

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»
Ассоциация «Инновационный территориальный
электротехнический кластер Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы
VI Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2022

УДК 621.3(06)
ББК 31я43
П781

Редакционная коллегия:

В.Г. Ковалев, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);
Г.С. Нудельман, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
О.А. Онисова, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета
Чувашского государственного университета*

Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и
П781 энергоэффективности: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. –
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – 404 с.

ISBN 978-5-7677-3559-4

Представлены статьи и доклады шестой Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-3559-4

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Издательство
Чувашского университета, 2022

I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА

ОСОБЕННОСТИ ТЕСТИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Шалимов А.С., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматриваются особенности тестирования быстродействующей динамической ступени цифровой дистанционной защиты при помощи компьютерно-управляемой испытательной системы. Отмечается необходимость применения нестационарных режимов выполнения испытаний для оценки быстродействия и селективности дистанционной защиты при имитации насыщения измерительных трансформаторов тока.*

***Ключевые слова:** дистанционная защита, тестирование, цифровой измерительный орган, переходные процессы.*

Для обеспечения селективности быстродействующих функций (ступеней) релейной защиты (РЗ) при высокодинамичных переходных процессах в электрической системе, в том числе, сопровождающихся насыщением измерительных трансформаторов тока (ТТ), как правило, применяются различные алгоритмы блокирующие или заглубляющие характеристики срабатывания РЗ.

Для сложных измерительных органов РЗ, например, дистанционных защит присоединений напряжением 110 кВ и выше, одним из способов предотвращения неселективных действий является применение для быстродействующей ступени динамической характеристики срабатывания с короткими окнами наблюдения и специального пускового органа (ПО) реагирующего на приращение тока, рис. 1 [1, 2].

Особенностью таких дистанционных органов является традиционный выбор их параметров срабатывания (сопротивление,

время, углы наклона). Дополнительные пусковые органы и характеристики не имеют расчётных параметров. При тестировании такой динамической функции обычными, стационарными, методами испытаний, с длительностью аварийного воздействия превышающей время соответствующих коротких окон наблюдения, результаты проверки характеристики также будут соответствовать расчётной – максимальной характеристике ДЗ (рис. 1).

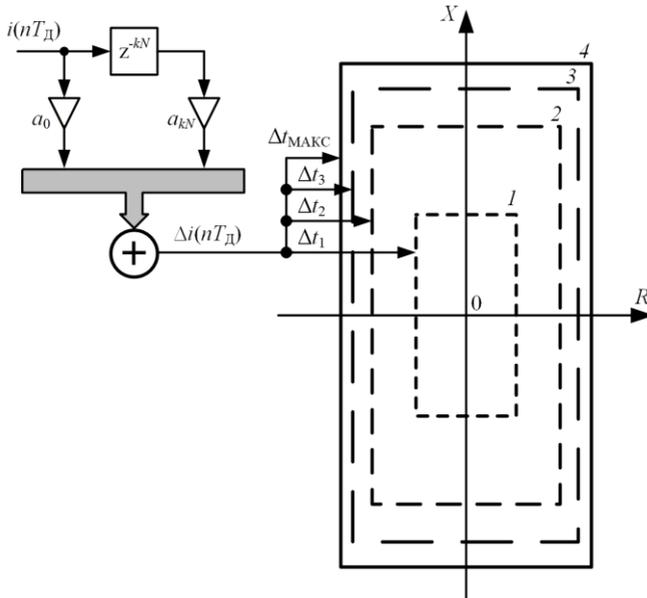


Рис. 1. Динамическая ступень ДЗ с пусковым органом:
 1, 2, 3 – внутренние динамические характеристики с короткими временами ввода; 4 – расчётная (максимальная) характеристика

Реагирующий на приращение (аварийную составляющую) тока ПО, в общем случае [1], измеряет приращение вектора тока путём сравнения текущей (измеряемой) величины $i(nT_{\text{д}})$ с величиной, имевшейся за k периодов измерения $NT_{\text{д}}$ ранее, рис. 1. Данное приращение возникает вследствие скачкообразного изменения величины, характеризующей возникновение короткого замыкания (КЗ). Условие срабатывания такого ПО:

$$\Delta i(nT_{\text{д}}) = i(nT_{\text{д}}) - i(nT_{\text{д}} - knT_{\text{д}}) \geq \Delta I_{\text{сз}},$$

где ΔI_{C3} – параметр срабатывания (уставка) ПО.

Для оценки динамических свойств ДЗ и проверки её поведения в высокодинамичных аварийных режимах энергосистемы, необходимо применять соответствующие методы и средства испытаний. Для тестирования сложных функций РЗ, обычно применяются компьютерно-управляемые испытательные комплексы типа РЕТОМ-51/61/71 (изготовитель ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары). Программное обеспечение таких комплексов позволяет выполнять в трёх- или шестифазном режиме моделирование и воспроизведение сигналов тока и напряжения в аварийных режимах, в том числе с учётом насыщения трансформаторов тока [3].

В качестве тестового воздействия может рассматриваться два типа сигналов тока (напряжения) – синусоидальный ограниченной длительности, соответствующей окнам (временами ввода) внутренних характеристик ДЗ (рис. 1, 2), и сигнал тока полученный в модели ТТ, форма и длительность которого, в зависимости от времени начала насыщения будет вызывать срабатывание динамических характеристик ДЗ [3].

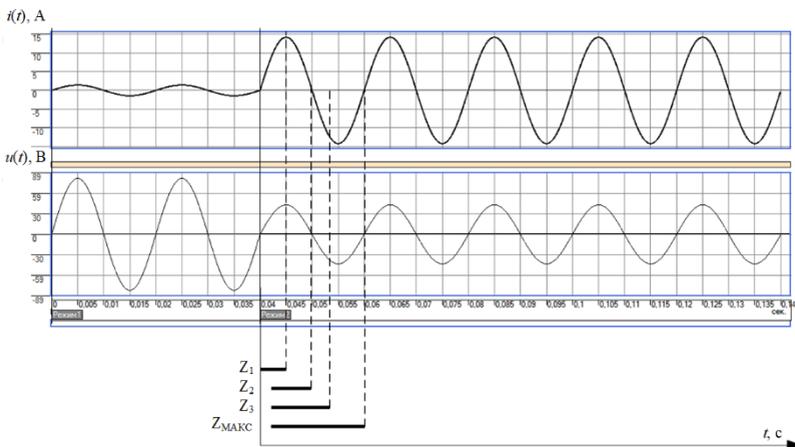


Рис. 2. К тестированию динамической ступени ДЗ синусоидальными сигналами

На рис. 3 представлены экспериментальные характеристики зависимости времени срабатывания от параметра срабатывания

ДЗ по сопротивлению $t(Z)$ при $K^{(1)}$, $K^{(2)}$ и $K^{(3)}$, полученные для микропроцессорного устройства ДЗ типа 7SA522 (изготовитель «Siemens AG»), полученные с учётом времени действия выходного реле терминала 5 мс. Полученные результаты показывают, что первая ступень ДЗ Z1 7SA522 имеет три внутренние характеристики срабатывания с временами срабатывания 15 мс, 17 мс и 34 мс.

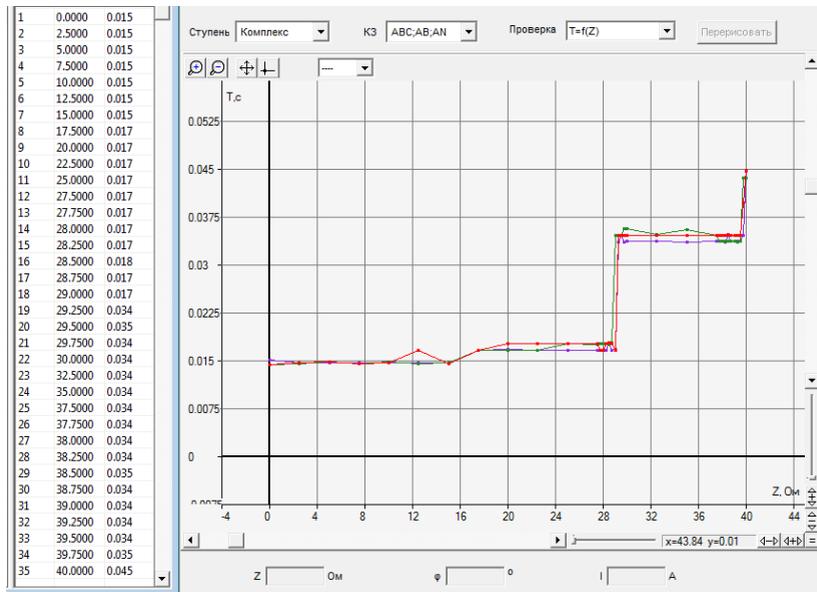


Рис. 3. Экспериментальная характеристика $t(Z)$ динамической ступени ДЗ

Выводы

Быстродействующие ступени дистанционных защит с дополнительными алгоритмами, обеспечивающими быстродействие и селективность, необходимо тестировать с учётом высокодинамичных переходных процессов в энергосистеме, используя соответствующий функционал испытательных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

2. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. / Г. Циглер. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.

3. Шалимов А.С. Динамическое тестирование релейной защиты с учётом переходных процессов в трансформаторах тока / А.С.Шалимов // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 2 (27). – С. 16-19.

Автор

Шалимов Александр Станиславович, начальник отдела релейной защиты и автоматики, ООО «НПП «Динамика». Окончил электротехнический факультет ЧГУ имени И.Н. Ульянова в 2005 году. E-mail: shalimov-alex@rambler.ru.

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ТРАНСФОРМАТОРА И ГЕНЕРАТОРА КАК ИНДИКАТОР ИХ ПОВРЕЖДЁННОГО СОСТОЯНИЯ

Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматриваются локальные режимы, возникающие при внутренних коротких замыканиях (КЗ) в трансформаторе и генераторе. Информационную базу идентификации КЗ составляет текущая информация в виде наблюдаемых токов и напряжений, а также априорная информация о наблюдаемом объекте, содержащаяся в его модели. Полнота информационной базы позволяет выделить из наблюдаемых величин виртуальные компоненты, активируемые на зашунтированных или разомкнутых входах модели объекта источником тока внутреннего повреждения.*

***Ключевые слова:** трансформатор, генератор, модель локального режима, короткое замыкание.*

Развитие микропроцессорных технологий в релейной защите и автоматике открывает возможность применять такие алгоритмы защиты, которые используют всю доступную информационную базу [1, 2]. Она может быть представлена не только в виде текущей информации о токах и напряжениях со всех сторон наблюдаемого объекта, но и в виде априорной информации о его структуре и параметрах, сконцентрированной в модели

неповреждённого объекта [3–5]. Было обнаружено, что модель наблюдаемого объекта позволяет в наблюдаемых токи и напряжениях выделить своеобразные виртуальные компоненты, получившие название нормальных и локальных [6, 7]. Нормальный режим возникает в модели неповреждённого энергообъекта, активируемой источниками, равными одной из наблюдаемых на каждом выводе величин, в то время как локальный режим концентрирует в себе информацию о повреждении, произошедшем на наблюдаемом объекте. Локальный режим, возникающий в модели наблюдаемого объекта, места наблюдения которого зашунтированы или отключены от внешних связей, создаётся источником неизвестного тока КЗ, протекающего в неизвестном месте повреждения.

Для начала рассмотрим локальный режим трехобмоточного трансформатора при межвитковом замыкании или замыкании обмотки на корпус. Он создаётся неизвестным током КЗ \underline{I}_f в трансформаторе с зашунтированной повреждённой обмоткой и с разомкнутыми остальными обмотками (рис. 1). Повреждённая первичная обмотка разделяется местом КЗ f на две части w_1 и $w_l - w_f$ с собственными сопротивлениями $\underline{Z}_f = R_f + j\omega L_f$ и $\underline{Z}_1 - \underline{Z}_f$.

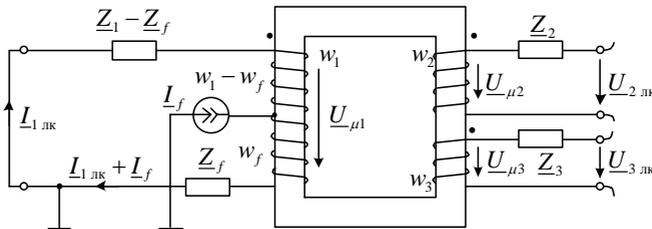


Рис. 1. Локальный режим трансформатора при повреждении первичной обмотки

МДС контура магнитной цепи $\underline{F}_\Sigma = w_1 \underline{I}_{1\text{лк}} + w_f \underline{I}_f$ определяет локальные величины $\underline{I}_{1\text{лк}}$, $\underline{U}_{2\text{лк}}$ и $\underline{U}_{3\text{лк}}$. Информацию о повреждении несут в себе их отношения

$$\underline{Z}_{q \text{ лк}} = \frac{U_{q \text{ лк}}}{I_{1 \text{ лк}}} = -j\omega w_q Y_\mu \frac{w_f \underline{Z}_1 - w_1 \underline{Z}_f}{\underline{Z}_f + j\omega w_1 w_f Y_\mu}, \quad q = 2, 3. \quad (1)$$

В трансформаторе с однородными равномерно распределёнными обмотками, для которых $\underline{Z}_1 = w_1 \underline{Z}^0$, $\underline{Z}_f = w_f \underline{Z}^0$, где \underline{Z}^0 – сопротивление одного витка обмотки, величины локальных напряжений разомкнутых обмоток будут оставаться на нулевом уровне.

Во временном базисе в пренебрежении потерями локальные напряжения разомкнутых обмоток выражаются через производную локального тока

$$u_{q \text{ лк}}(t) = -w_q G_\mu \frac{w_f L_1 - w_1 L_f}{L_f + w_1 w_f G_\mu} \frac{di_{1 \text{ лк}}(t)}{dt}, \quad (2)$$

отображающие данный тип КЗ в область на плоскости $u_{q \text{ лк}}$, $di_{1 \text{ лк}}/dt$, расположенную вблизи оси производной тока.

Локальный режим при замыкании между двумя заземлёнными обмотками одной фазы создаётся неизвестным током КЗ I_f , протекающим в повреждённых частях двух обмоток (рис. 2).

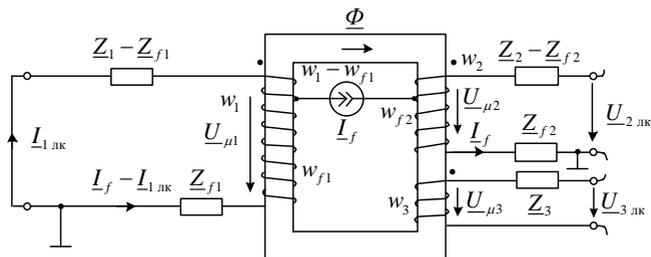


Рис. 2. Локальный режим трансформатора при межобмоточном КЗ

В контуре магнитной цепи действует МДС $\underline{F}_\Sigma = w_1 I_{1 \text{ лк}} + (w_{f2} - w_{f1}) I_f$, которая определяет новые локальные величины $I_{1 \text{ лк}}$, $\underline{U}_{2 \text{ лк}}$ и $\underline{U}_{3 \text{ лк}}$. Из уравнения контура первой обмотки вытекает взаимосвязь локального тока с током повреждения I_f , а из уравнения вторичной обмотки определяются зависи-

мость от \underline{I}_f локальных напряжений, из которых определяются собственные параметры повреждённого трансформатора, независящие от тока \underline{I}_f

$$\underline{Z}_{21.лк} = \frac{\underline{Z}_{f2}\underline{Z}_1 + j\omega\underline{Y}_\mu (w_1^2\underline{Z}_{f2} + w_1w_2\underline{Z}_{f1} + w_2\underline{Z}_1(w_{f2} - w_{f1}))}{\underline{Z}_{f1} + j\omega w_1\underline{Y}_\mu (w_{f1} - w_{f2})}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{31.лк} = \frac{j\omega w_3\underline{Y}_\mu (w_1\underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_1(w_{f2} - w_{f1}))}{\underline{Z}_{f1} + j\omega w_1\underline{Y}_\mu (w_{f1} - w_{f2})}. \quad (4)$$

В базе мгновенных значений зависимости между локальными величинами принимают следующий вид

$$u_{2.лк}(t) = \frac{L_{f2}(L_1 + w_1^2G_\mu) + w_2G_\mu(w_1L_{f1} + (w_{f2} - w_{f1})L_1)}{L_{f1} + w_1(w_{f1} - w_{f2})G_\mu} \frac{di_{1.лк}(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$u_{3.лк}(t) = \frac{w_3G_\mu(w_1L_{f1} + (w_{f2} - w_{f1})L_1)}{L_{f1} + w_1(w_{f1} - w_{f2})G_\mu} \frac{di_{1.лк}(t)}{dt}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны области отображения зависимостей локальных компонентов разных обмоток для режимов межвитковых замыканий (2) и замыканий между двумя заземлёнными обмотками (5), (6) на примере однофазного трёхобмоточного трансформатора мощностью 25/3 МВА.

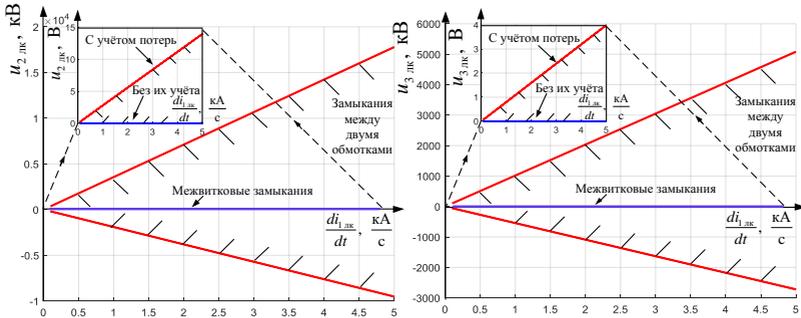


Рис. 3. Отображение режимов КЗ в первичной обмотке и замыкания между двумя заземлёнными обмотками одной и той же фазы трансформатора на плоскости их локальных компонентов

Напряжения обмоток трансформатора $U_1 = 115/\sqrt{3}$, $U_2 = 38,5/\sqrt{3}$, $U_3 = 11/\sqrt{3}$ число витков обмоток $w_1 = 1150$, $w_2 = 385$, $w_3 = 110$, их сопротивления $R_1 = 1,375$ Ом, $R_2 = 0,154$ Ом, $R_3 = 0,013$ Ом и индуктивности $L_1 = 180,962$ мГн, $L_2 = 0,004$ мГн, $L_3 = 1,039$ мГн. Границы области отображения (5), (6) относятся к таким повреждениям, в которых выполняется равенство числа замкнувшихся витков первичной и вторичной обмотки $w_{j1} = w_{j2}$.

Далее перейдём к рассмотрению локального режима генератора, локальная модель которого имеет замкнутые входы со стороны нейтральных выводов и разомкнутые со стороны фазных. Локальный режим при междуфазном замыкании фаз A и B (рис. 4) в обмотке генератора обусловлен действием источника тока КЗ I_f в разных местах x_A и x_B обмоток двух фаз.

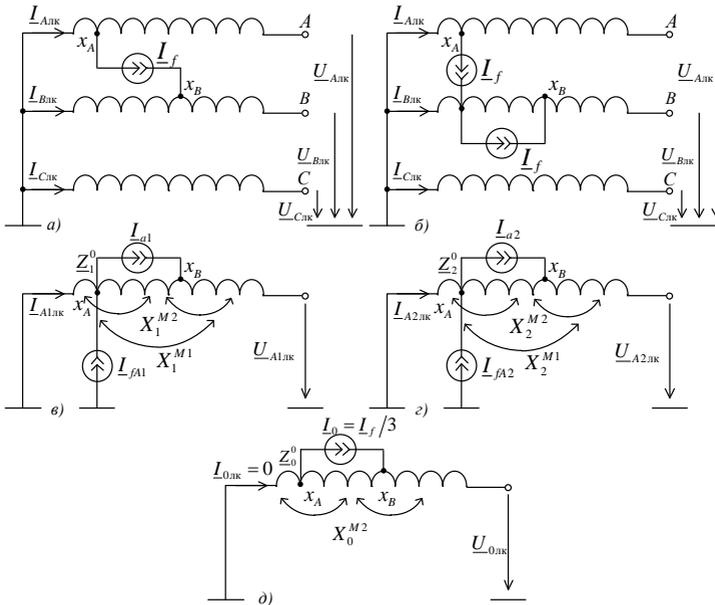


Рис. 4. Модели локального режима электрической машины при междуфазном КЗ: a , b – трёхфазная модель; $в$ – модель прямой последовательности; $г$ – модель обратной последовательности; $д$ – модель нулевой последовательности

Граничные условия в месте x_A двух фаз A и B $\underline{I}_{fA} = -\underline{I}_{fB} = \underline{I}_f$, $\underline{I}_{fC} = 0$ определяют величины локальных токов прямой, обратной и нулевой последовательностей $\underline{I}_{A1.лк} = \underline{I}_{fA1} = \underline{I}_f / (1 - \underline{a}^2)$, $\underline{I}_{A2.лк} = \underline{I}_{fA2} = -\underline{a}^2 \underline{I}_f / (1 - \underline{a}^2)$, $\underline{I}_{0.лк} = \underline{I}_{f0} = 0$, $\underline{a} = e^{j120^\circ}$, а граничные условия в двух местах фазы B $\underline{I}_{fB} = \underline{I}_f$, $\underline{I}_{fA} = \underline{I}_{fC} = 0$ – токи, протекающие в обмотке фазы B , $\underline{I}_{a0} = 1/3 \underline{I}_f$, $\underline{I}_{a1} = 1/2 \underline{I}_f (1/3 + 1/(a^2 - a))$, $\underline{I}_{a2} = 1/2 \underline{I}_f (1/3 - 1/(a^2 - a))$, необходимые для определения локальных напряжений в месте наблюдения

$$\underline{U}_{A1.лк} = -\underline{I}_{fA1} (\underline{Z}_1^0 x_A + jX_1^{M1}) + \underline{I}_{a1} (\underline{Z}_1^0 (x_B - x_A) + jX_1^{M2}) \quad (7)$$

$$\underline{U}_{A2.лк} = -\underline{I}_{fA2} (\underline{Z}_2^0 x_A + jX_2^{M1}) + \underline{I}_{a2} (\underline{Z}_2^0 (x_B - x_A) + jX_2^{M2}) \quad (8)$$

$$\underline{U}_{0.лк} = \underline{I}_{a0} (\underline{Z}_0^0 (x_B - x_A) + jX_0^{M2}) \quad (9)$$

где $X_p^{M1} = k_{cb} w_A (w - w_A) X_p^0$, $X_p^{M2} = k_{cb} (w_A (w_B - w_A) + (w - w_B) \times (w_B - w_A)) X_p^0$ – взаимные индуктивности обмоток, $p = 1, 2, 0$, $k_{cb} = 1$.

Тогда по аналогии с трансформатором соотношения локальных напряжений и токов различных последовательностей представляют собой собственные параметры повреждённой машины, которые несут в себе информацию не только о факте повреждения синхронного генератора, но и о месте его расположения.

Выводы

Сочетание текущей информации о наблюдаемых токах и напряжениях трансформатора и электрической машины с априорной информацией об их структуре и параметрах, сосредоточенных в их моделях, обнаруживают закономерности, способствующие идентификации повреждения. Локальный режим, будучи составной частью наблюдаемого процесса, открывает возможность для построения алгоритмов распознавания повреждений, возникающих в наблюдаемом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шнеерсон Э.М.* Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. *Фадке А.Г.* Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А.Г. Фадке, Д.С. Торп, пер. с англ. – М.: Техносфера, 2019.
3. *Атнншкин А.Б.* Модификации алгоритма дифференциальной защиты / А.Б. Атнншкин, Ю.Я. Лямец // Электрические станции. – 2019. – № 7. – С. 44–49.
4. *Атнншкин А.Б.* Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. (05.14.02) / Атнншкин Александр Борисович; Чувашский ун-т. – Чебоксары, 2019. – 24 с.
5. *Широкин М.Ю.* Совершенствование микропроцессорных защит трансформаторов на основе опыта эксплуатации: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. (05.14.02) / Широкин Максим Юрьевич; Чувашский ун-т. – Чебоксары, 2022. – 24 с.
6. *Белянин А.А.* Метод локализации для распознавания внутренних повреждений силового трансформатора, происходящих на фоне внешних / А.А. Белянин, А.Н. Маслов, И.В. Смирнова, М.Ю. Широкин // Вестник Чувашского ун-та. – 2019. – № 3. – С. 22–28.
7. *Кочетов И.Д.* Распознавание витковых замыканий в обмотке трансформатора по локальным составляющим наблюдаемых напряжений и токов / И.Д. Кочетов, Ю.Я. Лямец // Изв. РАН. Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 57–65.

Авторы:

Кочетов Иван Дмитриевич, инженер-исследователь, ООО «Релематика», аспирант, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: kochetov_id@relematika.ru.

Лямец Юрий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ, председатель НТС ООО «Релематика». Окончил в 1962 году энергетический факультет Новочеркасского политехнического института. В 1994 году защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ФУРЬЕ И ХАРТЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ РЗА

Егоров Г.В., Картузова Т.В., Машанов Ф.А., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В данной работе приведен сравнительный анализ методов цифровой обработки сигналов посредством преобразования Фурье и Хартли. Были выявлены достоинства и недостатки обоих методов, сопоставлены графики зависимости коэффициента ошибочных битов от отношения сигнал/шум.*

***Ключевые слова:** преобразование Фурье, преобразование Хартли, цифровая обработка сигнала.*

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) имеет большое значение как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Преобразования Фурье и Хартли - мощные инструменты, используемые в самых разных областях науки, решающие довольно сложные уравнения, описывающие динамические процессы. Они также позволяют идентифицировать регулярные компоненты в сложных колебательных системах, что может привести к корректной интерпретации широкого спектра экспериментальных энергетических наблюдений, в частности, при анализе цифровых каналов связи релейной защиты. Сегодня быстрое преобразование Фурье широко используется в цифровых функциональных блоках передачи данных, но относительно недавно появился интерес к вариантам, основанным на быстром преобразовании Хартли. Разработка более эффективных алгоритмов быстрого преобразования Хартли не проводилась только потому, что этот метод был защищен патентом в течение длительного времени.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) вектора имеет физический смысл, т.е. если вектор является дискретным сигналом, то он разлагается на частоты с помощью ДПФ. Преобразование Хартли не так однозначно. Однако преобразование Хартли может быть преобразовано в преобразование Фурье путем N сложений и умножений, что быстрее, чем последующая обработка в вещественные числа. Поэтому, если исходные данные

являются реальными, быстрое преобразование Хартли (БПХ) может быть более эффективным, чем быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Параллелизм на уровне инструкций процессора также примерно одинаков, поэтому фактическая эффективность практически не отличается. Однако есть и некоторые различия:

- Код БПХ проще. Формула для обратного преобразования такая же, как и для прямого преобразования, за исключением коэффициента $1/N$, тогда как для вычисления обратного БПФ необходимо задать дополнительный параметр или создать новую функцию;

- Точность БПФ обычно немного выше, чем БПХ для небольшого числа гармоник, но для большего числа гармоник выигрывает точность БПФ;

- Когда вычисляется БПФ реального вектора, сначала вычисляется «комплексное» БПФ половинной длины, поэтому происходит постобработка, которая не происходит с БПХ.

Оценим средние значения ошибок битов в цифровых каналах связи РЗА для различных соотношений сигнал/шум на основе преобразования Фурье и преобразования Хартли.

Модель преобразования Фурье

На рис. 1 [1] изображена модель канала связи на основе преобразования Фурье, разработанная в среде Simulink.

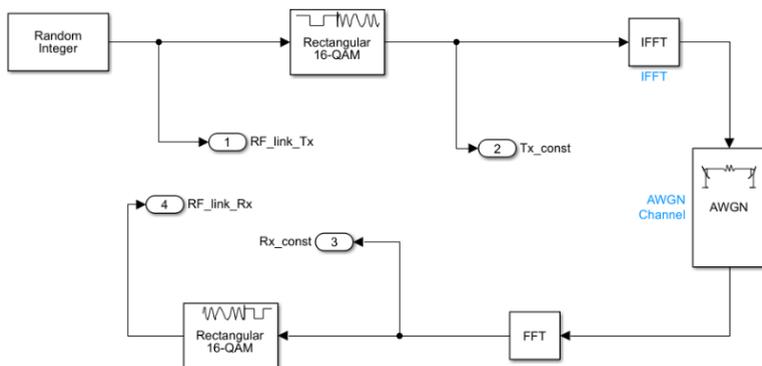


Рис. 1. Модель канала связи на основе преобразования Фурье

Блок Random Integer – генератор псевдослучайных чисел выступает в роли источника сообщений. От источника сообщений данные поступают в модулятор, который состоит из двух блоков. Первый Rectangular 16-QAM – квадратурный модулятор.

Модулированный сигнал поступает на блок IFFT – обратного быстрого преобразования Фурье. После преобразования сигнала в модуляторе данные поступают в канал связи на блок AWGN – аддитивный белый гауссовский шум. После канала связи сигнал передаётся в модулятор, который состоит из двух блоков. Первый блок FFT – быстрого преобразования Фурье. Далее на Rectangular 16-QAM – квадратурный демодулятор.

С входа модулятора и выхода демодулятора через ярлыки RF_link_Tx и RF_link_Rx, соответственно, данные передаются в блок расчёта коэффициента ошибочных битов.

На рис. 2 [2] приведено сравнение графиков исходного и конечного сигнала, полученного на выходе канала связи, использующего преобразование Фурье:

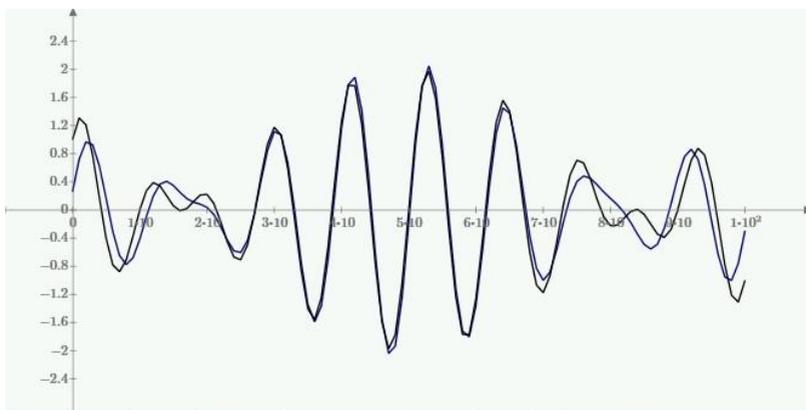


Рис. 2. Графики исходного и конечного сигнала, полученного на выходе канала связи, использующего преобразование Фурье

Модель преобразования Хартли

На рис. 3 [3] изображена модель модема на основе преобразования Хартли, разработанная в среде Simulink:

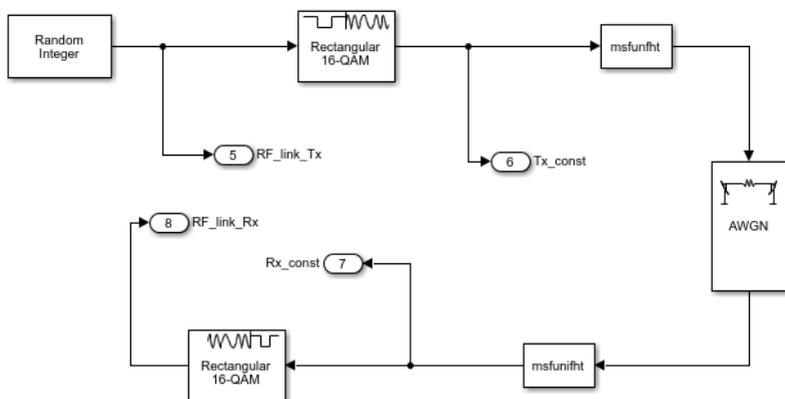


Рис. 3. Модель канала связи на основе преобразования Хартли

Модулированный сигнал поступает на блоки msfunfht — быстрого преобразования Хартли в передатчике и приемнике.

Сравнение графиков исходного и конечного сигнала, полученного на выходе канала связи, использующего преобразование Хартли, изображено на рис. 4:

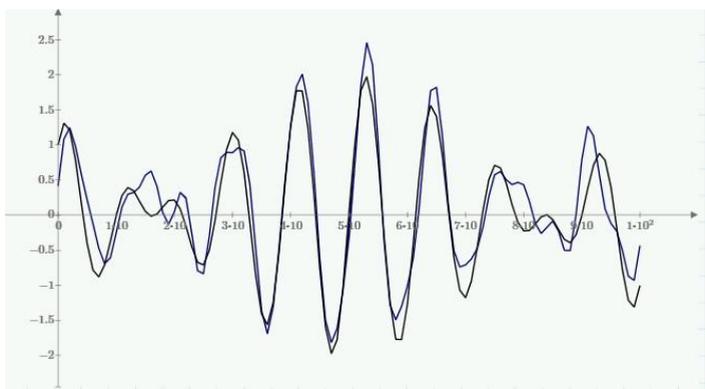


Рис. 4. Графики исходного и конечного сигнала, полученного на выходе канала связи, использующего преобразование Хартли

Результаты анализа моделей по коэффициенту ошибочных битов при различных отношениях сигнал/шум приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения коэффициента ошибочных битов
при различных отношениях сигнал/шум

SNR, дБ	80	70	60	50	40	30	20	10
BER, Фурье	0,0199	0,52	0,797	0,906	0,925	0,931	0,94	0,957
BER, Хартли	0	0,0001	0,0047	0,132	0,4	0,829	0,873	0,917

Обобщённые графики зависимостей коэффициента ошибочных битов от отношения сигнал/шум для модемов на основе преобразования Фурье, преобразования Хартли изображены на рис. 5.

