
5	50,01	6	0,24	0,02
20	96,04	200,26	15,12	1
100	99,85	390,31	1034,25	121,59
500	99,98	398,95	1870,98	6366,2

Таблица 2

Отношение сигнал/шум дифференциального алгоритма (численно)

$n$	Частота полезного сигнала, кГц			
	5	20	100	500
100	63,66	31,8	30,27	31,83
25	97,44	254,15	242,19	127,33
5	99,88	392,68	1210,92	636,63
1	99,98	398,95	1870,98	6366,2

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что отношение сигнал/шум выходного сигнала дифференциального фильтра выше или равно отношению сигнал/шум оптимального фильтра. Отношение сигнал/шум дифференциального фильтра менее чувствительно к частоте полезного сигнала.

Дифференциальный алгоритм цифрового фильтра датчика (1) занимает меньшие ресурсы памяти и требует меньших вычислительных мощностей микроконтроллера и в то же время позволяет надежно регистрировать переходной процесс.

### Источники

1. Пат. РФ № 2372624. Способ определения места однофазного замыкания в разветвленной воздушной линии электропередач, способ определения места междуфазного короткого замыкания в разветвленной воздушной линии электропередач и устройство контроля тока и напряжения для их осуществления / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин. – № 2008109491/28, заявл. 12.03.2008. – Бюл. № 31.

2. Пат. РФ № 154803. Устройство контроля фазного напряжения воздушной линии электропередач / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин, С.И. Новиков. – № 2015121748/28, заявл. 05.06.2015. – Бюл. № 25.

3. Алгоритмы локации сигналов тока и напряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных воздушных сетях / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин, С.И. Новиков, С.В. Сидорова // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 41–44.

4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем / А.И. Перов. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.

### ALGORITHMS OF REGISTRATION OF THE SIGNAL OF TRANSITION PROCESS GENERATED BY KOMMUTATSIMI IN POWER LINES

HUZYASHEV R.G., KUZMIN I.L., NOVIKOV S.I.

*In article the algorithm of registration of a signal of transition process which is given rise both by single-phase short circuit on the earth and is described by normal switching processes. Registration is carried out by means of tension sensors which are installed on an overhead power transmission line.*

*Keywords: short circuits on the earth, the sensor of current and voltage, registration of transition process, digital-signal algorithm, amplitude-frequency characteristic.*

УДК 621.311

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СИСТЕМЕ «ЭКСПЕРТ РС»

ЦОЙ А.А., КНИТУ–КАИ, к.т.н., доцент, alts2011@yandex.ru

*Обсуждаются вопросы разработки экспертной системы, предназначенной для обеспечения экспертизы технического состояния*

*и выработки предложений для принятия оптимальных решений по техническому обслуживанию распределительных электросетей. Разрабатываемая система является объектно-ориентированной надстройкой интегральной информационной платформы. Рассматривается обобщенный алгоритм оптимизации надежности в условиях ограниченного ресурсообеспечения.*

*Ключевые слова: экспертные системы, электрические сети, техническое обслуживание, ресурсы, надежность, оптимизация.*

Принятие эффективных решений при планировании и мониторинге мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) распределительных электросетей (РС) предполагает обработку больших объемов знаний о техническом состоянии объектов сети и сети в целом. Принятие оптимальных решений требует использования соответствующего программно-математического аппарата. Решение указанных проблем невозможно без комплексной информатизации работ этапа эксплуатации жизненного цикла РС. Инструментом для ее реализации может стать разрабатываемая экспертная система «Эксперт РС».

Система «Эксперт РС» является надстройкой к интегрированной информационной платформе сетевого предприятия, предназначенной для обеспечения решения инженерных, экономических и других задач, связанных со спецификой этапа технической эксплуатации РС.

Задачи обработки информации, разработки, сопровождения и выпуска документации сложных изделий, в том числе на этапе эксплуатации, успешно решаются с использованием таких систем, как TG Builder, PDM STEP Suite, LSA Suite и многих других. Такие системы позволяют создать интегрированную информационную среду предприятия, обеспечивающую информационное сопровождение объектов на всех этапах их жизненного цикла. Системы этого типа включают базы данных, средства администрирования, программы поддержки работы с текстовой, графической и мультимедийной информацией. Элементы таких систем присутствуют на большинстве современных предприятий.

Рассматриваемые информационные системы, как правило, имеют универсальный характер и требуют настройки на соответствующую предметную область. Настройка состоит в разработке структуры баз данных, их наполнении конкретным содержанием, определении алгоритмов и интерфейсов информационного взаимодействия пользователей. Решение этих задач является одним из этапов разработки системы «Эксперт РС».

Другой важный этап разработки системы «Эксперт РС» связан с тем, что универсальные системы не содержат программного обеспечения, необходимого для решения прикладных задач в конкретной предметной области.

В предметно-прикладной области система «Эксперт РС» предназначена для выполнения консалтинговых функций для принятия оптимальных решений по ТО РС. Основное ее назначение состоит в обеспечении экспертизы технического состояния, консультаций и выработки предложений по оптимизации решений при планировании работ по техническому обслуживанию, ремонту и развитию РС, а также для документального сопровождения этих работ. В этой связи центральным компонентом системы является подсистема программных средств моделирования и экспертных расчетов, таких как:

- анализ режимов работы, расчет токораспределения и режима напряжений в точках потребления, оценка загруженности компонентов и качества электроэнергии;
- расчет и анализ показателей технического состояния компонентов РС, в том числе показателей надежности;
- оптимизация принятия решений.

На данном этапе решается задача разработки проблемного матобеспечения расчетно-экспертных задач и оптимизации решений в системе «Эксперт РС».

Центральной задачей принятия эффективных решений по ТО является планирование диагностических, профилактических и ремонтно-восстановительных работ. Целью работ по ТО является обеспечение надежного электроснабжения потребителей. Средств на проведение мероприятий по ТО в полном объеме всегда недостаточно. Проблема оптимизации надежности при ограниченных ресурсах на ТО является одной из основных в этой части задач.

Проблема оптимизации надежности электроснабжения потребителей РС рассматривается в работах [1, 2]. В частности, в работе [1] решается задача минимизации выделяемых средств на ТО при ограничениях по надежности электроснабжения потребителей. В работе [2] предлагается алгоритм дуальной относительно этой задачи, где обеспечивается максимум надежности при ограничениях на выделяемые материальные ресурсы. Для включения в матобеспечение экспертной системы требуется универсальный инструмент, позволяющий решить задачу во всех возможных ее постановках.

В данной работе для использования системы «Эксперт РС» предлагается обобщенный алгоритм решения задачи оптимизации надежности в условиях ограниченных ресурсов, выделяемых на ТО. Его реализация дает возможность пользователю принять эффективное решение в зависимости от конкретной постановки задачи. С другой стороны, это упрощает программную реализацию модуля.



В обобщенной постановке задача математического программирования в качестве минимизируемой целевой функции использует либо суммарный ресурс, выделяемый на ТО, либо суммарное число ожидаемых отключений потребителей [3] с учетом их значимости. В ограничениях задачи, соответственно, ставятся ограничения по суммарному ущербу от отключений потребителей либо суммарные затраты на проведение мероприятий по ТО.

В обобщенной постановке оптимизационная задача сохраняет сепарабельность, и для ее решения, как и при решении каждой из дуальных задач, может быть использован метод динамического программирования.

Алгоритмически вычислительный процесс динамического программирования строится на конфигурации расчетной схемы. Принимается произвольная разомкнутая конфигурация сети. Учитывается различие требований по надежности потребителей разных категорий. Учитывается также тот факт, что в сетях сложной конфигурации последствия отключений зависят от места локализации отключаемого объекта сети. В этой связи более важным с точки зрения оценки качества электроснабжения является не суммарное число отключений объектов сети, а количество отключенных потребителей.

Применение метода ДП и предлагаемые здесь методика и алгоритм позволяют определить распределение заданного ресурса по объектам сети так, чтобы ожидаемое количество отключений потребителей было минимальным, либо обеспечить минимум затрат на ТО для обеспечения заданного уровня надежности электроснабжения потребителей.

Включение модуля оптимизации надежности, реализующего данный алгоритм, в систему «Эксперт РС» гарантирует принятие эффективных оптимальных решений при планировании ТО.

Реализация и внедрение экспертной системы «Эксперт РС» наряду с гарантией принятия оптимальных решений позволяет существенно сократить офисный персонал сетевых предприятий, повысить оперативность, эффективность и качество планирования и организации работ по ТО РС.

### **Источники**

1. Терещук В.С. Оптимизация ресурсообеспечения эксплуатационных нужд распределительных электросетей / В.С. Терещук, А.А. Цой // Вестник КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 4.

2. Цой А.А. Максимум надежности распределительных сетей при ограниченных ресурсах на техническое обслуживание / А.А. Цой // Вестник КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 1.

3. РД 153-34.3-20.573-2001. Указания по учету и анализу в энергосистемах технического состояния распределительных сетей напряжением 0,38 – 20 кВ с воздушными линиями электропередачи / Департамент электрических сетей ПАО «ЕЭС РОССИИ», введ. 01.09.01. – М., 2001. – 31 с.

**OPTIMAL PLANNING SERVICE IN “EXPERT OF DISTRIBUTION NETWORK”**  
TSOY A.A.

*Questions of development of expert system, which is dedicated to provide expert technical condition and adoption of optimal solution of maintenance power distribution network are discussed. The system is a object-oriented superstructure of integral information platform. The generalized algorithm mo reliability optimization in resource-limited is considered.*

*Keywords: expert system, distribution network, maintenance, resources, reliability, optimization.*

УДК 621

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 0,4 КВ НА ДОЖИМНЫХ  
НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ**

ШАЙДУЛЛИН И.Б., ООО «Диагностика-ЭнергоСервис», инженер

Защита электродвигателей является одной из приоритетных задач при эксплуатации электрического оборудования. Рассмотрим вопрос модернизации защиты асинхронных электродвигателей, расположенных на дожимных насосных станциях структурных подразделений ПАО «Татнефть». На сегодняшний день для защиты электродвигателей данных установок наиболее широкое распространение получили электронные контроллеры тока (ЭКТМ).

ЭКТМ позволяет защитить электродвигатель при наступлении одного из следующих событий:

- короткое замыкание;
- холостой ход электроустановки;
- превышение тока электроустановки выше номинального;
- пропадание одной или двух фаз;

– перекося фаз по току.

На рис. 1 представлена информация о количествах и причинах отказов ЭКТМ в период эксплуатации с 2007–2016 г.



Рис. 1. Информация о количествах и причинах отказов ЭКТМ в период эксплуатации с 2007–2016 г.

Также в таблице представлена информация о количестве внедренных ЭКТМ за период с 2007 по 2012 гг.

#### Информация о количестве внедренных ЭКТМ

№ п/п	Структурное подразделение ПАО «Татнефть»	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
1	НГДУ «Азнакаевскнефть»	8	10	7	9	8	6
2	НГДУ «Альметьевнефть»	7	9	6	8	7	5
3	НГДУ «Бавлынефть»	8	3				
4	НГДУ «Джалильнефть»	13	12	7	14		
5	НГДУ «Елховнефть»	14	18	16	11	13	
6	НГДУ «Лениногорскнефть»	20	17	18	17	11	
7	НГДУ «Нурлатнефть»	7	8	6			
8	НГДУ «Прикамнефть»	10	9				
9	НГДУ «Ямашнефть»	7	8	5			
		312				50	

Средний срок службы (наработки на отказ) ЭКТМ составляет порядка 6 лет. Таким образом, ЭКТМ, внедренные в период с 2007 по 2010 гг. в количестве 312 шт., в ближайшее время потребуют замены.

На сегодняшний день на территории РФ основными производителями контроллеров для защиты электродвигателей являются «СибЭлектроЗащита», «СибСпецПроект», «Техно-М», «Микроникс». На рис. 2 представлен анализ технических характеристик контроллеров устройств защиты. Были рассмотрены следующие устройства защиты ЭД: ЭКТНД, КСКН, УБЗ, УЗД.

При рассмотрении характеристик устройств защиты наибольшее внимание необходимо уделить степени исполнения защиты, возможности корректировки уставок, среднему времени наработки на отказ, дополнительному объему памяти и диапазону рабочей температуры.

	Электронный контроллер тока и напряжения ЭКТНД	Универсальный блок защиты УБЗ-302	Устройство защиты двигателя УЗД-7М	Контроллеры станка качалки КСКН
Изготовитель	ООО «СибЭлектроЗащита»	ООО «Техно-М»	ООО НТФ «Микроникс»	ООО «СибСпецПроект»
Город	Томск	Днепропетровск	Омск	Томск
Степень Защиты	IP-42	IP-40	IP-20	IP-20
Корректировка уставок	В панели контроллера	В панели контроллера	В панели контроллера	Через пульта ПУ-04
Среднее время наработки на отказ, часов, не менее	80000 (9лет)	50000 (6лет)	60000 (7лет)	50000 (6лет)
Объем встроенной памяти	(16, 32, 64, 128, 256)кБ +SD карта	(16, 32, 64, 128, 256)кБ	(16, 32, 64, 128, 256)кБ	(16, 32, 64, 128, 256)кБ
Диапазон контролируемых токов	0,05...6250	5...63	0,5...5800	0,05...6250
Диапазон контролируемых напряжений	50...450	180...450	176...264	180...450
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+40	-35...+55	-40...+55	-35...+40
Гарантия (год)	3	1	1	1
ЦЕНА (руб.)	4 500	7 500	10 000	4 000

Рис. 2. Сравнение ЭКТМ отечественных производителей

Проведенный анализ показал, что устройство «ЭКТНД» производства «СипЭлектроЗащита» г. Томск лучше других удовлетворяет требованиям надежности и предпочтительно для использования защиты электродвигателей дожимных насосных станций. Гарантия завода изготовителя – 36 мес. Управление контроллером осуществляется на панели прибора. Отсутствует необходимость подключения пульта управления.

Для повышения надежности работы контроллера ЭКТНД предлагаю смонтировать данный контроллер в отдельном шкафу степенью защиты

не ниже IP-56 и предусмотреть в данном шкафу систему микроклимата, позволяющую в зависимости от температуры окружающей среды поддерживать оптимальную температуру внутри шкафа.

Капитальные вложения на приобретение 312 компл. оборудования составят 12 596,38 тыс. руб. Экономический эффект за счет снижения эксплуатационных затрат составит 4 067 тыс. руб. ЧДД равен 10 232 тыс. руб. Срок окупаемости – 4,4 года.

Таким образом, защита ЭКТНД позволит устранить следующие проблемы:

- активное окисление металла контакта реле;
- отказ блока контроллера;
- высокую чувствительность к низким и высоким температурам окружающей среды;
- неисправность пульта управления;
- перегрев контактной пружины токопроводов.

### **Источники**

1. Технический паспорт ЭКТМД / Компания ООО «СибЭлектроЗащита». – Красноярск, 2014.

2. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1985.

УДК 62-83

## **СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ВИБРО-ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

ШАРАШКИН С.В., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, аспирант,  
sergey.nii.opr@gmail.com

*Описаны основные механические и электромагнитные причины вибраций и шумов в электрических машинах. Приведены способы устранения причин вибраций и шумов. Описаны электромагнитные процессы в реактивной электрической машине с лепестковым ротором, применение которой в электроприводах позволит улучшить вибро-шумовые характеристики.*

*Ключевые слова: электропривод, реактивная электрическая машина, лепестковый ротор, специальная форма ротора, вибро-шумовые характеристики, устранение вибраций, улучшение вибро-шумовых характеристик.*

В настоящее время вопрос улучшения вибро-шумовых характеристик (ВШХ) электропривода является актуальным, несмотря на то, что борьба с вибрациями и шумами в приводах ведется уже более ста лет. Ограничения по ВШХ связаны, в первую очередь, с необходимостью уменьшения уровня шума в рабочих помещениях, поскольку превышение определенных пределов пагубно влияет на нервную систему и состояние здоровья работающего персонала [1], а также с передачей вибраций и шумов от оборудования в окружающую среду, что немаловажно для научно-исследовательских судов [2] и судов военного флота.