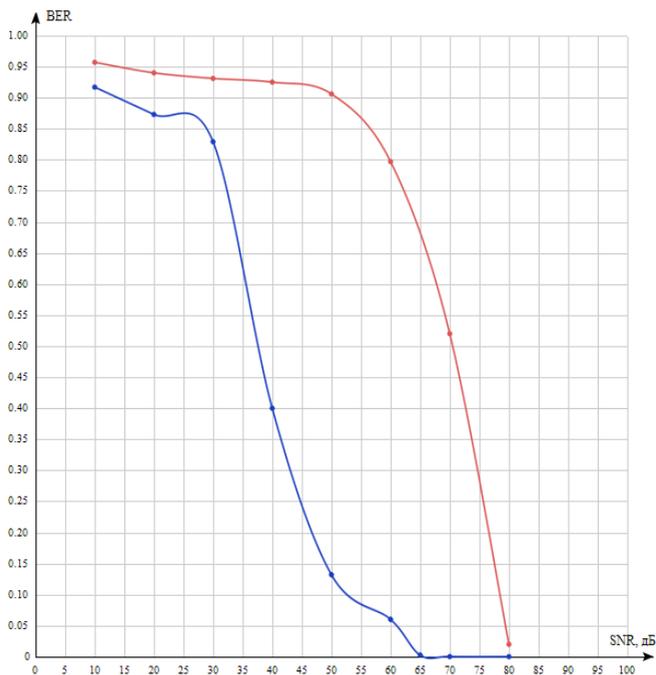


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента ошибочных битов от отношения сигнал/шум

Выигрыш преобразования Хартли перед преобразованием Фурье по коэффициенту ошибочных битов порядка 25дБ.

Выводы

Для создания реалистичной имитации процесса используется программное обеспечение Simulink, т.е. вычисления производятся так же, как и в устройствах релейной защиты, обрабатывающих цифровые данные – быстрые преобразования Фурье [4] и Хартли, которые осуществляются в микропроцессорах. При этом расчет БПХ на 36% быстрее при действительных входных данных и выборке меньших гармоник, поэтому устройства, использующие БПХ, могут использовать менее быстрые контроллеры – это положительно влияет на стоимость конечного продукта и снижает стоимость разработки модемов и узлов, выполняющих эту функцию.

Однако, когда учитывается большее количество гармоник, БПХ работает значительно хуже в зависимости от входного сигнала, что отражается на графике сравнения исходного и конечного сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онышко Д.А. Цифровые устройства обработки сигналов: учебное пособие / Д.А. Онышко, Д.Д. Фугаров. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2020. – 88 с.
2. III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ттг-2019. проблемы техники и технологий телекоммуникаций птитг-2019: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2019. Том 1. – 2019. – 697 с.
3. Макашева С. И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: монография / С.И. Макашева. – Хабаровск: ДВГУПС, 2020. – 114 с.
4. Елисеева В.В., Картузова Т.В., Чернышев И.В. Применение преобразования Фурье к задачам электроэнергетики. – Математические модели и их приложения: сборник научных трудов. Том 1. Выпуск 12. Чебоксары, 2010. – С. 363–370.

Авторы:

Картузова Татьяна Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре высшей математики, доцент кафедры высшей математики и теоретической механики им.

С.Ф. Сайкина ЧГУ. В 1989 г. закончила физико-математический факультет ЧГУ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» «Численные исследования обтекания системы произвольных профилей методом граничных элементов» защищена 25.12.1997. E-mail: tanyakartuzova@yandex.ru.

Егоров Георгий Витальевич, студент третьего курса, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», факультет энергетики и электротехники. E-mail: georgij.egprpv.03@gmail.com.

Машанов Федор Александрович, студент третьего курса, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», факультет энергетики и электротехники. E-mail: fedor.mashanovf@gmail.com.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ

Лыков Ю.Ф., Самарский Государственный Технический университет, г. Самара, Россия.

Аннотация. Компьютерная модель для исследования эффективности различных способов автоматического регулирования мощности силовой конденсаторной батареи (КБ).

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, конденсаторная батарея, секция, потери напряжения, мощности и энергии, автоматическое регулирование, зона нечувствительности.

Математическая модель узла нагрузки с регулируемой КБ.

На экранной форме компьютерной программы (рис. 1) приведена схема электроснабжения, включающая в себя ЛЭП 10 кВ, понижающий трансформатор 10/0,4 кВ, шины 0,4 кВ с подключенной нагрузкой $P + jQ$, кВА (окна P и Q , рис. 1) и КБ мощностью Q_k , квар (окна Q_k на экране). Суточные графики потребляемой мощности $P = f(t)$ и $Q = f(t)$ получаются с помощью датчика случайных чисел.

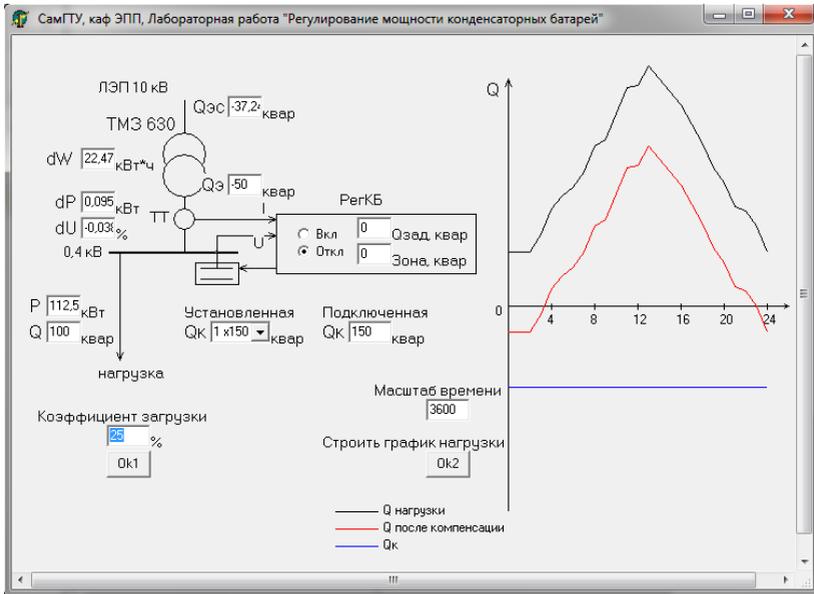


Рис. 1. Экранная форма программы: $Q_k = \text{const} = 150$ квар

Для определения остальных параметров графика делаются расчеты:

– Реактивной мощности (РМ) на вторичной стороне трансформатора: $Q_3 = Q - Q_k$, (окно Q_3);

– РМ на первичной стороне трансформатора: $Q_{3c} = Q_3 + \Delta Q$, (окно Q_{3c});

Потери РМ в ЛЭП и трансформаторере

$$\Delta Q = \frac{S_n I_{xx}}{100} + \frac{P^2 + Q_3^2}{U^2} (X_T + X_L), \text{ квар,}$$

где S_n – номинальная мощность трансформатора, кВА,

I_{xx} – ток холостого хода трансформатора, %,

X_T, X_L – индуктивные сопротивления трансформатора и ЛЭП, Ом,

U – номинальное напряжение, кВ.

– Потери активной мощности в ЛЭП и трансформаторе, зависящие от РМ (окно dP):

$$\Delta P = \frac{Q_3^2}{U^2} (R_T + R_{Л}), \text{ кВт},$$

где $R_T, R_{Л}$ – активные сопротивления трансформатора и ЛЭП, Ом.

– Потери электроэнергии в ЛЭП и трансформаторе за сутки

$$(\text{окно } dW): \Delta W = \int_0^{24} \Delta P dt = \sum_1^{24} \Delta P, \text{ кВтч.}$$

– Потери напряжения в ЛЭП и трансформаторе (окно dU):

$$\Delta U = \frac{P(R_{Л} + R_T) + Q_3(X_{Л} + X_T)}{U^2} 100, \%$$

Параметры узла нагрузки, используемые в математической модели:

- ЛЭП воздушная, $U = 10$ кВ, провод АС 35, длина 2 км;
- Трансформатор ТМЗ 630/10, $S_n = 630$ кВА, $U_k = 5,5$ %, $\Delta P_k = 7,6$ кВт, $I_{xx} = 1,8$ %;
- Набор ККУ: 1х150, 2х100, 2х125, 3х100, 4х100, 2х200, 3х150 квар.

1. Потери активной мощности, энергии и напряжения при неизменной нагрузке.

1.1. Запустить программу (рис.1), «РегКБ» – в положении "Откл". Исследовать зависимости потерь активной мощности, энергии и отклонений напряжения от потребляемой РМ.

1.2. В окне «Коэффициент загрузки» установить $k_z=0$ % (режим х.х.), $Q_k = 0$, нажать кнопку Ок1, (рис. 1) записать значения Q_3 , dW (за сутки), dP , dU . Повторить опыты с $k_z=50$ % и $k_z=100$ %, объяснить полученные результаты.

1.3. Выбрать КБ мощностью $Q_k = 200$ квар (2х100 квар), провести опыты с $k_z=0$ %, $k_z=50$ % и $k_z=100$ %, записать результаты Q_3 , dW , dP , dU , сравнить их с п. 1.2, сделать выводы.

2. Потери активной мощности, энергии и напряжения при изменяющейся нагрузке и отсутствии КБ.

2.1. Установить $Q_k = 0$.

2.2. Отключить автоматический регулятор (РегКБ – "Откл").

2.3. Установить подходящий масштаб времени построения суточного графика реактивной нагрузки. Его следует подбирать таким, чтобы время построения одной ступени графика было достаточным для снятия показаний Q_3 , ΔP и ΔU . Например,

масштаб $Mt = 3600$ означает, одна ступень (три числа) реального графика длительностью 1 час = 3600 с будет построена на модели за время $3600/Mt = 3600/3600 = 1$ с; $Mt = 720$: 1 час = 5 с.; $Mt = 360$: 1 час = 10 с. и т.д.

2.4. Приготовиться к записи графика в табл. 1, нажать Ок2. График РМ будет строиться на экране, числа будут выводиться в соответствующие окна. **По окончании построения** записать суточные потери электроэнергии $\Delta W = \dots$ кВт*ч, найти размах (максимальную разность) потерь напряжения $\Delta U_{\text{макс}} - \Delta U_{\text{мин}} = \dots\%$.

3. Потери активной мощности, энергии и напряжения с подключенной регулируемой КБ.

3.1. По результатам п. 3.4 определить среднесуточную РМ

нагрузки по точной $Q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} Q_{\text{Э}i}}{24}$, квар

или по приближенной $Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{Эмакс}} + Q_{\text{Эмин}}}{2}$, формуле,

где $Q_{\text{Э}i}$ – РМ ступени графика;

$Q_{\text{макс}}$, $Q_{\text{мин}}$ – максимальная и минимальная РМ суточного графика.

3.2. Из выпадающего списка «Установленная $Q_{\text{к}}$ » выбрать ближайшую по мощности ККУ ($n \times Q_{\text{к}} \approx Q_{\text{ср}}$).

3.3. Приготовиться к записи нового графика РМ (табл. 2 а). На экране будут строиться три графика (рис. 1):

- черным цветом – нагрузки $Q = f(t)$,
- синим – мощность КБ с учетом знака $Q_{\text{к}} = f(t)$,
- красным – РМ после компенсации $Q_{\text{э}} = f(t)$.

3.4. Нажать Ок2, занести величины ΔU в табл. 2. По окончании построения графика записать потери электроэнергии за сутки $\Delta W = \dots$ кВт*ч, вычислить размах отклонений напряжения $\Delta U_{\text{макс}} - \Delta U_{\text{мин}} = \dots\%$.

Сравнить результаты опытов п.п. 2.4 и 3.4, сделать выводы.

4. Потери активной мощности, энергии и напряжения с автоматически регулируемой КБ.

4.1. По условиям максимального режима рассчитать $Q_{\text{к}}$ – установленную мощность КБ из условия ограничения РМ, получаемой от источника питания $Q_{\text{э}} \leq 70$ квар [1]. Максимальную

30-ти минутную РМ нагрузки Q_m , квар, найти из графика РМ до компенсации (п. 2.4). Выбрать ближайшую по мощности ККУ ($n \times Q_{кк} \approx Q_k$) с максимальной мощностью ступени. Например среди двух ККУ 4 x 100 и 2 x 200 выбрать 2 x 200.

4.2. Установить величину зоны нечувствительности (НЧ) («Рег.КБ/Зона, квар», рис. 1) на 5 % больше ступени регулирования, равной мощности одной секции КБ (рис. 2).

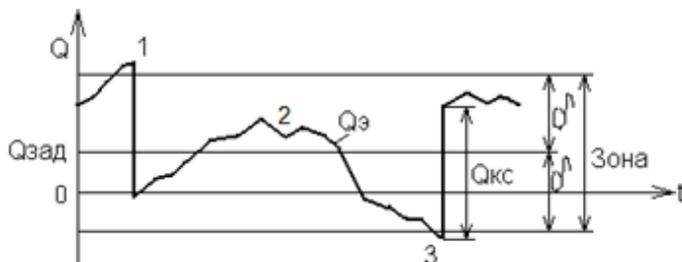


Рис. 2. Процесс автоматического регулирования мощности КБ

4.3. Середина зоны НЧ определяется величиной $Q_{зад}$. С целью обеспечить минимум передаваемой РМ установить $Q_{зад} = 0$ (рис. 2). В процессе работы, в зависимости от величины $Q_3 = var$, возможны 3 ситуации (рис. 2).

«1» – Контролируемая РМ Q_3 велика, разность $(Q_3 - Q_{зад})$ больше допустимого отклонения δ : поступает команда на включение одной секции КБ.

«2» – Q_3 находится внутри зоны НЧ, разность $Q_3 - Q_{зад} < \delta$, никаких команд не поступает.

«3» – Q_3 мала, разность $Q_3 - Q_{зад} < -\delta$, – поступает команда на отключение одной секции КБ.

4.4. Включить автоматический регулятор "РегКБ".

4.5. Установить масштаб времени $Mt = 3600$, нажать ОК2. На экране будут строиться три графика (см. выше), зеленым цветом показываются границы зоны НЧ регулятора.

По окончании построения графика записать потери электроэнергии за сутки $\Delta W = \dots$ кВт*ч, найти размах потерь напряжения $\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min} = \dots$ %.

Сравнить полученные результаты с п.п. 3.4, дать объяснения, сделать выводы.

4.6. Подключить ККУ, имеющую меньшую мощность ступени (например, вместо 2 x 200 включить 4 x 100 квар). Установить зону НЧ в соответствии с новой мощностью ступени.

4.7. Нажать ОК2, наблюдать построение нового графика, записать ΔU_{\min} и ΔU_{\max} , по окончании записать ΔW , найти размах отклонений напряжения $\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}$.

Сделать вывод о влиянии ширины зоны НЧ на ΔW и на размах.

4.8. Установить $Q_{\text{зад}}$ с целью не допустить перекомпенсации ($Q_s > 0$). Нажать ОК2, наблюдать построение нового графика, записать ΔU_{\min} и ΔU_{\max} , по окончании записать ΔW , найти размах отклонений напряжения $\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}$.

Оценить влияние $Q_{\text{зад}}$ на потери электроэнергии и на размах отклонений напряжения.

Вывод

Использование компьютерной модели автоматического регулирования мощности многосекционной конденсаторной батареи обеспечивает наглядность процесса регулирования мощности конденсаторной батареи, повышает эффективность и качество обучения студентов.

ЛИТЕРАТУРА

Сумарокова Л.П. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие / Томск, 2012. – 287 с.

Автор

Лыков Юрий Федорович, кандидат технических наук, доцент, место работы: Самарский Государственный технический университет, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Окончил Электротехнический факультет Куйбышевского Политехнического института в 1965 году. Ученую степень кандидата технических наук получил в 1973 г. по теме «Оптимизация режимов работы высоковольтных синхронных электродвигателей». E-mail: lykuriy1943@yandex.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Каргузов А.В., Каргузова Т.В., Кочетов А.Д., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Предложена методика расчета переходных процессов с помощью разностных уравнений. Проведены расчеты цепей классическим методом и методом разностных уравнений. Определено, что метод разностных уравнений упрощает расчет переходных процессов.*

***Ключевые слова:** переходный процесс, классический метод, разностные уравнения, аппроксимация.*

Целью работы является показать преимущество использования разностных уравнений для численного расчета переходных процессов в электрических цепях по сравнению с классическим методом.

Для исследования была поставлена следующая задача: произвести расчеты переходных процессов в цепях 1-го и 2-го порядков двумя методами и сравнить результаты.

Рассмотрим расчет цепи 1-го порядка со следующими исходными данными: $e = 50 \sin(100t)$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $L = 0,02$ Гн, представленной на рис. 1. Эквивалентная схема замещения показана на рис. 2.

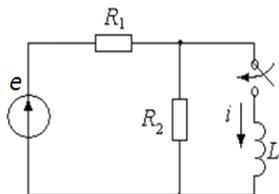


Рис. 1

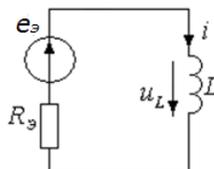


Рис. 2

Для решения классическим методом цепи 1-го порядка нужно [1]:

- 1) записать ток в виде $i(t) = i_y(t) + i_{св}(t)$;
- 2) найти установившийся режим;
- 3) определить дифференциальное уравнение 1-го порядка через 2-ой закон Кирхгофа и найти корень характеристического уравнения p : $L \frac{di}{dt} + R_3 i = e_3$, откуда $p = -400$;
- 4) записать свободный режим в виде $i_{св} = A e^{pt}$;
- 5) подставить найденные значения в искомый ток и переписать его при $t = 0$;
- 6) определить независимые начальные условия;
- 7) определить зависимые начальные условия;
- 8) определить постоянную A , решив уравнение с одним неизвестным;
- 9) записать искомый ток.

Для расчета разностными уравнениями произведём аппроксимацию дифференциального уравнения [2] и запишем его в

виде $L \frac{i_k - i_{k-1}}{h} + R_3 i_k = e_3$, откуда $i_k = \frac{he_3 + i_{k-1}}{1 + \frac{hR_3}{L}}$ или

$i_k = \frac{500h \cdot \sin(t_k) + i_{k-1}}{1 + 400h}$, при этом $i_0 = 0$, затем составляем программу.

На рис. 3 показаны графики при решении двумя методами и программа для решения разностными уравнениями. Графики совпадают, при этом наблюдается небольшой выигрыш по времени решения при использовании разностных уравнений.

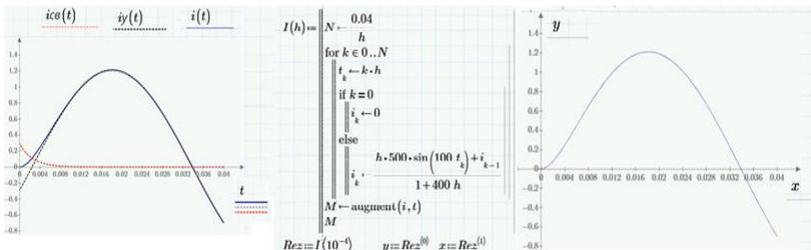


Рис. 3

Теперь произведем расчет переходного процесса для цепи 2-го порядка, представленной на рис. 4.

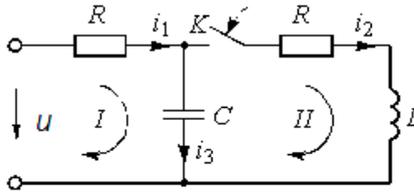


Рис. 4

Дано: $u = 10\sin(t)$ В, $R = 5$ Ом, $C = 5$ Ф, $L = 5$ Гн, $u_C(0-) = 0,5$ В.

Для решения классическим методом цепи 2-го порядка нужно [1]: 1) записать ток в виде $i(t) = i_y(t) + i_{CB}(t)$;

- 1) найти установившийся режим;
- 2) определить дифференциальное уравнение 2-го порядка через систему, составленную по законам Кирхгофа, и найти корни характеристического уравнения p_1 и p_2 :

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 = i_2 + C \frac{du_c}{dt} \\ u = Ri_1 + u_c \\ u_c = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} \end{cases},$$

откуда $LC \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \left(\frac{L}{R} + RC\right) \frac{di_2}{dt} + 2i_2 = \frac{u}{R}$, тогда $p_1 = -0,956$ и

$p_2 = -0,084$;

- 4) записать свободный режим в виде $i_{cb} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$;
- 5) подставить найденные значения в искомый ток, найти производную тока и переписать их при $t = 0$;
- 6) определить независимые и зависимые начальные условия;
- 7) задать постоянные A_1 и A_2 , решив систему с двумя неизвестными;
- 8) записать искомый ток.

Для решения разностными уравнениями произведем аппроксимацию дифференциального уравнения [2]:

$$25 \frac{i_k - 2i_{k-1} + i_{k-2}}{h^2} + 26 \frac{i_k - i_{k-1}}{h} + 2i_k = 2 \sin(t_k), \quad \text{откуда}$$

$$i_k = \frac{2h^2 \sin(t_k) + 26hi_{k-1} + 25(2i_{k-1} - i_{k-2})}{2h^2 + 26h + 25}, \quad \text{при этом } i_0 = 0,$$

$$\frac{i_1 - i_0}{h} = 0.5 \Rightarrow i_1 = 0.5h + i_0, \text{ после чего составляем программу.}$$

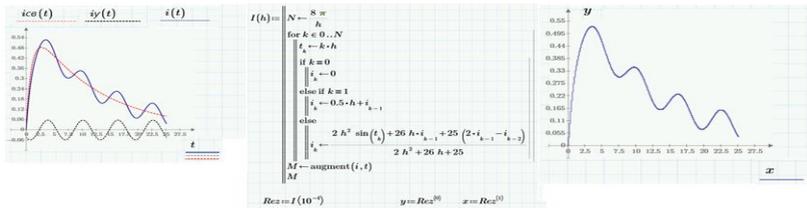


Рис. 5

На рис. 5 показаны графики, полученные двумя методами, и программа для решения вторым методом. Графики совпадают, то есть решение верное, при этом время расчета значительно уменьшилось.

Выводы

По проделанному исследованию следует, что применение разностных уравнений для расчета переходных процессов имеет ряд преимуществ перед классическим методом, поскольку отпадает необходимость нахождения установившегося режима, производных и определения постоянных коэффициентов [3].

И чем выше порядок цепи, тем более выигрышным оказывается метод разностных уравнений. При этом единственный существенный недостаток данного метода – это невозможность расчета вручную без написания программы. Тем не менее, в цепях высших порядков расчет установившихся режимов, независимых и зависимых начальных условий и постоянных интегрирования вручную сильно затруднен, поэтому даже при решении классическим методом необходимо будет прибегнуть к компьютерному вычислению [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Классический метод расчета переходных процессов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ups-info.ru/for_partners/library/%20teoreticheskie_osnove_elektrotehniki_dlya_ibp_ups_/perehodnee_prot_sesse_v_lineyneh_elektricheskikh_tse.
2. Разностная аппроксимация производных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2473011/>.
3. Елисеева В.В., Каргузова Т.В., Чернышев И.В. Применение преобразования Фурье к задачам электроэнергетики. – Математические модели и их приложения: сборник научных трудов. Том 1. Выпуск 12. Чебоксары, 2010, С. 363–370.
4. Каргузов А.В. Мониторинг качества учебного процесса в условиях информатизации / А.В. Каргузов. – Вестник Чебоксарского кооперативного института. – 2010. – № 1 (5). – С. 217–221.

Авторы:

Каргузов Александр Вячеславович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах ЧГУ. В 1989 г. закончил электротехнический факультет ЧГУ. В 2005 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени к.п.н. «Использование информационно-образовательных ресурсов вуза в формировании профессиональной подготовки специалиста» по специальности «Теория и методика обучения и воспитания (математика)». E-mail: kartuzovaleksandr@yandex.ru.

Каргузова Татьяна Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре высшей математики, доцент кафедры высшей математики и теоретической механики им. С.Ф. Сайкина ЧГУ. В 1989 г. закончила физико-математический факультет ЧГУ. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» «Численные исследования обтекания системы произвольных профилей методом граничных элементов» защищена 25.12.1997. E-mail: tanyakartuzova@yandex.ru.

Кочетов Алексей Дмитриевич, студент группы ЭЭ-21-20 факультета энергетики и электротехники.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ

Степанова Д.А., Иванов Н.Г., Солдатов А.В., Золотов А.А., Воробьев Е.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Исследуются характеристики точности трансформаторов тока в установившемся и переходном режимах. Характеристики позволяют оценить влияние насыщения трансформаторов тока на работу устройств релейной защиты. Показано, что при оценке условий функционирования релейной защиты установившийся режим работы является наихудшим. При оценке влияния алгоритма, реагирующего на вторую гармонику в токе должны использоваться характеристики переходного режима.*

***Ключевые слова:** характеристики точности трансформаторов тока, насыщение трансформаторов тока, прямоугольная характеристика намагничивания.*

Введение

Большинство алгоритмов релейной защиты и автоматики реагируют на параметры токов – обычно на составляющие основной гармоники. При насыщении трансформатора тока (ТТ) происходит искажение формы кривой вторичного тока, в результате чего теряется соответствие между интегральными параметрами вторичного и первичного токов [1], что оказывает существенное влияние на работу устройств релейной защиты [2, 3]. Насыщение ТТ может приводить к неселективному срабатыванию релейной защиты, ее замедлению или даже отказу. Особенно повышается опасность насыщения ТТ в переходном режиме, когда ток содержит апериодическую составляющую.

Релейная защита обычно реагирует на интегральные параметры тока (основная гармоника и высшие гармоники). Поэтому для оценки влияния насыщения ТТ на функционирование релейной защиты, необходимо знать, как насыщение сказывается на интегральных параметрах вторичного тока.

Цель работы заключается в исследовании характеристик одиночного ТТ в установившемся и переходном режимах работы.

Модель вторичного тока трансформатора тока в установившихся и переходных режимах

В режиме короткого замыкания ток повреждения, протекающий по первичной обмотке ТТ, состоит из апериодической и принужденной составляющих:

$$i_{prim}(t) = I_0 e^{-t/\tau} + I_1 \sin(\omega t + \psi), \quad (1)$$

где I_0 и I_1 – амплитуды апериодической и принужденной составляющих первичного тока ТТ; τ – постоянная времени апериодической составляющей; ω – угловая частота; ψ – начальная фаза.

Режим работы ТТ при коротком замыкании в первичной сети определяется характеристикой намагничивания ТТ и его параметрами. Учет нелинейности магнитных свойств сердечников и других реальных условий усложняет расчеты, в связи с чем исследование установившихся и переходных режимов работы ТТ было проведено при следующих допущениях: характеристика намагничивания ТТ имеет прямоугольную форму [4]; нагрузка ТТ имеет активный характер.

С учетом допущения о ПХН и активном характере нагрузки, вторичный ток может быть представлен в виде:

$$i'_{sec}(t) = \begin{cases} i_{prim}(t), & \text{если } |B| < B_{sat} \\ 0, & \text{если } B = B_{sat} \end{cases}$$

где B_{sat} – магнитная индукция насыщения.

Следовательно, характеристики точности ТТ зависят от: параметров тока КЗ, конструктивных параметров и нагрузки ТТ, а также от его характеристики намагничивания.

Характеристики точности трансформатора тока

Современные цифровые устройства релейной защиты и автоматики используют в своих алгоритмах значения основной и высших гармонических составляющих измеренного вторичного тока. В установившихся и переходных режимах точность работы ТТ может быть охарактеризована полной и токовой погрешностью по основной гармонике и угловой погрешностью (таблица 1). Помимо характеристик точности по основной гармонике при анализе функционирования дифференциальных защит

трансформатора используются параметры, характеризующие уровень второй и пятой гармоник тока намагничивания, появляющихся вследствие насыщения ТТ.

Таблица 1

Характеристики точности ТТ

Наименование характеристики	Формула
Полная погрешность по основной гармонике	$\varepsilon_1 = \left \dot{I}_{prim} - \dot{I}'_{sec} \right / \left \dot{I}_{prim} \right $
Токовая погрешность по основной гармонике	$f_1 = \left(I_{prim} - I'_{sec} \right) / I_{prim}$
Угловая погрешность	$\delta = \arg \left(\dot{I}'_{sec} / \dot{I}_{prim} \right)$
Значение второй гармоники тока намагничивания, приведенное к основной гармонике первичного тока	$I_{\mu}^{(2h)} = I_{*sec}^{(2h)} = I'_{sec}{}^{(2h)} / I_{prim}$
Значение пятой гармоники тока намагничивания, приведенное к основной гармонике первичного тока	$I_{\mu}^{(5h)} = I_{*sec}^{(5h)} = I'_{sec}{}^{(5h)} / I_{prim}$

Примечание – в таблице приняты обозначения: \dot{I}_{prim} и \dot{I}'_{sec} – комплексные действующие значения основной гармоники первичного и приведенного к первичной стороне вторичного токов; $I_{prim} = \left| \dot{I}_{prim} \right|$ и $I'_{sec} = \left| \dot{I}'_{sec} \right|$ – действующие значения основной гармоники первичного и приведенного к первичной стороне вторичного токов; $I_{sec}^{(2h)}$ и $I_{sec}^{(5h)}$ – действующие значения второй и пятой гармоник вторичного тока, приведенного к первичной стороне ТТ.

Точность трансформатора тока в установившемся режиме

Характеристики точности ТТ с ПХН, работающих на активную нагрузку, в установившемся режиме приведены на рис. 1, а–в. В качестве базиса принята токовая погрешность по основной гармонике в установившемся режиме f_1^{st} .

Анализ характеристик показывает, что при слабом и сильном насыщениях полная погрешность по основной гармонике ε_1 практически совпадает с токовой f_1^{st} , а при f_1^{st} от 0,2 до 0,8 о.е. – различие может достигать 20% (рис. 1, а).

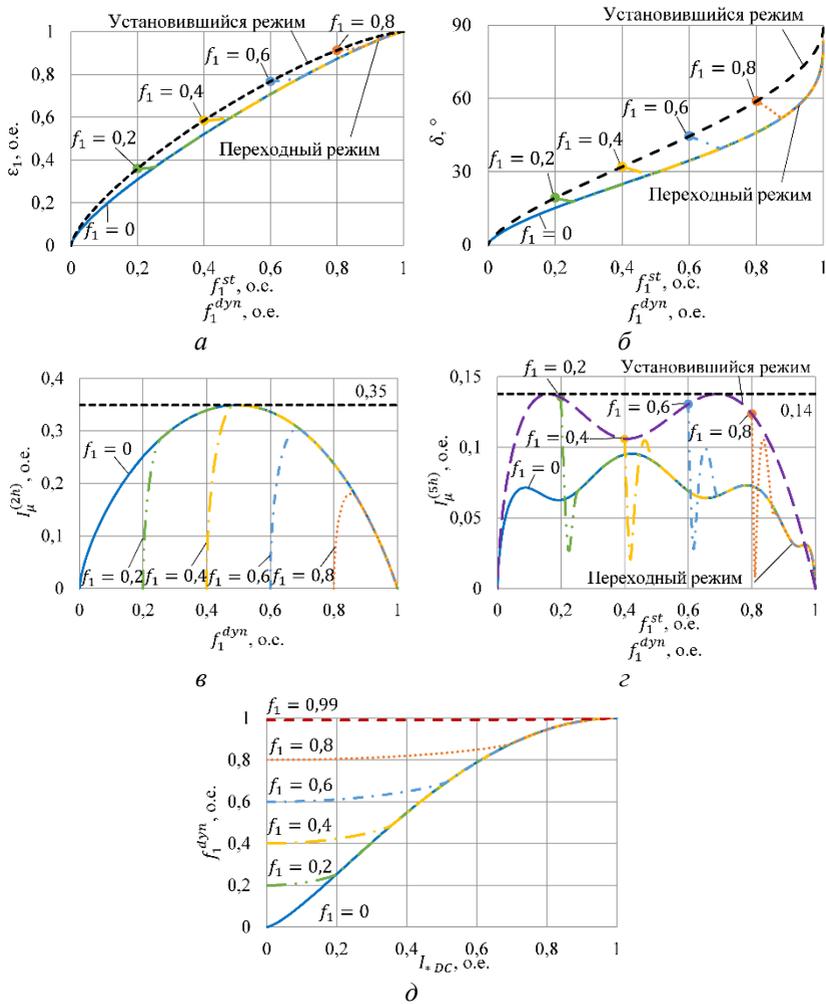


Рис. 1. Графики зависимости полной погрешности по основной гармонике ε_1 (а) и угловой погрешности δ (б), а также значения пятой $I_{\mu}^{(5h)}$ (в) и второй $I_{\mu}^{(2h)}$ (г) гармоник тока намагничивания от токовой погрешности по основной гармонике в установившемся f_1^{st} и переходном f_1^{dyn} режимах. На рис. г представлен график зависимости токовой погрешности по основной гармонике f_1^{dyn} от относительного значения амплитуды постоянной составляющей I_{*DC} первичного тока ТТ

Угловая погрешность δ монотонно возрастает с увеличением токовой погрешности по основной гармонике f_1^{st} от 0 до 90° (рис. 1, б). Поскольку в установившемся режиме кривые вторичного тока всегда симметричны относительно среднего значения, то четные гармоники во вторичном токе отсутствуют. Уже при слабом насыщении ТТ $f_1^{st} \approx 5\%$ появляется составляющая пятой гармоники тока намагничивания, которая может достигать 10÷14% от основной гармоники приведенного вторичного тока (рис. 1, в).

Точность трансформатора тока в переходном режиме

В переходном режиме, когда в первичном токе присутствует аperiodическая составляющая (1), характеристики точности ТТ зависят от относительного уровня аperiodической составляющей $I_{*DC} = (I_0/I_1)e^{-t/\tau}$ и погрешности в установившемся режиме f_1^{st} (рис. 1, д): чем выше относительное содержание аperiodической составляющей I_{*DC} , тем выше токовая погрешность по основной гармонике в переходном режиме f_1^{dyn} . Характеристики точности приведены на рис. 1 для заданных значений токовой погрешности по основной гармонике в установившемся режиме f_1^{st} от 0 до 99%. Со снижением (затуханием) аperiodической составляющей снижается токовая погрешность по основной гармонике f_1^{dyn} с максимального значения до значения установившегося режима f_1^{st} . Сначала снижение происходит быстро по общей характеристике, затем, при приближении параметра к параметру установившегося режима, – медленно по индивидуальной характеристике.

В переходном режиме полная погрешность по основной гармонике ε_1 (рис. 1, а) и угловая погрешность δ (рис. 1, б) при одной и той же токовой погрешности по основной гармонике оказывается ниже, чем в установившемся режиме.

Значение пятой гармоники тока намагничивания $I_{\mu}^{(5h)}$ в переходном режиме значительно меньше, чем в установившемся, и так же не превышает 14% (рис. 1, в). Таким образом, аperiodо-

дическая составляющая в первичном токе способствует снижению уровня пятой гармоники тока намагничивания.

Значение второй гармоники тока намагничивания $I_{\mu}^{(2h)}$ может достигать 35% (рис. 1, з). Это может приводить при внутреннем КЗ с насыщением ТТ к замедлению дифференциальной защиты из-за действия блокировки по второй гармонике, а при внешнем КЗ – способствовать дополнительной стабилизации защиты.

Выводы

1 Приведенные в работе характеристики точности ТТ в установившемся и переходном режимах позволяют оценить влияние насыщения ТТ на функционирование релейной защиты.

2 При анализе влияния насыщения ТТ на функционирование релейной защиты при заданной токовой погрешности по основной гармонике расчетным режимом в большинстве случаев является установившийся режим. При оценке влияния алгоритма, реагирующего на вторую гармонику в токе, например, дифференциальной защиты, должны использоваться характеристики переходного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов, А.Д. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах. / А.Д. Дроздов, С.Л. Кужеков. – Электричество, 1971, № 1. – С. 27 – 32.

2. Наумов, В.А. Влияние насыщения трансформатора тока в переходном режиме работы на функционирование дифференциальной защиты силового трансформатора. / В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов, М.И. Александрова, Д.А. Степанова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 394 – 401.

3. Воробьев, Е.С. Работа дистанционного органа при насыщении измерительного трансформатора тока в установившемся режиме. / Е.С. Воробьев, Н.Г. Иванов, А.В. Солдатов. // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 44 – 49.

4. Кужеков, С.Л. Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах. / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, К.В. Чередниченко – Электрические станции, 2015, №5. – С. 53 – 60.

Авторы:

Степанова Дарья Александровна, инженер группы разработки интеллектуальных электронных устройств сектора научного сопровождения продукции департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант 2-го года обучения электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 13.04.02 «Автоматика энергосистем». Окончила в 2021 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получила степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: Stepanova_DA@ekra.ru.

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки интеллектуальных электронных устройств сектора научного сопровождения продукции департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2021 году защитил кандидатскую диссертацию «Интеллектуальное автоматическое повторное включение линий электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами». E-mail: Ivanov_NG@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2021 году защитил кандидатскую диссертацию «Многопараметрическая дифференциальная защита от однофазных коротких замыканий на землю статора генератора, работающего на сборные шины». E-mail: Soldatov_AV@ekra.ru.

Золотов Александр Артурович, инженер-исследователь группы разработки интеллектуальных электронных устройств сектора научного сопровождения продукции департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2022 году факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: Zolotov_AA@ekra.ru.

*Воробьев Евгений Сергеевич, инженер 2 категории группы разработки интеллектуальных электронных устройств сектора научно-го сопровождения продукции департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы», ассистент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова.
E-mail: Vorobev_ES@ekra.ru.*

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Мироненко Я.В., АО «РЭС Групп», г. Владимир, Россия.

***Аннотация.** В условиях цифровой трансформации электроэнергетики определяющую роль в эксплуатации электрооборудования должны играть системы обработки данных технической диагностики. Разработка таких систем требует анализа используемых методов и накопленных знаний существующих на рынке продуктов, получивших достаточное распространение. Применение новых методов обработки данных на базе уже внедрённых комплексов может стать эффективным инструментом для управления жизненным циклом электрооборудования.*

***Ключевые слова:** диагностика электрооборудования, диагностический мониторинг, обработка данных, диагностические системы.*

Изменения работоспособности электрооборудования (ЭО) при его создании, использовании (эксплуатации) и ликвидации в условиях названных разнонаправленных процессов составляют конечное множество состояний и режимов, которое называют жизненным циклом. Управление жизненным циклом на этапе эксплуатации осуществляется по техническому состоянию ЭО. Наиболее эффективным инструментом с позиций идентификации текущего состояния оборудования и его изменения во времени под воздействием многочисленных факторов являются

методы технической диагностики, осуществляемого практически в непрерывном режиме диагностического мониторинга.

Обработка данных диагностического мониторинга осуществляется с использованием программных комплексов - информационно-диагностических систем. В Российской Федерации разработка подобных систем ведется более 30 лет. Основное отличие систем друг от друга заключается в использовании разных математических аппаратов (моделей) для анализа разного набора диагностических параметров. В условиях изменения подхода к обработке диагностических данных, вызванных цифровой трансформацией электроэнергетики необходимо провести оценку возможности использования уже разработанных продуктов в новых системах диагностики.

Среди систем, получивших наибольшее распространение, и разработанных независимыми от производителей организациями, выделяются следующие:

- «Диагностика +» – разработчик Ивановский государственный энергетический университет;
- Корпоративная экспертно-диагностическая и информационная система управления техническим обслуживанием высоковольтного электрооборудования (ЭДИС «Альбатрос») – разработчик Уральский государственный технический университет.

Обе системы в первую очередь ориентированы на масляное оборудование и в качестве источника данных ориентируются на результаты таких диагностических методов, как хроматографический анализ растворенных газов, физико-химический анализ трансформаторного масла, опыт холостого хода, испытания постоянным током [1]. Как следует из заявленных методов системы ориентированы на ручной ввод значений диагностических параметров для их последующей обработки программой. В системах заявлен продукционный подход, который подразумевает сравнение введенных значений параметров, описывающие состояние объекта с нормативными значениями из базы знаний. В качестве основы базы знаний были использованы отечественные и зарубежные публикации по диагностике оборудования, многолетний опыт работы специалистов-экспертов ряда энергосис-

тем (в первую очередь сетевых компаний Свердловской области), научно-исследовательские работы, и нормативные документы.

Рассматриваемые системы являются иерархическими, имеют подсистемы ролирования для доступа к информации на разных уровнях. Имеются встроенные справочные модули. Поддерживаются различные механизмы вывода диагностической оценки: цветовая дифференциация отдельных параметров, отображение на мнемосхемах, отчеты. Обе системы также имеют инструменты для распознавания дефектов, а в ЭДИС «Альбатрос» реализована подсистема оценки рисков и допустимости дальнейшей эксплуатации для районов энергосистемы, т.е. фактически система поддержки при управлении жизненным циклом.

Отдельные решения в виде информационно-диагностических систем предлагают производители измерительного и диагностического оборудования. Среди систем, имеющих достаточное количество внедрений:

- Автоматизированная система контроля и диагностики трансформатора «НЕВА-АСКДТ» – разработчик НПФ «Энергосоюз»;

- Экспертная диагностическая система «PD-Expert» – разработчик ООО "Димрус".

«НЕВА-АСКДТ» представляет собой комплексную систему, которая включает измерительное и вычислительное оборудование, программное обеспечение.

Среди контролируемых диагностических параметров: температура верхних и нижних слоев масла трансформатора; температура обмотки трансформатора; уровень масла; влаго- и газосодержание масла (H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6); давление масла на вводах трансформатора; уровень вибрации трансформатора; состояние различных технологических элементов (газовая защита, предохранительный клапана, РПН и пр.). В случае выхода значений контролируемых параметров за установленные технологические пределы осуществляется сигнализация о неисправности оборудования. «НЕВА-АСКДТ» может управлять в соответствии с результатами диагностического мониторинга осуществлять управление системой охлаждения и работой РПН трансформатора [3].

Подобная система была реализована НПФ «Энергосоюз» для генераторов и получила название «НЕВА-АСКДГ». Данная система осуществляет мониторинг по следующим показателям: тепловые параметры, электрические параметры; электрическое сопротивление изоляции цепей ротора; вибрация лобовых частей и стержней статора генератора; ток обратной последовательности; витковые замыкания ротора; работа щеточно-контактного аппарата [4].

И «НЕВА-АСКДТ», и «НЕВА-АСКДГ» позволяют выводить данные в виде схем и таблиц, а также осуществлять информационный обмен со SCADA. Системы производства НПФ «Энергосоюз» являются закрытыми: осуществляется комплексная поставка шкафа автоматизации в составе оборудования и программного обеспечения, системы не масштабируемы, работают только на определенном оборудовании.

Один из крупнейших производителей оборудования для диагностического мониторинга частичных разрядов, компания "Димрус" разработала свою экспертную систему «PD-Expert» для оценки уровня частичных разрядов в изоляции. «PD-Expert» работает со всеми диагностическими приборами и системами мониторинга «DIMRUS».

Данная система использует помимо стандартного продукционного наполнения базы знаний, также условные образы дефектов, описанные в виде распределения импульсов частичных разрядов относительно синусоиды приложенного к изоляции напряжения. Пользователь системы осуществляет работу с данными мониторинга частичных разрядов в двух плоскостях: TFM, на которой размещается вся информация о частичных разрядах выбранного замера, относящихся к одному измерительному каналу и PRPD, которая и содержит распределение ЧР. Работа с системой подразумевает выделение отдельных сигналов ЧР в группу, с последующим сравнением с вероятными типами дефектов в изоляции. Для этой цели используется встроенная библиотека образов дефектов в изоляции. Результаты такой диагностики показываются в отдельном графическом окне программы, в виде готового текстового отчета. Базовая библиотека образов дефектов, минимальной конфигурации, поставляется вместе с программой. При необходимости, пользователь

может дополнительно описать и сохранить в памяти программы образы других дефектов, в соответствии со своим пониманием определенных дефектов, с которыми ему приходится встречаться. Пользователь так же может, по желанию, самостоятельно модифицировать уже имеющиеся в памяти программы диагностические правила и образы дефектов, если они, на его практический взгляд, неотложно нуждаются в этом [5].

Помимо инжиниринговых компаний и университетов разработка подобных комплексов велась на эксплуатирующих предприятиях (в первую очередь сетевых и генерирующих компаниях) с уклоном в управление производственными активами.

Выводы

Все описанные выше диагностические системы имеют десятки и сотни внедрений, что позволило накопить им гигантский информационный потенциал, который тем не менее не может быть использован в дальнейшем из-за закрытости систем и отсутствия синхронизированных с ними систем мониторинга других диагностических параметров. В целом их отличительной особенностью является:

- отсутствие автоматизированного сбора данных с любого диагностического оборудования и информационного обмена с другими измерительными системами;
- отсутствие автоматизированной глубокой аналитической обработки данных в постоянном режиме;
- отсутствие статистического и корреляционного анализа диагностических и эксплуатационных параметров;
- использование простых продукционных правил и информативных, но дорогих методов диагностики вроде анализа масла и контроля диэлектрических характеристик изоляции;
- отсутствие современных технологий искусственного интеллекта для обработки данных диагностического мониторинга;
- требования к квалификации оператора систем, который фактически координирует работу этих систем.

Изменение парадигмы в рамках цифровой трансформации электроэнергетики служит толчком для начала активного использования методов искусственного интеллекта в диагностике. Существующий подход к созданию программных комплексов, в

полной мере не может реализовать обработку диагностических данных для дальнейшего использования результата при управлении жизненным циклом ЭО, но может использоваться в качестве базы для нового продукта, использующего современные технологии обработки больших данных, накопленный опыт и знания в формализованном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давиденко И.В.* Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.12 / Давиденко Ирина Васильевна ; Уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 2009

2. *Казаков М.С., Давиденко И.В.* Обзор интеллектуальных систем диагностирования электрооборудования // Конференция молодых ученых – 2016. / УралЭНИН, ФГАОУ ВПО «УрФУ», 2016

3. Автоматизированная система контроля и диагностики трансформатора «НЕВА-АСКДТ».

URL: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/avtomatizirovannaya-sistema-kontrolya-i-diagnostiki-transformatora-neva-askdt> (дата обращения 06.11.2022)

4. Автоматизированная система контроля и диагностики генератора «НЕВА-АСКДГ».

URL: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/avtomatizirovannaya-sistema-kontrolya-i-diagnostiki-generatora-neva-askdg> (дата обращения 06.11.2022)

5. *Русов В.А.* Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. / Екатеринбург: УрГУПС, 2011

Автор

Мироненко Ярослав Владимирович, заместитель генерального директора АО «РЭС Групп». E-mail: yaroslav.mironenko@inbox.ru.

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ «ОНЛАЙН» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАСТВОРЁННЫХ ГАЗОВ

Димитриев А.А., аспирант, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Михеев Г.М., доктор технических наук, Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы диагностирования силовых трансформаторов. Показано, что контроль данного оборудования необходимо производить не только с помощью оценки его параметров, полученные путём профилактических испытаний, но и в режиме реального времени. Основной упор по диагностированию направлен на оценку его состояния с помощью проведения «онлайн» анализа растворенных в масле газов, с применением методов искусственного интеллекта – аппарата нечеткой логики.*

***Ключевые слова:** силовой трансформатор, хроматографический анализ, трансформаторное масло, диагностирование, технические средства, метод нечёткой логики.*

В настоящее время в отечественной электроэнергетике происходит процесс цифровизации и «интеллектуализации» электрических сетей, в том числе и систем диагностики силового оборудования. Внедрение новых приборов и технологий позволяет наблюдать за функционированием устройств в «живую», т.е. без вывода оборудования в ремонт. Например, зарубежные производители (ABB, General Electric, Siemens, Omicron) производят программно-аппаратные комплексы, позволяющие диагностировать состояние силового трансформатора под напряжением в режиме «онлайн».

Анализ повреждаемости основного электрооборудования подстанций является необходимым этапом в оценке технического состояния электрооборудования [1]. Понимание о состоянии высоковольтных устройств необходимо для разработки мероприятий с целью обеспечения надежности и бесперебойной работы электрической сети с учетом старения оборудования, наличия дефектов, качества технического обслуживания, механических и климатических воздействий. Диагностирование со-

стояния оборудования способствует определению надежности различных типов высоковольтных преобразователей напряжения и отдельных его узлов, снижению длительности и числа профилактических ремонтов, позволяют оценить возможность дальнейшей эксплуатации устройств и разработать мероприятия с целью увеличения срока службы оборудования [1].

Силовой трансформатор (СТ) является одним из ключевых элементов парка электротехнического оборудования энергетических сетей электрических станций и подстанций [2]. При этом большое число СТ эксплуатируется со значительным превышением установленного срока службы. Внедрение цифровых систем диагностики позволит повысить работоспособность трансформаторов, а также заблаговременно реагировать на возникающие повреждения.

Существует ряд методов и технических средств диагностирования СТ, основу которых составляют физико-химический анализ жидкого диэлектрика, акустический контроль, тепловизионные методы, а также некоторые методы электрического контроля [3]. К недостаткам многих из этих методов относится узкая направленность на выявление лишь определенных возможных видов дефектов. Наибольшим недостатком большинства из этих методов является необходимость вывода из эксплуатации оборудования на время проведения испытаний [4]. В последние десятилетия в отечественной электроэнергетике всё шире начали применяться методы диагностирования, определяющие состояние силового высоковольтного электрооборудования в текущий момент времени в режиме «*on-line*», а также переход от планового ремонта к предупредительному.

В данное время к наиболее распространенным в нашей стране «онлайн» методам диагностирования состояния высоковольтного трансформатора относятся два метода – анализ растворенных газов (АРГ) в трансформаторном масле (ТМ) и анализ частичных разрядов.

АРГ является чувствительным и достоверным методом определения наличия дефекта трансформатора и его характера [1-3]. Для определения причины возникновения дефекта, степени его опасности и локализации применяют АРГ в комплексе с другими методами технического диагностирования, что позво-

ляет повышать эффективность и достоверность оценки технического состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Основным документом в процессе диагностирования дефектов трансформатора с помощью определения состояния ТМ является СТО 34.01-23-003-2019 [5].

Состояние оборудования методом АРГ оценивается по наличию газов, их концентрации и по скорости роста. Типичные дефекты и характерные для них растворенные газы в ТМ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Типичные дефекты в силовых трансформаторах и реакторах, а также состав растворенных газов при данных повреждениях

Тип повреждения	Характерные газы, растворенные в трансформаторном масле								
	СО	СО ₂	СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆	О ₂	Н ₂	Н ₂ О
Старение целлюлозы	X	X							X
Декомпозиция масла			X	X	X	X		X	
Утечки масла		X					X		X
Термическое повреждение целлюлозы	X	X	X				X	X	
Термическое повреждение масла до 300°С			X			X		X	
Термическое повреждение масла от 300 – до 700°С			X		X	X		X	
Термическое повреждение масла свыше 700°С			X	X	X			X	
Частичные разряды			X					X	
Образование дуги			X	X	X			X	

Для получения более полных экспертных оценок о состоянии трансформатора на основе анализа содержания газов, пред-

лагается использовать аппарат нечеткой логики [6-9]. Рассмотрим основные этапы функционирования данного математического аппарата.

1) Предварительная обработка входных данных – процесс унификация входных величин $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и их нормализация:

$$\mu(x_i) = \mu(u_i),$$
$$u = \frac{x_i - \underline{x}_i}{\overline{x}_i - \underline{x}_i},$$

где $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ интервал изменения переменной x_i ;

2) Фаззификация входных данных – это процесс перехода от количественных значений к качественным характеристикам. Происходит описание вычисляемых соотношений концентраций растворенных газов в виде терминов «высокое – нормальное – низкое» значение. Данное действие происходит с помощью применения входных функций принадлежности, например гауссовой функции:

$$\mu(u_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u - c}{a}\right)^{2b}};$$

3) Применение нечетких правил – оперирование с фаззифицированными значениями, с учетом задействования экспертной базы нечетких правил вида «если, то»:

если $x_1 = A_{11}$ и $x_n = A_{n1}$, то $N_1 = n_k$;

4) Дефаззификация результатов применения нечетких правил. Получение результата работы системы диагностики.

Используя данный вид обработки диагностических параметров, применяя опыт экспертов в области испытаний и диагностики СТ возможно получать информацию о его состоянии в виде оценки и рекомендации по дальнейшей эксплуатации [7–9]. Для автоматизации процесса принятия решения о состоянии СТ средствами микропроцессорной техники (промышленных компьютеров и серверов) предлагается алгоритм в виде блок схемы (рис. 1).

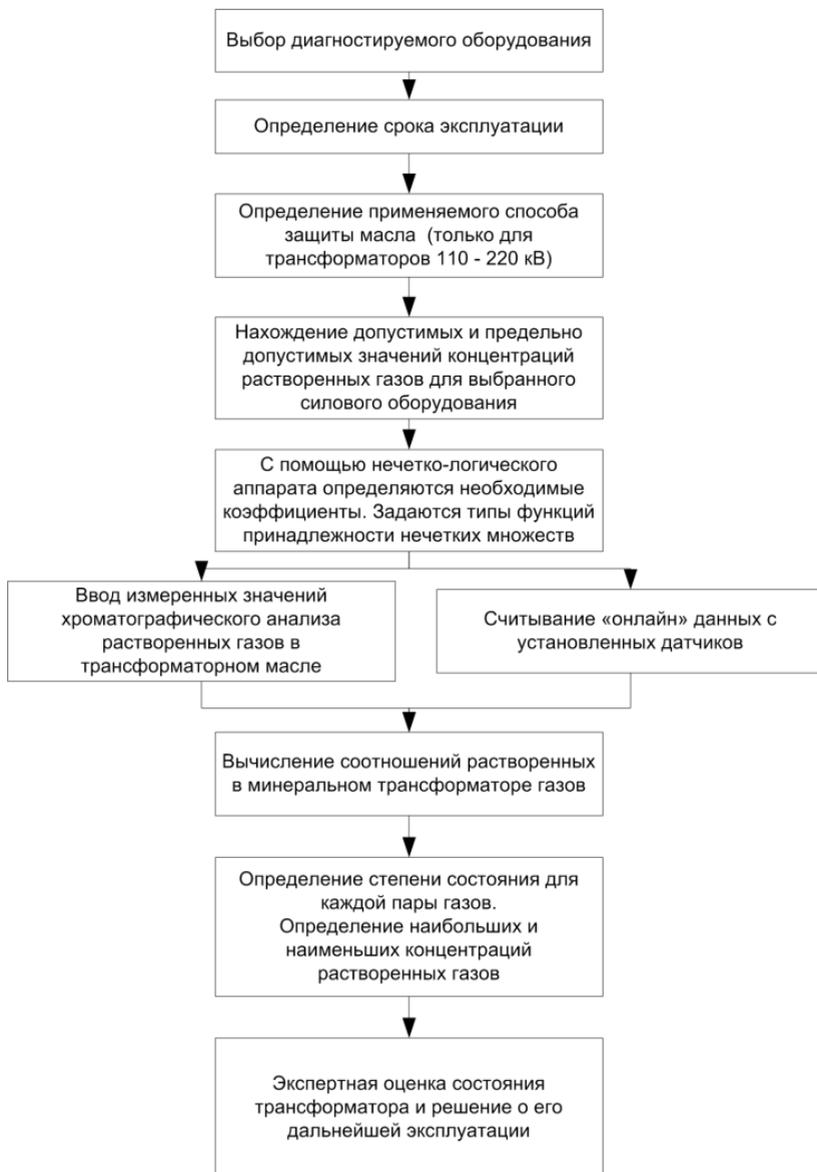


Рис. 1. Алгоритм диагностирования состояния трансформатора по результатам «онлайн» АРГ

Выводы

1. Предложен способ диагностирования состояния силового трансформатора, основанный на применении методов искусственного интеллекта – математического аппарата нечеткой логики.

2. Дан алгоритм составления экспертной оценки о технической надежности силового трансформатора при его диагностировании в режиме «on-line» в виде блок-схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Г.М. Способы повышения энергоэффективности силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, Л.Г. Ефремов, Д.Е. Иванов // Вестник Чувашияского университета. – 2013. – № 3. – С. 212-218. – EDN RUBSQR.

2. *Михеев Г.М.* Анализ существующих подходов и методов диагностирования регуляторов напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, А.А. Дмитриев, Х.У. Каландаров, О.В. Федоров // Вестник Чувашияского университета. – 2022. – № 3. – С. 61-72. – DOI 10.47026/1810-1909-2022-3-61-72.

3. *Михеев Г.М.* Проблемы диагностики силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, Т.Г. Иванова, О.В. Афанасьева, А.Г. Зиганшин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Материалы III Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 14–16 ноября 2019 года. – Чебоксары: Чувашияский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 445-451. – EDN PUZYNY.

4. *Алексеев Б.А.* Объём и нормы испытаний электрооборудования/Под общ. Ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.М. Мамиконянца. 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003, – 256 с.

5. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле: СТО 34.01-23-003-2019. Введ. 17.04.2019, ПАО Россети

6. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер.с польск. И.Д. Рудинского: учебное пособие / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – 2-е изд. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2013. – 384 с.

7. *Дмитриев А.А.* Диагностирование силового трансформатора на основе методов нечеткой логики / А.А. Дмитриев, Г.М. Михеев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 3. – С. 29–35.

8. *Димитриев А.А.* Применение нечеткой логики для контроля силовых трансформаторов / А.А. Димитриев, Г.М. Михеев // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: МАТЕРИАЛЫ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Чебоксары, 25 февраля 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. – С. 61-65.

9. *Димитриев А.А.* Нечеткая система «онлайн» диагностирования силовых трансформаторов / А.А. Димитриев, Г.М. Михеев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 316-319.

Авторы:

Димитриев Антон Анатольевич, аспирант, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. Окончил магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ в 2015 году. E-mail: Meterling21@mail.ru

Михеев Георгий Михайлович. Окончил Чувашский государственный университет, 1982 г. Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортно-энергетических систем» Чебоксарского института филиала Московского политехнического университета. Тема диссертации: «Автоматизированные ресурсосберегающие методы и приборы для диагностики высоковольтного электрооборудования», 2009г. E-mail: mikheevg@rambler.ru

ТРЕБОВАНИЯ К АТТРИБУТАМ И СВОЙСТВА АТТРИБУТОВ ОБЪЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ, СПРОЕКТИРОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Галанина Н.А., Петров С.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье рассматриваются требования к атрибутам и свойства атрибутов объектных моделей, полученных в результате применения объектно-ориентированного подхода (ООП) для моделирования физических объектов.*

***Ключевые слова:** объектно-ориентированный подход (ООП), моделирование, объектная модель (ОМ), абстракция, атрибуты объектной модели, физический объект (ФОб).*

ООП в моделировании

ООП в моделировании физических объектов (ФОб) представляет собой процесс анализа и декомпозиции предметной области задачи моделирования и, в итоге, синтеза объектной модели (ОМ) [1], основанный на парадигмах ООП. Процесс анализа и декомпозиции предметной области может быть итеративным до получения удовлетворительного результата моделирования предметной области.

Под предметной областью в рамках статьи понимаем ограниченную совокупность ФОб, процессов и явлений реального мира, имеющих между собой детерминированные связи, и являющуюся предметом исследования задачи моделирования.

Модель ФОб есть искусственный образ ФОб, процесса или явления [2]. Модель является уникальной в предметной области и имеет значимые в рамках решаемой задачи свойства и поведение.

Объектно-ориентированные парадигмы

Основой ООП являются абстракция, инкапсуляция, наследование, композиция.

Абстракция есть представление ФОб абстрактной моделью в виде скрытого набора свойств объекта и допустимых действий над этими свойствами [3].

Инкапсуляция есть механизм сокрытия свойств модели объекта и предоставление механизма взаимодействия с ними [3].

Инкапсуляция означает, что модель объекта представляется её интерфейсом для взаимодействия с другими моделями объектов из предметной области. Вся внутренняя реализация остаётся в рамках модели.

Следует заметить, что абстракция и инкапсуляция очень схожи друг с другом и иногда сложно проводить между ними грань. Абстракцию и инкапсуляцию можно считать разным пониманием одного и того же. В общем случае считаем, что абстракция есть представление ФОб в виде модели, а инкапсуляция – реализация поведения модели ФОб [1].

Наследование есть расширение базовых ОМ новыми свойствами и новым поведением [3]. Наследование позволяет создавать общие абстрактные свойства ФОб и использовать их при проектировании новых моделей, каким-либо образом связанных ФОб.

Композиция есть включение в состав ОМ других ОМ [3].

ОМ физического объекта

Из предыдущих пунктов определим цель ООП – ОМ. ОМ есть искусственный образ ФОб реального мира, состоящий из набора присущих ФОб свойств и интерфейса для манипуляции свойствами модели. Свойства могут быть в том числе и ОМ. Как следует из определения ОМ, свойства строго связаны друг с другом семантически, т.к. являются абстракцией одного ФОб. Интерфейс как набор манипуляций над свойствами также строго семантически связан с моделируемым ФОб. Набор свойств ОМ и интерфейс обуславливается значимостью для решения задачи моделирования предметной области.

Набор свойств ОМ называется атрибутами. Атрибут ОМ есть данные, хранящие состояние объекта в момент времени [3]. Иными словами, атрибут это какой-либо простой тип данных, хранящий свойство ФОб. Исходя из парадигмы ООП, композиция, атрибуты могут быть простыми типами данных и могут являться другими ОМ со всеми последствиями (наследование, полиморфизм).

Требования к атрибутам и их свойства

Рассмотрим простой случай: атрибуты ОМ являются простыми типами данных.

Требования к атрибутам данных.

Обязательность отношения к ФОб. Атрибут строго должен иметь отношение к моделируемому ФОб. Очевидно, если вносимый в ОМ атрибут не имеет отношение к ФОб, то его и не должно быть в ОМ. В случае внесения атрибута, не имеющего отношение к ФОб в ОМ, ОМ теряет строгую однозначную связь с ФОб и перестаёт быть образом ФОб.

Значимость свойства ФОб. Атрибут должен отражать свойство ФОб, значимое в рамках задачи моделирования. Незначительные в рамках задачи моделирования свойства объекта усложняют проектирование ОМ и её дальнейшее применение без привнесения пользы в итоговый проект.

Однозначность атрибута. Атрибут должен отражать строго одно свойство ФОб [4]. Семантическая связь одного атрибута с несколькими свойствами ФОб говорит о неверной интерпретации свойств ФОб и ведёт к последующим, сложно выявляемым, ошибкам на этапах применения ОМ.

Время значимости атрибута. Атрибут ОМ должен иметь значение на все время существования ОМ. В случае, если атрибут имеет значение на каком-то временном отрезке существования ОМ, следует переложить свойство ФОб на локальный атрибут, значимый в определённый момент времени существования ОМ.

Полнота атрибута. Атрибут должен в полной мере отражать свойство ФОб. В случае, если атрибут не в достаточной степени отражает свойство ФОб, следует синтезировать ОМ с требуемым набором атрибутов, в полной мере отражающих сложное свойство ФОб.

Отсутствие скрытых свойств атрибута. Атрибут не должен иметь скрытых свойств и связей [4]. Скрытые свойства и связи могут приводить к неверной интерпретации текущего состояния атрибута и, как следствие, к ошибкам при применении ОМ.

Свойства атрибутов данных.

При реализации ОМ на каком-либо языке программирования (ЯП) атрибуты могут быть представлены простыми типами данных. Для большинства ЯП к простым типам данных в общем случае относятся: логический тип данных – `boolean`, целочисленный тип данных (знаковый или беззнаковый, разной длины) –

integer, вещественный тип данных – float, символьный тип данных (char, string).

Тип атрибута. Тип данных атрибута зависит от свойства ФОб, связанного с атрибутом.

Логические типы данных, как правило, связаны с такими свойствами ФОб, как состояние в определённый момент времени, и принимают значение «истина» или «ложь». Логические типы данных уместно использовать при моделировании процессов, машин состояний. Над логическими типами выполняются операции булевой алгебры.

Целочисленные типы данных применяются для отражения свойств ФОб, относящихся к метрикам (все свойства, выражающиеся в числах). Над целочисленными типами выполняются алгебраические операции.

Вещественный тип данных аналогичен целочисленному типу с той лишь разницей, что применяется в случаях, когда нужна повышенная точность в вычислениях. Вещественный тип следует применять при моделировании процессов с математическими расчётами.

Символьные типы применяются для отражения свойств ФОб, имеющих символьные значения. Свойствами ФОб, имеющих символьные значения, могут быть имена, описания, сообщения, даты и т.п.

Простые типы данных в соответствии с семантикой свойств ФОб могут объединяться в массивы. Массивы применяются в случаях моделирования процессов, оперирующих большими объёмами однотипных данных.

Диапазон значений атрибута. Семантика свойства ФОб накладывает ограничения на значения атрибутов. Правильно сформулированные и реализованные в ОМ диапазоны значений атрибутов формируются из условий применения ОМ, а впоследствии заложенные при реализации ОМ на ЯП уменьшают вероятность возникновения ошибок, приводящих к неопределённому поведению программного обеспечения. Диапазон значений атрибута напрямую обуславливается исследуемой предметной областью и задачами моделирования. Как следствие, исходя из диапазона значений, подбирается соответствующий тип данных

атрибута, а также его размерность (место, занимаемое в памяти назначенным типом данных).

Выводы

В статье рассмотрены атрибуты ОМ, получаемой при помощи ООП.

На основании объектно-ориентированных парадигм предложены требования к атрибутам ОМ и сформулированы их общие свойства. На основании требований к атрибутам ОМ проектируется полная, неизбыточная, однозначно определённая ОМ, состоящая из семантически связанных атрибутов, отражающих ФОб, и готовая к реализации на любом ЯП, поддерживающим ООП. Следует отметить, что целью статьи не является рассмотрение требований к интерфейсам и критериев их внесения в ОМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буч Г., Максимчук Р., Энгл М., Янг Б., Коналлен Д., Хьюстон К. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений, 3-е изд.: пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. – 720 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ: учеб. для вузов / А.В. Антонов. – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.
3. Wiener R., Pinson L.J. Fundamentals of OOP and data structures in Java: Cambridge University Press., 2000. – 508.
4. Макконнел С. Совершенный код. Мастер-класс / Пер. с англ. – М.: Издательство «Русская редакция», 2010. – 896 с.

Авторы:

Галанина Наталья Андреевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: galaninacheb@mail.ru.

Петров Сергей Викторович, аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: eight@bk.ru.

ИЗМЕНЕНИЕ ШИРИНЫ СПЕКТРА СЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА: ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОНТРОЛЯ

Алюнов Д.Ю., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Ширина спектра – важная характеристика, применяемая в задачах анализа случайных сигналов. Для оценки этого параметра может использоваться ширина автокорреляционной функции. В статье описывается способ определения момента времени смены характеристик нестационарного сигнала с использованием искусственных нейронных сетей. Распознавание нестационарных сигналов в реальном времени требует повышенной скорости работы алгоритмов. Показано преимущество данного подхода в сравнении с классическими алгоритмами, рассчитывающими автокорреляционную функцию.*

***Ключевые слова:** шум, спектр, искусственные нейронные сети, нестационарный сигнал, автокорреляция.*

Контроль и оценка характеристик случайных сигналов (шума) актуальна для задач фильтрации, структурного анализа, шумоподавления в электротехнике и электроэнергетике [1-3]. В некоторых задачах контроля и управления электрооборудованием ширина спектра случайного сигнала может считаться контролируемым параметром [4]. Кроме того, соответствующий анализ случайных сигналов необходим для контроля данных при информационном обмене во вторичном оборудовании электроэнергетики [5]. Задачи шумоподавления чаще всего необходимо решать в реальном времени, поэтому при цифровой обработке сигналов время вычислений должно быть оптимизировано. Для обозначенных целей все чаще используется аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [6].