Для решения проблемы уменьшения ВШХ электропривода необходим комплексный подход, поскольку в приводе, как правило, находится не один источник шума и вибраций, а несколько (электродвигатели, редукторы, преобразователи частоты, исполнительные механизмы и др.). В данной работе рассмотрены способы уменьшения ВШХ электродвигателей, которые применяются или могут быть применены на практике при построении судового электропривода.

Вибрации в электрических машинах по природе происхождения можно разделить на механические и электромагнитные. К механическим вибрациям относятся те, которые возникают при неуравновешенности вращающихся частей электродвигателя, при неправильной установке машины на фундамент, при дефектах в подшипниках и т.п. Также к механическим относят вибрации, возникающие при неравномерном нагреве ротора (тепловой небаланс), и аэродинамические вибрации [3]. Основным источником электромагнитных вибраций является пульсация электромагнитного момента, которая связана как с гармоническим составом токов, протекающих в обмотках, так и с формой воздушного зазора между статором и ротором.

### **Устранение механических причин вибраций**

Неуравновешенность ротора электрической машины является не только причиной повышения ВШХ, но также и причиной возникновения усталостных разрушений. Для устранения неуравновешенности ротора

электрической машины необходимо производить балансировку, которая приводит к уменьшению динамических усилий от центробежных сил, вызванных дисбалансом.

Уменьшение вибраций, возникающих при плохом креплении машины на фундаменте, производится за счет устранения неплотного прилегания и ослабления крепления к фундаменту, что приводит к увеличению жесткости установки и увеличению общей массы, колеблющейся вместе с машиной.

В случае соединения вала машины с валом редуктора, исполнительным механизмом или валом другой машины (работа машин в тандеме, электромашинный преобразователь), необходимо производить центровку валов, обеспечив тем самым расположение валов таким образом, чтобы их упругие линии являлись продолжением друг друга без смещения и излома в плоскости сопряжения.

Для исключения теплового небаланса в электрических машинах применяют горячую посадку железа на вал – это исключает возможность ослабления посадки под действием центробежных сил и теплового расширения пакета, а следовательно, и изгиба вала. Помимо вышесказанного, в электрических машинах производят балансировку, нагревая ротор до температуры номинального режима работы машины, при этом ухудшаются ВШХ в режиме, когда машина не нагрета.

Основная часть аэродинамических шумов в электрической машине возникает за счет вентилятора, поэтому улучшение ВШХ в данном случае достигается оптимизацией формы, размеров и числа лопастей, а также правильным исполнением щита, образующего полость для вентилятора.

### **Устранение электромагнитных причин вибраций**

К числу причин электромагнитных пульсаций можно отнести неравномерность воздушного зазора между статором и ротором, а также несимметрию статора или ротора. Эти причины приводят к неравномерному распределению электромагнитной индукции в зазоре, а следовательно, к несимметрии электромагнитного поля. Вышеописанные причины зависят от точности изготовления деталей машины и от качества сборки.

Причинами магнитной несимметрии в машине может быть не только форма ротора: замыкание части обмотки фазного ротора асинхронного двигателя, например, также приводит к неравномерному распределению магнитного поля в зазоре и вибрации с частотой скольжения. В данном случае для устранения пульсаций необходима перемотка обмотки ротора.

При вращении ротора электрической машины магнитная проводимость воздушного зазора по оси каждого полюса периодически изменяется (ухудшается ее гармонический состав) – это обусловлено зубчатой конфигурацией статора, а также ротора (асинхронные электрические машины, реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором), пульсации проводимости приводят к пульсациям электромагнитного момента машины. Уменьшение ВШХ в таком случае достигается за счет разделения ротора на несколько пакетов и смещения их друг относительно друга на углы, сумма которых равна зубцовому делению статора, или изготовления ротора со скосом полюсов на зубцовое деление статора – это приводит к улучшению гармонического состава магнитных проводимостей и уменьшению пульсаций электромагнитного момента.

Помимо геометрии магнитопровода машины, на пульсации электромагнитного момента влияет гармонический состав токов, протекающих в обмотках. Для формирования необходимых параметров тока и напряжения, подающихся от источника электроэнергии на обмотки электродвигателя, используют преобразователи электрической энергии, для двигателей переменного тока, как правило, – преобразователи частоты (ПЧ). Улучшение гармонического состава токов на выходе ПЧ обеспечивается построением эффективного алгоритма управления и реализацией быстродействующей системы управления.

Большую роль в улучшении гармонического состава токов на выходе ПЧ играет коммутационная способность полупроводниковых ключей [4]. Современные кремниевые ключи практически исчерпали свои возможности по увеличению частоты коммутаций, в связи с этим ведущие производители полупроводниковой техники (Semikron, Hitachi, Infineon и др.) готовятся к серийному выпуску карбид-кремниевых ключей. Такие ключи позволяют в значительной степени понизить коммутационные потери, при этом уменьшается нагрев, улучшаются габариты ключа и повышается допустимая частота коммутаций. Исходя из вышесказанного, применение карбид-кремниевых ключей может послужить эффективным способом улучшения гармонического состава токов на выходе ПЧ, а следовательно, и ВШХ электропривода в целом.

Вибрации и шумы, обусловленные пульсацией электромагнитного момента, связанного с геометрией магнитопровода в электрической машине, создают внушительный вклад в ВШХ машины в целом, поэтому устранению такого рода пульсаций предлагается уделить наибольшее внимание. Одним из наиболее эффективных методов устранения электромагнитных пульсаций является применение роторов специальной (лепестковой) формы в реактивных электрических машинах: такая форма



теоретически позволяет достичь идеального синусоидального изменения магнитной проводимости в воздушном зазоре, тем самым исключив пульсации электромагнитного момента [5]. В работе рассматриваются именно реактивные электрические машины, поскольку они обладают рядом преимуществ при построении малошумного электропривода (пассивный ротор, не нуждающийся в охлаждении, простота и технологичность изготовления, возможность реализовать низкие ВШХ и др.).

### Улучшение гармонического состава магнитных проводимостей реактивной электрической машины за счет применения лепесткового ротора

Магнитные проводимости воздушного зазора зависят от положения ротора и являются периодическими пульсирующими функциями геометрического угла поворота ротора  $\Gamma$  и электрического угла  $\gamma = p_2\Gamma$  (рис. 1), где  $p_2$  – число пар зубцов на роторе. Величина и форма пульсаций при вращении ротора зависят от конструкции зубцов ротора и статора:

$$\lambda_{\delta}(\gamma) = \lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \text{Lr}(\gamma). \quad (1)$$

Для описания магнитных проводимостей ротора вводится  $\pi$ -периодическая функция  $\text{Lr}(\gamma)$ , симметричная относительно оси абсцисс, такая, что  $\text{Lr}(\gamma) = -\text{Lr}(\gamma + \pi/2)$ , где  $\gamma = p_2\Gamma = Z_2\Gamma$  – электрический угол повторяемости магнитных процессов.

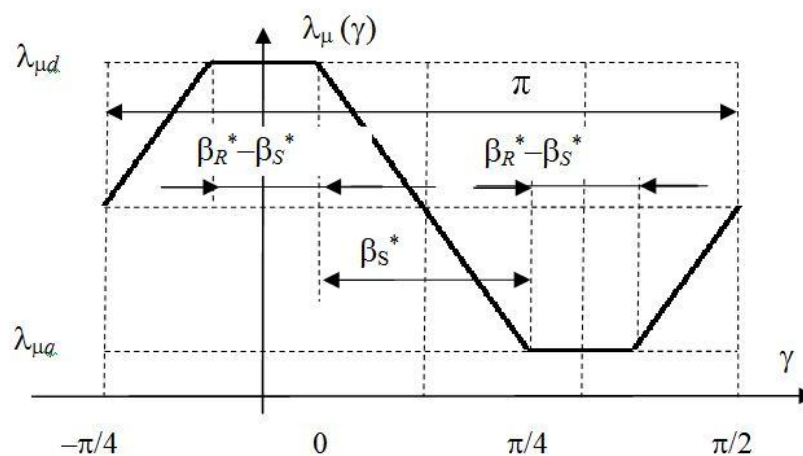


Рис. 1. Зависимость магнитной проводимости катушки в машине с зубчатым статором и ротором ( $\beta_R^*$ ,  $\beta_S^*$  – угловой размер зубцов ротора и статора в относительных единицах)

Рассмотрим формирование магнитных проводимостей катушек статора за счет изменения воздушного зазора под зубцом обмотки статора так, чтобы функция  $Lr(\gamma)$  была синусоидальной. Будем полагать, что воздушный зазор под зубцом обмотки статора  $\delta$  является функцией угла магнитной повторяемости  $\gamma$ , отсчитываемого от продольной оси магнитной симметрии ротора:  $\delta(\gamma)$ .

Угол магнитной повторяемости  $x$  связан с углом поворота ротора  $\Gamma$  соотношением  $x = Z_2\Gamma$ . В этом случае центральный угловой размер зубца в углах магнитной повторяемости будет равен  $\beta_S^* = p_2\beta_S$ . Тогда магнитную проводимость зубцовой катушки можно определить по формуле

$$\lambda_\delta(\gamma) = \int_{-\beta_S^*/2}^{\beta_S^*/2} \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot dx}{p_2 \cdot \delta(x + \gamma)}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $R$  – радиус расточки статора;  $l$  – расчетная длина магнитопровода.

Положим, что в формуле магнитной проводимости (1) функция  $Lr(\gamma) = \cos(2\gamma)$ . Тогда магнитная проводимость катушки пульсирует по синусоидальному закону:

$$\lambda(\gamma) = \lambda_0 + \lambda_m \cdot \cos(2\gamma), \quad (3)$$

где  $\gamma = p_2\Gamma$ .

Определим, как должен меняться воздушный зазор для того, чтобы магнитная проводимость катушки соответствовала выражению (3). Для этого необходимо решить интегральное уравнение (2). Несложно проверить, что решением уравнения (2) является функция вида:

$$\delta(\gamma) = \frac{2 \cdot \delta_d \cdot \delta_q}{\delta_q + \delta_d + (\delta_q + \delta_d) \cdot \cos(2\gamma)} \approx \frac{\delta_d}{\sin^2(\gamma)}, \quad (4)$$

где  $\delta_d$  – воздушный зазор по продольной оси  $d$ ;  $\delta_q$  – воздушный зазор по поперечной оси  $q$ . Приближенное выражение в формуле (4) записано в предположении, что  $\delta_d$  много меньше  $\delta_q$ . Таким образом, зависимость величины воздушного зазора под зубцом обмотки статора, обеспечивающая синусоидальный характер магнитной проводимости воздушного зазора, определяется формулой (4).

Радиус ротора является функцией угла магнитной повторяемости  $\gamma$ :

$$r(\gamma) = R - \frac{2 \cdot \delta_d \cdot \delta_q}{\delta_q + \delta_d + (\delta_q + \delta_d) \cdot \cos(2\gamma)} \approx R - \frac{\delta_d}{\sin^2(\gamma)}.$$

Если учесть, что угол магнитной повторяемости  $\gamma$  связан с углом поворота ротора  $\Gamma$  соотношением  $\gamma = p_2 \Gamma$ , где  $p_2$  – число пар зубцов ротора, то

$$r(p_2 \Gamma) = R - \frac{2 \cdot \delta_d \cdot \delta_q}{\delta_q + \delta_d + (\delta_q + \delta_d) \cdot \cos(2p_2 \Gamma)} \approx R - \frac{\delta_d}{\sin^2(p_2 \Gamma)}. \quad (5)$$

Зная зависимость  $r(p_2 \Gamma)$  от угла поворота ротора, можем получить форму ротора, обеспечивающую минимальные пульсации электромагнитного момента. Пример магнитопровода машины с таким ротором приведен на рис. 2.

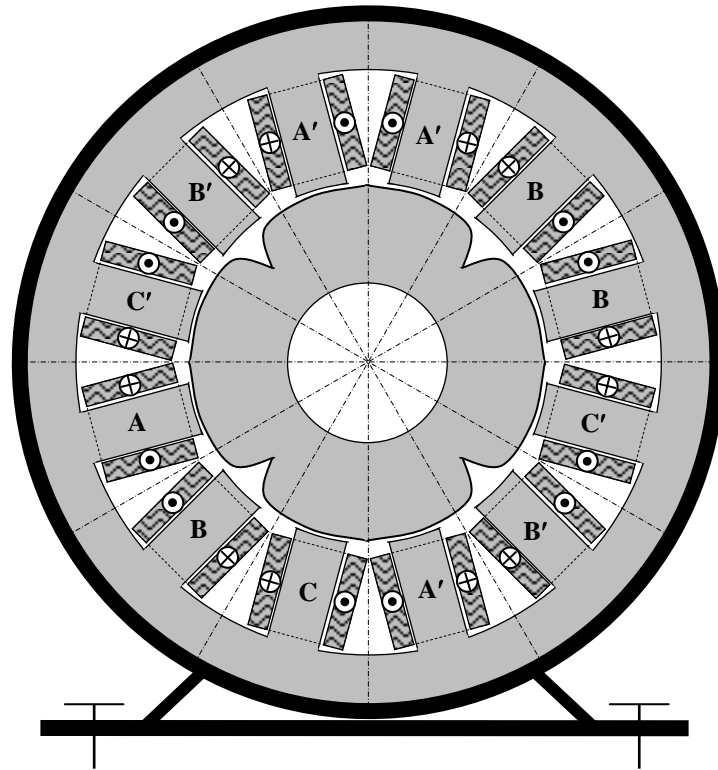


Рис. 2. Пример магнитопровода машины с числом фазных обмоток  $m = 3$ , пар полюсов статора  $p_s = 2$ , пар полюсов ротора  $p_2 = 2$ , пар полюсов ротора на фазу статора  $p = 2$

Если воздушный зазор между статором и ротором меняется в соответствии с выражением (4), то средняя магнитная проводимость катушки

$$\lambda_{\delta 0} = \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot (\delta_d + \delta_q) \cdot \beta_S^*}{\delta_d \cdot \delta_q \cdot p_2} \approx \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot \beta_S^*}{\delta_d \cdot p_2} \quad (6)$$

и амплитудная магнитная проводимость

$$\lambda_{\delta m} = \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot (\delta_q - \delta_d) \cdot \sin(\beta_S^*)}{\delta_d \cdot \delta_q \cdot p_2} \approx \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot \sin(\beta_S^*)}{\delta_d \cdot p_2}. \quad (7)$$

Максимальная магнитная проводимость катушки по оси  $d$ :

$$\lambda_{\delta d} = \lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \approx \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot (\beta_S^* + \sin(\beta_S^*))}{\delta_d \cdot p_2}. \quad (8)$$

Минимальная магнитная проводимость катушки по оси  $q$ :

$$\lambda_{\delta q} = \lambda_{\delta 0} - \lambda_{\delta m} \approx \frac{\mu_0 \cdot R \cdot l \cdot (\beta_S^* - \sin(\beta_S^*))}{\delta_d \cdot p_2}. \quad (9)$$

Оценить качество магнитной проводимости катушки статора можно по коэффициенту поперечной магнитной проводимости:

$$k_{\delta q} = \frac{\lambda_{\delta q}}{\lambda_{\delta d}} \approx \frac{\beta_S^* - \sin(\beta_S^*)}{\beta_S^* + \sin(\beta_S^*)},$$

где  $\beta_S^* = p_1 \beta_S$ .