Для исследования возможностей ИНС в задачах обнаружения момента смены характеристик случайного сигнала исследовался смоделированный нестационарный процесс, изменяющий свои характеристики в случайные моменты времени. На рис. 1 изображен пример нестационарного сигнала, полученного сшивкой двух сигналов. Сигналы были созданы путем сглаживания случайного процесса скользящей средней с различными размерами окон.

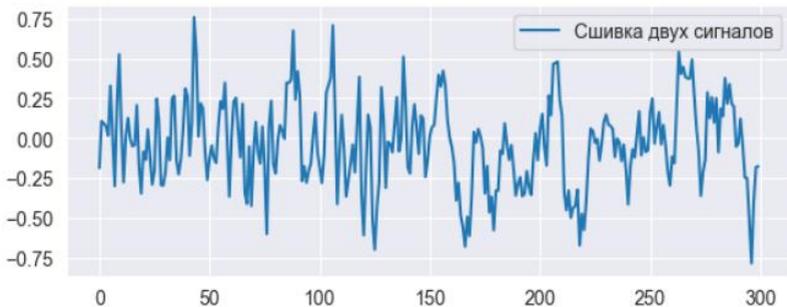


Рис. 1. Пример случайного сигнала

Проблема идентификации момента времени смены характеристик нестационарного сигнала исторически решается анализом различных спектральных характеристик, в частности ширины спектра. В качестве оценки ширины спектра используется автокорреляционная функция (АКФ). Ширина спектра сигнала тем шире, чем уже основной лепесток автокорреляционной функции [7]. В качестве меры ширины основного лепестка АКФ будем использовать время спада АКФ наблюдаемого сигнала в 2 раза. Длина моделируемого дискретного сигнала составляет $N = 300$ отсчетов. Моделируются различные комбинации сшивок сигналов, причем время обнаружения смены характеристик случайного сигнала может составлять от 5% до 90% наблюдаемого окна. Будем называть перекрытием долю окна, который он занимает. Необходимо определить минимально возможное перекрытие, при котором становится возможным обнаруживать присутствие нового сигнала. Параметры сигналом различаются величиной окна скользящего среднего, которое участвовало в их генерации, и варьировалось от 2 до 5 временных отсчетов. Примеры их автокорреляционных функции представлены на рис. 2. При этом АКФ первого сигнала спадает до уровня 0,5 за время $t_1 = 1$, в то время как время падения АКФ второго сигнала, составило $t_2 = 2,3$.

В результате проведения серии симуляций средняя величина перекрытия окна новым сигналом, при котором становится возможным его обнаружить, анализируя ширину АКФ, составила 0,6. Стоит отметить, что в случае более разнородных сигнала

лов, величина перекрытия, требуемая для обнаружения, будет уменьшаться. В то же время для близких по характеристикам сигналов, сглаженных скользящими средними с окнами, размером 2 и 3 временных отсчета, требуется практически все пространство окна для определения момента времени смены характеристик случайного сигнала.

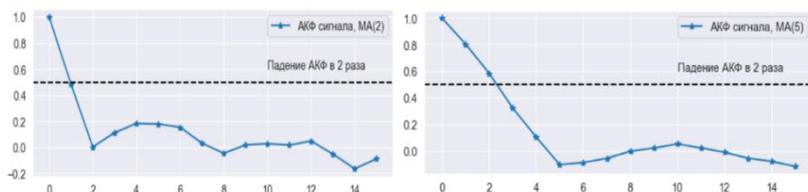


Рис. 2. АКФ двух сигналов, полученных сглаживанием гауссова шума окнами размером 2 и 5 соответственно

Рассмотрим альтернативный подход анализа нестационарного сигнала с использованием ИНС. Существуют различные способы представления информации о сигнале: представление сигнала во временной области, спектральное представление, периодограмма, корреллограмма и т.п. [8]. Для той же длины сигнала рассчитывается спектр при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ), который подается в полносвязную нейронную сеть прямого распространения. Для усложнения задачи в обучающих данных сгенерировано несколько типов различных сигналов, сглаженных окнами размерами от 2 до 5. Веса ИНС обучаются алгоритмом обратного распространения ошибки, предсказание представляет собой вектор из двух чисел, которые являются вероятностями наличия или отсутствия смены характеристик случайного сигнала.

Структура нейронной сети включает в себя 2 слоя нейронов, а также слой регуляризации между ними:

1. Dense слой из 32 нейрона, функция активации Relu;
2. Регуляризация Dropout (0,25);
3. Dense слой из 2 нейронов, функция активации Softmax.

Схема работы нейронной сети изображена на рис. 3.

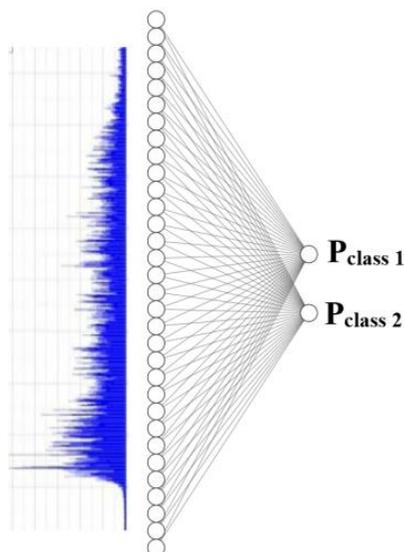


Рис. 3. Схема ИНС, принимающей на вход спектр сигнала

Объем данных для обучения нейронной сети – 5000 сигналов. Переобучение контролировалось путем разделения данные на тренировочные и тестовые в пропорции 80 %–20 %, оптимизатор Adam, learning rate = 0.0001. При перекрытии окна равном 0,2 точность нейронной сети составляет 99 %.

Таким образом нейросетевой подход позволяет существенно сократить время распознавания параметров нестационарного процесса, в сравнении с классическими алгоритмами на базе автокорреляционных функций.

Выводы

В настоящей работе показано, что аппарат ИНС может эффективно применяться для анализа нестационарного шума. Результаты позволяют оценить нестационарность шума за значительно более короткое время, чем традиционная спектральная обработка. В электротехнических задачах спектр шума в сигнале зависит от параметров электрических цепей и режимов их работы. Продемонстрированный в работе подход может быть использован для оценки начала переходного процесса в сигнале с наложением шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Slavutskiy A, Slavutskii L., Slavutskaya E.* Neural Network for Real-Time Signal Processing: the Nonlinear Distortions Filtering // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 84-88. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559619.
2. *Vorobyev E., Antonov V., Ivanov N., Naumov V. and Soldatov A.* Fundamentals of Multichannel Structural Analysis of Electrical Signals // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), 2021, P. 30-34, doi: 10.1109/USSEC53120.2021.9655762.
3. *Andreev O.N., Slavutskiy A. L., Slavutskii L. A.* Neural network in a sliding window for power grids signals structural analysis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 990 012054. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/990/1/012054>
4. *Ядарова О.Н.* Система управления приводом вентилятора на основе доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока / О. Н. Ядарова, Г. П. Охоткин, Л. А. Славутский // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 27-30.
5. *Кощев М.И.* Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики / М. И. Кощев, А. А. Ларюхин, А. Л. Славутский // Вестник Чувашиского университета. – 2019. – № 1. – С. 47-58.
6. *Баскаков Д.Б.* Исследование возможностей применения искусственных нейронных сетей для разделения спектров на примере модельного сигнала / Д. Б. Баскаков // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 2-2. – С. 61-64. – EDN OQQZOT.
7. *Гущина А.А.* Об анализе речевого сигнала с использованием автокорреляционной функции / А. А. Гущина // Новая наука: Современное состояние и пути развития. – 2016. – № 11-2. – С. 149-151. – EDN XBUBJF.
8. *Алюнов Д.Ю.* О методах оценивания параметров сигнала / Д.Ю. Алюнов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 263. – EDN TGQFRL.

Автор

Алюнов Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил ННГУ им. Н.И. Лобачевского, радиофизический факультет, 2011 г. E-mail: aldmity89@gmail.com.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСЕТЬЮ И ЕЕ КОМПОНЕНТМИ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия.

***Аннотация.** В работе рассматривается программно-моделирующий комплекс системы управления энергосетью и её элементами. Программно-моделирующий комплекс предлагается использовать для управления энергосетью и энергетическим оборудованием, а наиболее актуально использование в локальных энергосистемах автономных потребителей и микросетях. Для эффективного проведения экспериментальных исследований была разработана методология эксперимента, включающая этап разработки плана-программы эксперимента; выбор средств проведения эксперимента; проведение эксперимента; обработку и анализ экспериментальных данных.*

***Ключевые слова:** энергосеть, управление, прогнозирование нагрузки, контроль и учет электроэнергии.*

Принятие Правительством РФ Энергетической стратегии до 2030 года, утвердило Положение ОАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [1]. В них определена главная интеллектуальная задача – создание электросетей с использованием технологий «Smart Grid» [2]. Создание такой технологии предназначается для решения задач повышения надежности и эффективности общей энергосети с распределенными генерирующими комплексами и требует применение новых методов автоматического и интеллектуального управления. В электроэнергетике к такого рода технологиям относятся: мониторинг состояния и управления электротехническим оборудованием; автоматизированный учет и информационные системы потребителей. Это актуально как для процессов генерации, так процессов передачи и распределения электроэнергии. Далее реализуется диспетчерское управление и сбор данных с помощью счетчиков электроэнергии SCADA системы. На этом уровне осуществляется основное оперативное управление состоянием сети.

Функциями АИИС является:

– оперативно-диспетчерское управление объектами электросетевого комплекса;

- сбор, передача и обработка данных для целей управления электросетевым комплексом;
- мониторинг, оценка и диагностика состояния электрических сетей и оборудования электрических подстанций;
- передача информации на верхний уровень корпоративной информационной системы управления ресурсами.

На нижнем уровне в точках получения измеряемых данных используются многофункциональные счетчики электроэнергии (КИПП-2М, ПСЧ-4ТМ.05 и др.), трансформаторы тока и напряжения. В рассматриваемых системах многофункциональные счетчики играют важную роль. Они объединяют в себе функции интеллектуального измерительного преобразователя электрических параметров, непосредственно счетчика, измерителя качества электроэнергии и устройства связи, что позволяет использовать их в качестве базовых элементов многоуровневой системы управления (СУ). Второй уровень включает устройства сбора и передачи данных (УСПД) и каналобразующую аппаратуру. Интеллектуальный модуль анализа потерь и балансировки подстанции, интегрированный в УСПД, позволяет оперативно реагировать на аварийные ситуации на объекте и бороться с воровством электроэнергии. На третьем уровне осуществляется автоматизированный сбор, обработка и хранение результатов измерений. Производится интеллектуальный анализ данных (Data Mining) о состоянии энергообъекта. Верхние уровни системы состоят из средств сбора, хранения и передачи измерительной информации. К интеллектуальным возможностям ЦУС стоит отнести систему поддержки принятия решения (СППР). При поиске скрытых закономерностей используются методы искусственного интеллекта, прикладная статистика, теория баз данных. На уровне автоматизированных рабочих мест реализуются функции АСУ. Оперативный и диспетчерский персонал осуществляет контроль и управление электрическими сетями и подстанциями.

Структурная схема интеллектуальной энергосети. Управление энергосетью может быть организовано в виде многоуровневой системы управления. Верхний уровень обеспечивает задачу управления в рамках всей энергосети, последующие для локальных участков или непосредственно для локальных эле-

ментов этой энергосети (рис 1), таких как генерирующие или распределяющие электроэнергию элементы. Верхний уровень СУ представляет собой систему планирования. На этом уровне СУ формирует сегменты и определяет уровень необходимой мощности генерирующих источников для обеспечения спроса потребителей. Формирование сегментов происходит по принципу территориальной распределенности и принципу энергетической самодостаточности сегмента, т.е. в нормальном режиме количество генерируемой мощности достаточно для обеспечения потребностей потребителей и остается некоторый резерв мощности.

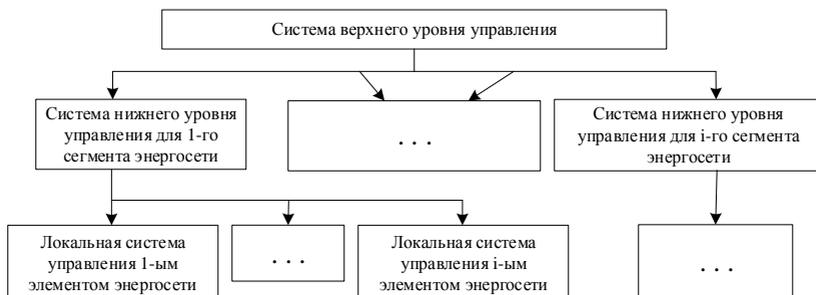


Рис. 1. Блок-схема системы управления энергосетью

На втором уровне СУ формируются задания по мощности для каждого элемента сегмента энергосети. Применяется алгоритм распределения, обеспечивающий минимум СКО текущего баланса мощностей. На нижнем уровне происходит управление элементами энергосети, а именно – электростанциями. Представим электростанцию как источник генерации – синхронный генератор, и синтезируем регулятор способный удовлетворить потребность верхнего уровня управления.

Моделирование работы системы управления источником энергии. Экспериментальная установка состоит из следующих блоков: А1, А2, А3 – трехфазная трансформаторная группа; Q1, Q2, Q3 – трехполюсный выключатель; L1 – трехфазная линия электропередач; А4 – блок датчиков тока и напряжения; М1 – машина постоянного тока; G2 – машина переменного тока; G3 – источник питания двигателя постоянного тока; G4 – возбудитель.

тель машины переменного тока; А5 – терминал; А6 – блок ввода-вывода цифровых сигналов; А7 – коннектор. Часть экспериментальной установки представлена на рис. 2.

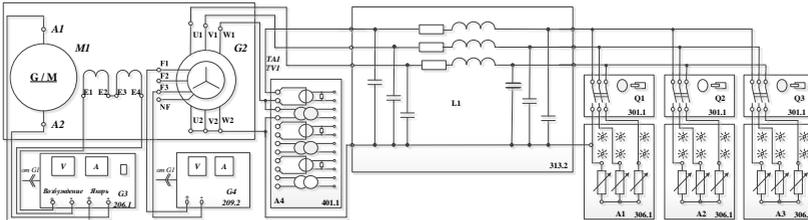


Рис. 2. Экспериментальная установка

Моделирование системы

Управление производилось с использованием синтезированного регулятора, разработанного в ходе выполнения работы. В качестве турбины использовался ДПТ, для получения необходимого момента на валу генератора определялась и задавалась необходимая частота вращения вала ДПТ с учетом математической модели:

$$\begin{cases} u = e + Ri + L \frac{di}{dt} \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \\ M = C_m \Phi i \\ e = C_\omega \Phi \omega \end{cases} \quad (1)$$

где u – напряжение на якорной обмотке двигателя, e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря, R – активное сопротивление якорной цепи, i – ток якоря, M – электромагнитный момент двигателя, M_c – момент сопротивления движению, J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки, ω – скорость вращения вала двигателя, C_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом, Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения, C_ω – коэффициент связи между скоростью и ЭДС. Дополнительно к управлению СГ необходимо задать опре-

деленное количество оборотов вала ДПТ, для управления этим параметром синтезирован регулятор:

$$\begin{cases} i_0 = \frac{Mc}{C_\omega \Phi} - \frac{J}{C_\omega \Phi} \cdot a_1(\omega - \omega_0) \\ u = iR + C_\omega \Phi \omega - a_2 L(i - i_0) \end{cases}$$

Управление происходит регулированием напряжения, поданного на якорную обмотку ДПТ. Вычисление управления происходит в два этапа: на первом этапе вычисляется ток i_0 , необходимый для того что бы поддержать требуемую частоту ω_0 , на втором этапе происходит расчет необходимого напряжения. Основными параметрами регулятора являются коэффициенты a_1 и a_2 .

При ПИД-управлении для автоматического регулирования скорости вращения ротора ДПТ и генерируемого напряжения СГ применяются два стандартных блока из программы. Для регулирования оборотов и поддержания их номинального значения 1500 оборотов в минуту используется управление напряжением якоря ДПТ в диапазоне 40 – 250 В, так как при напряжении ниже 40 В ротор не вращается. Для регулирования выходного напряжения СГ используется напряжение возбуждения СГ в диапазоне 0 – 40 В. Эксперимент заключался в запуске и остановке ДПТ при работе СГ на холостом ходу. Результаты представлены на рис. 5.

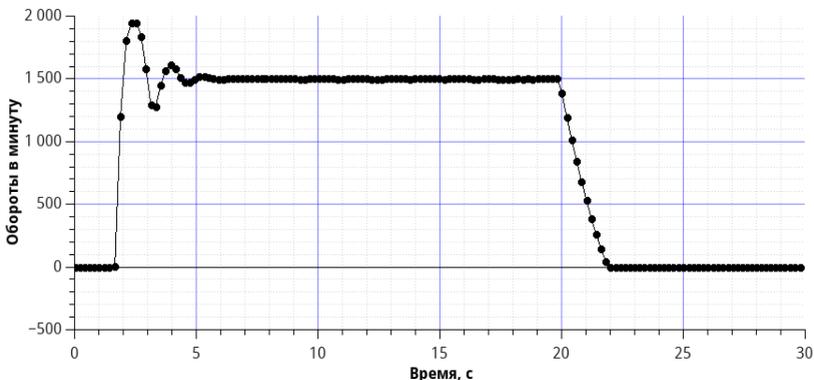


Рис. 5. Обороты СГ при ХХ, пуск и отключение ДПТ, при ПИД-регулировании оборотов и выходного напряжения СГ на уровне 100, В

Анализ полученных результатов

Эксперимент моделирует работу синхронного генератора электростанции при включении СГ и его работе на холостом ходу (ввод генератора в работу). Длительность переходного процесса составляет около 4-5 секунд, при управлении с ПИД-регулятором происходит краткое перерегулирование, по напряжению на 150% номинального значения, по току на 50 %, по частоте вращения до максимального значения 2000 об/мин. Такое перерегулирование является близким к критическому, поэтому попытка выхода на напряжение СГ уже превышает значения уставок. Система с базовым регулятором показала большую стабильность и уменьшение отклонений от номинальных значений на 10-15 %.

Прогнозирование пропускной способности линии ЛЛ.

Прогнозирование электрических нагрузок необходимо для решения задач управления режимами функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС). На его основе рассчитываются исходные и оптимальные электрические режимы ЭЭС, оценивается их надежность, экономичность, качество электроэнергии. Разработано большое число методов и моделей прогнозирования электрических нагрузок как традиционных, так и нетрадиционных. Их обзор дан в [3]. Задача прогнозирования электропотребления состоит в анализе объективных факторов, влияющих на изменение нагрузки, и расчет будущих графиков нагрузки электропотребления. В последнее время проводится большая работа по применению нейронных сетей (НС) в системах управления. Примеры, иллюстрирующие использование НС для прогнозирования нагрузки и примеры компьютерного моделирования нейросетевых систем с применением пакета MATLAB описаны [4].

Выводы

Проведено моделирование системы управления на базе разработанного программно-моделирующего комплекса. Система управления энергосетью с базовым регулятором демонстрирует большую стабильность и уменьшение отклонений от номинальных значений на 10-15 %, при ПИД-регулировании. Значения этих отклонений лежат в рамках допустимых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение ОАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». – М.: ОАО «Россети», 2013.
2. Варжапетян А.Г., Глущенко В.В., Глущенко П.В. Методы исследования и управления проектами и процессами производства. Монография. / А.Г. Варжапетян, В.В. Глущенко, П.В. Глущенко. – М.: Вузовская книга, 2013, 314 с.
3. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общей ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. М.: Издательство МЭИ, 2000. – 648 с.
4. Полуянович Н. К., Дубяго М.Н., Азаров Н. В., Огреничев А.В. Прогнозирование ресурса электроизоляционных материалов силовых кабелей с использованием метода искусственных нейронных сетей. Монография / Ростов-на-дону; Таганрог, 2022. С. 116.
5. M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. 01. 2018 Volume 5, Issue 16. URL: <http://eudl.eu/doi/10.4108/eai.30-1-2018.153815>.

Авторы:

Полуянович Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Окончил Таганрогский радиотехнический институт им. В.Д. Калмыкова по специальности электроакустика и ультразвуковая техника в 1983 году. В 1991 году присуждена ученая степень кандидата технических наук по разработке методов эквивалентных преобразований линейных и нелинейных электрических цепей и синтеза энергосберегающих цепей с помощью методов эквивалентных преобразований. E-mail: nik1-58@mail.ru.

Дубяго Марина Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Окончила ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», магистратуру по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В 2022 году присуждена ученая степень кандидата технических наук по разработке методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса кабельных линий в распределительных электрических сетях 6-10 кВ. E-mail: w_m88@mail.ru.

ИТЕРАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВЕЛИЧИН РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИХ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА

Кочетов А.Д., Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматриваются свойства и применения многозвенного адаптивного фильтра, предназначенного для работы в реальном времени. Настройка совершается путём подавления входной величины в предположении, что её модель представляет собой сумму гармоник и экспоненты. Приведены примеры итерационного определения частот трёхчастотной величины, переходной величины с экспоненциальным компонентом.*

***Ключевые слова:** адаптивный фильтр, многозвенная структура, итерационная настройка, входные величины релейной защиты.*

Унифицированный адаптивный заграждающий фильтр [1, 2] $2s$ -го порядка представляет собой каскадное соединение s симметричных звеньев второго порядка, каждое с одним собственным адаптивным коэффициентом a_p , $p = \overline{1, s}$ (рис. 1). Если входной сигнал $i(k)$ задаётся в дискретном времени $k = \text{ent}(t/\tau) \geq 0$, где τ – интервал дискретизации, то уравнения первого и p -го звеньев

$$v_1(k) = i(k) - a_1 i(k-1) + i(k-2), \quad (1)$$

$$v_p(k) = v_{p-1}(k) - a_p v_{p-1}(k-1) + v_{p-1}(k-2). \quad (2)$$

Выходной сигнал всего фильтра $v_s(k)$ формируется окончательным s -ым звеном, время установления каждого из которых составляет три отсчёта, а настройка последующего – не раньше установления предыдущего.

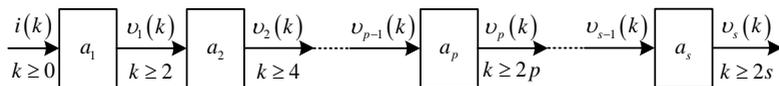


Рис. 1. Многозвенный адаптивный фильтр

Коэффициенты фильтров a_p изначально неизвестны, а также не определено число фильтров s . Задана только выборка отсчётов входной величины $k = \overline{0, n}$. Однако имеется условие: размер выборки n должен быть достаточен для настройки предельного числа звеньев s_{\max} и должен хотя бы на один отсчёт превышать время установления фильтра $n \geq 2s_{\max} + 1$. Настройка заключается в получении оценок a_p всех адаптивных коэффициентов.

Для оценки коэффициента a_p фильтра (2) воспользуемся критерием наименьших квадратов

$$\sum_{k=2p}^m v_p^2(a_p, k) \rightarrow \min_{a_p}, \quad (3)$$

где $2p+1 \leq m \leq n$. Из (2) и (3) получаем оценку

$$a_p = \frac{\sum_{k=2p}^m (v_{p-1}(k) + v_{p-1}(k-2))v_{p-1}(k-1)}{\sum_{k=2p}^m v_{p-1}^2(k-1)}. \quad (4)$$

Для входного первого звена (рис. 1)

$$a_1 = \frac{\sum_{k=2p}^m (i(k) + i(k-2))i(k-1)}{\sum_{k=2}^m i^2(k-1)}. \quad (5)$$

Перед настройкой p -го звена должны быть настроены все предыдущие звенья каскадного соединения по рис. 1, благодаря чему отсчёты входной величины $i(k)$ удаётся преобразовать в отсчёты входного сигнала $v_{p-1}(k)$, $k = \overline{2p-2, m}$ p -го звена.

Далее производится итерационная настройка многозвенного адаптивного фильтра. Процедура итерации заключается в следующем: на каждом шаге исключается начальное звено, настроенное ранее, а к выходу цепи присоединяется новое адаптивное звено, которое настраивается по общему правилу

$$a_s^{(h)} = \frac{\sum_{k=2s}^m (v_{s-1}^{(h)}(k) + v_{s-1}^{(h)}(k-2)) v_{s-1}^{(h)}(k-1)}{\sum_{k=2s}^m (v_{s-1}^{(h)}(k-1))^2} \quad (6)$$

где $h \geq 1$ – номер шага итерации. Начальный шаг $h = 0$ составляет исключение, так как на нём цепь выстраивается впервые. Итерационная настройка заканчивается, когда выполняется условие

$$\left| a_p^{(h)} - a_p^{(h-1)} \right| < \varepsilon, \quad p = \overline{1, s}. \quad (7)$$

Таблица 1

Начальный и последующие шаги итерационной процедуры настройки адаптивных фильтров

Шаг итерации	Число звеньев	
	$s = 2$	$s = 3$
0	$\rightarrow a_1^{(0)}$ $\rightarrow a_1^{(0)} \rightarrow a_2^{(0)}$	$\rightarrow a_1^{(0)}$ $\rightarrow a_1^{(0)} \rightarrow a_2^{(0)}$ $\rightarrow a_1^{(0)} \rightarrow a_2^{(0)} \rightarrow a_3^{(0)}$
1	$\rightarrow a_2^{(0)} \rightarrow a_1^{(1)}$ $\rightarrow a_1^{(1)} \rightarrow a_2^{(1)}$	$\rightarrow a_2^{(0)} \rightarrow a_3^{(0)} \rightarrow a_1^{(1)}$ $\rightarrow a_3^{(0)} \rightarrow a_1^{(1)} \rightarrow a_2^{(1)}$ $\rightarrow a_1^{(1)} \rightarrow a_2^{(1)} \rightarrow a_3^{(1)}$
...
h	$\rightarrow a_2^{(h-1)} \rightarrow a_1^{(h)}$ $\rightarrow a_1^{(h)} \rightarrow a_2^{(h)}$	$\rightarrow a_2^{(h-1)} \rightarrow a_3^{(h-1)} \rightarrow a_1^{(h)}$ $\rightarrow a_3^{(h-1)} \rightarrow a_1^{(h)} \rightarrow a_2^{(h)}$ $\rightarrow a_1^{(h)} \rightarrow a_2^{(h)} \rightarrow a_3^{(h)}$

После итерационной настройки двух звеньев выстраивается новая цепочка адаптивного звена уже с тремя звеньями, а далее по тому же принципу выполняется итерационная настройка всех трёх звеньев до выполнения условия сходимости (7). В табл. 1 дана мнемоническая схема итерационной настройки фильтров с разным числом звеньев, представленных своими коэффициентами, а сама итерационная процедура интерпретируется как исключение настроенного входного звена и включение на выходе нового, подлежащего настройке.

В качестве примера рассмотрим итерационный частотный анализ периодической величины

$$i(k) = 1 \sin(\alpha k + 60^\circ) + 1/3 \sin(3\alpha k + 45^\circ) + 1/5 \sin(5\alpha k + 30^\circ) \quad (8)$$

при $\alpha = 2\pi f_1 / F_d$, $F_d = 1$ кГц – частота дискретизации, $f_1 = 48$ Гц. Анализ выполняется многозвенным фильтром при общем числе отсчётов входной величины $m = n = 20$. Для определения оценки частот f_q использовались следующее из табл. 1 соотношение

$$f_q^{(h)} = \frac{F_d}{2\pi} \arccos \frac{a_q^{(h)}}{2}. \quad (9)$$

Таблица 2

Итерационная обработка периодического сигнала (8) с оценкой его частот

Шаг итерации	Оценка частот						
	$s = 2$			$s = 3$			
	$f_1^{(h)}$, Гц	$f_2^{(h)}$, Гц	σ_s , о.е.	$f_1^{(h)}$, Гц	$f_2^{(h)}$, Гц	$f_3^{(h)}$, Гц	σ_s , о.е.
0	74,38	212,58	0,026	74,38	130,88	212,58	0,009
1	52,63	218,94	0,020	54,25	139,26	240,25	4e-5
2	51,87	219,09	0,020	48,65	143,67	240,18	3e-6
3	51,86	219,09	0,020	48,04	143,98	240,02	3e-8
4	–	–	–	48,00	144,00	240,00	3e-9

Результаты применения итерационной процедуры к сигналу (8) на каждом шаге сведены в табл. 2. Настройки многозвенного адаптивного фильтра по числу входящих в него звеньев s осуществляется по уровню невязки σ_s , определяемой при $p = s$

$$\sigma^2(a_p) = \sum_{k=2p}^m v_p^2(a_p, k). \quad (10)$$

Настройка адаптивного фильтра завершается при числе звеньев $s = 3$, когда оценка невязки выходного сигнала многозвенного заграждающего фильтра устремляется к нулю.

В качестве другого примера рассмотрим итерационный анализ периодического сигнала, в состав которого входит экспоненциальная составляющая

$$i(k) = 1e^{-\beta k/F_d} + 1 \sin(\alpha k + 60^\circ) + 1/3 \sin(3\alpha k + 45^\circ), \quad (11)$$

где $\alpha = 2\pi f_1/F_d$, $F_d = 1$ кГц, $f_1 = 48$ Гц, $\beta = 10$ с⁻¹ – коэффициент затухания. Анализ такого вида сигнала принципиально не отличается от (8) за тем лишь исключением, что один из коэффициентов определяет коэффициент затухания экспоненциальной составляющей

$$\hat{\beta}^{(h)} = \text{arch } a_q^{(h)} / 2. \quad (12)$$

Результат итерационной настройки фильтров на сигнал (11) приведён в табл. 3.

Таблица 3
Итерационная обработка сигнала (11) с оценкой его частот

Шаг итерации	Оценка частот и коэффициента затухания						
	$s = 2$			$s = 3$			
	$f_1^{(h)}$, Гц	$f_2^{(h)}$, Гц	σ_s , о.е.	$f_1^{(h)}$, Гц	$f_2^{(h)}$, Гц	$\beta_1^{(h)}$, с ⁻¹	σ_s , о.е.
0	40,89	139,91	0,028	42,89	139,91	0	2e-5
1	25,11	139,64	0,001	41,57	144,12	0	2e-6
2	25,24	138,63	0,001	45,65	144,16	0	9e-7
3	–	–	–	47,45	144,07	0	5e-7
4	–	–	–	47,89	144,02	0	9e-8
5	–	–	–	47,98	144,00	0	7e-9
6	–	–	–	48,00	144,00	8,86	4e-10
7	–	–	–	48,00	144,00	9,79	2e-11
8	–	–	–	48,00	144,00	9,96	6e-12
9	–	–	–	48,00	144,00	9,99	8e-13

Выводы

Многозвенный адаптивный фильтр обладает рядом практически значимых свойств. Предложена итерационная процедура настройки такого фильтра на подавление входной электрической величины. Продемонстрирована сходимости процедуры, в которой на каждом шаге входное звено, настроенное ранее, из структуры выводится, а взамен на выходе фильтра включается новое звено, настраиваемое по критерию наименьших квадратов. Рассмотрены применения адаптивного фильтра в задачах оценивания частот трёхчастотного сигнала, частот и затухания компонентов переходного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов С.В.* Оценивание параметров элементарных компонентов электрической величины по малому числу отсчётов / С.В. Иванов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин // *Электротехника*. – 2020. – № 3. – С. 59–67.

2. *Кочетов И.Д.* Цифровая обработка тока электромагнитного переходного процесса в электрической машине / И.Д. Кочетов, Ю.Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // *Электрические станции*. – 2022. – № 8. – С. 56-62.

Авторы:

Кочетов Алексей Дмитриевич, техник-исследователь, ООО «Релематика», студент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: kochetov_ad@relematika.ru.

Кочетов Иван Дмитриевич, инженер-исследователь, ООО «Релематика», аспирант, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: kochetov_id@relematika.ru.

Лямец Юрий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ, председатель НТС ООО «Релематика». Окончил в 1962 году энергетический факультет Новочеркасского политехнического института. В 1994 году защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Пестряев Д.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье рассмотрены особенности систем управления и сбора данных в соответствии со стандартом IEC 61850. Описан стандарт энергоэффективной передачи и перераспределения энергии и современные протоколы передачи данных: Goose и MMS.*

***Ключевые слова:** цифровые подстанции, МЭК 61850, интеллектуальное электронное устройство, электрическая защита.*

Современная электрическая подстанция предназначена для распределения и преобразования электроэнергии и сочетает в себе как стандартные электрические устройства релейной защиты, так и измерения мощности, а также электрические устройства автоматизации и управления.

Поскольку количество потребителей и количество регистрируемых параметров постоянно растет, количество одновременно передаваемые сигналы и каналы передачи данных также увеличиваются. Все эти данные необходимы непрерывная обработка и анализ в современных системах ERP и SCADA. Основным требованием для такой цифровой подстанции является обработка данных в режиме реального времени, без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

Эффективная передача и перераспределение энергия через интеллектуальные сети оказывает прямое влияние на повышение энергоэффективности система в целом. Для программирования и эксплуатации таких систем автоматизации необходимо использовать четкие стандарты и технологии передачи данных. На уровне программного обеспечения такие стандарты включают МЭК 61850 стандарт, который описывает модель передачи данных.