Исходя из уравнения, для получения малых значений коэффициента  $k_{\delta q}$  угловой размер зубца статора на зубцовом периоде ротора должен быть небольшим, поскольку коэффициенту поперечной магнитной проводимости  $k_{\delta q} < 0,05$  соответствуют углы  $\beta_S^* < \pi/4$ .

## Выводы

1. При построении электропривода с повышенными ВШХ для уменьшения механических колебаний необходимо особое внимание уделять правильному креплению машины к фундаменту, балансировке вала, а также проектированию системы охлаждения. Для уменьшения электромагнитных вибраций, в первую очередь, необходимо осуществлять качественную сборку машины, отслеживать отсутствие дефектов и неточностей при изготовлении отдельных деталей и узлов.

2. При решении задачи уменьшения ВШХ необходимо особое внимание уделить разработке алгоритма управления электродвигателем и выбору полупроводниковых ключей.

3. Реактивная электрическая машина с лепестковым ротором обладает наименьшими ВШХ по сравнению с электрическими машинами других типов. Дальнейшее исследование машины с лепестковым ротором является перспективным направлением и может привести к значительному улучшению ВШХ малошумных электроприводов.

## Источники

1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин / И.Г. Шубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отд-е, 1986. – 208 с.

2. Кузнецов М.Ю. Характеристики гидроакустического шума научно-исследовательских судов ТИНРО-центра / М.Ю. Кузнецов, В.И. Шевцов, В.И. Поляничко // Известия ТИНРО. – 2014. – С. 235–256.

3. Исакович М.М. Устранение вибрации электрических машин / М.М. Исакович, Л.И. Клейман, Б.Х. Перчанок. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия; Ленингр. отд-е, 1979. – 200 с.

4. Гагаринов И.В. К вопросу определения номинальной частоты питающего напряжения для гребных электродвигателей / И.В. Гагаринов [и др.] // Научная мысль информационного века – 2014: труды 10-й Междунар. науч.-практ. конф. – Przemysl, 2014. – С. 54–56.

5. Шарашкин С.В. Улучшение гармонического состава магнитных проводимостей реактивной электрической машины за счет геометрии оснований цилиндра магнитопровода ротора / С.В. Шарашкин, В.Ф. Самосейко // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы 6-й межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов, 14 мая 2015 года. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. – С. 101–105.

6. Самосейко В.Ф. Теоретические основы управления электроприводом: учеб. пособие / В.Ф. Самосейко. – СПб.: Элмор, 2007. – 464 с.

**WAYS OF IMPROVING THE VIBRANOISE CHARACTERISTICS  
MARINE ELECTRIC DRIVE  
SHARASHKIN S.V.**

*The paper describes the main mechanical and electromagnetic causes of vibrations and noises in electrical machines. Given the causes of vibrations and noises. Describes electromagnetic processes in reactive electric machine with a special shape of rotor. Application of this shape can improve vibronoise characteristics.*

*Keywords: electric drive, reactive electric machine, the special shape of the rotor, vibronoise characteristics, elimination of vibration.*

УДК 621.22.018.8

**ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ  
ГИДРОАГРЕГАТА МЕТОДАМИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

ШИНДОР О.В., КНИТУ–КАИ, Чистопол. ф-л, к.т.н., o\_v\_sh@mail.ru

*Рассматривается возможность построения подсистемы диагностики состояния гидроагрегата на основе анализа его вибродиагностических данных методом вейвлет-преобразования. Показана возможность выявления дефектов и неисправностей на ранних стадиях развития.*

*Ключевые слова: гидроагрегат, гидрогенератор, вейвлет-преобразование, вибрационная диагностика, спектральный анализ, диагностика, мониторинг.*

Главным преимуществом ГЭС является их работа на постоянно возобновляемом природном источнике энергии и выработка электрической энергии при более высокой производительности труда и при наименьших общественных издержках производства по сравнению с другими электростанциями. Высокая маневренность гидроагрегатов, использование их в резкопеременных режимах, включая частые пуски и остановки, предъявляют повышенные требования к организации их технического обслуживания и ремонта [1].

Выявление возникающих при работе дефектов и неисправностей, их обнаружение на ранних стадиях развития позволяет своевременно принимать решение о выводе оборудования из работы до возникновения аварийных ситуаций. Кроме этого, в последнее время развивается тенденция обслуживания оборудования по факту его технического состояния.

Среди многочисленных методов технической диагностики особое место уделяется вибрационной диагностике, большинство методов которой базируется на анализе вибрации работающих машин и оборудования. Наибольшая трудность в вибрационной диагностике возникает при определении информативных диагностических параметров и выделении их из вибрационного сигнала. Среди классических методов обработки вибрационных сигналов стоит отметить: метод измерения общего уровня вибрации, метод пик-фактора, спектральный анализ, спектр огибающей высокочастотной вибрации, кепстральный анализ. Как правило, совокупное использование нескольких методов анализа позволяет достичь желаемого результата в диагностике оборудования. Для исследования стационарной вибрации с постоянной во времени мощностью случайных и периодических компонентов чаще всего используются методы спектрального анализа [2].

Современным альтернативным методом обработки нестационарных сигналов является вейвлет-преобразование, позволяющее выделять локальные особенности сигнала и обладающее хорошим разрешением одновременно и по времени, и по частоте. В качестве диагностических признаков технического состояния эксплуатируемого оборудования выбирается значение вейвлет-коэффициентов на различных масштабах.

Техническая диагностика гидроагрегата выполняется по двухуровневой системе. Согласно [3], на первом уровне оценки технического состояния узлов производят выявление возможных дефектов на основе сопоставления значений контролируемых параметров с номинальными или предельными значениями. На втором уровне выполняется углубленное техническое диагностирование, включающее определение параметров, состояния конструктивного узла и остаточного ресурса.

Одним из обязательных этапов оценки технического состояния гидроагрегатов на российских ГЭС является контроль вибрационного состояния конструктивных узлов, проводящийся в соответствии с нормативными документами [3–5]. Определение вибрационного состояния гидроагрегата проводится путем измерения вибрации опорных конструкций гидротурбины, стальных конструкций и лобовых частей обмоток статора гидрогенератора, биения вала гидрогенератора [4]. Совместно с вибрационными испытаниями проводят визуальные осмотры

оборудования. Эти мероприятия позволяют достаточно точно судить об эксплуатационном состоянии агрегата. Мерой вибрации узлов гидроагрегата в этом случае служит двойная амплитуда полигармонического виброперемещения.

Вибрационные испытания агрегата согласно технической документации обязательно проводятся до и после каждого капитального ремонта. Испытания, проводимые до ремонта, позволяют определить отклонения от нормального режима работы оборудования, выявить скрытые дефекты, не обнаруженные в период эксплуатации, и уточнить объем работ по ремонту. Качество проведенных ремонтных работ определяется вибрационным состоянием оборудования.

В межремонтный период целесообразность проведения измерений определяется результатами предыдущих обследований или при измерении уровня вибрации агрегата. По результатам проведения вибрационных испытаний должно быть составлено заключение с оценкой технического состояния гидроагрегата.

В работе рассматривается возможность построения подсистем диагностики гидрогенераторов на основе анализа вибродиагностических данных.

Для возможности ранней диагностики вращающегося оборудования необходимо своевременное выделение информативной составляющей из вибрационного сигнала. Обработка вибрационных сигналов проводилась с помощью непрерывного вейвлет-преобразования в силу содержания максимального количества диагностической информации в полученных в результате преобразования вейвлет-коэффициентах [6]. Для эффективного проведения данного вида анализа необходимы тонкая настройка и выбор параметров преобразования [2].

Обработка вибродиагностического сигнала производится в соответствии со структурой, представленной на рис. 1.

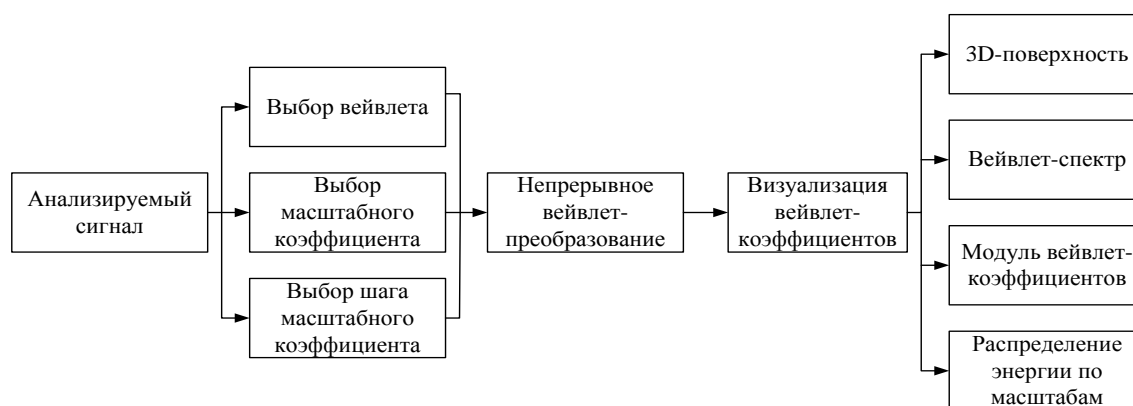


Рис. 1. Структурная схема выделения локальных особенностей сигнала



Методика выделения локальных особенностей вибродиагностического сигнала для ранней диагностики дефектов гидроагрегатов на основе непрерывного вейвлет-преобразования может быть представлена в следующем виде:

1) получение информации с вибродатчиков, установленных в местах, рекомендованных нормативными документами или локальными техническими документами гидроэлектростанции, и ввод измерительной информации в модуль-анализатор вибрационных данных, разработанный в среде LabVIEW;

2) выбор анализирующего вейвлета;

3) выбор предела значений и шага изменения масштабного коэффициента, непосредственно связанного соотношением с диапазоном частот, на котором осуществляется определение особенностей сигнала;

4) непрерывное вейвлет-преобразование вибрационного сигнала и получение значений вейвлет-коэффициентов;

5) визуализация вейвлет-коэффициентов. В зависимости от выполнения задач мониторинга или диагностики сигнала способы визуализации могут быть различны.

Для измерения вибрации использовалась аппаратура ИВГ-1 (измеритель вибрации гидроагрегатов), разработанная в ИЦ «Энергопрогресс», комплекс аппаратуры состоит из 16 датчиков вибрации (ВК-310Н), выходным сигналом которых является ток, пропорциональный виброскорости, блока согласования, АЦП (12-разрядный), компьютера типа Notebook.

Испытание опорных конструкций гидроагрегата производилось путем измерения радиальной вибрации турбинного и генераторного подшипников в двух взаимно перпендикулярных направлениях, биения вала в зоне турбинного и генераторного подшипников в тех же направлениях, вертикальной вибрации опоры пяты и верхней крестовины. 3D-модель гидроагрегата и расположение измеряемых параметров вибрации приведены на рис. 2.

Все измерения проводились на гидроагрегатах Нижнекамской ГЭС, вырабатывающей около 17 % суммарной электрической мощности энергосистемы Республики Татарстан.

Состояние опорных конструкций гидроагрегата определяется по среднему размаху виброперемещения, для чего применяется спектральный анализ. Оценка размаха виброперемещения проводится по низшей из составляющих частот.

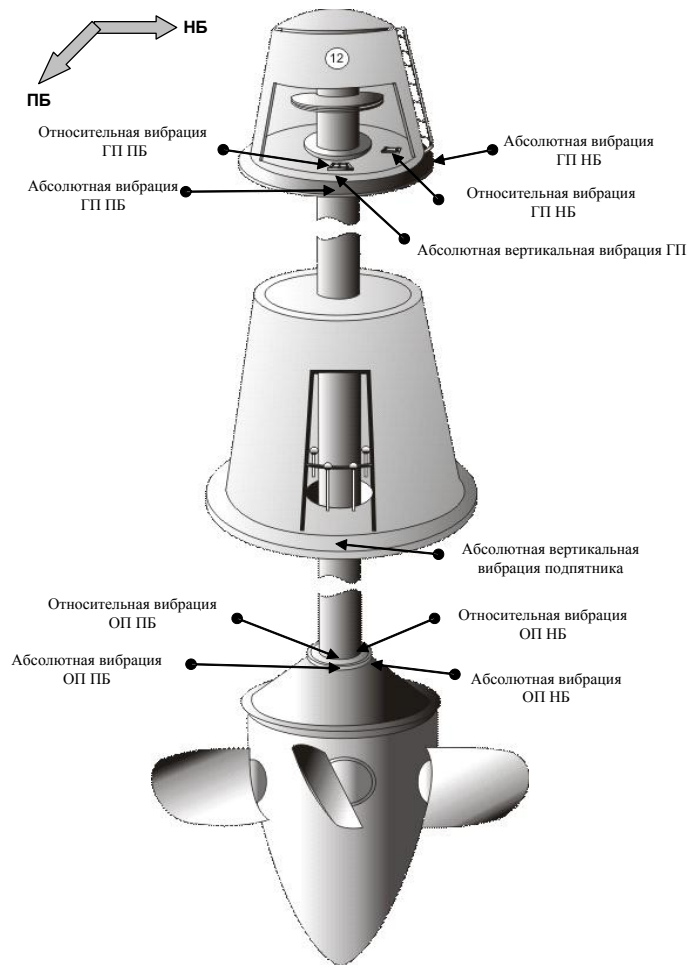


Рис. 2. Схема расположения датчиков для измерения параметров вибрации гидроагрегата

Среднему значению виброперемещения поставим в соответствие сумму абсолютных значений вейвлет-коэффициентов  $W_{\text{sum}}$  на частотах 1–10 Гц с шагом 1 Гц:

$$W_{\text{sum}} = \sum_a |W(a,b)|.$$

Значения коэффициента  $a$  выбираются в диапазоне 800–80, шаг нефиксированный, так как выбор величины масштабного коэффициента непосредственно зависит от необходимости анализа коэффициентов на определенной частоте.

Таким образом, выбираются следующие значения масштабного коэффициента  $a$ : 800, 400, 267, 200, 160, 133, 114, 100. При всех вычислениях использовался материнский вейвлет Добеши третьего порядка (db3), выбор которого был обоснован при анализе вибрационного состояния стальных конструкций статора гидрогенератора.

В результате анализа экспериментальных данных и определения среднего размаха виброперемещения на основе спектрального анализа было получено соответствие между значением вейвлет-коэффициентов и средним значением виброперемещения (таблица).

Соотношения между суммарным значением ВК  
и средним размахом виброперемещения

	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно	Недопустимо
Средний размах виброперемещения	<50	50–100	101–144	145–180	>180
Сумма абсолютных значений вейвлет-коэффициентов $W_{sum}$	<0,17	0,17 – 0,57	0,58–0,79	0,8–1	>1

Процесс мониторинга вибрационного состояния опорных конструкций гидроагрегата включает измерение абсолютной вибрации опорного и генераторного подшипников, вертикальной вибрации опоры пяты и верхней крестовины.

Для оценки вибрационного состояния опорного подшипника целесообразно усреднить полученные значения и оценить состояние как удовлетворительное.

При необходимости более детального анализа для определения причин ухудшения вибрационного состояния оборудования можно рассматривать вклад вейвлет-коэффициентов в суммарное значение на определенных частотах, аналогично спектральному анализу. При выполнении непрерывного мониторинга вибрации подшипника по изменению уровня вейвлет-коэффициентов можно определить время возникновения или нарастания дефекта. Для этого можно использовать проекции вейвлет-коэффициентов на плоскость определенного масштабного коэффициента, либо для получения общей картины можно воспользоваться спектром вейвлет-коэффициентов.

На рис. 3 представлено колебание виброскорости, измеренное на опорном подшипнике в направлении нижнего бьефа гидроагрегата № 7, работающего в режиме холостого хода с номинальной частотой вращения ротора, результаты спектрального анализа и картина вейвлет-коэффициентов.

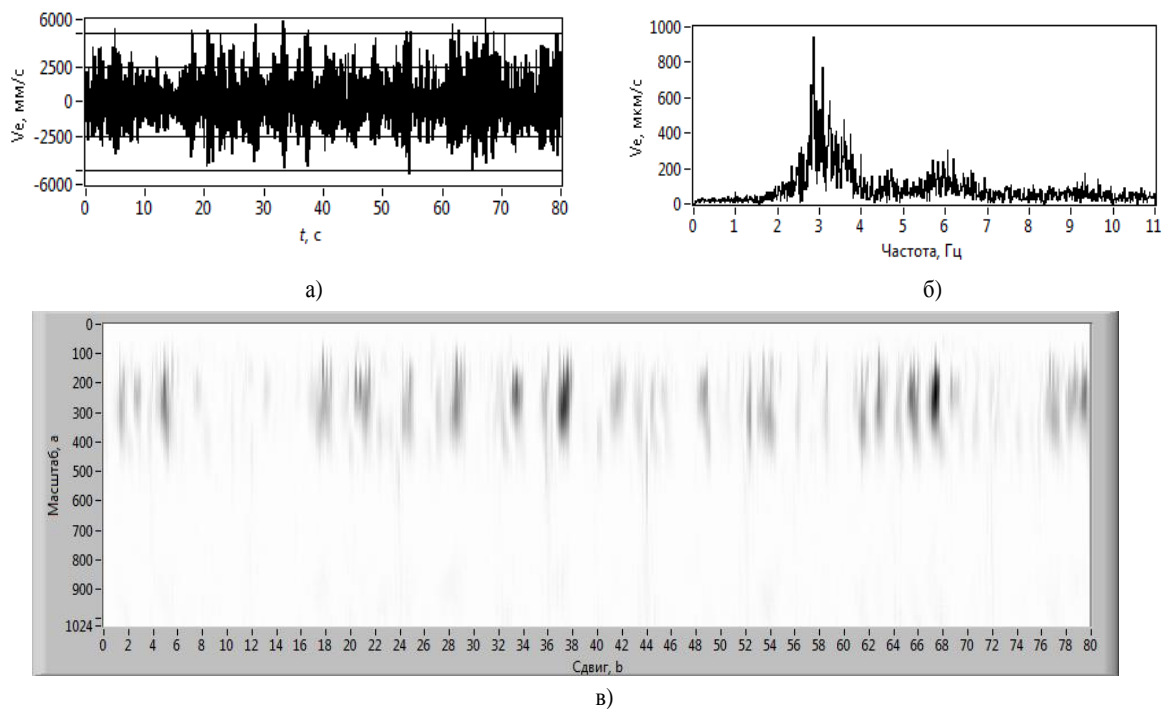


Рис. 3. Колебания виброскорости опорного подшипника (а) правого берега ПБ, спектр виброскорости (б) и картина вейвлет-коэффициентов (в)

Анализ картины вейвлет-коэффициентов (рис. 3, в) показывает, что наибольшие значения вейвлет-коэффициентов имеют в диапазоне масштабных значений 100–400, что соответствует диапазону частот 2–8 Гц, причем максимум вейвлет-коэффициентов наблюдается на масштабе 267, т.е. на частоте 3 Гц, что полностью совпадает с результатами спектрального анализа (рис. 3, б).

На основе имеющихся экспериментальных данных было установлено соответствие между средним значением биения вала и уровнем вейвлет-коэффициентов. Параметры вейвлет-преобразования аналогичны представленным выше. В данном случае единичное значение вейвлет-коэффициентов не соответствует единичному значению коэффициентов, полученных при оценке абсолютной вибрации опорного и генераторного подшипников.

### Источники

1. Надточий В.М. Справочник по ремонту и модернизации гидрогенераторов / В.М. Надточий, Я.С. Уринцев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.

2. Шиндор О.В. Исследование диагностических возможностей вейвлет-преобразования для анализа электрических флуктуаций водородного топливного элемента / О.В. Шиндор, Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 4. – С. 120–124.

3. СТО 17330282.27.140.001-2006. Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций. – М.: РАО «ЕЭС России», 2006.

4. РД 34.31.303-96. Методические указания по эксплуатационному контролю вибрационного состояния конструктивных узлов гидроагрегатов. – М.: РАО «ЕЭС России», 1996.

5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РД 34.20.501-03. Приказ Минтопэнерго России от 19.06.2003, № 49. Зарегистрировано в Минюсте России 20.06.2003, рег. № 4799.

6. Шиндор О.В. Применение вейвлет-преобразования для диагностики состояния гидроагрегата / О.В. Шиндор, Ю.К. Евдокимов // Нигматуллинские чтения – 2013: Междунар. науч.-техн. конф., 19–21 ноября 2013 г.: тез. докл. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – С. 197–200.

7. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие / А.Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

## **HYDRAULIC UNIT'S DIAGNOSTICS AND MONITORING BY WAVELET TRANSFORM SHINDOR O.V.**

*The possibility of diagnostics hydraulic unit states based on the analysis using wavelet transform of vibration characteristics is considered. The investigation of hydraulic unit vibration parameters is carried out before and after repair. It is shown the possibility of monitoring the state of hydro-generator for the detection of defects and faults in the early stages of development. Application of wavelet transform for the analysis due to the possibility of separating the local features of the signal.*

*Keywords: hydropower unit, hydrogenerator, wavelet transform, vibration diagnostic, spectral analysis, diagnostic, monitoring.*

УДК 620.8

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОБЩЕДОМОВОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЖИЛОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА**

ЮДАЕВ И.В., АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ, д.т.н., доцент,  
etsh1965@mail.ru

ДАУС Ю.В., АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ, магистрант,  
zirochka2505@gmail.com

*Повысить экологическую, экономическую эффективность функционирования систем электроснабжения и реализовать требования по энергосбережению в жилищно-коммунальном секторе экономики страны возможно путем использования возобновляемых источников электрической энергии – солнечных батарей в сочетании с новейшими разработками в области преобразования электрической энергии в световую – светодиодными лампами. Для подтверждения сформулированных тезисов выполнен технико-экономический расчет мероприятий по повышению эффективности системы общедомового освещения жилого многоквартирного дома в г. Волгограде. Экономически целесообразно это осуществить за счет комплексной модернизации, начиная с обоснования внедрения автономной системы генерации электрической энергии и заканчивая реконструкцией системы общедомового освещения. В результате выполненной оценки можно сделать вывод, что такое техническое решение не только окупит проект по замене источников света и внедрению солнечной электроустановки, но и высвободит электрические мощности, а также позволит получить дополнительный доход на реализацию последующих энергосберегающих предложений.*

*Ключевые слова: энергосбережение, система освещения, солнечная электроустановка, экономическая эффективность, срок окупаемости, светодиодные лампы, оплата за электроэнергию.*

Комфортное и безопасное проживание сегодня ассоциируется, прежде всего, со светом, теплом, уютом, информационной доступностью и безопасностью. Все перечисленные компоненты находятся в прямой зависимости от наличия и бесперебойной подачи электроэнергии – основы, необходимой для работы всех этих установок и приборов. В условиях

существующих реальностей ресурсо- и энергосбережения эффективность работы электроустановок в жилищно-коммунальном хозяйстве является одним из основных факторов, влияющих на экономию и разумное потребление энергии.

Привычным элементом многоквартирных, многоэтажных домов является освещение перед подъездами, на лестничных маршах, этажных площадках, в подвальных помещениях и под крышными конструкциями.

Обычно при возведении новостроек и последующей эксплуатации жилья в подъездах домов используются стандартные осветительные приборы и конструкции. При этом часто светотехническое оборудование работает по 12...24 часов в сутки, в том числе и в дневное время, что характеризуется неоправданно большим расходом электроэнергии.

Поэтому в наше время тема использования возобновляемых источников энергии в жилищно-коммунальном комплексе страны как нельзя более актуальна [1, 2]. Их установка и применение важны не только с точки зрения диверсификации технологической базы электрогенерации, но и для снижения антропогенного влияния на окружающую среду [3, 4]. Повысить экологическую, экономическую эффективность систем электроснабжения возможно путем использования новых установок электрической генерации – солнечных батарей [5]. Главное их достоинство – это предельно простые конструктивные элементы и полное отсутствие подвижных деталей. Солнечные батареи не нуждаются в каком-либо топливе, способны работать на внутренних ресурсах и не требуют практически технического обслуживания (обычно достаточно лишь протирать грязь с рабочей поверхности и следить за прочностью креплений). Кроме этого, применяемые технологии и материалы полностью соответствуют самым высоким экологическим нормам, солнечные батареи не производят выбросов вредных веществ в окружающую среду и абсолютно безопасны.

Если рационально сочетать такой подход к выработке электрической энергии с новейшими разработками в области преобразования этой энергии в световую – светодиодными лампами, то можно достичь высокого экологического и экономического эффекта при организации мероприятий по энергосбережению в ЖКХ.

Цель данной статьи – проанализировать и выработать рекомендации на основе технико-экономической оценки мероприятий по обеспечению энергоэффективности работы системы электроснабжения многоквартирного жилого дома за счет замены используемых источников света на светодиодные и применения солнечных батарей для электроснабжения общедомового освещения.

### Анализ и обсуждение результатов

Расчет экономической эффективности применения ламп различного типа, а также использования солнечной электроустановки для электроснабжения системы общедомового освещения проводился для девятиэтажного жилого дома по ул. Симонова в Дзержинском районе г. Волгограда.

В таблице представлены данные о существующих источниках света для системы общедомового освещения (лампы накаливания), а также о рекомендованных к применению по критерию энергоэффективности при условии, что световой поток для одной лампы каждого типа одинаков.

Данные об используемых и перспективных источниках света  
в системе общедомового освещения жилого дома

Параметр	Лампа накаливания (сущ.)	Люминесцентная лампа	Светодиодная лампа
Светильник	НПП9101	НПП9101	Econex Budget 3 Smart
Количество ламп, шт.	132		
Время работы в день, ч	24		
Время работы в году, дни	365		
Срок службы, ч	1000	5000	50000
Электрическая мощность ламп светильника, Вт	60	18	4,4
Стоимость кВт/ч, руб.	2,53		
Инфляция, % в год	10		
Стоимость одного светильника, руб.	290		850
Стоимость одной лампы, руб.	10	70	–
Стоимость замены одной лампы, руб.	10		
Стоимость утилизации лампы, руб.	15		–

Из анализа данных таблицы видно, что стоимость светодиодных ламп почти в 3 раза выше стоимости ламп накаливания, однако при этом срок службы почти в 50 раз больше, а мощность при одном и том же световом потоке отличается в 13,6 раза.



Анализ затрат на электроэнергию, потребленную системой общедомового освещения в течение 10 лет, для каждого вида лампы с учетом инфляции показал, что суммарный расход на электроэнергию за этот период времени составит от 34,192 тыс. руб. при использовании светодиодных ламп до 2797,86 тыс. руб. для ламп накаливания (рис. 1).

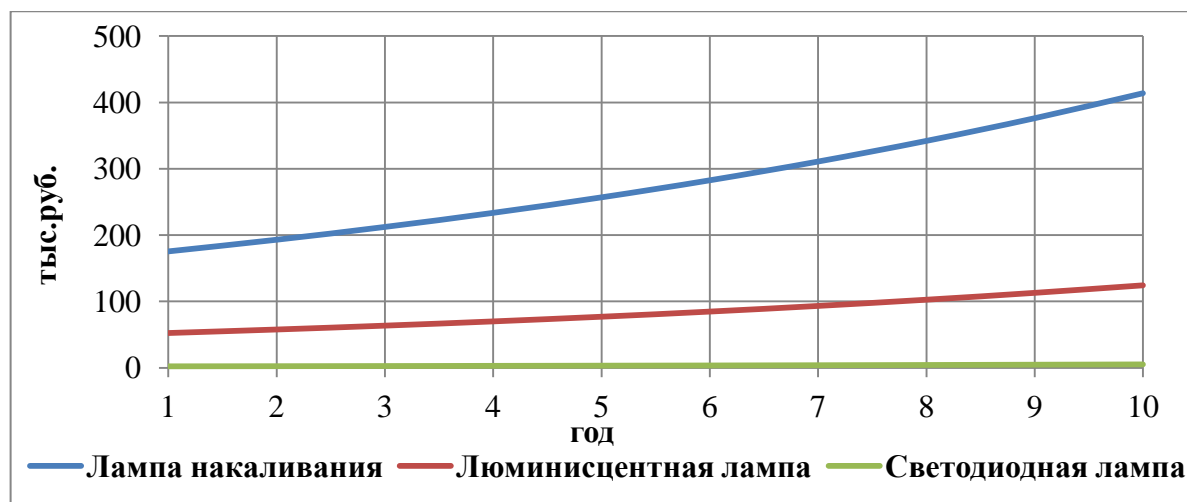


Рис. 1. Изменение оплаты за электроэнергию, потребленную системой общедомового освещения в течение 10 лет для каждого вида лампы, тыс. руб.

Практический интерес также представляет информация о затратах денежных средств на приобретение различных типов источников света для исследуемой системы электроснабжения общедомовой системы освещения (рис. 2).

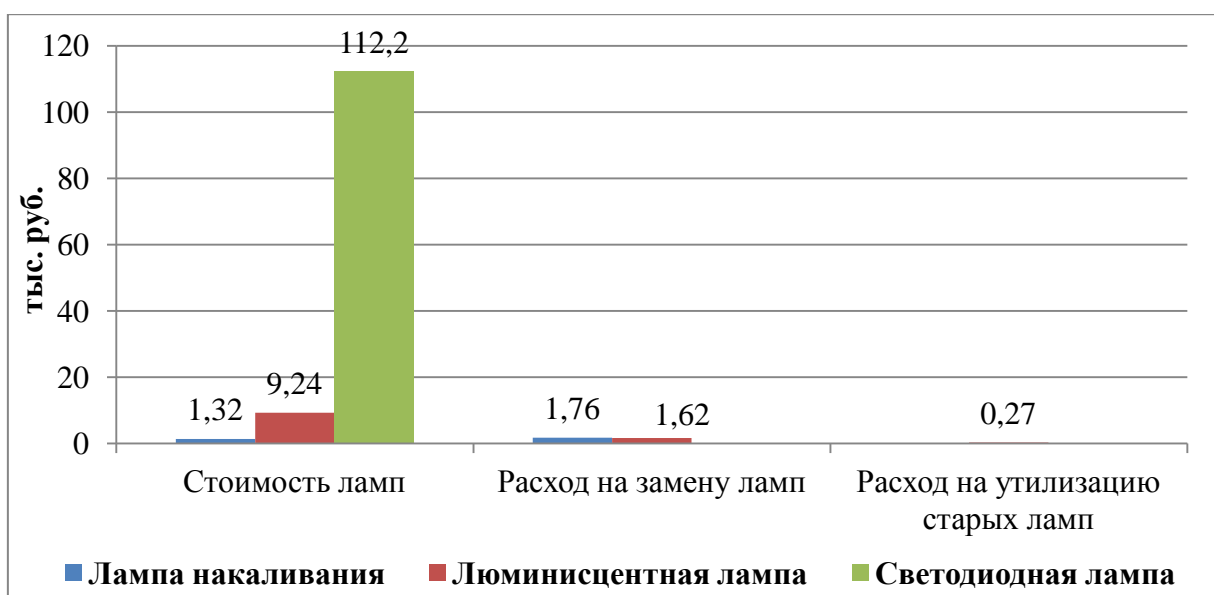


Рис. 2. Капитальные затраты на приобретение, замену и утилизацию ламп, тыс. руб.