Ключевые аппаратные элементы цифровой системы подстанции (DSS), работающие в соответствии к данному стандарту относятся: цифровые трансформаторы тока и напряжения; аналоговые и цифровые блоки мультиплексора (объединяющие блоки); Микро RTU; интеллектуальные электронные устройства (IED).

Современные протоколы передачи данных, обеспечивающие взаимосвязь аппаратного и программного обеспечения системы представляют собой вертикальные (MMS) и горизонтальные (GOOSE) протоколы обмена.

Информация, которая передается между уровнем процесса и сетевым уровнем, а также между различными другими устройствами на сетевом уровне, передается только с помощью шин. Обмен данными на уровне подстанции, а также с устройств сетевого уровня на устройства уровня подстанции, также выполняется с использованием шины подстанции.

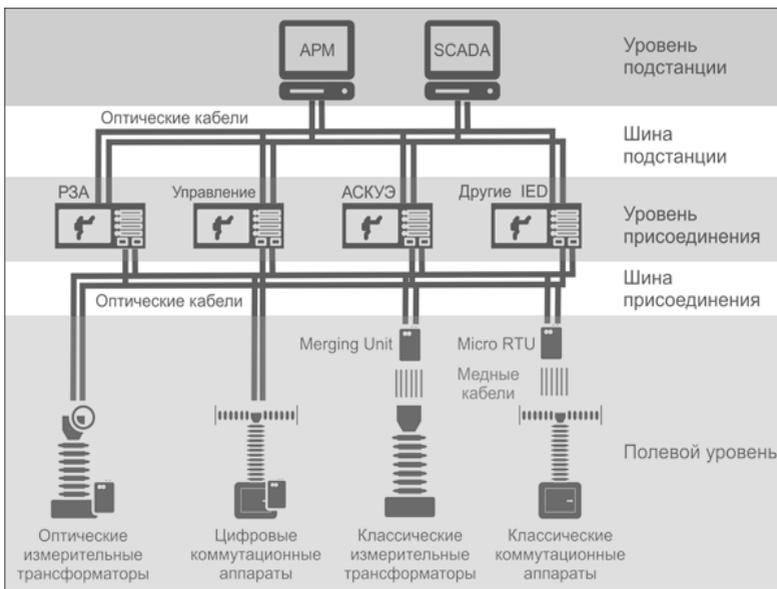


Рис. 1. Схематическое изображение цифровой подстанции

Распределительное устройство представляет собой устройство, состоящее из двух входных шкафов и двух шкафов линий электропередачи. Эти шкафы оснащены терминалами разных производителей, таким образом, стандарт поможет разобраться не только в схемах подключения, но и увидеть различия между терминалами и их общие характеристики.

Для связи с верхним уровнем используют OPC сервера. Преимущество этой технологии в том, что:

1. Она обеспечивает соединение разнородных узлов внутри проекта и подключение к другим аппаратным и программным системам, при этом пользователю не нужно вручную назначать линии связи и протоколы обмена. Любой узел в системном дереве может стать OPC-сервером и передавать данные клиентам.

2. Не каждая SCADA-система поддерживает стандарт IEC 61850, и OPC технология поможет в этом.

Внедрение стандарта МЭК 61850 позволяет соединить все технологическое оборудование на подстанции единой информационной сетью, которая передает не только данные с измерительных приборов на терминалы реле, но и сигналы управления. Применение протокола GOOSE (входит в стандарт МЭК 61850) в сочетании с правильным проектированием и параметризацией информационной сети и релейной защиты устройства позволяют отказаться от использования медных цепей для передачи сигналов, обеспечивая требуемый уровень надежности и производительности.

Другими словами, при использовании протокола все сигналы между терминалами передаются по одному (например, оптическому) кабелю. Использование одного кабеля вместо обычных сигнальных кабелей сокращает продолжительность и стоимость простоя подстанции во время реконструкции вторичного оборудования и позволяет легко и быстро перенастроить систему. Таким образом, обмен между шкафами осуществляется только по цифровому каналу, что устраняет необходимость в традиционных схемах, соединяющих шкафы.

Выводы

Рассмотрены особенности программного и аппаратного обеспечения современных систем сбора данных в составе цифровой подстанции на соответствие международному стандарту МЭК 61850. Так же были рассмотрены особенности систем управления и протоколов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титаренко О.Н.* Цифровые подстанции – важный элемент интеллектуальной энергосистемы / Титаренко О.Н. Муртазаев И.А. – Севастополь: Энергетические установки и технологии, 2020. – 183с.

2. Чичёв С.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2014. – 228 с.

3. Пател Н. Горизонтальная передача данных и анализ IEC 61850. / Пател Н – Маврикий: Академическое издательство Палмариум, 2019. – 128 с.

Автор

Пестряев Денис Алексеевич, магистрант, Чувашский государственный университет им И.Н. Ульянова, факультет энергетики и электротехники. E-mail: engl406050@gmail.com.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Шварнуков А.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье рассматривается переход систем к новым стандартам автоматизации. Информационные технологии позволяют перейти к автоматизированному проектированию цифровых подстанций. В настоящее время в мире началось массовое внедрение решений класса «цифровая подстанция», основанных на стандартах серии МЭК 61850.*

***Ключевые слова:** цифровые подстанции, автоматизация, МЭК 61850, информационные технологии.*

Новые технологии производства современных систем управления перешли из стадии научных исследований и экспериментов в стадию практического использования. Разработаны и внедряются современные коммуникационные стандарты обмена информацией. Широко применяются цифровые устройства защиты и автоматики. Произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления. Появление новых международных стандартов и развитие современных информационных технологий открывает возможности инновационных подходов к решению задач автоматизации и управления

энергообъектами, позволяя создать подстанцию нового типа – цифровую подстанцию (ЦПС).

Отличительными характеристиками ЦПС являются: наличие встроенных в первичное оборудование интеллектуальных микропроцессорных устройств, применение локальных вычислительных сетей для коммуникаций, цифровой способ доступа к информации, её передаче и обработке, автоматизация работы подстанции и процессов управления ею. В перспективе цифровая подстанция будет являться ключевым компонентом интеллектуальной сети (Smart Grid).

Переход к качественно новым системам автоматизации и управления возможен при использовании стандартов и технологий цифровой подстанции, к которым относятся:

- 1) стандарт МЭК 61850;
- 2) цифровые (оптические и электронные) трансформаторы тока и напряжения;
- 3) аналоговые мультиплексоры (Merging Units);
- 4) выносные модули УСО (Micro RTU);
- 5) интеллектуальные электронные устройства (IED).

Информационные технологии позволяют перейти к автоматизированному проектированию цифровых подстанций, управляемых цифровыми интегрированными системами. Все информационные связи на таких подстанциях выполняются цифровыми, образующими единую шину процесса. Это открывает возможности быстрого прямого обмена информацией между устройствами, что в конечном счёте даёт возможность сокращения числа медных кабельных связей, и числа устройств, а также более компактного их расположения.

Цифровые измерительные трансформаторы передают мгновенные значения напряжения и токов по протоколу МЭК 61850-9-2 устройствам уровня присоединения. Существует два вида цифровых измерительных трансформаторов: оптические и электронные. Оптические измерительные трансформаторы являются наиболее предпочтительными при создании систем управления и автоматизации цифровой подстанции, так как используют инновационный принцип измерений, исключая влияние электромагнитных помех. Электронные измерительные трансформаторы базируются на базе традиционных трансформаторов и ис-

пользуют специализированные аналогово цифровые преобразователи.

Данные от цифровых измерительных трансформаторов, как оптических, так и электронных, преобразуются в широковещательные Ethernet-пакеты с использованием мультиплексоров (Merging Units), предусмотренных стандартом МЭК 61850-9. Сформированные мультиплексорами пакеты передаются по сети Ethernet (шине процесса) в устройства уровня присоединения (контроллеры АСУ ТП, РЗА, ПА и др.).

Устройства для цифровой подстанции могут быть выполнены по модульному принципу и позволяют совмещать в себе функции множества устройств. Гибкость построения цифровых подстанций позволяет предложить различные решения с учётом особенностей энергообъекта. В случае модернизации существующей подстанции без замены силового оборудования для сбора и оцифровки первичной информации можно устанавливать шкафы выносных УСО. При этом выносные УСО помимо плат дискретного ввода/вывода будут содержать платы прямого аналогового ввода (1/5 А), которые позволяют собрать, оцифровать и выдать в протоколе МЭК 61850-9-2 данные от традиционных трансформаторов тока и напряжения.

С появлением стандарта МЭК 61850 ряд производителей выпустили продукты для цифровой подстанции. В настоящее время во всём мире выполнено уже достаточно много проектов, связанных с применением стандарта МЭК 61850, показавших преимущества данной технологии. К сожалению, уже сейчас, анализируя современные решения для цифровой подстанции, можно заметить достаточно свободную трактовку требований стандарта, что может привести в будущем к несогласованности и проблемам в интеграции уже современных решений в области автоматизации.

Сегодня в России активно ведётся работа по развитию технологии «Цифровая подстанция». Запущен ряд пилотных проектов, ведущие российские фирмы приступили к разработке отечественных продуктов и решений для цифровой подстанции.

В 2011 году ведущими российскими компаниями (ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭнергопромАвтоматизация», ЗАО «Профотек» и ОАО «НИИПТ») было подписано генеральное согла-

шение об организации стратегического сотрудничества с целью объединения научно-технических, инженерных и коммерческих усилий для создания цифровой подстанции на территории РФ.

Разработка собственного российского решения по цифровой подстанции позволит не только развивать отечественное производство и науку, но и повысить энергобезопасность нашей страны. Проведённые исследования технико-экономических показателей позволяют сделать вывод, что стоимость нового решения при переходе на серийный выпуск продукции не будет превышать стоимости традиционных решений построения систем автоматизации и позволит получить ряд технических преимуществ.

Выводы

В настоящее время в мире началось массовое внедрение решений класса «цифровая подстанция», основанных на стандартах серии МЭК 61850, реализуются технологии управления Smart Grid, вводятся в эксплуатацию приложения автоматизированных систем технологического управления. Применение технологии «Цифровой подстанции» должно позволить в будущем существенно сократить расходы на проектирование, пусконаладку, эксплуатацию и обслуживание энергетических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичёв С.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2014. – 228 с.
2. Титаренко О.Н. Цифровые подстанции – важный элемент интеллектуальной энергосистемы / Титаренко О.Н. Муртазаев И.А. – Севастополь: Энергетические установки и технологии, 2020. – 183с.

Автор

Шварнуков Алексей Валерьевич, магистрант, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, факультет энергетики и электротехники. E-mail: shvarnikov2010@mail.ru.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Павлов О.П., Андреев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** Проанализированы основные особенности разработки математической модели и комплексов программ, необходимых при создании системы управления преобразователем частоты для интеллектуального электропривода.*

***Ключевые слова:** цифровая система управления, интеллектуальный электропривод, преобразователь частоты, математическое моделирование.*

Объектом исследования в данной работе является комплекс проблем, возникающих в процессе разработки интеллектуальных электроприводов. Целью является разработка комплекса программ для анализа с учетом заданных требований математической модели цифровой системы управления преобразователем частоты для электродвигателя.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами широко применяются в системах автоматики, робототехнике, электро-транспортных средствах, медицинских приборах, в которых должны сочетаться такие характеристики, как высокий момент, малые масса и габариты, высокое быстродействие при жестких требованиях к обеспечению стабильности частоты вращения. Выбор в пользу синхронного двигателя с постоянными магнитами связан с тем, что по сравнению с другими электродвигателями он имеет лучшие показатели, в частности, в плане мощность/объем, момент/инерция [1]. В то же время известно [2], что у синхронного двигателя с постоянными магнитами КПД примерно на 2 % больше, чем у высокоэффективного асинхронного электродвигателя при условии одинаковых конструкций статоров, а управление осуществляется с помощью одного и того же частотного преобразователя.

Несмотря на востребованность, разработка систем управления для подобных двигателей остается сложной задачей, тре-

бующей учета многих факторов. Основной проблемой является существенная разница между имеющимися упрощенными математическими моделями и реальным электроприводом. Более того, не всегда известны математические модели и управляющие алгоритмы отдельных элементов электропривода. Для наиболее точного управления требуется точно знать множество параметров системы, как электрических, так и механических, что предполагает уточнение существующих и синтез новых математических моделей электропривода.

Реализация темы исследования связана с решением следующего круга взаимосвязанных проблем.

1. Определение и модернизация наиболее значимых для предмета исследования математических моделей элементов системы управления с последующими синтезом, моделированием и анализом цифровой системы управления в процессе работы в сопряжении с преобразователем частоты, двигателем и рабочим механизмом.

2. Разработка и отладка программного обеспечения при использовании для проведения испытаний отладочной платы частотного преобразователя с электродвигателем.

3. Выявление и решение проблем при наличии несоответствий по итогам сравнительного анализа теоретических и практических результатов.

4. Обоснование эффективности и оптимальности технических решений при разработке цифровой системы управления по сравнению с уже существующими решениями.

Следует обратить внимание на следующие особенности при проведении исследований. Необходимо обратить пристальное внимание на математические модели с точки зрения адекватного описания всех важных особенностей реальных процессов функционирования цифровой системы управления электроприводом. Для наиболее точного управления требуется точно знать параметры системы, как электрические, так и механические. В то же время в паспортной технической документации часто указана лишь часть параметров, которые требуется знать при разработке системы управления. Кроме того, эти параметры даются с некоторой допустимой погрешностью. Погрешности в некоторых случаях могут существенно влиять на качество управления, ко-

торое зависит от выбранного алгоритма управления и его реализации. Также проблемой является то, что некоторые параметры могут изменяться со временем (например, сопротивление меняется при изменении температуры). Причем не всегда можно проследить зависимость изменения одного параметра от другого и включить ее в модель. На некоторые из параметров могут влиять внешние факторы (температура, влажность, пыль и так далее). Как правило, их воздействие стараются минимизировать и, если оно незначительное, им пренебрегают. Если же внешние факторы оказывают заметное влияние на работу системы, то необходимо измерять их и корректировать работу с учетом их влияния. В некоторых случаях на сигналы могут наводиться помехи, искажающие их. Тогда необходимо либо установить физическую защиту от помех, либо с помощью программных средств учитывать их и корректировать. Важно также подобрать такой алгоритм управления, при котором их влияние отсутствует или минимально. Также необходимо учитывать то, что все аналоговые сигналы преобразуются с помощью АЦП в цифровые с некоторой погрешностью, с ограниченной частотой и не моментально. Следовательно, необходимо помнить, каким аналоговым значениям соответствуют полученные цифровые значения. Вдобавок у цифровых величин при программировании имеются свои особенности, которые нужно учитывать (знаковые и беззнаковые, ограничения диапазона в зависимости от типа, округление целых вниз). Возможны постепенно накапливающиеся ошибки округления. Замкнутые контуры при неправильных коэффициентах и/или определенных ситуациях могут привести систему к резонансу, что ухудшит ее показатели или даже сделает работу невозможной. Так, при слишком больших коэффициентах регуляторы могут реагировать на случайные помехи, пытаясь их скомпенсировать. Это приводит к резким скачкам управляющего сигнала. Некоторые алгоритмы обладают большей устойчивостью, некоторые – меньшей. Для повышения устойчивости может потребоваться коррекция алгоритмов (например, введение ограничений на значения некоторых сигналов).

Полученные теоретические результаты по итогам работы позволят точнее моделировать процессы в электроприводе в за-

висимости от заданных параметров, тем самым точнее прогнозировать поведение электропривода на этапах разработки и отладки цифровой системы управления преобразователем частоты для синхронного двигателя с постоянными магнитами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Павлов О.П.* Синхронный двигатель с постоянными магнитами, управляемый при помощи прогнозирующей модели // Молодой ученый. 2019. № 25 (263). С. 135-138.

2. *Markus Lindegger.* Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors. – Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009.

Авторы:

Павлов Олег Павлович, аспирант факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил факультет радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в 2017 году. E-mail: mr.oleg.pavlovich@mail.ru.

Андреев Всеволод Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил физико-математический факультет Чувашского государственного университета в 1989 году. Учёную степень по теме «Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых гранулах катализатора» получил в 1994 году. E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru.

СЕТЕВОЙ АНАЛИЗАТОР ДАННЫХ И ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Кокшев П.А., АО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары, Россия.

Галанина Н.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. Данный доклад освещает необходимость защиты информации путем использования сетевого анализатора данных, предназначенного для применения на цифровой подстанции.

Ключевые слова: IEC 61850, цифровая подстанция, протоколы передачи данных, нейронная сеть, информационная безопасность.

Современный мир постепенно движется к полной цифровизации во всех сферах деятельности человека. Это открывает возможности для появления новых технологий, программных продуктов и аппаратно-технических комплексов. В частности, цифровизация в значительной мере влияет на энергетику и активно проявляет себя в самых отдаленных краях земли, вплоть до Арктики.

Когда речь заходит о цифровизации в энергетике, не обходится без упоминания относительно новой коммуникационной технологии IEC 61850. Еще недавно темы касательно стандарта IEC 61850 «Сети и системы связи на подстанциях» вызывали оживленные дискуссии. Кто-то видел будущее в этих технологиях, а кто-то считал их бесполезными. Сейчас же все больше специалистов видят перспективы цифровых решений, что приводит к увеличенному спросу на высокоавтоматизированные подстанции.

Появление новых технологий влечет за собой изменение ряда сопутствующих систем, в частности, к появлению новых протоколов передачи данных, для которых начали формироваться новые требования к надежности и производительности системы. Таким образом, появилась необходимость в регистрации информационных потоков на цифровых подстанциях с целью мониторинга состояния оборудования, а также внедрения интеллектуальных сетей [6].

Реализация сетевого анализатора трафика

Как известно, за регистрацию информационных потоков в сети отвечает сетевой анализатор, работающий на уровне сете-

вого адаптера и позволяющий просматривать весь трафик сети. Анализ данных представляет собой процесс обработки всех данных, проходящих через определенный сетевой интерфейс. Применение сетевого анализатора открывает возможности мониторинга сети и анализа всех необходимых данных путем перехвата пакетов, проходящих через эту сеть [1].

В данном случае речь идет о данных, передающихся по сети высокоавтоматизированных (цифровых) подстанций согласно IEC 61850. К таким данным относятся сообщения, передающиеся по протоколам [6, 7, 8, 9]:

– GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event – IEC 61850-8-1) – протокол передачи данных о событиях на подстанции; данный протокол используется при передаче дискретных сигналов между устройствами, фактически позволяет заменить медные кабельные связи;

– MMS (Manufacturing Message Specification – IEC 61850-8-1) – протокол передачи данных реального времени и команд диспетчерского управления между сетевыми устройствами и/или программными приложениями, то есть благодаря данному протоколу происходит взаимодействие между SCADA-системой и устройствами РЗА;

– SV (Sampled Values – IEC 61850-9-2) – протокол передачи оцифрованных мгновенных значений от измерительных трансформаторов тока и напряжения. Данный протокол позволяет заменить цепи переменного тока, соединяющие устройства РЗА с трансформаторами тока и трансформаторами напряжения.

В рамках цифровых подстанций сеть разделяется на две шины:

– шина станции (по данной шине передаются сообщения по протоколу MMS и, опционально, по протоколу GOOSE);

– шина процесса (по данной шине передаются сообщения по протоколу SV и, опционально, по протоколу GOOSE).

По какой шине передавать GOOSE- сообщения решается на этапе проектирования, в частности, это зависит от типа архитектуры, применение которой планируется в рамках реализации подстанции.

Можно выделить несколько очевидных преимуществ, которые являются результатом анализа данных [2]:

– проверка правильности настройки конфигурации оборудования на подстанции, что дает возможность сразу после интеграции нового оборудования в систему и его запуска проверить соответствие публикуемых им сообщений с файлом конфигурации подстанции, в котором содержится информация обо всех устройствах, их сетевые настройки, а также данные об информационных потоках между этими устройствами;

– выявление некорректной работы сети и оборудования;

– обеспечение безопасности всей системы целиком и сети в частности.

На рис. 1 представлены данные, полученные путем перехвата данных. Стоит отметить, что это просто поток информации, без какой-либо обработки.

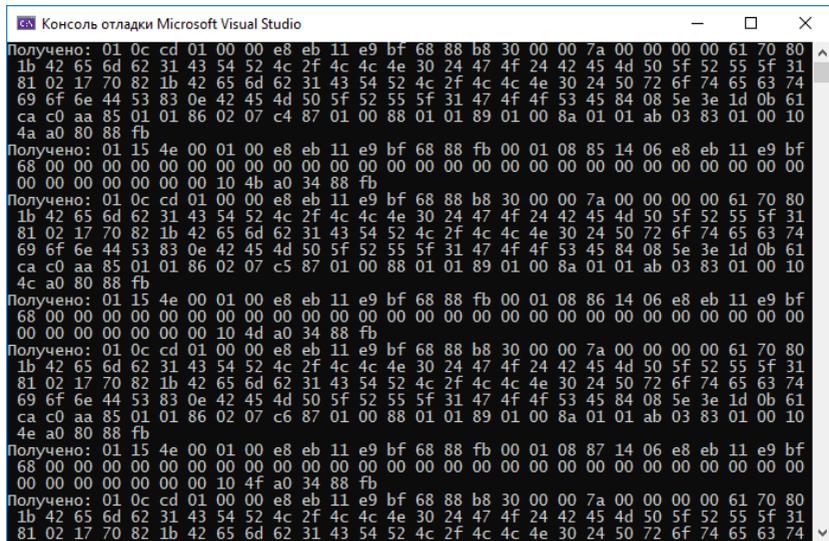


Рис. 1. Данные, полученные сетевой картой без предварительной обработки

При разборе пакетов важно учесть тот факт, что MMS накладывается на уровень TCP, а GOOSE и SV – сразу на канальный уровень. На рис. 2 показано, как данные протоколы накладываются на сетевую модель OSI.

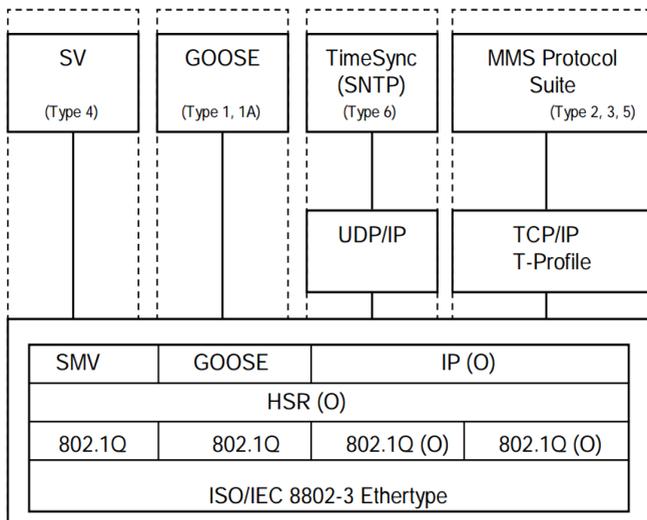


Рис. 2. Наложение протоколов на сетевую модель OSI

Следовательно, для GOOSE и SV мы должны разбирать все пакеты целиком, а для MMS, к которым относится ReportControl, только ту часть, которая начинается с ip-уровня.

Основы защиты информации

Защита информации в автоматизированной системе управления технологическими процессами является составной частью работ по созданию (модернизации) и эксплуатации АСУ ТП и должна обеспечиваться на всех стадиях ее жизненного цикла. Принимаемые организационные и технические меры защиты информации[10]:

– должны обеспечивать доступность обрабатываемой в автоматизированной системе управления информации (исключение неправомерного блокирования информации), ее целостность (исключение неправомерного уничтожения, модифицирования информации), а также, при необходимости, конфиденциальность (исключение неправомерного доступа, копирования, предоставления или распространения информации);

– должны соотноситься с мерами по промышленной, физической, пожарной, экологической, радиационной безопасности,

иными мерами по обеспечению безопасности автоматизированной системы управления и управляемого (контролируемого) объекта и/или технологического процесса;

– не должны оказывать отрицательного влияния на штатный режим функционирования автоматизированной системы управления.

Исходя из цели воздействия на ИС, специалисты выделяют три основных типа угроз безопасности в автоматизированных системах управления (АСУ):

- нарушение конфиденциальности информации;
- нарушение целостности информации;
- нарушение работоспособности ИС (отказы в обслуживании).

С помощью разработки анализатора сети можно предупредить два из этих трех основных типов угроз безопасности. К ним относятся нарушение целостности информации и нарушение работоспособности информационной системы, то есть отказ в обслуживании.

Целостность информации – существование информации в неискаженном виде (неизменном по отношению к некоторому фиксированному ее состоянию). Чаще субъектов интересует обеспечение более широкого свойства – достоверности информации, которое складывается из адекватности (полноты и точности) отображения состояния предметной области и непосредственно целостности информации, т.е. ее неискаженности.

Угрозы нарушения целостности – это угрозы, связанные с вероятностью модификации той или иной информации, хранящейся в ИС. Нарушение целостности может быть вызвано различными факторами – от умышленных действий персонала до выхода из строя оборудования.

Реализация каждой из указанных угроз в отдельности или их совокупности приводит к нарушению информационной безопасности предприятия.

В данном случае, например, подмена или изменение GOOSE-сообщений может приводить к ложным срабатываниям терминалов РЗА, незапланированным отключениям линий и т.п., что может нарушить функционирование всей системы.

Выводы

Регистрация информационных потоков на цифровых подстанциях с целью мониторинга состояния оборудования, а также внедрения интеллектуальных сетей открывает новые возможности повышения качества и надежности работы высокоинтеллектуальных подстанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокшев П.А. Анализ готовых решений для сетевого анализатора данных высокоавтоматизированной подстанции / П.А. Кокшев, Н.А. Галанина // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 296–297.

2. Кокшев П.А. Особенности применения сетевого анализатора данных в цифровой подстанции и его возможности / П.А. Кокшев, Н.А. Галанина // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Международ. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 93–96.

3. Кокшев П.А. Применение нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П.А. Кокшев // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 199-203.

4. Кокшев П.А. Применение стандарта МЭК 61850 для систем автоматизированного проектирования цифровых подстанций / П.А. Кокшев, Д.А. Удиков, Д.Г. Мухин // Сборник докладов научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 178–183.

5. Кокшев П.А. Преимущества применения нейронной сети с архитектурой многослойного персептрона для сетевого анализатора данных цифровой подстанции / П.А. Кокшев, Н.А. Галанина // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 127-129.

6. IEC 61850-8-1: 2011. Communication networks and systems for power utility automation – Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3.

7. IEC 61850-9-2: 2011. Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3.

8. ГОСТ Р МЭК 61850-7-2–2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 2. Абстрактный интерфейс услуг связи (ACSI).

9. ГОСТ Р МЭК 61850-6–2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 6. Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях.

10. Кокшев П.А. Оценка угроз информационной безопасности в цифровой подстанции / П.А. Кокшев, А.А. Андреева // Состояние и перспективы развития IT-образования: сб. докл. и науч. ст. Всерос. науч.-практ конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 225-231.

Авторы:

Кокшев Павел Андреевич, АО «ЧЭАЗ», ведущий-программист – специалист по защите информации, ЧувГУ, факультет информатики и вычислительной техники, 2020 – магистратура ЧувГУ по специальности «Математическое и программное обеспечение автоматизированных систем». E-mail: p.kokshev@cheaz.ru.

Галанина Наталия Андреевна, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры МиАОИС. E-mail: galaninacheb@mail.ru.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Тарасов В.А., Ковалев В.Г., Афанасьев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Тарасова В.В., ООО «Инженерно-технический центр ГОРИСС», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассмотрены периодические тепловые процессы в ограждающих конструкциях при периодическом изменении температуры наружного воздуха. Математическая модель нестационарных тепловых процессов позволяет создать цифровые двойники, которые нужны для выбора оптимальных режимов систем централизованного и автономного отопления.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, цифровые двойники, режимы работы отопления, прогнозное управление отоплением, дежурное отопление.*

В ограждающих конструкциях зданий и сооружений при изменении температуры наружного воздуха протекают нестационарные тепловые процессы [1]. Годовой ход среднесуточной температуры наружного воздуха близок к синусоиде, но в течение суток наблюдаются периодические изменения температуры вследствие солнечной инсоляции, в течение каждого месяца наблюдается периодичность изменения температуры с периодом несколько дней.

Для оптимального управления отоплением необходимо учитывать переходные тепловые процессы в ограждениях и колебания температуры наружного воздуха с помощью цифровых двойников, созданных на основе математического моделирования. Для создания цифрового двойника нестационарных тепловых процессов в ограждающих конструкциях можно использовать представление зависимости температуры от времени в виде гармонического ряда, полученного разложением в ряд Фурье [2].

Если температура среды меняется во времени по гармоническому закону

$$\Theta_n = T_{mn} \cos \omega t ,$$

то между поверхностью тела и средой происходит теплообмен при граничных условиях третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_{mc} - T(0, \tau)] = 0,$$

где T_{mc} – амплитуда изменения температуры, α – коэффициент теплоотдачи, λ – коэффициент теплопроводности.

Температура в любой точке наружной стенки ограждения совершает гармонические колебания [3] и отличается от температуры наружного воздуха по амплитуде и по фазе.

$$\Theta = \Theta_a \exp\left(-\frac{x}{\Delta}\right) \left(\cos \omega \tau - \frac{x}{\Delta} - M\right),$$

где x – координата, которая отсчитывается от наружной поверхности стенки, ω – круговая частота, a – коэффициент температуропроводности, $\Delta = \sqrt{2a / \omega}$.

Максимальная безразмерная амплитуда колебаний температуры Θ_a на наружной поверхности стенки зависит от периода колебаний P , коэффициентов теплоотдачи α и температуропроводности a :

$$\Theta_a = \left(1 + \frac{2\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{aP}} + \frac{2\pi\lambda^2}{\alpha^2 aP}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Смещение по фазе (времени) колебания температуры поверхности тела M по отношению к колебанию температуры окружающей среды зависит от периода колебаний, коэффициентов теплоотдачи и температуропроводности (рис. 1):

$$M = \arctg\left(\frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{aP}{\pi}}}\right).$$

Температурное поле в толще ограждения описывается уравнением параболического типа

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T.$$

Одномерное нестационарное температурное поле описывается уравнением

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}.$$

Используя теорию рядов Фурье можно представить зависимость температуры наружного воздуха от времени в виде суммы гармонических составляющих с разными частотами. Для исследова-

дования температурных волн в толще стен можно применить широко используемый в электротехнике символический метод и решать уравнение нестационарной теплопроводности для комплексной температуры [2]:

$$\frac{d^2 \dot{T}(x)}{dx^2} = \frac{j\omega}{a} \dot{T},$$

где ω – круговая частота.

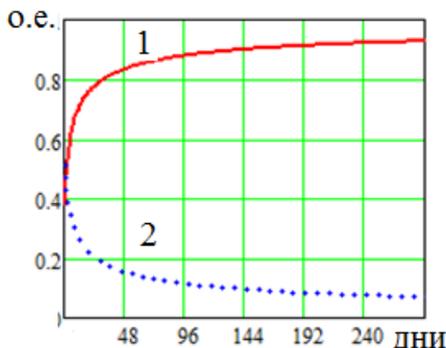


Рис. 1. Зависимость максимальной безразмерной амплитуды (1) и фазы температуры (2) наружной поверхности стенки от продолжительности периода

Решение уравнения для ограниченной стенки описывает затухающие температурные волны:

$$\dot{T}(x) = C_1 \exp\left(-\frac{x}{\Delta}\right) + C_2 \exp\left(\frac{x}{\Delta}\right).$$

Первое слагаемое соответствует прямой волне, второе – обратной. На расстоянии $\Delta = \sqrt{2a/\omega}$ амплитуда волны затухает в e раз. По аналогии с электротехникой Δ можно назвать глубиной проникновения тепловой волны. Глубина проникновения зависит от теплофизических параметров ограждения и частоты изменения температуры наружного воздуха (табл. 1).

Глубина проникновения тепловой волны в кирпичную стенку толщиной 0,54 м при периоде изменения температуры наружного воздуха 24 часа составляет 0,138 м, а длина волны – 0,864 м. Затухание и фазовая скорость тепловой волны зависят от частоты, чем она выше, тем больше фазовая скорость и затухание (табл. 1).

Таблица 1

Параметры температурной волны в стенке

Период, часы	4	12	24	48
Период, секунды	14400	43200	86400	$1,728 \cdot 10^5$
Частота, миллигерц	70	23	11	5
Фазовая скорость, м/сек	$4,361 \cdot 10^{-4}$	$1,414 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	$7,071 \cdot 10^{-6}$
Глубина проникновения, м	0,056	0,097	0,138	0,195
Длина тепловой волны, м	0,864	0,611	0,864	1,22
Отношение глубины проникновения к толщине стенки	0,1	0,179	0,26	0,36
Максимальная безразмерная амплитуда температуры	0,569	0,097	0,138	0,195
Смещение по фазе температуры	0,372	0,263	0,204	0,154

В качестве примера рассмотрено изменение среднесуточной температуры наружного воздуха в Чебоксарах в течение 12 суток по данным гидрометцентра (рис. 2) в январе 2020 года.