Из анализа данных рис. 2 видно, что самые большие затраты на приобретение источников света связаны с установкой светодиодных ламп – 112,2 тыс. руб. Однако, благодаря существенной экономии потребляемой электрической энергии (173,384 тыс. руб./г.), их применение экономически целесообразно, и при этом срок окупаемости составляет 8 месяцев. Получаемую выгоду от внедрения данного мероприятия по замене источников света можно направить на реализацию не таких эффективных с точки зрения экономики, но важных с позиции снижения антропогенного влияния на окружающую среду и уменьшения зависимости от углеводородных источников энергии проектов, а именно – на применение солнечных электроустановок.

Солнечная установка представляет собой комплекс, состоящий из солнечных батарей и аккумуляторов. Включенные в систему датчики освещения и датчики движения позволяют обеспечить рациональный расход энергии, накопленной в аккумуляторах. Солнечные фотовольтаические батареи могут быть установлены на крыше здания, а также на его фасаде при условии, что одна из стен дома выходит на южную сторону.

С помощью [6] была рассчитана интенсивность суммарного солнечного излучения в течение года на приемную поверхность, находящуюся под углом  $35^\circ$  к горизонту с ориентацией на юг (наклонная панель), а также на горизонтальную и вертикальную поверхности (рис. 3) для географических координат  $48,68^\circ$  с.ш. и  $44,47^\circ$  в.д., что соответствует местоположению г. Волгограда.

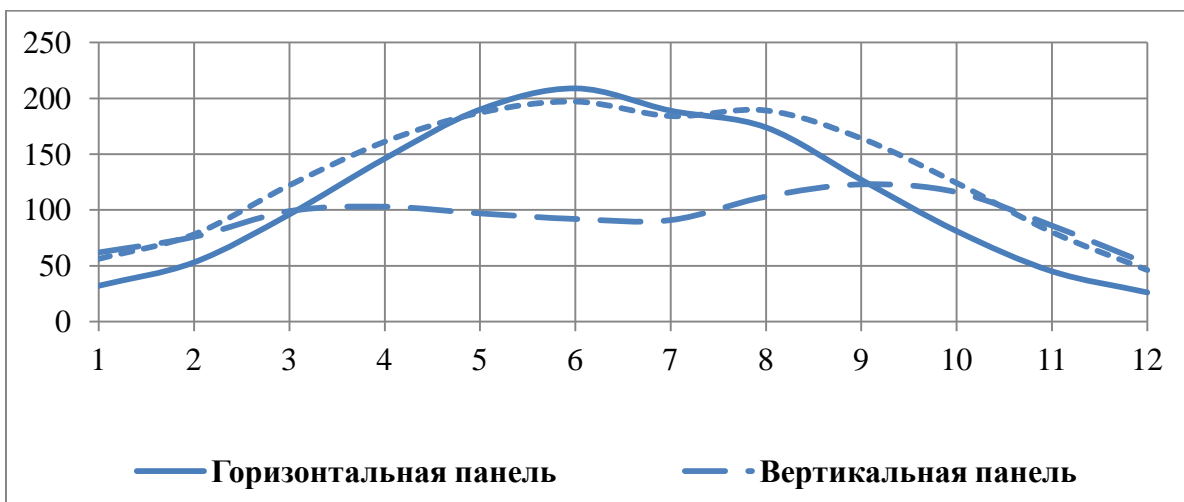


Рис. 3. Месячные суммы инсоляции на различно ориентированные приемные поверхности для г. Волгограда ( $48,68^\circ$  с.ш. и  $44,47^\circ$  в.д.)

При потребляемой системой общедомового потребления мощности 3 кВт/сут. было выбрано оборудование солнечной электроустановки со следующими параметрами:

– два солнечных модуля типа RZMP-240 номинальной мощностью  $P = 240$  Вт, размерами  $a \times b = 1640 \times 980$  мм и КПД  $\eta = 14,9$  % [7];

– система аккумулярования: четыре аккумуляторные батареи емкостью 200 А·ч типа АГМ при условии, что глубина разряда составляет 40 %, а автономная работа системы не превышает 72 часов [8];

– напряжение в системе – 12 В.

Такая система позволит сгенерировать 679,64 кВт·ч/год. При этом суммарные капитальные вложения составят 252,34 тыс. руб. Срок окупаемости будет очень высокий, что связано с высокой долей капитальных вложений в систему аккумулярования, однако если доход от внедрения мероприятия по модернизации системы общедомового освещения за счет замены ламп накаливания на энергосберегающие источники света направить на реализацию проекта нового источника электрической энергии, то срок окупаемости такой комплексной реконструкции системы общедомового освещения составит всего 2,1 года.

### **Заключение**

Ключом к повышению качества жизни человека является создание соответствующих физиологическим требованиям и экономическим возможностям условий его проживания. Это возможно реализовать за счет рационализации использования энергетических ресурсов, а именно электрической энергии. Начать формировать энергосберегающее сознание населения необходимо с модернизации (реконструкции), например, системы общедомового пользования – освещения. Расчет мероприятий по повышению эффективности такой системы для жилого дома по ул. Симонова в Дзержинском районе г. Волгограда показал, что экономически целесообразно это осуществлять комплексно, начиная с системы генерации электрической энергии и заканчивая системами ее преобразования. Результаты расчетов и анализа показали, что за период чуть больше двух лет возможно не только окупить проект по замене источников света и внедрению солнечной электроустановки, но и высвободить электрические мощности, а также получить дополнительных доход на реализацию последующих энергосберегающих предложений и мероприятий.

### **Источники**

1. Фархутдинов Р.Р. К вопросу о необходимости внедрения энергоэффективных технологий при производстве и потреблении электроэнергии / Р.Р. Фархутдинов, Г.Н. Марченко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 7/8. – С. 100–108.

2. Бадах В.Ф. Реальное энергосбережение в ЖКХ России / В.Ф. Бадах, А.Д. Кузнецова // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 1(31). – С. 114–118.

3. Высоцкий В.И. Энергосбережение и энергоэффективность объектов ЖКХ – составная часть процесса экологической безопасности / В.И. Высоцкий, И.Ф. Высоцкая // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2016. – № 2–3(2627). – С. 105–108.

4. Безруких П.П. Роль возобновляемой энергетики в модернизации промышленности России / П.П. Безруких, С.М. Карабанов // Деловая слава России. – 2015. – № 5-1(48). – С. 40–42.

5. Millinger M. Evaluation of Indian rural solar electrification: A case study in Chhattisgarh. Original Research Article / M. Millinger, T. Mårilind, E.O. Ahlgren // Energy for Sustainable Development. – 2012. – Vol. 16(4). – pp. 486–492.

6. Свидетельство № 2016612047 РФ. Оценка потенциала солнечной энергии в заданной точке Южного федерального округа: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.В. Даус, В.В. Харченко, И.В. Юдаев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Донской ГАУ». – № 2015662511; заявл. 18.12.2015; зарегистр. 18.02.2016. – 1 с.

7. Рязанский завод металлокерамических приборов: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.rmcip.ru/solarcells/product/id/24>.

8. ОАО «Тюменский аккумуляторный завод»: [сайт]. – Режим доступа: <http://tyumen-battery.ru/68>.

## **IMPROVING EFFICIENCY OF GENERAL USE LIGHTING SYSTEM OF RESIDENTIAL APARTMENT BUILDING YUDAEV I.V., DAUS YU.V.**

*There is possible to raise the environmental, economic efficiency of the power supply systems and implement the requirements for energy efficiency in housing and communal sector of the country through the use of renewable electric energy sources – solar cells in combination with the latest developments in the field of conversing electrical energy into light – LED lamps. To confirm the formulated theses technical and economic assessment of measures to improve the efficiency of general use lighting system of residential apartment building in Volgograd was carried out. It is economically expedient to accomplish this through comprehensive modernization, starting with the justifying implementation of the autonomous system of electrical energy generation and ending with reconstruction of general use lighting systems. As a result of carried assessment it can be concluded that such solution will not only pay back project on replacing light sources and the implementing solar power plant, but also will release electrical power, and will provide additional income for the implementation of the following energy-saving suggestions.*

*Keywords: energy efficiency, lighting system, solar electric power plant, economic efficiency, payback time, LED lamps, payment for electricity.*

УДК 532.527

## **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СЕПАРАЦИИ ГАЗА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ**

ЮШКО С.В., КНИТУ, д.т.н., профессор, s.v.yushko@gmail.com  
АХЛЯМОВ М.Н., ООО «ПЛКГРУП», к.т.н., заместитель директора,  
ma@plcgroup.ru  
СИРАЕВ Р.Р., КНИТУ, аспирант, siraev.rom@gmail.com  
АХМАДЕЕВ К.Х., ГИП ООО «ПЛКГРУП», ka@plcgroup.ru

*Рассмотрены основные аспекты анализа и оценки эффективной работоспособности сепарационного оборудования на установках комплексной подготовки природного газа. Детально описан измеритель содержания дисперсной фазы (ИСДФ) для определения количества дисперсной капельной жидкой и твердой фазы в газовом потоке после технологического оборудования. Устройство относится к области контроля качества подготовки природного и попутного газов к транспорту в нефтегазодобывающей промышленности и может быть использовано на топливно-энергетических, химических, нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих предприятиях.*

*Ключевые слова: подготовка газа, эффективность сепарации газа, массовое содержание дисперсной фазы, вторичный «унос», измеритель содержания дисперсной фазы, изокинетический зонд.*

Одной из важнейших задач в промышленности ТЭК является необходимость эффективного процесса очистки природного газа от жидкостей и механических примесей. Согласно [1], сепарация газа является необходимым условием очистки и предназначена для предохранения технологического оборудования от попадания жидких и твердых частиц в промысловые газосборные сети и оборудование газовых и газоконденсатных месторождений. Недостаточный уровень сепарации приводит к низкой эффективности промысловых газопроводов, перерасходу энергии, затрачиваемой на компримирование газа, росту эксплуатационных затрат, возможности образования газогидратных пробок в промысловых системах сбора и транспорта газа, снижению эффективности работы технологического оборудования промыслов.

Наличие указанной актуальной проблемы требует технического решения, и в связи с этим разрабатываются все новые и новые устройства для оценки уноса дисперсной фазы в потоке. К наиболее перспективным устройствам, внушающим уверенность в объективности результатов, относится измеритель содержания дисперсной фазы (ИСДФ).

ИСДФ в газовом потоке применяется для определения количества жидкой или твердой дисперсной фазы до или после технологического оборудования, газовых сепараторов, фильтров, адсорберов, абсорберов, компрессоров для оценки параметров их работы.

Устройство состоит из следующих блоков (рис. 1):

- 1) устройство перемещения пробозаборного зонда (УППЗ);
- 2) гибкие рукава;
- 3) теплообменный блок;
- 4) блок сепаратора поглотителя;
- 5) блок автоматического регулирования расхода пробы газа;
- 6) блок автоматического и ручного дозирования ингибитора гидратообразования;
- 7) теплоизолированный портативный кофр;
- 8) блок обработки информации (БОИ) – на рис. 1 условно не показан.

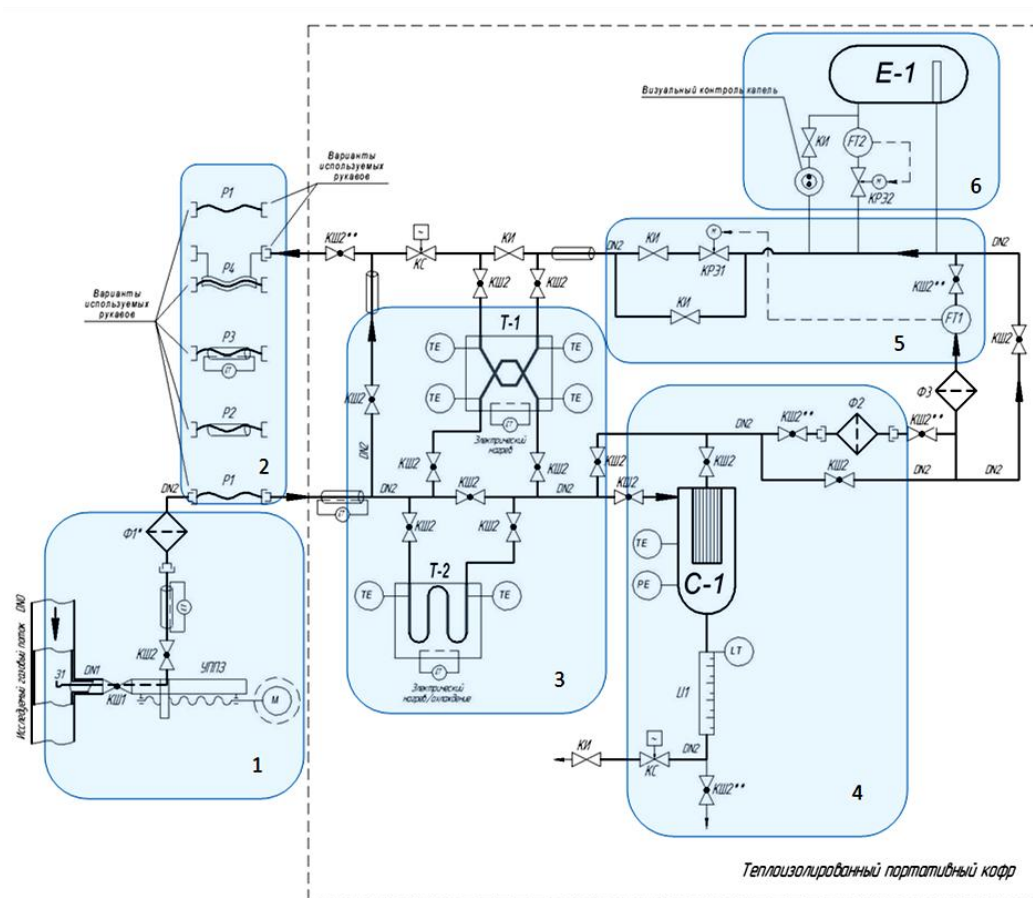


Рис. 1. Схема устройства

Принцип работы устройства, описание работы: для анализа отбирается незначительная часть потока газа через специальный пробоотборный зонд [2]. Устройство зонда показано на рис. 2.

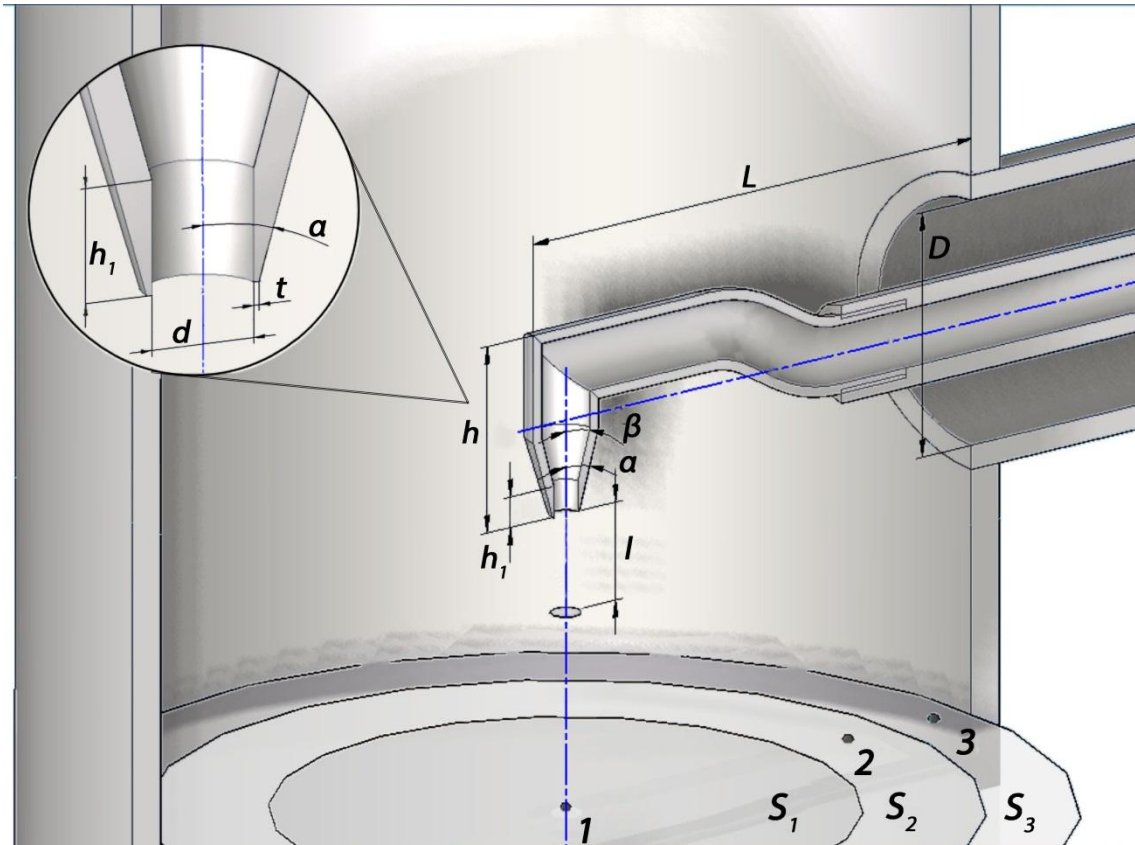


Рис. 2. Пробоотборный зонд

Массовый расход газа через зонд определяется по формуле:

$$q = Q \frac{d^2}{D^2},$$

где  $Q$  – массовый расход газа через основной трубопровод;  $D$  – диаметр условного прохода основного трубопровода;  $d$  – диаметр условного прохода зонда на его атакующем срезе.

Для забора пробы по всему профилю потока основного трубопровода предусмотрена возможность автоматического (по заданному алгоритму) изменения глубины погружения зонда при помощи устройства перемещения зонда УППЗ, оснащенного сервоприводом. Это позволяет определять значение концентрации дисперсных частиц в нескольких сечениях профиля потока.

УППЗ также используется для первичного ввода зонда в

технологический трубопровод через штуцер, предусмотренный на трубопроводе и оснащенный полнопроходной задвижкой КШ1 (шаровой кран, шиберная или клиновья задвижка) условным диаметром не менее 25 мм (допускаются штуцеры с другими, большими диаметрами).

В УППЗ предусмотрены сальниковые уплотнения, предназначенные для герметизации пробозаборной трубки от окружающей среды.

В конструкции зонда 31 предусмотрен также дополнительный канал отбора статического давления из штуцера трубопровода.

Для обеспечения представительности отбираемой пробы пробозабор должен осуществляться с линейной осевой скоростью, равной скорости потока (условие изокINETИЧНОСТИ).

Устройство имеет возможность поддерживать скорость потока в зонде путем автоматического регулирования расхода через пробозаборный зонд. Расход пробозабора измеряется массовым расходомером в составе устройства. Данный способ применяется, если исследуемый технологический трубопровод оснащен расходомером.

В составе УППЗ предусмотрен фильтр Ф1 для улавливания твердых дисперсных частиц из газопылевых потоков, например, после технологических фильтров газа для оценки эффективности фильтрования. Количество твердых дисперсных частиц определяется в лаборатории по привесу фильтрующей кассеты или по весу остатка после сжигания фильтрующей кассеты.

Отобранная проба газа должна сохранять температуру, равную температуре газа основного потока (условие изотермичности). Для этого:

1. УППЗ, как и устройство в целом, теплоизолировано, а также оснащено кабельным обогревом.

2. УППЗ, монтируемое на штуцере технологического трубопровода, и основной блок ИСДФ соединены между собой одним из гибких металлорукавов высокого давления, показанных на схеме. Применяются рукава: Р1 – гибкий РВД с быстроразъемными соединениями на концах, с самозакрывающимися ответными частями без дополнительных элементов; Р2 – такой же рукав с дополнительными наружными теплоизоляционным и защитным слоями; Р3 – такой же, как Р2, рукав с дополнительным греющим кабелем, проложенным под теплоизоляционным слоем; Р4 – теплообменный рукав в рукаве, имеющий внешний дополнительный рукав, через который подается вспомогательная среда, охлаждающая основной внутренний рукав за счет адиабатического расширения или обогревающая его. В качестве охлаждающей среды используется отработанная проба газа, сбрасываемая на свечу или факел.



3. Основной блок ИСДФ компактно смонтирован в портативном термостатированном кофре или стационарном утепленном шкафу.

4. Трубопроводы внутри блока теплоизолированы и оснащены кабельным обогревом.

5. Корпус сепаратора-поглотителя С1 и трубопроводы до него теплоизолированы и оснащены охлаждающим теплоспутником со сбрасываемой на свечу отработанной пробой газа в качестве охлаждающей среды.

6. Проба газа до попадания в сепаратор-поглотитель С1 при необходимости проходит один или несколько компактных теплообменников, смонтированных в блоке ИСДФ. Теплообменник Т1 осуществляет охлаждение пробы за счет нагрева встречного потока отработанной пробы газа, сбрасываемой на свечу или факел, или нагрев пробы газа электронагревателями, предусмотренными в его корпусе. Теплообменник Т2 нагревает или охлаждает при необходимости пробу газа за счет работы электронных приборов, реализующих принцип Пельтье.

Проба газа, содержащая представительную концентрацию дисперсных частиц жидкости, проходит через сепаратор-поглотитель С1, где осаждаются дисперсные частицы жидкости. Жидкость под действием силы тяжести стекает в мерник Л11 известной вместимости. Мерник позволяет производить визуальные измерения уровня заполнения, а также уровня раздела жидких фаз с разной плотностью, таких как различные водные растворы (растворы спиртов, солей и пр.) и различные углеводородные жидкости (стабильные и нестабильные конденсаты, минеральные и синтетические масла и их компоненты, моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль и др.), разделяющиеся в мернике под действием силы тяжести в зависимости от своих плотностей. Указанные уровни измеряются также уровнемером в автоматическом режиме. Устройство имеет возможность автоматически дренировать часть накопленной жидкости, открывая соленоидный клапан КС при достижении заданного оператором верхнего значения уровня. При достижении нижнего уровня жидкости клапан автоматически закрывается. Количество вытесненной из мерника за счет избыточного давления газа в сепараторе С-1 жидкости суммируется и учитывается БОИ устройства. Предусмотрена возможность сбора вытесненной из мерника жидкости в пробоотборный баллон.

Для подтверждения эффективности сепарации в С1 может применяться фильтр Ф2, соединяемый последовательно. Фильтр Ф2 используется также, если количество дисперсной фазы в потоке настолько мало, что за продолжительное время исследования не удастся набрать минимальный уровень в Л11. В этих случаях количество дисперсной фазы в отобранной пробе газа или в очищенном от дисперсной фазы газе определяется по привесу кассеты фильтра в лаборатории.

Исследованная на фильтре Ф1 или сепараторе С1, или фильтре Ф2 проба газа проходит через кориолисовый (массовый) расходомер FT1, который измеряет мгновенное значение массового расхода газа и определяет полную массу прошедшей за время исследования пробы газа. Одновременно с измерением массового расхода производится измерение плотности газа. Масса выделившихся на фильтрах или в сепараторе примесей может быть прибавлена к массе пробы газа, но на практике ими можно пренебречь. Перед расходомером проба газа проходит фильтр Ф3, предназначенный для защиты проточной части расходомера и седельной пары клапана-регулятора КРЭ1 во всех режимах работы устройства.

Поддержание расхода пробы газа в автоматическом режиме выполняется электроприводным клапаном-регулятором КРЭ1.

Для защиты клапана от гидратообразования предусмотрено дозирование ингибитора из емкости Е-1 через блок дозирования ингибитора. Блок дозирования ингибитора включает автоматический электроприводный клапан-регулятор расхода и кориолисовый расходомер. Также предусматривается возможность ручной дозировки ингибитора игольчатым клапаном КИ с визуальным контролем расхода в капельнице с прозрачным окном.

Температура отработанной пробы газа после дросселирования на клапане КРЭ1 существенно снижается из-за адиабатического расширения. Охлажденный газ используется в качестве хладагента в теплообменнике Т-1 и в теплообменном рукаве Р4.

Содержание жидкой дисперсной фазы в исследуемом технологическом потоке в объемных единицах определяется по формуле:

$$Q = \frac{V_{\text{жидкости}} \cdot D^2}{V_{\text{газа}} \cdot d^2},$$

где  $Q$  (см<sup>3</sup>/нм<sup>3</sup>) – объемная концентрация жидкости в газе;  $V_{\text{жидкости}}$  (см<sup>3</sup>) – суммарный объем жидкости, выделенный в сепараторе С-1, за полное время проведения измерения;  $V_{\text{газа}}$  (нм<sup>3</sup>) – суммарный объем газа, прошедшего через сепаратор за время измерения, приведенный к нормальным условиям.

Содержание жидкой дисперсной фазы в исследуемом технологическом потоке в массовых единицах определяется по формуле:

$$\mu = \frac{(10^3 \cdot V_{\text{жидкости}} \cdot \rho_{\text{жидкости}} + m_{\text{жидкости Ф2}}) \cdot D^2}{V_{\text{газа}} \cdot d^2},$$

где  $\mu$  (мг/нм<sup>3</sup>) – массовая концентрация жидкости в газе;  $\rho_{\text{жидкости}}$  (г/см<sup>3</sup>) – средняя плотность жидкости, отобранной из мерника сепаратора С-1, определенная в лаборатории или плотномером;  $m_{\text{жидкости}\Phi 2}$  (мг) – масса жидкости, выделившейся на кассете фильтра  $\Phi 2$ , определенная по разнице масс кассеты до и после исследований на весах в лаборатории.

Содержание механических примесей в исследуемом технологическом потоке в массовых единицах определяется по формуле:

$$M. K_{\text{мех.примесей}} = \frac{m_{\text{примесей}\Phi 1} \cdot D^2}{V_{\text{газа}} \cdot d^2},$$

где  $M. K_{\text{мех.примесей}}$  (мг/нм<sup>3</sup>) – массовое содержание механических примесей в газе;  $m_{\text{примесей}\Phi 1}$  (мг) – масса остатка после сжигания мембраны фильтра  $\Phi 1$  в лаборатории.

Устройство позволяет измерять содержание жидкой и твердой дисперсной фазы в газовых потоках с соблюдением условий сохранения температуры, давления и представительности пробы газа.

Устройство позволяет производить сканирование профиля потока с измерением скорости потока и концентрации в разных точках сечения потока.

Ниже перечислены преимущества ИСДФ:

1. За счет применения автоматического перемещения пробозаборного зонда достигается исследование концентрации дисперсных частиц в различных точках профиля концентраций. Возможно измерение усредненной концентрации или измерение концентрации в различных точках потока. Это обеспечивает более корректное измерение по сравнению со стационарным зондом.

2. За счет примененной формы пробозаборного зонда обеспечивается сохранение профиля концентраций в области забора пробы. Создаваемый в потоке телом зонда тормозной фронт находится за атакующим срезом зонда и не вносит изменений в сканируемый профиль концентраций. Такая форма совместно с обеспечением изокинетичности, обеспечивает представительность пробы.

3. За счет применения кориолисового расходомера в блоке автоматического регулирования расхода пробы обеспечивается корректное поддержание скорости газа на входе в пробозаборный зонд, которое не зависит от падения давления и изменений температуры пробы на участке от зонда до расходомера. Во многих аналогичных устройствах используется расходомер объемного типа, который требует коррекции объема при изменении давления и температуры газа.

4. За счет применения в комплексе или по отдельности средств термостатирования (охлаждающих теплообменников, охлаждающего рукава, нагревающего рукава, нагревающего теплообменника, кабельного обогрева элементов устройства, теплоизоляции элементов устройства) обеспечивается равенство температур пробы газа в точке пробозабора и в сепараторе-поглотителе С-1, что обеспечивает корректность измерений.

5. Обеспечивается возможность измерения плотности отбираемой пробы газа при сохранении изобарических условий трубопровода.

6. За счет применения блока автоматического и ручного дозирования ингибитора обеспечивается защита клапана-регулятора расхода газа в блоке автоматического регулирования расхода пробы газа от кристаллизации паров воды на седельной паре.

Возможны исполнения с длиной пробозаборного зонда, обеспечивающей сканирование профиля потока в цилиндрических трубопроводах с диаметром условного прохода более 400 мм (до 1200 мм).

Возможны исполнения с различной вместимостью мерника-накопителя LI1 – от 5 до 100 см<sup>3</sup>.

### Источники

1. Сираев Р.Р. Определение уноса капельной жидкости и механических примесей в газовом потоке / Р.Р. Сираев, М.Н. Ахлямов, С.В. Юшко // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 772.

2. Петров П.П. Электронные средства в образовании / П.П. Петров. – М.: Инфра-М, 2014. – 351 с.

3. Юшко С.В. Основные требования к формам наконечников измерителей содержания дисперсной фазы в газовом потоке / С.В. Юшко, М.Н. Ахлямов, Р.Р. Нигматов // Газовая промышленность. – 2013. – № 2. – С. 29–32.

### QUALITY ANALYSIS OF SEPARATION OF GAS AS A PART OF THE PROCESS

JUSHKO S.V., AHLYAMOV M.N., SIRAEV R.R., AKHMADEEV K.KH.

*This paper under discussed of the main aspects in the analysis and evaluation of effective performance separation equipment at installations of complex preparation of natural gas. Meter described in detail the contents of the dispersed phase (ISDF) to determine the amount of liquid or solid phase dispersed in the gas stream before or after the process equipment; device relates to quality control of natural and associated gas to transport to the oil and gas*

*industry and can be used for fuel and energy, chemical, petrochemical and oil and gas processing plants.*

*Keywords: preparation of gas, the weight content of the dispersed phase, the separation efficiency of gas, liquid drops, the dispersed phase, the content of liquid drops, measuring the content of the dispersed phase, isokinetic.*

УДК 621

## ТЕХНИЧЕСКИЙ АУДИТ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ НГДУ «АЗНАКАЕВСКНЕФТЬ»

ЯББАРОВ Р.Р., МУХОРТОВ И.С., АЮПОВ Н.Р., БИЛАЛОВ Ф.Ф.,  
ООО «Диагностика-ЭнергоСервис»

В настоящее время в ПАО «Татнефть» основными потребителями электроэнергии являются электроприводы, задействованные в процессах механизированной добычи (51 %) и поддержания пластового давления (34 %). Вопрос повышения энергоэффективности данных процессов в условиях постоянного роста тарифов остро стоит перед нефтедобывающими предприятиями (рис. 1).