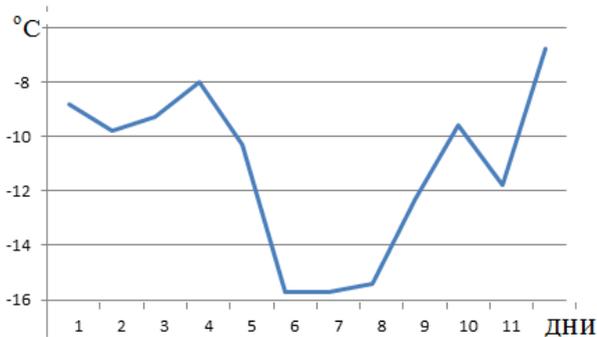


Рис. 2. Изменение среднесуточной температуры наружного воздуха по метеорологическим данным

На рис. 3 и 4 приведены цифровые двойники изменения температуры стенки, полученные разложением зависимости температуры в ряд Фурье, коэффициенты ряда Фурье приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты ряда Фурье

Номер гармоники	1	2	3	4	5
Коэффициенты при косинусах	2,553	-0,442	0,817	0,075	1,081
Коэффициенты при синусах	2,264	-1,487	0,95	0,707	1,081
Постоянная составляющая	-11,1				

Из табл. 2 видно, что спектр достаточно сложный, существенного затухания гармоник высоких частот не наблюдается.

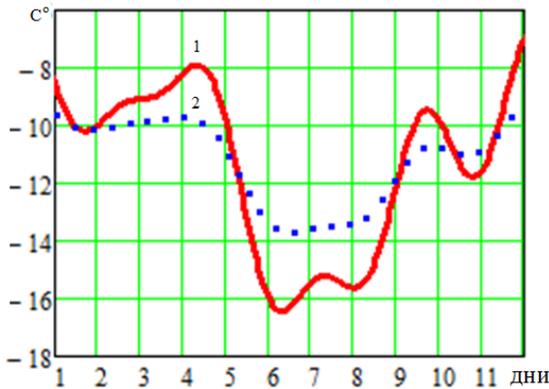


Рис. 3 Цифровой двойник изменения температуры на наружной поверхности стенки (1) и в середине толщины стенки (2)

Расчеты нестационарных температурных полей позволили получить цифровые двойники тепловых процессов в ограждениях [4, 5]. На рис. 4 приведены расчетные зависимости изменения температуры в наружной стенке в течение двенадцатидневного периода при температуре внутреннего воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и средней температуре наружного воздуха $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Пунктиром нанесены постоянные составляющие температуры, соответствующие стационарному режиму. В глубине стенки уменьшается амплитуда колебаний и меняется фаза (рис. 4). Максимум и минимум температуры на разных глубинах наступают в разное время. Отклонение температуры от средней уменьшается по глубине стенки. Постоянная составляющая равна температуре при стационарном процессе.

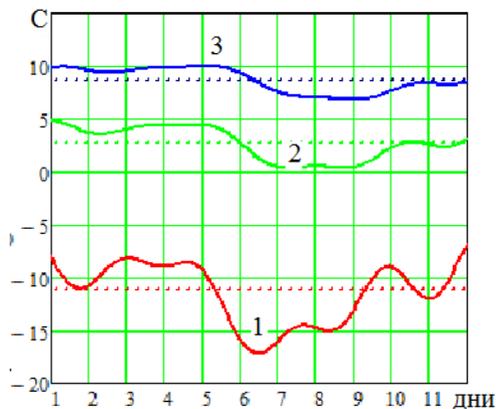


Рис. 4 Изменение температуры в течение 12 дней на наружной поверхности стенки (1), в середине толщины стенки (2) и на 3/4 толщины стенки (3)

Различие между средней температурой и температурой в середине стенки с учетом затухания и сдвига по фазе велико при малых периодах изменения температуры и снижается при возрастании периода. Перепад температуры между наружным воздухом и поверхностью стенки в стационарном режиме (постоянная составляющая) зависит только от коэффициентов теплоотдачи, уменьшение амплитуды колебаний температуры зависит также от периода колебаний, чем меньше период, тем сильнее затухают колебания. Затухание колебаний возрастает по мере заглубления в толщу стенки.

Для обеспечения комфортных условий в отапливаемых помещениях при минимальном расходе тепловой энергии кроме соблюдения температурного графика необходимо применение автоматического погодозависимого управления отоплением на каждом объекте. Цифровой двойник позволяет выявить основной тренд, влияющий на среднюю температуру стенки, рассчитать среднеинтегральную температуру и отсеять от автоматического регулятора быстрые колебания теплового режима, вызванные инсоляцией и изменениями скорости ветра. При учете влияния суточной инсоляции для регулятора нужно среднесуточное значение теплового потока инсоляции, так как суточные

колебания температуры практически затухают на половине толщины стенки.

Математическим моделированием создана методика расчета режимов погодозависимого прогнозного и дежурного отопления [4, 6]. Благодаря цифровому двойнику можно вести прогнозное отопление с учетом изменения температуры наружного воздуха и ее производной по времени по данным гидрометеоцентра без использования нормативного температурного графика сетевой воды.

Алгоритм адаптивного управления компенсацией тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом аккумулированного в них тепла, предоставляет возможность поддерживать температуру воздуха в помещениях на заданном уровне, несмотря на то, что реальная температура наружного воздуха может меняться с разной скоростью. Благодаря рассматриваемой математической модели можно рассчитать значения мощности системы при расчете режимов прогнозного управления и дежурного отопления.

Выводы

Вследствие неравномерного затухания высших гармоник тепловых волн на глубине, равной половине толщины стенки, амплитуда колебаний температуры в глубине стенки существенно меньше, чем на поверхности.

Перепад температур между наружным воздухом и стенкой в стационарном режиме зависит от коэффициента теплоотдачи и термического сопротивления стенки. В нестационарном режиме при гармоническом изменении температуры наружного воздуха перепад зависит от частоты (периода) изменения температурных волн.

Суточные колебания температуры наружного воздуха и наружных поверхностей ограждений, вызванные инсоляцией и ветром, практически полностью затухают в толще ограждений, для определения мощности отопления при автоматическом регулировании необходимо учитывать только среднесуточные инсоляцию и скорость ветра.

Использование цифрового двойника открывает дополнительные принципиально более широкие возможности экономии

энергии за счет управляемого прогнозируемого снижения температуры внутреннего воздуха в большинстве современных зданий в ночное время, в выходные и праздничные дни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В., Федоров Д.Г. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 20–29.

2. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопередачи // Региональная энергетика: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IX. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013 г. – С. 128–144.

3. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.

4. Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Калинин А.Г., Адаптивное управление режимом теплоснабжения здания с помощью автоматизированного теплового пункта // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 117–123.

5. *Tarasov V.A., Tarasova V.V., Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Orlov V.N. Mathematical modeling of the forecast and standby heating modes (Математическое моделирование режимов прогнозного и дежурного отопления) // Power engineering: research, equipment, technology. 2019; 21(5-6): С. 77–87. (In Russ). doi :10.30724/1998-9903-2019-21-5-6-77-87.*

Авторы:

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: volodtar@yandex.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизации производств Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: kovenergy@mail.ru.

Афанасьев Владимир Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. E-mail: avvteo@mail.ru.

Тарасова Валентина Владимировна, инженер-программист ООО «ГОРИСС», г. Чебоксары. E-mail: charming_cerl@rambler.ru.

II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Баженова Е.С., Кесель Л.Г., КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия.

Кесель Б.А., ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника», г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В статье представлены конструктивные мероприятия по исключению подачи горячего воздуха, отбираемого из-за компрессора приводного газотурбинного двигателя энергетической газотурбинной установки.*

***Ключевые слова:** энергетическая газотурбинная установка, отбор горячего воздуха, комплексное воздухоочистительное устройство, противообледенительная система, циклоны, кассетные фильтры.*

Большинство современных энергетических газотурбинных установок (ГТУ), эксплуатируемых в системах генерации электрической энергии, оборудовано системами очистки и подготовки циклового воздуха. Указанные системы оборудованы комплексными воздухоочистительными устройствами (КВОУ). В качестве устройств очистки циклового воздуха в составе КВОУ используются устройства инерционного принципа действия - циклоны или различного рода фильтры. Номенклатура устройств, используемых в системах очистки воздуха весьма обширна. [1]. Для защиты устройств очистки циклового воздуха от наземного обледенения КВОУ оборудованы противообледенительными системами (ПОС). В отечественной и мировой практике противообледенительные системы используют в качестве теплового агента горячий воздух, который отбирается из-за компрессора ГТУ. Данное решение трудно признать оптималь-

ным с энергетической точки зрения, в связи с тем, что данный отбор приводит к резкому снижению коэффициента полезного действия ГТУ и перерасходу топлива.

Цель настоящей работы – повышение тепловой эффективности энергетических ГТУ за счёт исключения отбора горячего воздуха из-за компрессора газотурбинных установок.

Противообледенительная система с использованием горячего воздуха, отбираемого из-за компрессора газотурбинного двигателя, входящего в состав ГТУ относится к системам воздушно-теплого типа. Воздушно-тепловое исполнение противообледенительных систем заключается в использовании горячего воздуха, отбираемого от высоких ступеней компрессора приводного ГТД и подаваемого в смеси с основным потоком циклового воздуха, направляемого на воздухоочистительные элементы КВОУ и далее на вход указанного ГТД. Подача воздушно-теплого потока на вход в КВОУ воздействует на точку росы входного воздушного потока и тем самым снижает вероятность образования льда и отложения инея на элементы воздухоочистительных устройств.

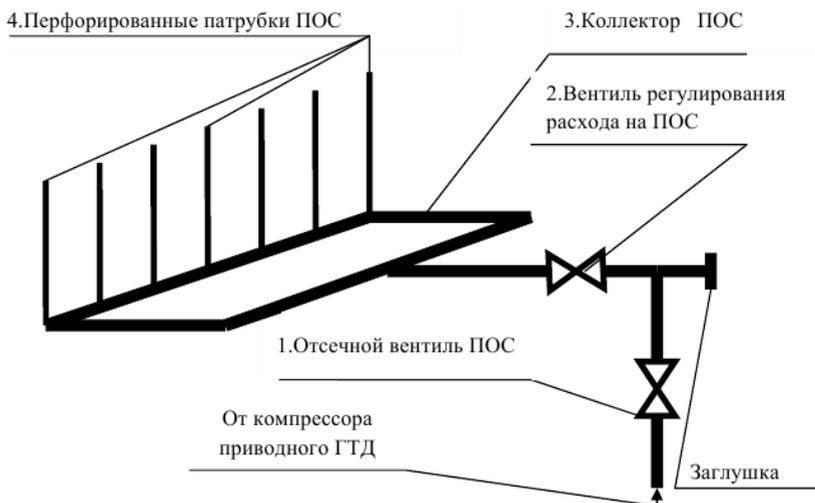


Рис. 1. Схема противообледенительной системы воздушно-теплого типа

Схема воздушно-тепловой противообледенительной системы представлена на рис. 1, содержит следующие конструктивные элементы: отсечной вентиль ПОС – 1, вентиль регулирования расхода горячего воздуха – 2, коллектор ПОС – 3 и перфорированные патрубки – 4. Система работает следующим образом: горячий воздух, отбираемый от компрессора ГТД (условно не показан), поступает через отсечной вентиль – 1 на вентиль регулирования расхода горячего воздуха – 2 и далее через коллектор ПОС – 3 поступает на перфорированные патрубки и затем на вход в КВОУ.

Диапазоны расхода горячего воздуха в зависимости от мощности ГТУ представлены в таблице.

Таблица

Диапазоны расхода горячего воздуха на ПОС

Мощность ГТУ, тыс. кВт	Диапазон расхода циклового воздуха, кг/с	Диапазон расхода горячего воздуха из-за компрессора ГТД на нужды ПОС, кг/с
2,5 – 5,2	16,0 – 45,0	0,32 – 0,9
6,0 – 8,0	29,7 – 58,2	0,594 – 1,164
10,0 – 12,9	35,6 – 84,7	0,712 – 1,692
16,0 – 18,0	53,7 – 101,9	1,074 – 2,038
25,0	80,0 – 148,0	1,6 – 2,96

В среднем отбор горячего воздуха на нужды ПОС составляет 2–3 % от расхода циклового воздуха, что примерно снижает к.п.д. установки на 1,5–2%. Снижение к.п.д. в указанном диапазоне приводит к увеличению расхода топлива на 4–6 %.

В практике эксплуатации летательных аппаратов в условиях образования наземного обледенения имеет место техническое решение, позволяющее исключить образование инея и льда на фюзеляжах, крыльях и других конструктивных элементах. Это решение заключается в том, что на поверхности, подверженные наземному обледенению наносится противообледенительная жидкость, содержащая в своём составе диэтиленгликоль. Данное решение относится к химическим противообледенительным

системам. Химические противообледенительные системы предполагают в своём исполнении подачу химических реагентов, способных растворять и преобразовывать в воду снежно-ледовые образования на воздухоочистительных элементах КВОУ или предотвращать отложения указанных образований в случае профилактического использования данных реагентов.

Для повышения тепловой эффективности энергетических ГТУ за счёт исключения отбора горячего воздуха из-за компрессора газотурбинных установок было предложено отказаться от использования горячего воздуха в противообледенительных системах и перейти на системы химического принципа действия. Схема ПОС химического типа представлена на рис. 2

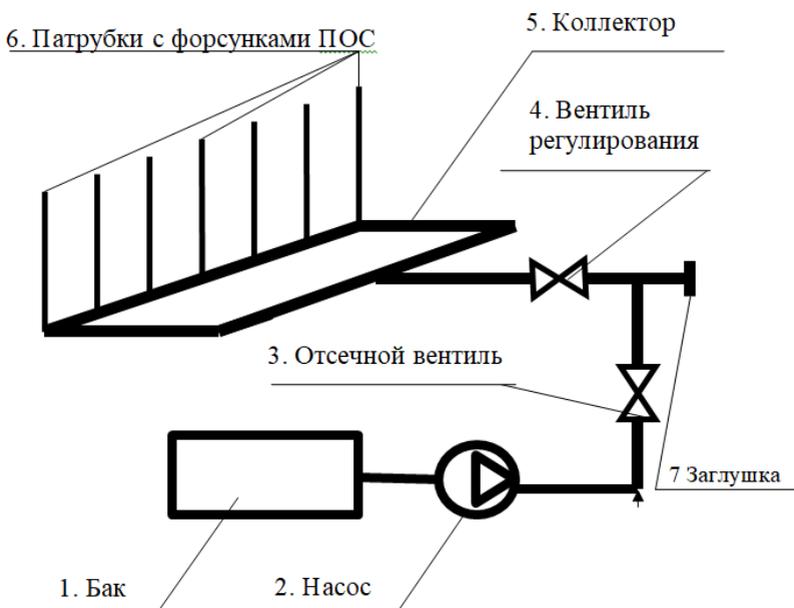


Рис. 2. Схема противообледенительной систем химического типа

В состав схемы, представленной на рис. 2 входит следующее оборудование: бак для рабочей жидкости – 1, насос для подачи рабочей жидкости – 2, отсечной вентиль – 3, вентиль регулирования расхода рабочей жидкости – 4, коллектор – 5, пат-

рубки с форсунками – 6, заглушка – 7. Система, представленная на рис. 2 работает следующим образом: рабочая жидкость из бака – 1 посредством насоса – 2, через открытый отсечной вентиль – 3 и вентиль регулирования расхода – 4, подаётся на коллектор – 5. Из коллектора – 5 через патрубки с форсунками рабочая жидкость подаётся на элементы воздухоочистки КВОУ. Команду на подачу рабочей жидкости подаёт систем автоматического управления, в состав которой входят датчики анализа метеоусловий по влажности и температуре окружающей среды.

Выводы

1. Противообледенительная система химического типа существенным образом повышает топливную эффективность энергетических ГТУ при работе в условия обледенения КВОУ.

2. Состав системы ПОС химического типа позволяет выполнить доработку воздушно-тепловых систем в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

Кесель Б.А., Кесель Л.Г. Модернизация противообледенительной системы воздухоочистительного устройства газотурбинной установки с кассетными фильтрами ж. Вестник КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, № 2, 2022, С. 42–48.

Авторы:

Баженова Елена Сергеевна студентка 4 курса КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. E-mail: bale01@mail.ru

Кесель Людмила Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. Закончила в 1974 году физфак КГУ им. В.И. Ленина г. Казань, ученая степень с 1997 года по квантовой электронике. E-mail: bak1951@yandex.ru.

Кесель Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент, ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника» Казань, главный конструктор. Закончил в 1974 г. КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, факультет Двигатели летательных аппаратов. учёная степень с 1999 г. по тепловым двигателям Л.А. E-mail: bak1951@yandex.ru.

СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ПАРА В АТМОСФЕРНЫЙ ДЕАЭРАТОР

Морозов Д.С., Золин М.В., Пазушкина О.В., УлГТУ,
г. Ульяновск, Россия.

***Аннотация.** В предлагаемой статье рассмотрена возможность модернизации котельных установок для улучшения надёжности их работы. Важно, что данные усовершенствования положительно влияют на качество работы оборудования. Разработка запущена в работу на предприятии, показала свою эффективность. Проведённые наблюдения подтверждают актуальность предлагаемых методов.*

***Ключевые слова:** атмосферная деаэрация, понижающий редуктор, регулятор пара на деаэратор.*

Атмосферная деаэрация – способ термической подготовки воды на теплоисточниках, который часто используют для приготовления питательной воды паровых котлов [1]. Это одна из важнейших ступеней подготовки воды из-за того, что содержание кислорода в исходной воде велико и требует удаления [2, 3]. Кислород, содержащийся в воде, вызывает коррозию оборудования и трубопроводов. Соответственно, в котельных, генерирующих пар на нужды производства, деаэраторы обязательно присутствуют. Тем более, что греющим агентом деаэраторов данного типа выступает именно пар. Пар удобен для применения в качестве греющего агента, т.к. доступен (пар производится силами котельной), легко транспортируется по трубопроводам, имеет высокую температуру и давление. Но последний фактор может выступать как преимуществом, так и недостатком из-за существенной разницы давлений на выходе из парового котла (8-10 бар) и потребляющей установкой (в данном случае атмосферный деаэратор), где рабочее давление превышает атмосферное всего на 0,2-0,25 бар.

Рассмотрим процесс атмосферной деаэрации на примере котельной пивоваренного завода АО ИнБев-Эфес в г. Ульяновске.

На данном предприятии для получения пара используется два паровых котла паропроизводительностью 23 тонны пара в час каждый. Для подпитки котлов применяют атмосферный де-

аэратор производительностью до 50 тонн деаэрированной воды в час. Греющим агентом выступает пар, произведённый на данном котельном оборудовании, который поступает в деаэратор через регулятор давления, и понижает его для нормальной работы с 8-10 бар до 0,25 бар.

В процессе эксплуатации регулятора давления была выявлена проблема – регулятор периодически выходил из строя из-за огромной разницы давления до и после него. Для нормализации процесса, более плавной работы регулятора и исключения срыва предлагается включить в схему кроме регулирующего клапана, установленного перед деаэратором, дополнительное устройство – понижающий редуктор.

Дело в том, что при большом расходе химически очищенной воды (ХОВ) клапан регулятора давления максимально открыт. Разница давлений до и после него небольшая.

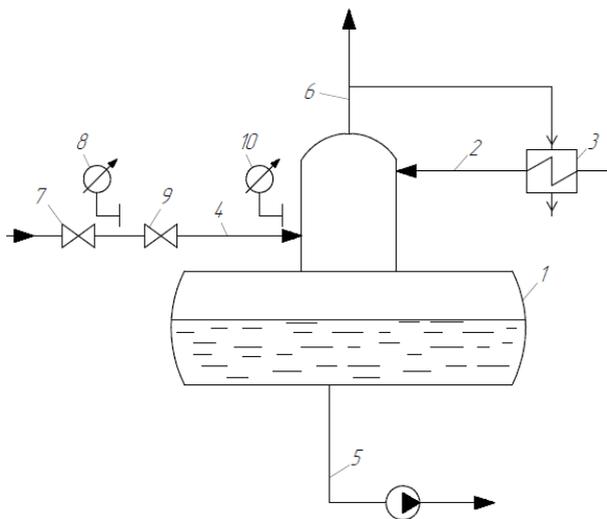


Рис. 1. Схема включения деаэрационной установки: 1 – атмосферный деаэратор; 2 – трубопровод химически очищенной воды (ХОВ); 3 – охладитель выпара (ОВА); 4 – трубопровод греющего агента; 5 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 6 – трубопровод отвода выпара; 7 – понижающий редуктор; 8 – манометр; 9 – регулирующий клапан; 10 – манометр

В то же время, если расходы минимальны или отсутствуют, и потребления пара нет, то эта разница давлений становится существенной. Резко возрастает нагрузка на регулятор, который вынужден корректировать давление после себя с огромных входящих давлений пара до давления, незначительно превышающего атмосферное, применяемое в деаэраторе. При установке редуктора сразу снижается давление после него более чем в два раза – до 4 бар.

Для контроля давления в схему также добавляется манометр.

По данному предложению был получен патент на изобретение [4]. Также это изобретение было реализовано на рассматриваемом предприятии. Наблюдения показали, что регулятор давления стал работать более плавно. Не было ни одной поломки регулятора по причине высокого входящего давления пара.

Вывод

Таким образом, заявленное техническое решение позволяет подавать греющий агент на регулятор с более низким давлением, исключая выход регулятора давления из строя при малых нагрузках или отсутствии потребления пара, а также при резких изменениях в нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Делягин Г.Н.* Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин, В.И. Лебедев, Б.А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
2. ГОСТ 16860-88 Деаэраторы термические. Типы, основные параметры, приемка, методы контроля от 04.11.88 N 3646 – [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011642> (дата обращения: 14.10.2022).
3. РД 10-165-97 Методические указания по надзору за водно-химическим режимом паровых и водогрейных котлов. – [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026705> (дата обращения: 14.03.2022).
4. Деаэрационная установка / Золин М.В., Морозов Д.С., Пазушкина О.В. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке 2021127666 от 11.10.2022 (приоритет от 20.09.2021).

Авторы:

Морозов Дмитрий Сергеевич, магистрант строительного факультета Ульяновского государственного технического университе-

та, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова». E-mail: goodwin731@mail.ru.

Золин Максим Вячеславович, аспирант строительного факультета Ульяновского государственного технического университета, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова». E-mail: zolintb@gmail.ru.

Пазушкина Ольга Владимировна, кандидат технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», доцент строительного факультета Ульяновского государственного технического университета, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В. И. Шарапова». E-mail: o.pazushkina@ulstu.ru.

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ С БЕСПРОВОДНЫМ ДОСТУПОМ

Михайлов Д.М., КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В данной статье рассмотрено проектирование и реализация автоматизированной системы с удаленным доступом. Исследуется метод дистанционного управления посредством локальной сети интернет по TCP/IP протоколу. Данная система построена на основе микроконтроллера, основным преимуществом которого является высокая скорость обмена информацией. Детально рассматривается процесс приема и передачи данных от удаленного пользователя. Особенностью разработки является гибкость, так как возможна работа с несколькими различными проектами.*

***Ключевые слова:** микроконтроллер, дистанционный доступ, светодиод, цифровые линии, TCP/IP.*

В настоящее время появляется все больше так называемых «умных» устройств, позволяющих не только автоматизировать выполнение различных операций на локальном уровне, но и обеспечить дистанционный доступ и управление. Возможность использования телекоммуникационных сетей общего пользования делает подобные системы более гибким и удобными в применении [1, 2]. Поэтому одной из актуальных задач на сегодняшний день является построение быстродействующих и на-

дежных систем дистанционного управления различными устройствами [3].

В работе поставлена задача разработки контроллера, обеспечивающего дистанционный доступ к автоматизированной системе через локальную сеть и/или интернет. Структурная схема разработанного устройства показана на рис. 1. Эта схема является типовой и может использоваться для построения более сложных систем измерения, контроля и управления.

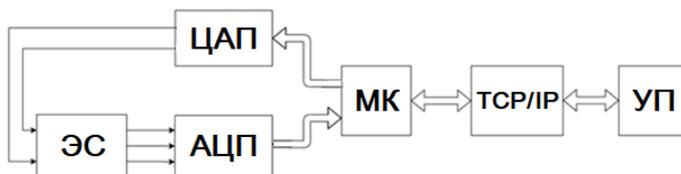


Рис. 1. Структурная схема контроллера дистанционного доступа:
ЭС – контролируемая (изучаемая) электронная схема; МК – микроконтроллер; ТСР/ІР – интерфейсных блок для удаленного доступа; УП – удаленные пользователи

В качестве контроллера дистанционного доступа был использован встраиваемый модуль Wi-Fi на базе чипа ESP8266. Для демонстрации работы разработанной системы реализовано дистанционное управления пятью светодиодами, как показано на рис. 2.

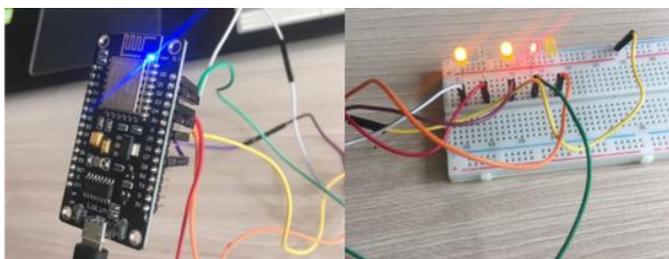


Рис. 2. Демонстрация работы системы

Этот вариант реализации системы является достаточно простым, так как были использованы только цифровые линии и не использованы измерительные каналы АЦП и ЦАП. Однако в этом случае еще более наглядно демонстрируются особенности

и возможности подобных систем. Интерфейс пользователя, необходимый для управления включением/отключением светодиодов, реализован посредством web-страницы, которая может быть открыта на ПК или мобильном телефоне.

Разработано устройство дистанционного управления электронными устройствами, использующими логические уровни в качестве сигналов управления. Основными элементами системы являются смартфон в качестве передатчика и Wi-Fi модуль в качестве приемника. Передача данных между приемником и передатчиком осуществляется по TCP/IP-протоколу. Главной особенностью контроллера дистанционного управления с беспроводным доступом является гибкость, так как в зависимости от кода программы на модуле ESP8266 возможно реализовать множество различных функциональных возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокимов Ю.К., Кирсанов А.Ю.* Экспериментальное исследование и статистическая модель динамики системы дистанционного управления // Вестник каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева-КАИ (Казань), №3, 2006. С. 31–36.

2. *Евдокимов Ю.К., Кирсанов А.Ю., Салахова А.Ш.* Дистанционные автоматизированные учебные лаборатории и технологии дистанционного учебного эксперимента в техническом вузе / Открытое образование. 2009. № 5. С. 101–116.

3. *Дягилев А.А., Мелехина С.В.* Дистанционное управление в электроэнергетике // Молодой ученый. 2019. № 9 (247). С. 92–94.

Автор

Михайлов Дмитрий Михайлович, студент, КНИТУ-КАИ, ИРЭФ-ЦТ. E-mail: fizik.1995@bk.ru.

КАЧЕСТВО СЕТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Абдуллина А.А., Зинуров В.Э., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В статье рассмотрены критерии качества элементов расчетной сетки. Представлено описание основных критериев: угол наклона (Skew Angle), асимметрия (Skewness), соотношение сторон (Mesh Aspect Ratio) и коэффициент роста (Mesh Expansion Factor). Приведены предельные и рекомендуемые значения критериев. В докладе показано влияние данных критериев на результаты численного моделирования.*

***Ключевые слова:** качество сеточных элементов, расчетная сетка, численное моделирование, сеточная модель, густота сетки.*

В последнее время рынок весь автоматизируется, исключение этому не является теплоэнергетика, так как она тоже становится более гибкой, продвинутой, эффективной. Данный рост происходит за счет использования различных специализированных программ, в частности программ, имеющих доступ к созданию компьютерных моделей различного уровня сложности [1, 2]. Такие программы используют численные методы моделирования и анализа конструкции, то есть для нахождения определенного критерия или значения решаются всевозможные математические уравнения в каждой отдельной единицы объема конструкции, полученной в результате ее разделения на ячейки специальным структурным элементом сеткой. Не стоит забывать, что данный метод, как и любой другой может давать неточные результаты. Точность результатов будет зависеть от ошибки, накопленной в результате решения математических уравнений. Улучшение качества сеточной модели, приведет к уменьшению данной ошибки [3, 4].

Проверить качество модели можно с помощью следующих параметров: внутренние углы (Included angles), угол деформации (Warp angle), отношение якоби (Jacobian Ration), соотношение сторон (Aspect Ratio), параллельное отклонение (Parallel Deviation) и др. Наиболее значимыми из них являются угол наклона (Skew Angle), асимметрия (Skewness), соотношение сто-

рон (Mesh Aspect Ratio) и коэффициент роста (Mesh Expansion Factor). Более подробное их описание приведено ниже в табл. 1.

Таблица 1

Критерии сеточных элементов

Критерий	Информация	Качество		
		Мин	Макс	Рекоменд
Угол наклона (Skew Angle)	Показывает отклонение формы элементов от идеальной по углу, находящемуся внутри фигуры	90	0	<10
Асимметрия (Skewness)	Показывает, насколько близка наша фигура к идеальной	1	0	<0.5
Соотношение сторон (Mesh Aspect Ratio)	Показывает, отношение сторон между собой, то есть растянутость ячеек	$+\infty$	1	<5
Коэффициент роста (Mesh Expansion Factor)	Показывает, отстраненность узла от центра объема фигуры	$+\infty$	1	<20

Расчетные формулы.

Угол наклона рассчитывается по формуле (1):

$$\text{Угол наклона} = 90 - \theta, \quad (1)$$

где θ – угол между серединными перпендикулярами.

Соотношение сторон рассчитывается по формуле (2):

$$\text{Соотношение сторон} = \frac{\text{Максимальная длина}}{\text{Минимальная длина}}, \quad (2)$$

где максимальная длина – диагональ фигуры, m ; минимальная длина – расстояние между 2 ближайшими плоскостями, считая от середины этих плоскостей, m .

Асимметрия рассчитывается по формуле (3):

$$\text{Асимметрия} = \frac{\text{Оптимальный объем} - \text{Размер ячейки}}{\text{Оптимальный объем}}, \quad (3)$$

где оптимальный объем – объем идеальной фигуры, но с тем же радиусом, описанной окружности, лежащей в основании фигуры, м³; размер ячейки – объем нашей фигуры, м³.

Коэффициент роста рассчитывается по формуле (4):

$$\text{Коэффициент роста} = \frac{\sum V_{\max}}{\sum V_{\min}}, \quad (4)$$

где V_{\max} – объемы наибольших ячеек, окружающих узел, м³;

V_{\min} – объемы наименьших ячеек, окружающих узел, м³

Выводы

В работе показано, что на проведение численных расчетов существенным образом влияет качество сеточных элементов. В большинстве случаев высокая неопределенность численных результатов обусловлена не грубой сеткой, а элементами низкого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А.В. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, С.В. Данг // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 3 (39). – С. 65-71.

2. Зинуров В.Э. Численное и экспериментальное исследование сужающего устройства на основе трубы Вентури / В.Э. Зинуров, И.И. Насырова, К.Д. Вьюгова, И.Н. Мадышев // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 7. – С. 106–111.

3. Фарахов Т.М. Физическое и математическое моделирование теплообменных характеристик каналов с хаотичными насадками / Т.М. Фарахов, Е.П. Афанасьев, А.Г. Лаптев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – № 1(41). – С. 51–59.

4. Салахова Э.И. Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 5. – С. 60–64.

Авторы:

Зинуров Вадим Эдуардович, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «КГЭУ». E-mail: vadd_93@mail.ru.

Абдуллина Азалия Айратовна, студентка кафедры «Экономика и организация производства» ФГБОУ ВО «КГЭУ». E-mail: azalkabdullina69826@gmail.com.

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ТЕПЛОНЫМ НАСОСОМ ОТ ОБРАТНОЙ ТЕПЛООВОЙ СЕТИ ТЭЦ

Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А. Туманов Ю.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Исследуется возможность использования теплового насоса для теплоснабжения с использованием в качестве низкопотенциального тепла обратной сетевой воды ТЭЦ. Проведен расчет изменения коэффициента преобразования теплового насоса при различных температурах обратной сетевой воды. Оценена технико-экономическая эффективность внедрения теплового насоса по сравнению с водогрейным котлом.*

***Ключевые слова:** обратная сетевая вода ТЭЦ, энергосбережение, тепловой насос, водогрейный котел, эффективность*

Одним из перспективных направлений экономии топливно-энергетических ресурсов и защиты окружающей среды от воздействия выбросов продуктов сгорания является использование низкотемпературных источников тепловой энергии для теплоснабжения зданий и сооружений с помощью тепловых насосов (ТН). Источниками низкопотенциальной теплоты для работы ТН являются тепло грунта или грунтовой воды, окружающий атмосферный воздух, тепло водоемов и рек, различные сточные воды, вторичные энергоресурсы различных производств, в том числе низкопотенциальная теплота ТЭЦ, включая обратную сетевую воду ТЭЦ[1-3]. ТН позволяет эффективно преобразовать низкотемпературное тепло до более высоких температур, приемлемых для целей отопления и горячего водоснабжения. При

этом обеспечивается высокая экологическая эффективность и уменьшаются потери тепловой энергии из-за приближения ТН непосредственно к потребителю. Дополнительным стимулом применения ТН согласно [4] является увеличение доли электрической энергии в конечном потреблении. Поэтому использование электрической энергии для привода компрессора ТН позволяет значительно повысить эффективность использования электрической энергии для теплоснабжения по сравнению с электродотом.

Теоретический коэффициент преобразования тепла μ_t ТН характеризует его энергетическую эффективность и определяется из выражения

$$\mu_t = Q_{\text{П}} / Q_{\text{К}},$$

где $Q_{\text{П}}$ – количество тепла, полученное потребителем; $Q_{\text{К}}$ – электрическая энергия, затраченная на привод компрессора.