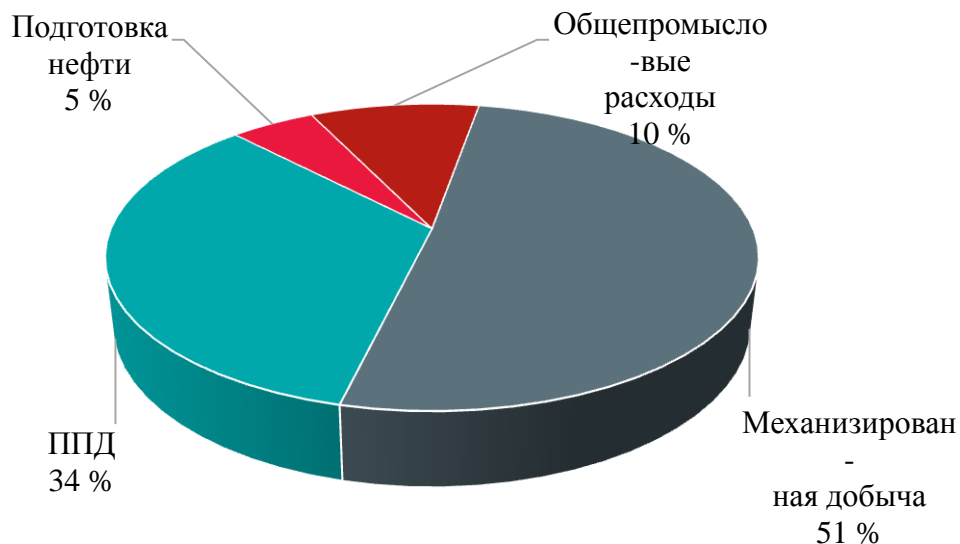


Рис. 1. Потребление электроэнергии по основным направлениям деятельности структурных подразделений ПАО «Татнефть»

С целью снижения удельных затрат электрической энергии на перекачку технологической жидкости на объектах НГДУ «Азнакаевскнефть» выполнен технический аудит насосного оборудования.

Основной задачей технического аудита является снижение удельных затрат на перекачку жидкости, которая достигается за счет решения следующих задач:

- оптимизации режимов работы оборудования;
- оптимизации эксплуатационных затрат;
- применения современных энергосберегающих технологий.

Для его решения необходима адаптация математических моделей процессов перекачки жидкости. При определении параметров режимов работы используются рабочие характеристики центробежных насосов. Характеристики  $Q$ – $H$  центробежных насосов в пределах рекомендуемых подач описываются уравнением квадратичной параболы:

$$H_p = H_f - S_f Q^2, \quad (1)$$

где  $H_f$  – фиктивный напор при нулевой подаче, м;  $S_f$  – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, м·(с/л)<sup>2</sup>.

Адекватные реальным объектам модели могут быть построены только с учетом измерений основных параметров технологического процесса: энергопотребления, расхода и напора жидкости, так как эксплуатируемый парк насосного оборудования имеет высокую степень физического износа, и большинство агрегатов подвергались неоднократному капитальному ремонту. Фиктивные параметры определяются по экспериментальным данным.

КПД насоса вычисляется на основании экспериментальных данных по следующей формуле:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{1000 P \eta_{ed}}, \quad (2)$$

где  $P$  – мощность, кВт, потребляемая насосным агрегатом;  $\eta_{ed}$  – КПД электродвигателя.

Для аппроксимации графиков рабочих характеристик и КПД насосных агрегатов (экспериментальных данных) применяется точечный способ наименьших квадратов. Согласно этому способу, за меру отклонения полинома

$$Q_m(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m \quad (3)$$

от данной функции  $f(x)$  на множестве точек  $x_0, x_1, \dots, x_n$  принимают величину

$$S_m = \sum_{i=0}^n [Q_m(x_i) - f(x_i)]^2, \quad (4)$$

равную сумме квадратов отклонений полинома  $Q_m(x)$  от функции  $f(x)$  на заданной системе точек.

В качестве примера применения данной модели представлены результаты проведенного технического аудита на примере насосных станций (рис. 2) НГДУ «Азнакаевскнефть».



Рис. 2. Объекты исследования

Проведенные инструментальные замеры насосного агрегата № 3 БЦСП показали: максимальная нагрузка электродвигателя насосного агрегата составляет 50 %, что говорит о необходимости рассмотрения мероприятий по повышению энергоэффективности привода данного насосного агрегата (рис. 3).

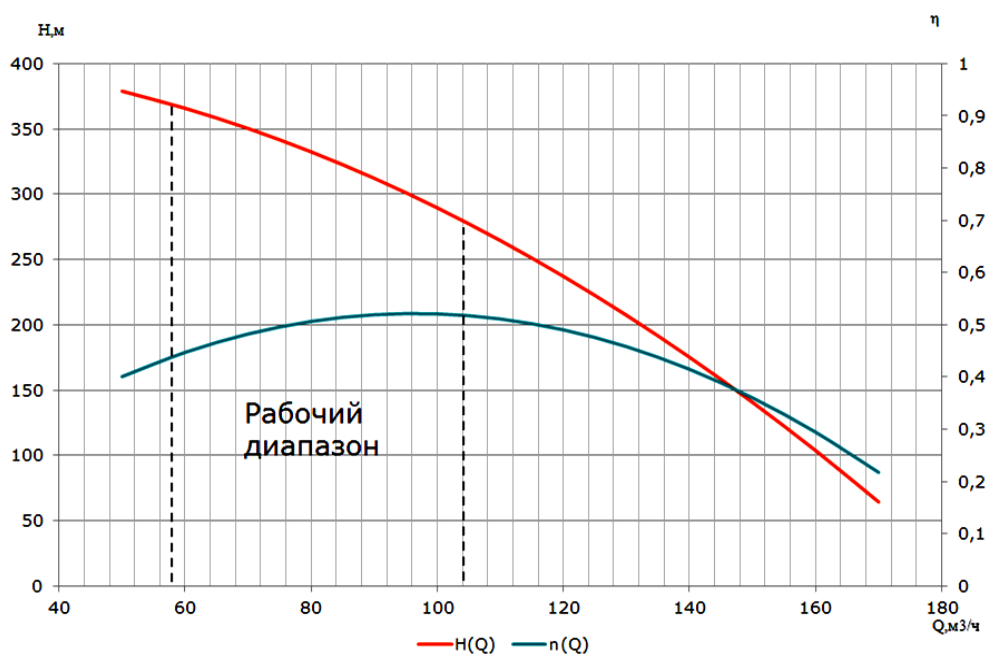


Рис. 3. Фактическая рабочая характеристика насосного агрегата № 3 БЦСП

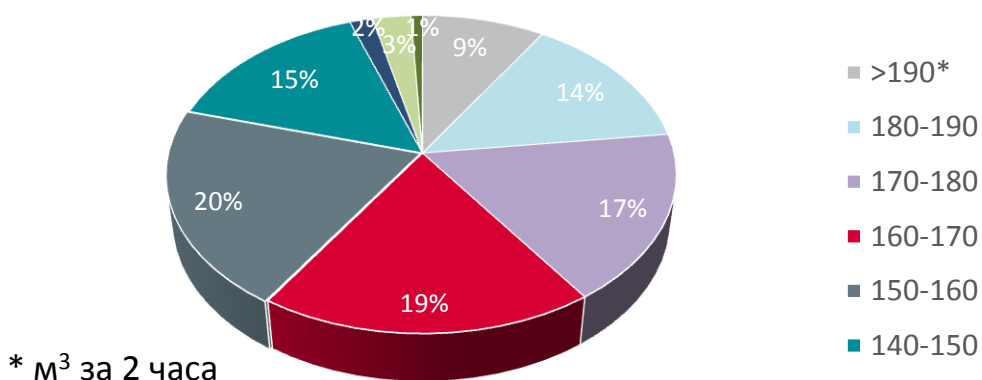


Рис. 4. Анализ работы насосного агрегата № 3 БЦСП

Анализ режимов работы насосного агрегата (рис. 4) показал, что объем перекачиваемой жидкости изменяется от 50 до 100 %. При работе насосной установки с подачей меньше расчетной возникает превышение напора насоса, что приводит к перерасходу электроэнергии.

По результатам технического аудита насосного агрегата № 3 БЦСП разработаны шесть вариантов мероприятий по снижению затрат на перекачку жидкости (табл. 1)

Таблица 1

#### Мероприятия по снижению затрат на перекачку жидкости на БЦСП

№ п/п	Наименование	Экономический эффект, тыс. руб.
1	Установка высоковольтного ПЧ для ЭД 315 кВт (6 кВ)	311,34
2	Замена ЭД 315 кВт (6 кВ) на ЭД 160 кВт (0,4 кВ) из обменного фонда	115,4
3	Замена ЭД 315 кВт (6 кВ) на ЭД 200 кВт (0,4 кВ) из обменного фонда	123,2
4	Перестановка местами насосов № 3 и 6 с заменой электродвигателя № 6 на 200 кВт (0,4 кВ)	63,2
5	Перестановка местами насосов № 3 и 6 с установкой низковольтного ЧРП 200 кВт (0,4 кВ)	374,57
6	При реализации мероприятий № 4 или 5 рассмотреть возможность вывода из эксплуатации электропривода насоса и высоковольтной ячейки РУ 6 кВ	126,5



Полученные результаты позволяют оценить варианты применения тех или иных мероприятий для принятия технически обоснованного решения, а также выбрать оптимальный вариант по критерию минимума энергозатрат в соответствии с технологическими требованиями по подаче жидкости и напору.

Удельные затраты на перекачку жидкости насосным агрегатом № 3 БЦСП за год приведены на рис. 5.

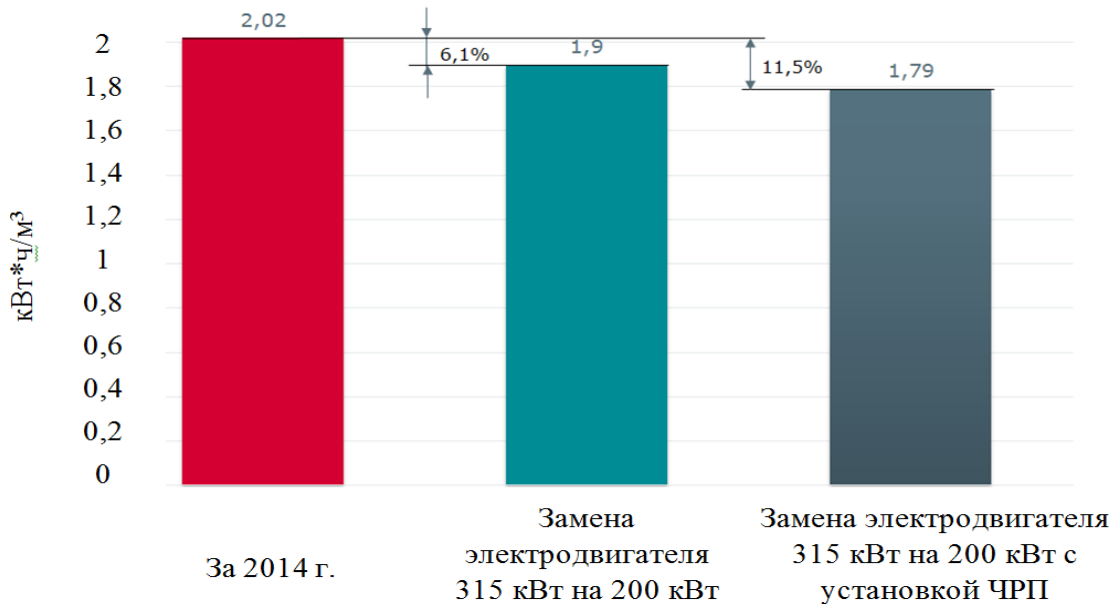


Рис. 5. Удельные затраты на перекачку жидкости насосным агрегатом № 3 БЦСП за год

Максимальная возможная экономия затрат на перекачку жидкости – 499,9 тыс. руб. в год. Требуемые инвестиции – 1 118,36 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости с момента внедрения – 3,6 года.

Аналогичные мероприятия были выполнены и на УПСВ-4972С. Характерной особенностью данного объекта является то, что установленные насосные агрегаты работают лишь 2-3 часа в сутки, вследствие чего исключается возможность выполнения дорогостоящих мероприятий по энергосбережению.

По результатам технического аудита насосного агрегата № 1 УПС-4972С разработаны два мероприятия по снижению затрат на перекачку жидкости (табл. 2).

Сводная таблица энергосберегающих мероприятий

№ п/п	Наименование	Экономический эффект, тыс. руб.
1	Замена ЭД 132 кВт (0,4 кВ) на ЭД 55 кВт (0,4 кВ) из обменного фонда	40,57
2	Замена насоса ЦНС 60-264 на ЦНСн 60-99 с электродвигателем мощностью 45 кВт	76,59

Удельные затраты на перекачку жидкости насосным агрегатом № 1 УПСВ-4972С за год приведены на рис. 6.

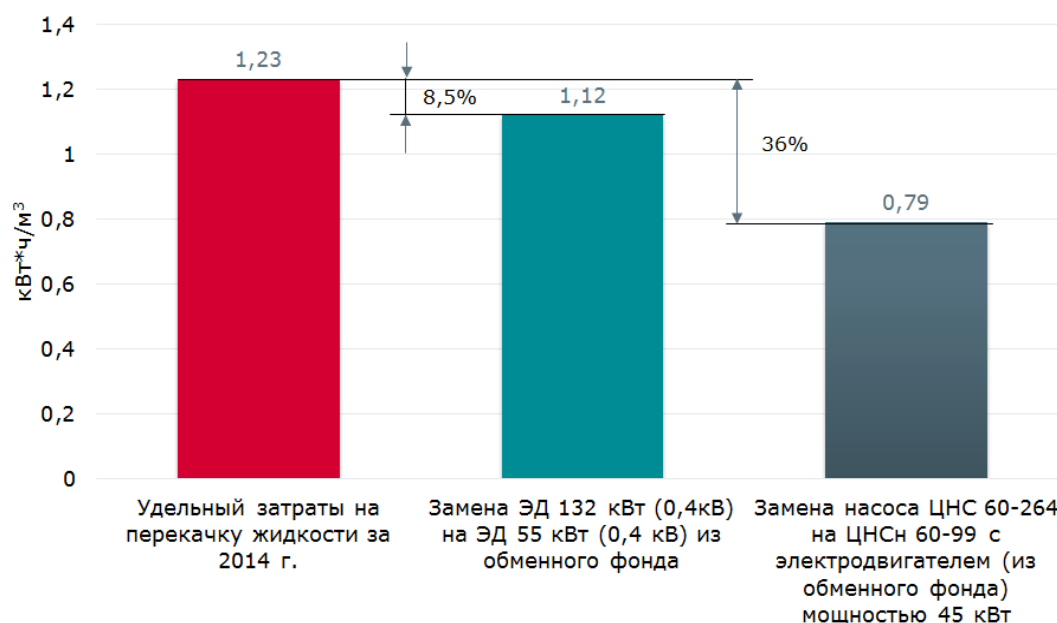


Рис. 6. Удельные затраты на перекачку жидкости насосным агрегатом № 1 УПСВ-4972С за год

Максимальная возможная экономия затрат – 76,59 тыс. руб. в год. При этом требуемые инвестиции составят 90 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости составит 1,75 года.

В соответствии с рекомендациями было реализовано энергосберегающее мероприятие – замена ЭД 315 кВт (6 кВ) на ЭД 200 кВт (0,4 кВ) из обменного фонда и выполнено повторное обследование.

Результаты повторных экспериментальных исследований (рис. 7) работы насосного агрегата показали увеличение КПД на 6–8 %.

Коэффициент мощности насосного агрегата составил 0,9 по сравнению с предыдущим значением – 0,62; коэффициент загрузки электродвигателя увеличился на 35 % и составил 88–89 %.