Реальный коэффициент трансформации μ меньше теоретического из-за необратимых потерь и степени термодинамического несовершенства, который учитывается коэффициентом ε и согласно [5] изменяется в пределах 0,55–0,70.

$$\mu = \varepsilon \mu_t = \varepsilon \cdot T_{\text{к}} / (T_{\text{к}} - T_{\text{и}}),$$

где $\mu_t = T_{\text{к}} / (T_{\text{к}} - T_{\text{и}})$ – теоретический коэффициент преобразования цикла Карно; $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{и}}$ температуры в конденсаторе и испарителе ТН в Кельвинах, соответственно.

При этом значение $T_{\text{к}}$ не менее чем на 5°C должно быть выше температуры нагреваемого теплоносителя, а $T_{\text{и}}$ ниже на 5°C температуры конденсации пара в испарителе.

Очевидно, что для повышения эффективности преобразования ТН следует уменьшать перепад температур между $T_{\text{к}}$ – $T_{\text{и}}$ и поддерживать его постоянным в процессе работы ТН.

При подключении теплообменника испарителя ТН к обратному трубопроводу тепловой сети ТЭЦ коэффициент преобразования μ в значительной степени зависит от температуры воды в обратном трубопроводе, которая в соответствии с утвержденным температурным графиком увеличивается с понижением температуры окружающей среды. Теплоснабжение от Чебоксарской ТЭЦ-2 осуществляется по температурному графику 150/70°C со срезкой 115° и поэтому температура воды в обратном трубопроводе должна изменяться в диапазоне от 42°C до

58°C, но фактическое ее значение превышена на 5-10°C в зависимости от температуры наружного воздуха и изменяется в диапазоне 47-63°C.

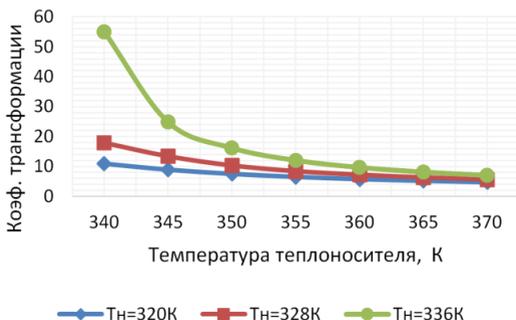


Рис. 1. Зависимость действительного коэффициента преобразования ТН от температуры теплоносителя при различных температурах воды (испарителя) в обратном трубопроводе

На рис. 1 приведен пример расчета изменения коэффициента трансформации μ от температуры теплоносителя в системе теплоснабжения при использовании в качестве низкопотенциального тепла обратного трубопровода тепловой сети с температурами воды 47, 55 и 63°C. При повышении температуры теплоносителя примерно на 20-25°C с помощью ТН, по сравнению с температурой воды в обратном трубопроводе, что достаточно для целей теплоснабжения, коэффициент трансформации изменяется в пределах 8-16. Это делает перспективным применение ТН по сравнению с другими источниками тепловой энергии, включая газовые котельные.

Расход электрической энергии на привод компрессора ТН можно существенно уменьшить за счет тепловой инерционности ограждающих конструкций зданий и двухтарифного счетчика электрической энергии с преимущественным потреблением использованием электроэнергии в периоды ночного провала нагрузки энергосистемы. В работах [12-14] установлено, что температура внутренней поверхности кирпичной стены толщиной порядка 0,5 м при резком похолодании (на 15°C) уличного воздуха остается неизменной в течение 16 часов, что достаточно для использования ночной дифференцированной оплаты за потребление электроэнергии.

Проведем оценку энергетической эффективности применения ТН по сравнению с водогрейным котлом по расходу условного топлива на производство единицы тепловой энергии, кг.у.т./ГДж. Удельный расход условного топлива при использовании водогрейного котла составляет

$$b_{y.t}^{BK} = 1000 / (\eta_k \cdot 29,3),$$

где η_k – КПД водогрейного котла; 29,3 МДж/кг – низшая теплота сгорания условного топлива.

На привод компрессора ТН расход условного топлива при использовании электрической энергии от ТЭЦ составит [8]

$$b_{y.t}^{TH} = 1000 / (\mu \cdot 29,3 \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{эс}),$$

где $\eta_{эл}$ – КПД тепловой ТЭЦ; $\eta_{эс}$ – КПД электрических сетей.

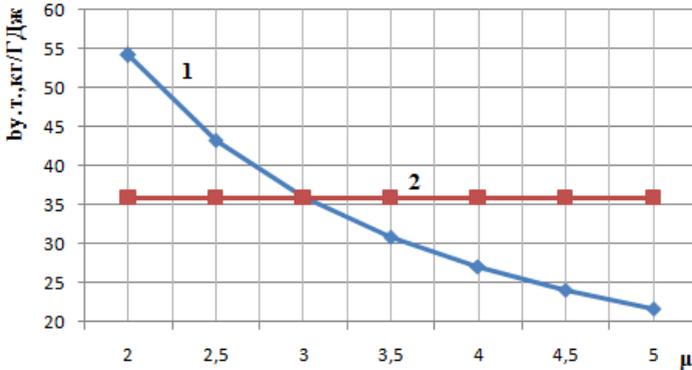


Рис. 2. Зависимость удельного расхода условного топлива ТН от коэффициента преобразования (кривая 1)

Результаты расчета при $\eta_{эл} = 0,35$ и $\eta_{эс} = 0,90$ приведены на рис. 2 (кривая 1) в зависимости от коэффициента трансформации μ . Для сравнения приведен также расход условного топлива для водогрейного котла (кривая 2) в виде прямой линии при $\eta_k = 0,95$. Из рассмотрения рисунка следует, что при $\mu = 3$ расходы условного топлива водогрейного котла и ТН на производство 1 ГДж тепловой энергии практически совпадают. При дальнейшем увеличении μ , например до 10, расход условного топлива на привод компрессора ТН становится намного меньше по сравнению с водогрейным котлом на газовом топливе.

Таким образом, организация теплоснабжения с применением ТН и дополнительным охлаждением обратной сетевой воды ТЭЦ позволяют:

- повысить эффективность работы ТЭЦ за счет увеличения электрической мощности теплофикационной турбины без дополнительных затрат топлива;
- обеспечить присоединение новых потребителей тепла к ТЭЦ на величину пропорциональной снижению температуры обратной сетевой воды при неизменном расходе сетевой воды и электроэнергии на ее перекачку;
- снизить потери тепловой энергии и теплоносителя при транспортировке сетевой воды по трубопроводам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трушевский С.Н. Анализ низкотемпературных источников тепловой энергии средней полосы России для тепловых насосов / С.Н. Трушевский // Вестник ВИЭСХ. – 2012. – №1. – С. 31–38.

2. Овсянник А.В. Перспективы применения теплонасосных технологий в теплофикационном комплексе города Гомеля / А.В. Овсянник, И.И. Мацко, О.Л. Рыхтер, С.О. Бобович // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2017. – №4. – С. 67–79.

3. Афанасьев В.В. Применение теплового насоса для отопления индивидуального жилого дома / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2020. С. 173–180.

4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. [Электрон. Ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 30.05.2022).

5. Гершкович В.Ф., Литовченко А.К. Оценка эффективности использования в тепловом насосе тепла из обратного трубопровода тепловой сети при теплоснабжении от ТЭЦ / В.Ф. Гершкович, А.К. Литовченко // Новости теплоснабжения. – 2011. – №1. – С. 35–38.

6. Тарасов В.А. Динамические тепловые характеристики ограждающих конструкций / В.А. Тарасова, А.Г. Калинин, В.В. Тарасова, В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №3. – С. 124–131.

7. V.A. Tarasov, V.V. Tarasova, V.V. Afanasyev, V.G. Kovalev, V.N. Orlov. Mathematical modeling of the forecast and standby heating

modes. Power engineering: research, equipment, technology.2019; 21(5-6):77-87. (In Russ). doi :10.30724/1998-9903-2019-21-5-6-77-87.

8. *Афанасьев В.В.* Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, Д.Г. Федоров // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 20–29.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1974 году физико-математический факультет Чувашского государственного университета. В 2004 году защищена докторская диссертация «Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами». E-mail: avvteo@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, декан факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1973 окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1982 защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Исследование электрических параметров многоэлектродных электрошлаковых печей». E-mail: esp21@mail.ru.

Краснов Евгений Вячеславович, магистрант факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары. E-mail: evgeni.krasnov.99@mail.ru.

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1972 году. В 1980 году защищена кандидатская диссертация «Аналитические исследования электрических полей и выбор схем питания и электрических параметров многоэлектродных установок». E-mail: vladimir_tarasov@inbox.ru.

Туманов Юрий Альбертович, старший преподаватель кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары. Окончил в 1982 году энергомашинностроительный факультет Московского энергетического института. E-mail: yutamanov1959@gmail.com.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А. Туманов Ю.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В работе исследуется влияние температуры обратной сетевой воды ТЭЦ на электрическую мощность паровых турбин типа ПТ и Т. Получены зависимости потери мощности и расхода условного топлива от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком.*

***Ключевые слова:** обратная сетевая вода, электрическая мощность турбоагрегата, расход условного топлива, эффективность.*

В условиях рыночной экономики и на фоне постоянного роста цен на углеводородное топливо актуальными являются технологии, направленные на повышение конкурентоспособности ТЭЦ на рынке производства, передачи электрической и тепловой энергии. Одним из перспективных способов повышения эффективности работы ТЭЦ является снижение температуры обратной сетевой воды, которая в большинстве ТЭЦ завышена до 10-15°C по сравнению с температурным графиком [1]. При этом тепловая мощность, расход и температура прямой сетевой воды поддерживаются на необходимом уровне по заданию диспетчера объединенной диспетчерской службы, в зависимости от температуры наружного воздуха. Согласно правилам технической эксплуатации ТЭЦ, тепловых энергоустановок и Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей в России температура прямой сетевой воды поддерживается на заданном уровне по усредненной температуре наружного воздуха за промежуток времени в пределах 12-24 ч, по заданию диспетчера тепловой сети. Допустимое отклонение температуры прямой сетевой воды не может быть более $\pm 3\%$ от утвержденного температурного графика.

Температура обратной сетевой воды для ТЭЦ является неуправляемым параметром и зависит от работы всей системы теплоснабжения: источника теплоснабжения, тепловых сетей и

потребителя тепловой энергии. При этом основное влияние на температуру обратной сетевой воды оказывает потребитель.

Основными причинами завышения температуры обратной сетевой воды у потребителя являются – загрязненная и изношенная система отопления, нарушение гидравлического режима тепловых сетей и системы отопления, реконструкция ограждающих конструкций зданий и сооружений с использованием высокоэффективных теплоизоляционных материалов, внедрение автоматического погодозависимого регулирования потребления тепла в тепловых пунктах зданий и сооружений [2, 3-5].

Повышение температуры обратной сетевой воды приводит к повышению давления в теплофикационных отборах турбины, что в свою очередь приводит к его нережимной работе, сопровождающийся разгрузкой турбоагрегата, как по выработке электроэнергии, так и по отпуску тепла.

Поэтому в типовых договорах теплоснабжения имеется раздел, где отмечается, что температура обратной сетевой воды, возвращаемая потребителем, не должна превышать утвержденный температурный график более чем на 3°C. При превышении этого значения потребитель дополнительно возмещает недоиспользованную тепловую энергию ΔQ , которая определяется из выражения

$$\Delta Q = G_2 [t_{2ф} - (t_{2н} + 3)] / 1000 ,$$

где G_2 – массовый расход теплоносителя по обратному трубопроводу, т/ч; $t_{2ф}$, $t_{2н}$, – фактическое и нормативное значение температуры обратной сетевой воды, кДж/кг °С.

Таким образом, эффективность работы ТЭЦ по тепловому графику в значительной степени зависит от температуры обратной сетевой воды, которая влияет на выработку электрической энергии, отпуск тепла и расход топлива. С учетом того, что в большинстве ТЭЦ в России применяются паровые турбины типа Т и ПТ проведем оценку влияния температуры обратной сетевой воды на основные технико-экономические показатели ТЭЦ с турбинами ПТ- 135/165- 130/15 и Т-110/120 -130.

Турбина ПТ-135/165-130/15 – теплофикационная паровая турбина с одним регулируемым производственным и двумя теп-

лофикационными отборами пара предназначена для нужд производства, отопления и горячего водоснабжения.

Мощность электрической энергии N_3 , вырабатываемой паротурбинной установкой типа ПТ, можно оценить из выражения [6]:

$$N_3 = [D_0 (h_0 - h_p) + (D_0 - D_p) (h_p - h_n) + (D_0 - D_p - D_n) (h_n - h_t) + (D_0 - D_p - D_n - D_t) (h_t - h_k)] \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{эм},$$

где D_0, D_p, D_n, D_t – расходы свежего пара, регенеративного, производственного и теплофикационного отборов, соответственно, кг/с; h_0, h_p, h_n, h_t, h_k – энтальпии свежего пара, регенеративного (среднего), производственного и теплофикационного отборов, отработанного пара в конденсаторе турбины, соответственно, кДж/кг; η_{oi} – внутренний относительный КПД турбины; $\eta_{эм}$ – электромеханический КПД генератора.

Проведем оценку электрической мощности N_3 в отопительный период для типичного режима работы турбины ПТ-135/165-130/15 в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком. Для расчета примем $D_0 = 180$ кг/с, $D_p = 25$ кг/с, $D_n = 94$ кг/с, $D_t = 33$ кг/с, $\eta_{oi} = 0,82$, $\eta_{эм} = 0,98$. График изменения электрической мощности турбоагрегата в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком приведен на рис. 1. Из рисунка видно, что превышение температуры обратной сетевой воды на 6 °С, характерной для работы тепловых сетей большинства ТЭЦ (см. рис. 2), приводит, для принятых значений, к потере электрической мощности турбоагрегата на 1,3 МВт из-за повышения давления в теплофикационных отборах турбины.

Теплофикационная турбина Т-110/120-130. Паровая турбина типа Т-110/120-130 с конденсационной установкой и двумя отопительными отборами пара предназначена для привода генератора переменного тока мощностью 120 МВт и подогрева сетевой воды.

Мощность электрической энергии N_3 , вырабатываемый турбоагрегатом типа Т, можно оценить из выражения [6]:

$$N_3 = [D_0 \cdot (h_0 - h_p) + (D_0 - D_p) \cdot (h_p - h_m) + (D_0 - D_p - D_m) \cdot (h_m - h_k)] \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{эм}.$$

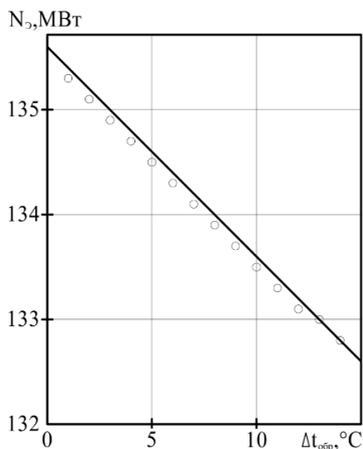


Рис. 1. Изменение электрической мощности турбоагрегата ПТ-135/165- 130/15 в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком

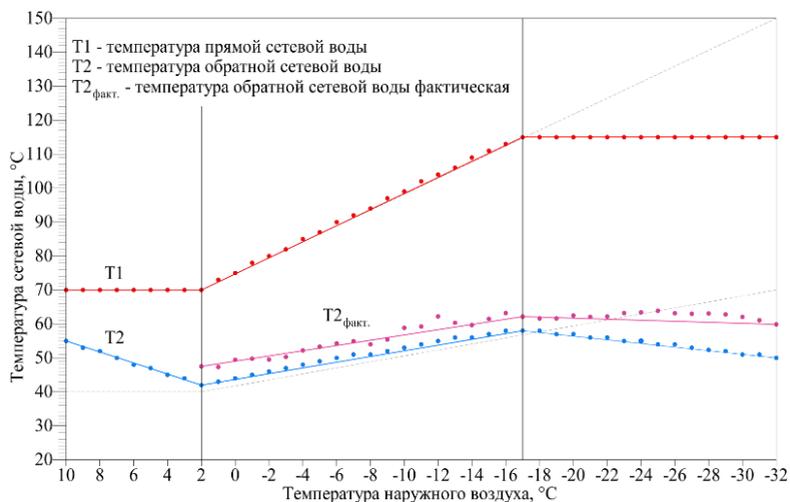


Рис. 2. Отопительный график температур 150/70°C «со срезкой» 115°C Чебоксарской ТЭЦ-2 на отопительный сезон 2020-2021 гг

Расчет изменения электрической мощности N , при $D_0 = 134$ кг/с, $D_p = 19$ кг/с, $D_T = 88$ кг/с, $\eta_{oi} = 0,84$, $\eta_{эм} = 0,98$ в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над темпе-

ратурным графиком приведен на рис. 3. Из рисунка видно, что превышение температуры обратной сетевой воды, например на 10°C , приводит, для принятых значений, к потере электрической мощности турбоагрегата на 1,6 МВт.

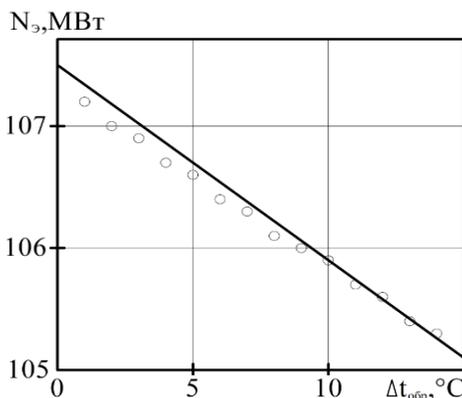


Рис. 3. Изменение электрической мощности турбоагрегата Т-110/120-130-5 в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком

Для удобства оценки технико-экономических показателей турбин типа ПТ и Т на рис. 4 приведен относительные изменения электрической мощности и удельного расхода топлива в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком. В качестве нормирующей величины взяты мощность и расход условного топлива для нормативного значения температуры обратной сетевой воды. Из рисунка легко определить потерю мощности турбин типа ПТ и Т и перерасход условного топлива от превышения температуры обратной сетевой воды от нормативного значения в диапазоне температур $0\text{--}15^{\circ}\text{C}$, характерной для большинства ТЭЦ.

Из приведенных результатов следует, что для повышения эффективности работы ТЭЦ необходимо снижать температуру обратной сетевой воды до нормативных значений. Это можно осуществить непосредственно на ТЭЦ, например, за счет нагрева сырой воды от обратного трубопровода с помощью водоводяного теплообменника вместо пароводяного, охлаждения кон-

денсаторов одной или нескольких турбин обратной сетевой водой с последующей ее подачей в сетевые подогреватели, применение тепловых насосов в составе ТЭЦ для утилизации низкопотенциальных источников теплоты [1, 7-9].

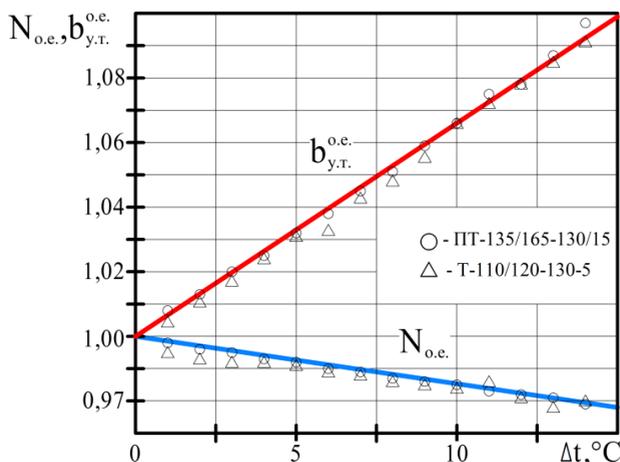


Рис. 4. Относительные изменения электрической мощности и удельного расхода топлива в зависимости от превышения температуры обратной сетевой воды над температурным графиком

Однако вышеперечисленные мероприятия хотя и позволяют повысить эффективность производства электрической и тепловой энергии непосредственно на ТЭЦ, но не позволяют повысить эффективность транспортировки и распределения тепловой энергии у потребителя.

Наиболее эффективны технологии, связанные снижением температуры обратной сетевой воды, возвращаемой потребителями на ТЭЦ. Это может быть осуществлено непосредственно у потребителя за счет подключения к обратной сетевой воде водяных теплообменников для нагрева водопроводной воды, поступающей на холодное водоснабжение, низкопотенциальных систем отопления во вновь вводимых или реконструируемых зданиях и сооружениях (например, устройство теплых полов), применение тепловых насосов и т.д.

Таким образом, снижение температуры обратной сетевой воды непосредственно у потребителя наряду с увеличением выработки электрической энергии на тепловом потреблении и экономией топлива на ТЭЦ, позволяет обеспечить присоединение новых потребителей тепловой энергии к ТЭЦ без увеличения расхода теплоносителя, температуры прямой сетевой воды и расхода электрической энергии на ее транспортировку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губин В.Е. Совершенствование схем отпуски тепла от ТЭЦ с учетом влияния внешних факторов / В.Е. Губин, А.С. Матвеев // Известия ТПУ – 2005. – № 5 – С. 148–151.
2. Киселев Н.Н. Факторы, влияющие на температуру обратной сетевой воды / Новости теплоснабжения. 2017. №10. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru/nt/206>. (дата обращения: 20.05.2022).
3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательский дом МЭИ, – 2006. – 472 с.
4. Тарасов В.А. Адаптивное управление режимом теплоснабжения здания с помощью автоматизированного теплового пункта/ В.А. Тарасов, В.В. Афанасьев, В.Г.Ковалев, В.А. Тарасова, А.Г. Калинин // Вестник Чувацкого университета, – 2016. – № 3. – С. 117–123.
5. Тарасова В.В. Исследование динамических характеристик систем автоматического регулирования от отопления здания / В.В. Тарасова, В.А. Тарасов, А.Г. Калинин, В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев // Вестник Чувацкого университета, – 2015, – №3. – С. 122–128.
6. Костюк А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций. учеб. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.В. Костюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 516 с.
7. Роцин Н.Н. Анализ экономичности схемы подогрева сырой воды обратной сетевой водой на тепловых электрических станциях/ Н.Н. Роцин, П.В. Кальницкий, Л.С. Нифонтова // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11. С. 109–112.
8. Афанасьев В.В. О возможности повышения эффективности работы ТЭЦ за счет использования теплового насоса / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, Е.В. Краснов, В.А. Тарасов, Ю.А. Туманов // Промышленная энергетика – 2022. – № 8 – С. 43–48.
9. Афанасьев В.В. Повышение эффективности работы ТЭЦ за счет снижения температуры обратной сетевой воды / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, Е.В. Краснов, В.А. Тарасов, Ю.А. Туманов // Проблемы

и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та. – 2021. – С. 146–156.

Авторы:

Афанасьев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1974 году физико-математический факультет Чувашского государственного университета. В 2004 году защищена докторская диссертация «Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами». E-mail: avvteo@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, декан факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1973 окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. В 1982 защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Исследование электрических параметров многоэлектродных электрошлаковых печей». E-mail: espp21@mail.ru.

Краснов Евгений Вячеславович магистрант факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары. E-mail: evgeni.krasnov.99@mail.ru.

Тарасов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета в 1972 году. В 1980 году защищена кандидатская диссертация «Аналитические исследования электрических полей и выбор схем питания и электрических параметров многоэлектродных установок». E-mail: vladimir_tarasov@inbox.ru.

Туманов Юрий Альбертович, старший преподаватель кафедры теплоэнергетических установок Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары. Окончил в 1982 году энергомашиностроительный факультет Московского энергетического института. E-mail: yutumanov1959@gmail.com.

III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УТОЧНЕНИЮ РАСЧЕТНОГО КОНТАКТНОГО НАЖАТИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Иванов И.П., Петров О.А., Самуилов Д.В., АО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье даны рекомендации по применению основной теоретической зависимости для расчета сил контактного нажатия коммутационных аппаратов. Выведен поправочный коэффициент на основе опытных данных для сильноточных электромагнитных контакторов. Результаты поверочных расчетов по уточненной зависимости отличаются от опытных данных не более 5 %.*

***Ключевые слова:** коммутационный аппарат, контактор, рекомендации, проектирование, расчет, контактное нажатие, опытные данные.*

Сила контактного нажатия P_k коммутационного аппарата (КА) может быть определена по теоретическим зависимостям или на основе опытных данных [1, 2, 3, 4 и др.].

При расчетах по теоретическим зависимостям исходные значения входящих в них параметров выбираются практически произвольно из интервала, соотношение граничных значений которого для некоторых параметров может быть трехкратным. Значения величины P_k по опытным данным также находятся в широком интервале значений. Результаты расчетов величины P_k по известным соотношениям, в особенности – при больших значениях номинального тока, могут в разы отличаться от фактических значений применяемых на практике аппаратов. Все это значительно затрудняет пользование существующих подходов к определению значения величины P_k .

Сутью настоящей работы является уточнение известной теоретической зависимости по определению силы контактного

нажатия путем введения поправочных коэффициентов применительно к конкретному виду КА.

При проектировании сильноточных КА (контакторов, переключателей, автоматических выключателей и т.п.) для определения величины P_k часто, например, в [2, 3, 5], рекомендуется следующая зависимость:

$$P_k = \frac{I_n^2 A_L \pi H_V}{16\lambda^2 [\arccos(\Theta_{к.д}/\Theta_a)]^2}. \quad (1)$$

Здесь: I_n – номинальный ток аппарата, А; A_L – число Лоренца, $(В/К)^2$; H_V – твердость материала контакта, $Н/м^2$; λ – удельная теплопроводность контакта, $Вт/(м \cdot К)$; $\Theta_{к.д}$ – температура контакта, К; Θ_a – температура контактной площадки, К.

Зависимость (1) получена [1] из рассмотрения модели в виде одной контактной площадки (зоны) между двумя одинаковыми проводниками с неограниченными размерами (рис. 1, а), в которой эквипотенциальные и изотермические поверхности электрического и температурного полей представлены как эллипсоиды вращения.

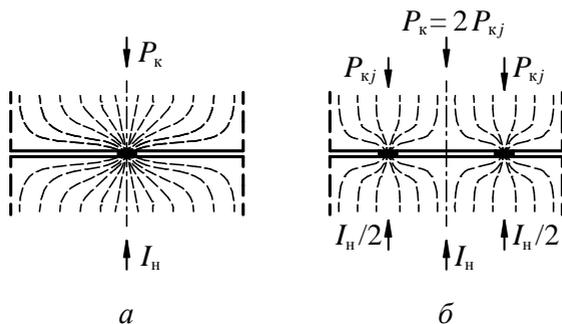


Рис. 1. Модели контактов по определению силы контактного нажатия P_k с одной (а) и двумя (б) точками (зонами) соприкосновения

В действительности контакты представляют собой пару контакт-деталей, которые имеют определенные размеры и разные геометрические формы соприкасающихся поверхностей: в

виде сферы, цилиндра или плоскости. Контактную зону в [6] рассматривают как группу (кластер) токопроводящих пятен, которые могут меняться по составу, форме и размерам в зависимости от условий внешней среды, режимов коммутации и пропускания тока.

Вполне очевидно, что процессы, происходящие в реальных контактах, значительно сложнее, чем описываемые формулой (1). Однако формула (1) устанавливает в простой форме математическую связь между главными конструктивными, электрическими и эксплуатационными параметрами контакта (аппарата), удобной при проектных расчетах. Поэтому для получения результатов по теоретической зависимости, приближающихся к реальным условиям, представляется целесообразным выработать обоснованные рекомендации по введению в нее поправочного коэффициента применительно к конкретному виду контакта или аппарата. Так, в [2] и [3] предлагается при определении величины P_k в линейном контакте, образованном цилиндрической поверхностью по крайней мере одной контакт-детали, увеличить результаты расчета по формуле (1) в 2 раза, а при поверхностном контакте – в 3 раза.

Однако, из рассмотрения модели контакта с двумя зонами соприкосновения (рис. 1, б), характерного для линейного контакта, следует, что через каждую зону контактирования протекает только половина номинального тока. В этом случае сила контактного нажатия в каждой зоне $P'_{к.л}$ определяется относительно номинального тока на основе формулы (1) как $P'_{к.л} = 2K_k \cdot (I_n/2)^2 = K_k I_n^2 / 2$, где K_k – составная часть формулы (1) за исключением величины I_n . Если увеличить значение $P'_{к.л}$ вдвое, то сила контактного нажатия $P_{к.л}$ будет равна силе точечного контакта, определенной по исходной формуле (1), а не вдвое больше, как предлагают в [2] и [3]. Аналогичное наблюдается и в плоскостном контакте.

Таким образом, можно полагать, что формула (1) справедлива для контактов с любой формой поверхности без поправочных коэффициентов «2» и «3», по крайней мере, в отношении сильноточных КА. В них контактирующие площадки после незначительных коммутаций, сопровождаемых дугowymi процес-

сами, представляют собой, как правило, одну обширную зону, состоящую из множества токопроводящих пятен и которую можно принять, как это предложено в [1], за одну точку.

Наиболее достоверные результаты расчетов по формуле (1) можно получить при введении в нее уточняющих коэффициентов на основе сравнительной оценки с опытными данными для конкретных видов КА.

На рис. 2 приведены в качестве примера зависимости силы контактного нажатия от номинального тока $P_k = f(I_n)$, полученные расчетным путем по формуле (1), а также аналогичные зависимости по опытными данным нескольких серий электромагнитных контакторов.

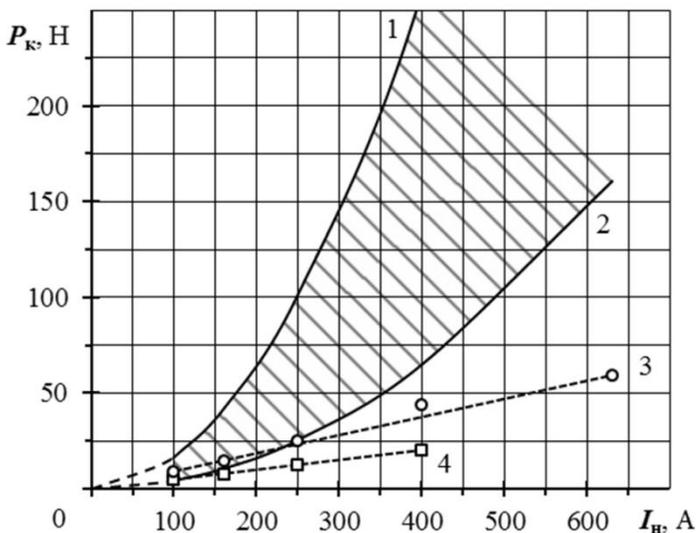


Рис. 2. Зависимости сил контактного нажатия $P_k = f(I_n)$ для электромагнитных контакторов, полученные расчетным путем при предельных значениях температур (1, 2) и по опытными данным (3, 4):

- 1 – для $\Theta_{к.д} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\Theta = 5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2 – для $\Theta_{к.д} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\Theta = 15 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 3 – для контакторов серий КЭ16, КЭ16П, КСЭ;
- 4 – для контакторов серии КНЕ

Расчеты выполнены при следующих исходных данных:

1) число Лоренца A_L для контактных материалов на основе серебра принимается равным $A_L = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ (В/К)}^2$ и не зависящим от температуры;

2) температура контакт-детали $\Theta_{к.д}$ зависит от материала и принимается равной допустимой температуре $\Theta_{доп}$ (в сильно-точных контакторах применяются в основном композиционные материалы на основе серебра (85%) и окиси кадмия (15%); величина $\Theta_{доп}$ согласно рекомендации [7] нормируется исходя из минимальной температуры рекристаллизации $\Theta_{рек}$, превышение которой приводит к изменению физических и механических свойств материала, и определяемой как $\Theta_{рек} = \alpha \Theta_{пл}$, где $\Theta_{пл}$ – температура плавления, α – коэффициент (для серебра $\alpha = 0,34 \div 0,38$). Таким образом, для расчетов можно принять:

$$\Theta_{к.д} = \Theta_{доп} = (0,34 \div 0,38) \cdot (960 + 273) - 273 \approx (150 \div 200) \text{ } ^\circ\text{C};$$

3) температура контактной площадки Θ_a принимается равной $\Theta_a = \Theta_{доп} + \Delta\Theta$, где $\Delta\Theta = (5 \div 15) \text{ } ^\circ\text{C}$;

4) твердость материала по Виккерсу для композиционного материала КМК-А10м согласно техническим условиям $H_V = (8,0 \div 10,5) \cdot 10^8 \text{ Н/М}^2$ и с увеличением температуры снижается по соотношению [5]:

$$H'_V = H_V \left(1 - \sqrt[3]{\left(\frac{\Theta_{к.д}}{\Theta_{пл}} \right)^2} \right) / \left(1 - \sqrt[3]{\left(\frac{\Theta_n}{\Theta_{пл}} \right)^2} \right),$$

где Θ_n – температура, при которой нормируется твердость H_V .

Так, для $\Theta_{к.д} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\Theta_{к.д} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ твердость H'_V составит $0,83H_V$ и $0,77H_V$ соответственно;

5) удельная теплопроводность λ с увеличением величины $\Theta_{к.д}$ в пределах от $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $\Theta_{доп}$ изменяется незначительно (не более 2 %) и принимается равной $\lambda = 325 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Расчетные зависимости 1 и 2 (рис. 2) представляют собой квадратичные функции и отражают предельные значения величины P_k при крайних значениях входящих в формулу (1) параметров. При промежуточных значениях этих параметров можно получить любые значения P_k , находящиеся в заштрихованной зоне между кривыми 1 и 2. Что характерно – минимальные значения P_k могут отличаться от максимальных до 4 раз.