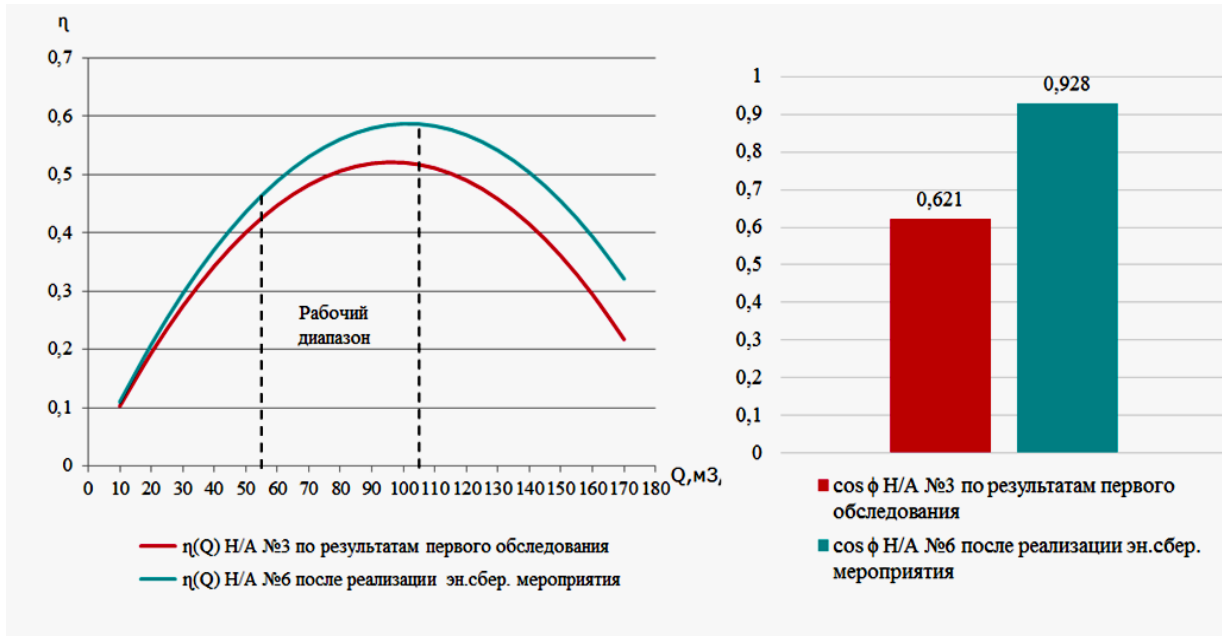


Рис. 7. Повторный технический аудит БЦСП (после реализации рекомендуемого энергосберегающего мероприятия)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что расчетная величина экономии электроэнергии достигнута. Разработанная математическая модель позволяет аппроксимировать фактические характеристики насосного агрегата и использовать их для дальнейшего анализа и разработки энергосберегающих мероприятий. Программа экспериментальных исследований в рамках настоящей работы легла в основу методики проведения технического аудита объектов нефтедобычи ПАО «Татнефть».

Проведение технического аудита насосных станций в масштабе НГДУ «Азнакаевскнефть» с реализацией разработанных энергосберегающих мероприятий позволит достичь ЧДД – 91,938 млн руб. за 10 лет при инвестициях 55,85 млн руб., дисконтированный срок окупаемости составит 2,8 года.

На совещании по обсуждению результатов данной работы специалистами НГДУ «Азнакаевскнефть» и проектного офиса ПАО «Татнефть» дана положительная оценка результатов технического аудита и принято решение о его целесообразности.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Направление 1. Электроэнергетика, электротехника, приборостроение  
и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ**

<b>Альтахер Аббас А. Карим, Доманов В.И.</b> Анализ работы модели асинхронного двигателя . . . . .	3
<b>Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А.</b> Активный фильтр высших гармоник . . . . .	8
<b>Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А.</b> Выпрямитель с фильтрацией входных токов . . . . .	16
<b>Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А.</b> Моделирование активного фильтра высших гармоник в среде MatLab – Simulink . . . . .	23
<b>Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А.</b> Моделирование выпрямителя с фильтрацией входных токов в среде MatLab – Simulink . . . . .	30
<b>Афанасьев В.Л., Карандей В.Ю.</b> Математическое моделирование компонентов новых типов электрических приводов для топливно-энергетического комплекса . . . . .	36
<b>Афанасьев В.Л., Карандей В.Ю.</b> Разработка новых типов электрических приводов для топливно-энергетического комплекса . . . . .	46
<b>Ахметдинов И.Р.</b> Автоматизированное управление секционными выключателями через GSM-модуль . . . . .	57
<b>Ахметзянов Д.А., Ильясова Л.Н., Билалов Ф.Ф., Ахунов Т.Р., Яббаров Р.Р., Габитов Б.Ф.</b> Автоматизация отопления производственных объектов ПАО «Татнефть» программируемыми термостатами . . . . .	60
<b>Бычков Е.В., Крюков О.В.</b> Предиктивное управление вентиляторами аппаратов воздушного охлаждения газа . . . . .	66
<b>Варенов А.А., Горин В.А., Погодицкий О.В., Малев Н.А.</b> Проблемы автоматического управления объектами теплоэнергетики . . . . .	71
<b>Васенин А.Б., Крюков О.В.</b> Экстремальные методы управления ВЭУ для вдольтрассовых потребителей . . . . .	73
<b>Васинкина Е.Ю., Огурцов К.Н.</b> Исследование методов ослабления электромагнитного поля в производственных и жилых помещениях . . . . .	79
<b>Гайнутдинов Ф.А., Дудка Н.А.</b> Интегрированная система круиз-контроля грузового автомобиля . . . . .	84
<b>Гатауллин И.А., Смирнова С.В.</b> Моделирование и применение активного RC-фильтра второго порядка . . . . .	91

<b>Гильванов Д.Р.</b> Диагностика электродвигателей. Вибродиагностика . . .	95
<b>Гимазетдинов А.А., Иمامиев А.Р., Шакиров А.Р., Шарафутдинова Г.Р.</b> Автоматизированный информационный стенд . . . . .	103
<b>Глазырин А., Слепнев И.Г.</b> Подход к построению микропроцессорных асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния для УЭЦН . .	106
<b>Грачева Е.И., Нгуен Т., Серпионова Т.А.</b> Моделирование теплового режима силового трансформатора . . . . .	114
<b>Грозов В.В., Цветков А.Н.</b> Диагностика электродвигателей после капи- тального ремонта . . . . .	126
<b>Гумерова Р.Х., Черняховский В.А.</b> Математическая модель потребления природного газа и производства тепла котельной . . . . .	128
<b>Деваев В.М., Фадеев А.Ю., Никитина Д.В.</b> Разработка алгоритмов динамической стабилизации на примере антропоморфного робота AR-601 . . . . .	135
<b>Дикарев П.В., Макаров А.М., Волков И.В., Лазарев В.В.</b> Автоматическая компактная когенерационная энергоустановка . . . . .	140
<b>Доманов В.И., Билалова А.И., Горшков В.А.</b> Анализ моделей прогно- зирования потребления электроэнергии в зависимости от базы данных . .	142
<b>Дудка Н.А.</b> Комплексирование систем для кризис-контроля транспортных средств . . . . .	146
<b>Дудка Н.А.</b> Применение корреляционно-экстремальных систем навигации в беспилотных транспортных средствах . . . . .	153
<b>Дюрягин А.М.</b> Топливно-энергетический комплекс и энергобезопасность	161
<b>Егуданова Е.А.</b> Компенсация реактивной мощности в электросетях потребителей . . . . .	163
<b>Журавлев А.М., Сычев Д.А., Иманова А.А.</b> Повышение надежности работы электроприводов жилищно-коммунального хозяйства . . . . .	174
<b>Залялеев И.А., Сафин А.Р.</b> Система управления автономного источника электроснабжения . . . . .	181
<b>Зиатдинов И.Ф.</b> «Данфосс» – ведущий мировой производитель энерго- сберегающего оборудования . . . . .	187
<b>Иванов К.В., Сенькив Е.П., Розаев И.А., Однокопытов Г.И.</b> Исследование неполнофазного режима работы двухсекционного асинхронного электропривода со свойством живучести . . . . .	190
<b>Идиатуллов З.Р.</b> Конструирование электронных устройств управления энергоустановками с учетом обеспечения электромагнитной совместимости . . . . .	197

<b>Кашаев Р.С., Киен Н.Т.</b> Контроль параметров нефти и управление нефтедобычей по данным ЯМР-анализатора . . . . .	203
<b>Кашаев Р.С., Кубанго Б.Э.</b> Электроснабжение электроприводов нефтедобывающих и нагнетательных скважин и установок обезвоживания по данным анализа ЯМР . . . . .	213
<b>Кашаев Р.С., Тунг Ч.В.</b> Контроль параметров сырой нефти по данным ЯМР-анализа и управление процессом отделения воды от нефти и ее очисткой . . . . .	223
<b>Кашаев Р.С., Хусниязов И.Ф.</b> Термоэлектрический генератор . . . . .	231
<b>Козелков О.В., Козелкова В.О., Хакимов А.Р.</b> Математическая модель процесса контроля и управления однопараметрическим объектом . . . . .	239
<b>Кондаков Л.А.</b> Новый уровень энергосбережения в ТЭК и ЖКХ: в ногу со временем . . . . .	244
<b>Корнилов В.Ю., Мухаметшин А.И., Усманов И.К., Билалов Ф.Ф., Валиуллин Р.Р., Мухортов И.С.</b> Повышение энергоэффективности асинхронного электродвигателя . . . . .	253
<b>Лазарев С.А., Митюков П.В.</b> Энергосберегающие режимы работы электропривода насосного агрегата и их реализация . . . . .	255
<b>Лизунов И.Н., Мисбахов Р.Ш., Багаутдинов И.З.</b> Разработка подсистем для имитационной модели централизованной системы релейной защиты и автоматики распределительного пункта среднего напряжения . . . . .	266
<b>Ломакин И.В., Белова С.А.</b> Алгоритм автоматического контроля давления масла двигателей станций электроснабжения . . . . .	271
<b>Лутфуллин И.И., Сафин А.М., Серпионов А.А., Уразаев В.Г., Капаев В.И.</b> Повышение экологичности и топливной экономичности транспортных средств путем электромагнитнополевой активации топливовоздушной горючей смеси двигателей . . . . .	276
<b>Макаров А.В., Афанасьев А.Ю.</b> Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства с переключением передач . . . . .	283
<b>Малацион А.С., Андреев Н.К.</b> Результаты испытаний метода и прибора для контроля цементации скважин с односторонним возбуждением и приемом упругих волн с оголовка скважины . . . . .	294
<b>Малацион А.С., Малацион Н.В.</b> Опыт применения прибора контроля энергетических характеристик системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» . . . . .	300
<b>Малев Н.А., Погодицкий О.В.</b> Демпфирование колебаний термоанемометрической измерительной системы с применением полиномиального фильтра Бесселя . . . . .	308

<b>Митченко Д.И., Шилин А.А.</b> Реализация датчика скорости по форме тока потребления коллекторного двигателя . . . . .	313
<b>Муллахметов Ш.Ш., Сафин А.Р.</b> Автономный источник для морских буровых установок . . . . .	322
<b>Мухаметгалеев Т.Х., Штягин С.Н.</b> Высоковольтные преобразователи частоты для управления электроприводами в ТЭК . . . . .	327
<b>Парамонов М.А., Усачев А.Е., Юдицкий Д.М.</b> О возможности определения участков ВЛ с повышенной плотностью ударов молний . . .	336
<b>Парфенов И.Ю., Гаврилин Д.А., Малацион А.С.</b> Борьба с просадками напряжения на крупном промышленном предприятии с использованием приводной техники Danfoss . . . . .	343
<b>Резниченко В.В., Демидов В.П., Демидов Г.В.</b> Оценка электрических показателей при искажающей нагрузке . . . . .	348
<b>Савостеенко Н.В., Костенко Р.В., Архипова Н.С., Буханов С.С.</b> Модернизация насосных станций . . . . .	356
<b>Сафаргалиев Р.Ф., Григорьев Б.В., Новиков В.Ф.</b> Разработка магнитного дефектоскопа для топливно-энергетического комплекса . . .	363
<b>Сердцева А.В., Мурзаков Д.Г., Байрамов Н.В.</b> Проектирование энергоэффективной автоматизированной системы управления микроклиматом чистых помещений . . . . .	376
<b>Серебряков А.В., Крюков О.В.</b> Нейросетевое управление электроснабжением магистральных газопроводов . . . . .	381
<b>Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф.</b> Контроль структуры стали по параметрам петель магнитного гистерезиса . . . . .	386
<b>Степанов С.Е., Крюков О.В.</b> Средства оптимизации управления газоподачей магистральных газопроводов . . . . .	395
<b>Сушков С.Л., Рудаков А.И.</b> Проект ветроэнергетической электроустановки парусного типа . . . . .	400
<b>Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Калинин А.Г., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Федоров Д.Г.</b> Комплекс математических моделей и программ для адаптивного управления отоплением здания с помощью программируемого контроллера . . . . .	403
<b>Усманов Н.В., Дагаев К.В.</b> Разработка универсального воздушно-гравитационного скоростного смесителя сухих сыпучих материалов . . . .	410
<b>Федоров О.В., Семенов А.С., Егоров А.Н.</b> Измерение и анализ показателей качества электроэнергии учебно-лабораторного корпуса . . .	414
<b>Хабетдинова М.И.</b> Диагностика кабельных линий методом частичных разрядов . . . . .	420

<b>Хабибуллин А.И., Драчев А.Н., Рябишина Л.А.</b> Эффективное подавление гармоник входного тока многоуровневого преобразователя частоты для регулируемого электропривода . . . . .	427
<b>Халиулин Р.Р., Павлов Г.И.</b> Разработка мобильной термогазодинамической установки для решения задач в сфере ЖКХ . . . . .	433
<b>Халяпов И.И.</b> Внедрение программируемых термостатов на объектах ПАО «Татнефть» . . . . .	433
<b>Хисматуллин Р.М., Салахов Р.Р., Хайруллин А.Х., Гуреев В.М.</b> Моделирование модифицированной когенерационной энергетической установки в LMS AMESim . . . . .	448
<b>Хлынин А.С., Крюков О.В.</b> Новые конструкции моноблочных электроприводных газоперекачивающих агрегатов . . . . .	453
<b>Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И.</b> Алгоритмы регистрации сигнала переходного процесса, порождаемого коммутациями в линиях электропередач . . . . .	459
<b>Цой А.А.</b> Оптимальное планирование технического обслуживания в системе «Эксперт РС» . . . . .	466
<b>Шайдуллин И.Б.</b> Модернизация защиты асинхронных электродвигателей 0,4 кВ на дожимных насосных станциях . . . . .	470
<b>Шарашкин С.В.</b> Способы улучшения вибро-шумовых характеристик судового электропривода . . . . .	473
<b>Шиндор О.В.</b> Диагностика и мониторинг состояния гидроагрегата методами вейвлет-преобразования . . . . .	482
<b>Юдаев И.В., Даус Ю.В.</b> Повышение эффективности системы общедомового освещения жилого многоквартирного дома . . . . .	490
<b>Юшко С.В., Ахлямов М.Н., Сираев Р.Р., Ахмадеев К.Х.</b> Анализ качества сепарации газа как элемент управления процессом . . . . .	497
<b>Яббаров Р.Р., Мухортов И.С., Аюпов Н.Р., Билалов Ф.Ф.</b> Технический аудит насосных станций на примере НГДУ «Азнакаевскнефть» . . . . .	505



*Научное издание*

II ПОВОЛЖСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ  
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Материалы докладов

8–9 декабря 2016 г.

Казань

Том 1

Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова

Примечание: печать докладов произведена с оригиналов, представленных авторами.

Издатель не несет ответственности за содержание докладов.

Редактор издательского отдела *Н.А. Мустакимова*

Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Дизайн обложки *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 02.12.16.

Формат 60x84/16. Бумага Business. Гарнитура Times. Вид печати РОМ.

Усл. печ. л.30,22. Уч.-изд. л. 33,54. Тираж 500 экз. Заказ № 5022

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066,

Казань, Красносельская, 51