Графические зависимости 3 и 4 построены по фактическим данным некоторых типопредставителей электромагнитных контакторов: кривая 3 – по технической документации на контакторы серий КЭ16, КЭ16П и КСЭ производства АО «ВНИИР-Прогресс»; кривая 4 – по данным [8] на контакторы серии КНЕ. Эти зависимости можно представить в виде прямолинейных функций.

Таким образом, из сопоставления теоретических зависимостей величины P_k с опытными данными следует:

- наиболее близкие теоретические значения к опытным данным получаются при температуре $\Theta_{к.д} = 150\text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta\Theta = 15\text{ }^\circ\text{C}$ в пределах $I_n = (100\div 250)\text{ A}$;

- существенные расхождения расчетных и опытных значений P_k наблюдаются при $\Theta_{к.д} = 200\text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta\Theta = 5\text{ }^\circ\text{C}$ во всем диапазоне рассматриваемых значений номинального тока I_n .

На основании этого, при пользовании теоретической формулой (1) для расчета силы контактного нажатия P_k в сильноточных электромагнитных контакторах предлагается ввести в нее поправочный коэффициент $K_{оп}$, не зависящий от формы контактной поверхности:

$$P_k = K_{оп} \cdot P'_k, \quad (2)$$

где P'_k – сила, определяемая по формуле (1) при $\Theta_{к.д} = 150\text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta\Theta = 15\text{ }^\circ\text{C}$; $K_{оп} = (125\div 230) / I_n$.

Численные значения коэффициента $K_{оп}$ зависят от исполнения контактора и применяемых в них контактных материалов. Меньшие значения коэффициента $K_{оп}$ применяются для контакторов, работающих в легких режимах, большие – для контакторов, работающих в тяжелых режимах. Так, например, для контакторов серии КНЕ $K_{оп} = 125 / I_n$, для контакторов серий КЭ16, КЭ16П, КСЭ $K_{оп} = 230 / I_n$.

Результаты поверочных расчетов по уточненной формуле (2) отличаются от опытных данных не более 5 %.

Аналогичным образом, как и для электромагнитных контакторов, определяются численные значения коэффициента $K_{оп}$ для автоматических выключателей и других сильноточных КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Залесский А.М.* Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: «Энергия», Ленинградское отделение, 1967. – 380 с.

2. *Сахаров П.В.* Проектирование электрических аппаратов (общие вопросы проектирования): учебное пособие для студентов электротехнических вузов / П.В. Сахаров. – М.: «Энергия», 1971. – 500 с.

3. *Сипайлова Н.Ю.* Вопросы проектирования электрических аппаратов: учебное пособие / Н.Ю. Сипайлова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 168 с.

4. *Таев И.С.* Расчет электромагнитных коммутационных реле и контакторов / И.С. Таев. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 79 с.

5. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов [и др.]; под редакцией В.В. Афанасьева. – Л.: «Энергоатомиздат», 1988. – 384 с.

6. *Мышкин Н.К.* Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончин, М. Браунович. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 560 с.

7. ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов.

8. Контактные электромагнитные специальные. ТС-07. Аппараты низкого напряжения. – М.: Информэлектро, 1981. – 88 с.

Авторы:

Иванов Иван Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс». В 1978 г. закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 1978 г. защитил диссертацию по теме «Исследование и расчет магнитных систем герконов повышенной мощности». E-mail: irivanov@vniir.ru.

Петров Олег Александрович, начальник отдела низковольтной аппаратуры управления и защиты, АО «ВНИИР-Прогресс». В 1997 г. закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: petrov06@vniir.ru.

Самуилов Дмитрий Владимирович, научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс». В 2016 г. закончил факультет энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: dsamuilov@vniir.ru.

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ТРЕХУРОВНЕВОГО КОНВЕРТОРА

Быков К.В., Павлов Ю.В., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Лазарева Н.М., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматривается DC-DC преобразователь для питания собственных нужд станций и подстанций, приводится кривая разгона тока нагрузки, определяется математическая модель в виде передаточной функции.*

***Ключевые слова:** трехуровневый конвертор, имитационное моделирование в Simulink, кривая разгона, передаточная функция.*

Конверторы, выполненные по трехуровневой схеме (рис. 1), применяются в источниках питания, работающих на высокой частоте переключения силовых транзисторов, когда важным становится снижение динамических потерь, которое может быть достигнуто за счет коммутации ключей при нуле тока (ZCS) и нуле напряжения (ZVS) [1–4].

Обеспечение режима мягкого переключения транзисторов, меньшие перенапряжения и как следствие использование более низковольтных ключей, имеющих преимущество по быстродействию и напряжению насыщения, позволяют обеспечить высокий КПД источника питания.

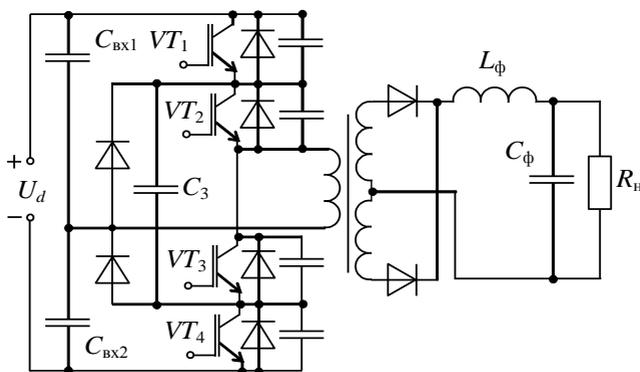


Рис. 1. Трехуровневый конвертор

В ООО НПП ЭКРА разработан конвертор, выполняющий преобразование постоянного напряжения 536 В в постоянное 48 В и обеспечивающий в нагрузке ток 120 А при частоте коммутации MOSFET транзисторов инвертора с частотой 100 кГц. При имитационном моделировании режимов работы преобразователя был получен КПД более 92 % [2].

Для регулирования параметров электрического режима необходимо разработать замкнутую систему управления. Расчет параметров регулятора можно выполнить например корневым методом на основе передаточной функции конвертора $W(p)$ [5]. В свою очередь передаточную функцию можно определить по кривой разгона – нормированном переходном процессе в результате скачкообразного возмущения. По кривой разгона нетрудно получить и частотные характеристики конвертора: АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ [6].

Кривая разгона преобразователя по току нагрузки, полученная в результате имитационного моделирования в Simulink Matlab [7], приведена на рис. 2, амплитудно-фазовая характеристика, рассчитанная на ее основе, показана на рис. 3.

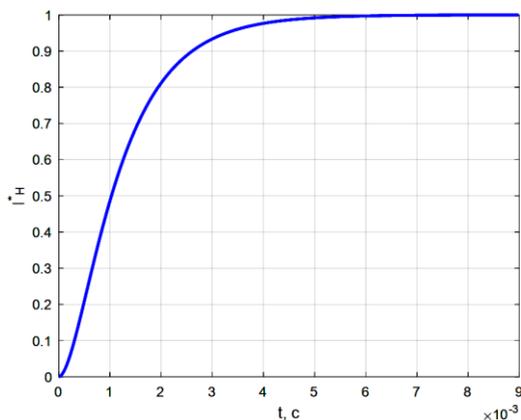


Рис. 2. Кривая разгона тока нагрузки

По виду кривой разгона и частотной характеристике можно предположить, что конвертор по току нагрузки в номинальном режиме может быть представлен апериодическим звеном второго порядка

$$W(p) = \frac{K}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} = \frac{K}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}, \quad (1)$$

где $K = \frac{I_{н.кон} - I_{н.нач}}{U_{у.кон} - U_{у.нач}} \frac{U_{у.кон}}{I_{н.кон}} = \frac{120,4 - 96,14}{3,95 - 3,15} \frac{3,95}{120,4} = 0,99$ – коэффициент

передачи конвертора по току нагрузки; $I_{н.кон}$, $I_{н.нач}$ – конечное и начальное значения тока нагрузки соответственно; $U_{у.кон}$, $U_{у.нач}$ – конечное и начальное значения напряжения управления соответственно.

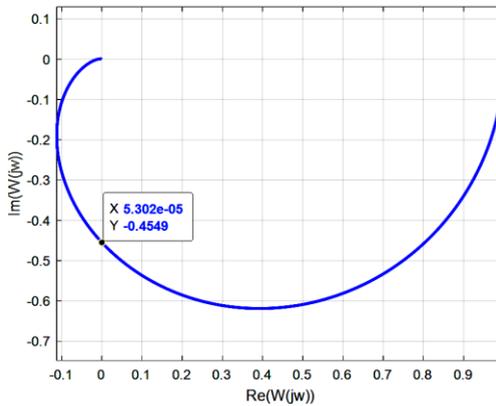


Рис. 3. АФЧХ конвертора по току нагрузки

Для определения динамических параметров T_3 и T_4 или T_3 и T_4 звена (1) используем АФЧХ. Определим координаты точки пересечения характеристики с осью ординат (рис. 3). Получим,

$$T_2 = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{1699} = 5,8858 \cdot 10^{-4} \text{ с,}$$

$$T_1 = \frac{T_2}{-V_0} = \frac{5,8858 \cdot 10^{-4}}{0,4549} = 1,2939 \cdot 10^{-3} \text{ с,}$$

где $V_0 = -0,4549$ - ордината АФЧХ при $\omega = \omega_0 = 1699$ рад/с.

Постоянные времени T_3 и T_4 в (1) выражаются через T_1 и T_2 следующим образом:

$$T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}.$$

Для нашего случая будем иметь

$$T_3 = \frac{1,2939 \cdot 10^{-3}}{2} + \sqrt{\frac{(1,2939 \cdot 10^{-3})^2}{4} - (5,8858 \cdot 10^{-4})^2} = 9,1544 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$T_4 = \frac{1,2939 \cdot 10^{-3}}{2} - \sqrt{\frac{(1,2939 \cdot 10^{-3})^2}{4} - (5,8858 \cdot 10^{-4})^2} = 3,7843 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Для проверки достоверности идентификации параметров передаточной функции выполним вычислительный эксперимент и сравним кривую разгона конвертора по току нагрузки с переходной характеристикой звена (1). В масштабе, принятом на рис. 4, кривые совпадают. Следовательно трехуровневый конвертор конвертор (рис. 1) по току нагрузки можно моделировать передаточной функцией

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{1}{(3,4643 \cdot 10^{-7} p^2 + 1,2939 \cdot 10^{-3} p + 1)} = \\ &= \frac{1}{(9,1544 \cdot 10^{-4} p + 1)(3,7843 \cdot 10^{-4} p + 1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

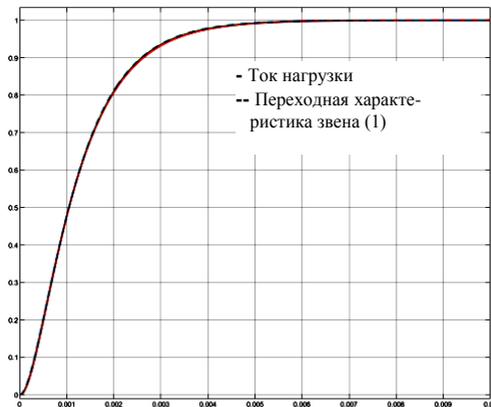


Рис. 4. Аппроксимация кривой разгона конвертора по току нагрузки

Заключение

Трехуровневый конвертор по току нагрузки может быть моделирован апериодическим звеном второго порядка. Параметры передаточной функции преобразователя комфортно определять по его кривой разгона. По кривой разгона можно рассчитать и частотные характеристики конвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаков М.С.* Трехуровневый преобразователь, работающий с переключением при нуле напряжения // Практическая силовая электроника, 2007. № 26. С. 15–20.

2. *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Трехуровневый конвертор для питания собственных нужд станций и подстанций // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары, Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 111–115.

3. *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Трехуровневый транзисторный преобразователь с питанием от трехфазной сети // САПР и моделирование в современной электронике: Сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, Изд-во БГТУ, 2020. С. 341–345 (DOI: 10.51932/9785907271739_341).

4. *Колпаков А, Стаудт И.* Трехуровневые инверторы: теория и практика // Силовая электроника. 2014. № 5. С. 42–48.

5. Мостовой корректор коэффициента мощности / К.В. Быков [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 189–194.

6. *Лазарева Н.М.* Построение частотных характеристик устройства промышленной электроники по его разгонной переходной характеристике. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022614335, 18.03.2022. Заявка № 2022613412 от 10.03.2022.

7. *Лазарева Н.М., Яров В.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. 498 с.

Авторы:

Быков Константин Владимирович, заместитель заведующего отделом НКУ ООО НПП «ЭКРА», окончил Чувашский госуниверситет в 1999 году. E-mail: bykov_kv@ekra.ru.

Лазарева Надежда Михайловна, доцент кафедры промышленной электроники ЧувГУ им. И.Н.Ульянова, кандидат технических наук,

доцент, окончила факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧувГУ им. И.Н.Ульянова в 1981 году, в 1997 году защитила диссертацию на тему «Алгоритмы структурной компрессии цифровых осциллограмм сигналов электроэнергетических систем». E-mail: lana21lana21@mail.ru.

Павлов Юрий Валерианович, руководитель направления модульных ЗПУ отдела НКУ ООО НПП «ЭКРА», окончил Чувашский госуниверситет в 1992 году. E-mail: pavlov_yv@ekra.ru.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЗАО «ЧЕБОКСАРСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «СЕСПЕЛЬ»

**Андреев В.А., Андреева Т.В., Ильин С.А., Семенов Л.А.,
Калинин А.Г.,** Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Статья отражает результаты этапа работ по проекту «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом», где описано инженерное решение по стендовым испытаниям образцов тяговых электродвигателей, производство которых локализуется в Чувашии.*

***Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, порошковый тормоз, измерение момента, моделирование в реальном времени.*

С 2021 года Чувашский госуниверситет реализует комплексный проект по теме: «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» (далее «Проект»). Соисполнителем Проекта выступает МГТУ им. Н.Э. Баумана, индустриальным партнером – ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». С весны 2022 года работы по Проекту дополнительно включают в себя локализацию производства тяговых электродвигателей (ТЭД) для фронтального погрузчика и тяговых инверторов для ТЭД. В связи с этим потребовалось наличие стенда для прототипирования, исследований и аттестации дополнительной продукции на территории индустриального партнера.

Согласно графику работ по Проекту в 2022 году выполняется опытно-конструкторская работа по разработке образца ТЭД для каждого колеса с сопряжением через колесный редуктор, одностадийное проектирование испытательного стенда с литерой «Р», его сборка и ввод в эксплуатацию.

Тягово-динамическая характеристика опытного ТЭД, обеспечивающая движение фронтального погрузчика во всех режимах, приведена на рис. 1, где пунктиром сделаны акценты для рабочего цикла (номинальный режим) и транспортного хода (высокоскоростной режим). Момент перегрузки в рабочем цикле двухкратный относительно номинального момента. Тип двигателя вентильный с постоянными магнитами. Число фаз – 6. Рабочее напряжение в номинальном режиме 60В (450А), на максимальной частоте вращения – 500В (50А). Ток кратковременной перегрузки 900А (скважность 2).

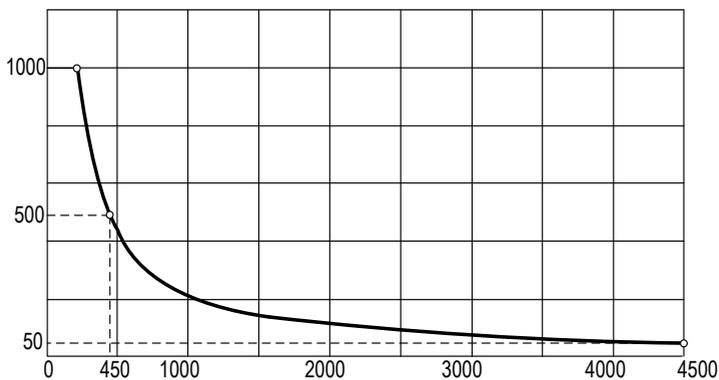


Рис. 1. Тягово-динамическая характеристика образца ТЭД

Стенд должен быть имитатором нагрузки на валу для образцов ТЭД и прототипом инвертора для решения следующих задач:

- изучение/опробование фактической модели сигналов и команд управления опытных образцов ТЭД, опробование функциональных свойств в спецификации сигналов образцов импортных ТЭД;

- исследование характеристик тока и момента двигателя в функции частоты вращения в двигательном/генераторном режимах, реверсном и рекуперативном режиме;

– исследование переходных процессов на всех стадиях преобразования электроэнергии от генератора и накопителя аккумуляторного типа.

Коллективом авторов было принято решение о разработке стенда по схеме «Генератор»-«Двигатель», где между ними добавлены цифровой датчик момента и частоты вращения М40-1.2к (ООО «Тилком», респ. Беларусь) [1], и порошок тормоз ПТ-100М1 (3-д Станкоконструкция, Москва, Россия), выполняющий функцию вариатора момента и коммутируемой муфты (рис. 2).

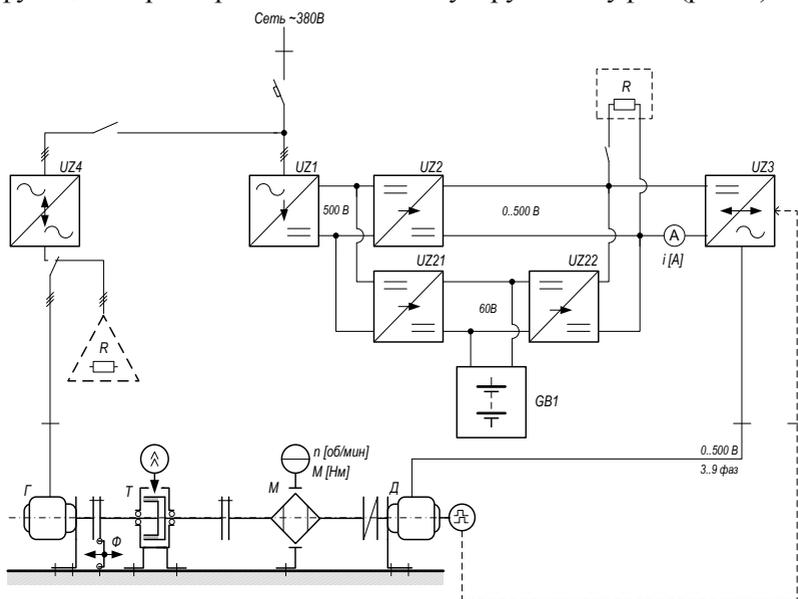


Рис. 2. Функциональная схема стенда ТЭД, где: Γ – нагрузочный двигатель (генератор); T – порошок тормоз; M – торсионный датчик момента и частоты; D – образец ТЭД; Φ – фиксатор вращения вторичного вала T ; $GB1$ – аккумуляторная сборка; $UZ1$ – регулируемый стабилизированного напряжения до 500 В; $UZ2$ – импульсный понижающий силовой преобразователь; $UZ21$ – импульсный понижающий зарядный преобразователь; $UZ22$ – импульсный силовой преобразователь, ведомый контуром $UZ2$; $UZ3$ – многофазный мостовой инвертор (до 9 фаз); $UZ4$ – обратимый преобразователь частоты (рекуператор); R – лабораторные керамические сопротивления

В качестве стендового генератора использован вентильный двигатель ВМЭД-01 (АО «ЧЭАЗ», Россия), обеспечивающий момент нагрузки до 2 кНм и ограниченный максимальной частотой вращения – 3000 об/мин, где по рис. 1 считаем допустимой линейную аппроксимацию момента на частотах от 3000 об/мин до 4500 об/мин.

Система «Генератор»-«Двигатель» является гибкой и эффективной схемой имитации нагрузки на валу образца ТЭД, однако, рекуперация энергии в сеть на низких скоростях неустойчива и приводит к сильным пульсациям формируемого момента нагрузки на частотах вращения ниже 700 об/мин для ВМЭД-01. Этот недостаток покрывает рабочий диапазон выбранного порошкового тормоза со шкалой момента до 1000 Нм.

Порошковый тормоз используется в промышленности как регулятор и индикатор момента, а так же при аттестации зубчатых передач в станкостроении как управляемая муфта на валу образцов. Принцип работы основан на управлении количеством смеси магнитного порошка во фрикционных пластинах за счет внешнего источника тока. Показания момента доступны на стрелочном индикаторе часового типа на тарированной скобе снаружи [2]. Основной недостаток – длительно допустимая частота вращения не более 750 об/мин, кратковременная не более 2000 об/мин, а так же потребность в непрерывном охлаждении смеси оборотной водой, поскольку рассеиваемая механическая мощность достигает 24 кВт.

Управление стендом предполагается от ПАК Matlab-Simulink Speedgoat, признанным мировым сообществом как универсальное средство для прототипирования систем управления, как быстродействующая ЦАП и АЦП, функционально повторяющая технологию RTDS, применяемую в релейной защите и автоматике. Оператор стенда находится на любой АРМ в сети предприятия, которая является клиентом ПАК Matlab Speedgoat [4].

Конструкционно стендовое решение предполагает собираемую в любом сочетании схему «Генератор»-«Тормоз»-«Двигатель» и имеет вид, показанный на рис. 3.

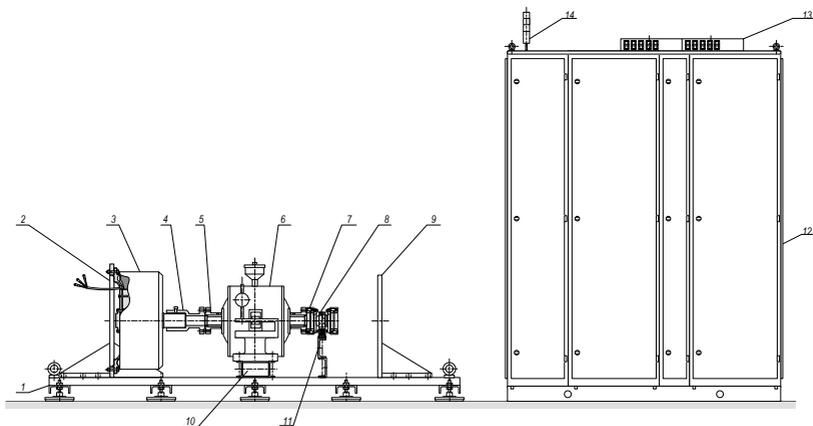


Рис. 3. Общий вид Стенда ТЭД, где: 1 – несущее перфорированное основание; 2 – опора генератора; 3 – генератор; 4 – муфта нагрузочной машины; 5 – муфта порошкового тормоза; 6 – порошковый тормоз; 7 – муфта компенсационная; 8 – датчик момента; 9 – опора образца ТЭД; 10 – основание порошкового тормоза; 11 – подставка датчика момента; 12 – шкаф НКУ 125А; 13 – буквенно-цифровые индикаторы величин, 14 – светосигнальная колонна

Шкаф НКУ 125А (рис. 3, поз. 12) является общим для всех преобразователей UZ (рис. 2), смонтированных внутри на плоскости для обеспечения приборного доступа.

Стенд испытаний ТЭД в данной конфигурации способен обеспечить автоматические протоколы испытаний в статике [3] согласно диаграмме рис. 4. Переходные процессы в механике и в преобразователях могут быть получены посредством ПАК или портативных приборах, приобретаемых отдельно.

Выбранная конфигурация и оборудование стенда позволяет аттестовать его по наличию двух измерителей момента: аналогового (скоба порошкового тормоза) и цифрового (МК40), путем взаимной юстировки показаний двух поверенных приборов без привлечения сертифицированных организаций.

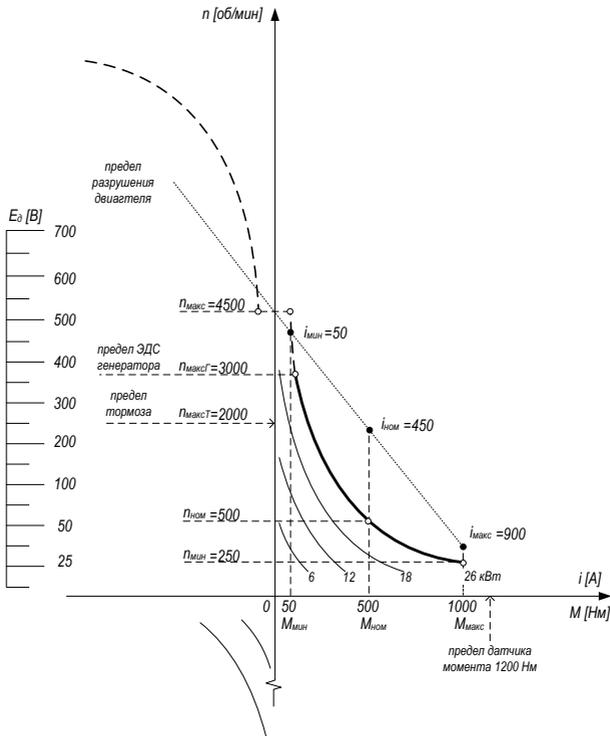


Рис. 4. Диаграмма электротехнического комплекса ТЭД с инвертором

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Датчик крутящего момента М40. Руководство по эксплуатации / ООО «Гилком», г. Минск, 2022.
2. Тормоза порошковые серии ПТ-100М1. Руководство по эксплуатации / Завод «Станкоконструкция», г. Москва, 2022.
3. Фролов Э.М. Основы электропривода. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. – 192 с.
4. Real-time simulation and testing with Simulink [электронный ресурс] URL: <https://www.speedgoat.com>.

Авторы:

Калинин Алексей Германович, доцент, кандидат технических наук, ведущий инженер, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: humanoid1984@yandex.ru.

Ильин Сергей Александрович, инженер-конструктор, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: sergeics@rambler.ru.

Андреев Вячеслав Андреевич, инженер-программист, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: sl.andreev.318@gmail.com.

Андреева Татьяна Вячеславовна, инженер-конструктор, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: tanyukha21@mail.ru.

Семенов Лев Ананьевич, инженер-конструктор, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: onlyformemory@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ РЕЛЕ ВЕДУЩИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Яковлев Д.В., Сорокин Н.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, АО «Чебоксарский Электроаппаратный завод», г. Чебоксары, Россия.

Якимов Е.А., АО «Чебоксарский Электроаппаратный завод», г. Чебоксары, Россия.

Котик В.Ю., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В процессе эксплуатации электродвигателя могут возникнуть неполадки, причиной которых являются тепловые перегрузки, в результате перегрева электродвигателя, что приводит к разрушению обмотки статора и выход оборудования из строя. Для максимального срока службы и безопасности применения электродвигателей применяются электрические аппараты, одним из таких аппаратов, предназначенных для предотвращения перегрева, используют тепловые реле перегрузки.*

***Ключевые слова:** защита электродвигателей, предотвращение перегрева, тепловые реле.*

Обзор тепловых реле перегрузки для защиты электродвигателей

Тепловые реле перегрузки для защиты электродвигателей предназначены для отключения электродвигателей и их защиты от токов короткого замыкания, перегрузки и т.д. с возможностью многократного использования. Сегодня на рынке тепловых реле перегрузке представлена продукция разных производителей

лей как отечественных, так и зарубежных компаний, в широком ценовом диапазоне. Известно 3 ведущих отечественных производителей: АО «Курский электроаппаратный завод», ОАО «Кашинский завод электроаппаратуры», АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» и 4 основных зарубежных производителей исследуемых изделий: Schneider Electric, ABB, Legrand, Siemens.

Вместе с тем отсутствует современная отечественная комплексная защита электродвигателя (предохранители, тепловые реле перегрузки, магнитные пускатели, плавкие вставки), включая современные тепловые реле перегрузки для защиты электродвигателей отечественного производства, которые были бы конкурентоспособны с зарубежными производителями в соотношении «цена-качество».

Решение проблем по созданию современных тепловых реле перегрузки для защиты электродвигателей способствует выполнению отраслевого плана Министерства промышленности и торговли (шифр 05ЭМ13 «Части электрической распределительной или регулирующей аппаратуры, предназначенные для устройств электрических (низковольтная аппаратура)» по снижению доли импорта тепловых реле перегрузки с 75 % в 2019 году до 25 % в 2024 году. Стоит отметить, что в шифр 05ЭМ13 отраслевого плана Министерства промышленности и торговли относятся все низковольтные электрические аппараты (предохранители, тепловые реле перегрузки, магнитные пускатели, плавкие вставки).

Основные зарубежные производители Schneider Electric и ABB (наиболее распространённая и качественная продукция) и другие производители (в том числе и отечественный АО «Курский электроаппаратный завод») зачастую имеют схожий внешний вид. Это связано с тем, что тепловые реле перегрузки используются совместно с магнитными пускателями (контакторами), и автоматическими выключателями для комплексной защиты электродвигателей. Для ручного управления используется поворотная рукоятка с шкалой (под защитной крышкой), нажимная поворотная кнопка. При этом все тепловые реле перегрузки оснащены кнопкой «Test», для проверки корректной работы аппарата. Особенностью ручного управления в виде поворотной кнопки является идентификация рабочих уставок тепло-

вых реле перегрузки Примеры различных способов управления на примере тепловых реле перегрузки серии TeSyS LR-K и LR-D производства «Schneider Electric» приведены на рис. 1.



а

управление поворотной кнопкой
тепловое реле серии TeSyS LR-K



б

управление поворотной кнопкой
тепловое реле серии TeSyS LR-D



в

управление нажимной поворотной кнопкой
тепловое реле серии TeSyS LR-D

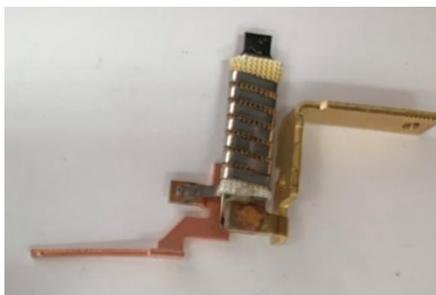
Рис. 1. Пример способов ручного управления тепловых реле перегрузки на примере серии TeSyS LR-K и LR-D производства «Schneider Electric»

В любом тепловом реле перегрузке для защиты электродвигателей есть следующие основные узлы: механизм теплового реле, биметаллический элемент, подвижная система с контактами, кнопка взвода механизма в рабочее положение и т.д.

На рис. 2, б, показан чувствительный узел реле, который состоит из термобиметаллического элемента (ТБЭ), на который намотан нагревательный элемент (НЭ) в виде спирали, состоящей из семи витков. Между НЭ и ТБЭ установлена изоляционная подложка из стеклоткани. При этом имеет место комбинированный способ нагрева ТБЭ посредством последовательно соединённых в электрическую цепь ТБЭ и НЭ. Свободный конец ТБЭ в результате изгиба последнего механически воздействует на пластмассовую рейку, которая, в свою очередь, обеспечивает срабатывание замыкающих (NO) и размыкающих (NC) контактов.



a



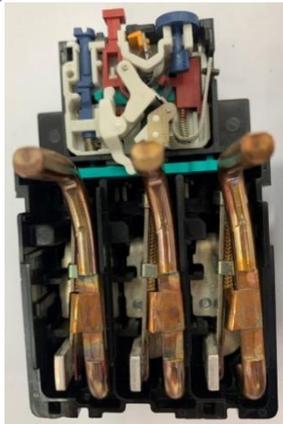
б

Рис. 2. Внешний вид электротеплового токового реле типа TeSyS LR2K0307 на ток от 1,2 до 1,8 А со стороны лицевой панели и его чувствительного узла на один полюс производства фирмы Schneider Electric

На рис. 3 представлен внешний вид и конструкция чувствительных узлов с косвенным нагревом ТБЭ электротеплового токового реле типа TeSyS LRD3365 на токи от 80 до 104 А. Чувствительный узел (рисунок 3,б) состоит из ТБЭ в виде пластины, к которому прижат НЭ посредством двух хомутов. НЭ выполнен в виде шести параллельно включенных гибких лент из высокопроводящего материала (предположительно медь).



a



б

Рис. 3. Внешний вид электротеплового токового реле типа TeSyS LRD3365 на ток от 80 до 104 А, со стороны лицевой панели и его чувствительного узла производства фирмы Schneider Electric

Электротепловые токовые реле АВВ типов ТF42 (рис. 4 а, б), Т16 (рис. 4 в, з), производства АВВ содержат лицевую панель, включающую тот же набор функциональных элементов, что и реле производства Schneider Electric.



а



б



в



з

Рис. 4. Внешний вид электротеплового токового реле типа ТF42-1.7В (а, б) на ток от 1,3 до 1,7 А и Т16-1.7 (в, з) на ток от 1,3 до 1,7 А со стороны лицевой панели (а, в) и его чувствительного узла (б, з) производства фирмы АВВ

На рис. 4 (б, з) показан чувствительный узел реле ТF42, Т16 на ток от 1,3 до 1,7 А, который состоит из термобиметаллического элемента (ТБЭ), на который намотан нагревательный элемент (НЭ) в виде спирали. Между НЭ и ТБЭ установлена изоляционная подложка из стеклоткани. При этом имеет место комбинированный способ нагрева ТБЭ посредством последователь-

но соединённых в электрическую цепь ТБЭ и НЭ, по аналогии с ТБЭ производства Schneider Electric.

Выводы

Для снижения влияния температуры окружающего воздуха рекомендуется выполнять биметаллические пластины из материала с рабочей температурой срабатывания около 200 °С, значительно превышающей температуру окружающей среды 40 °С. В конструкцию механизма передачи воздействия от термобиметалла включают пассивный, не нагреваемый током нагрузки биметалл, благодаря которому происходит компенсация изменения температуры окружающей среды. При этом тепловые реле перегрузки реализуют модель защищаемого электрооборудования с контролем нахождения температуры в допустимых пределах. Тепловое реле, как и любой другой электрический аппарат, дает определенную погрешность и учитывает не все факторы, например, чем больше отношение действующего значения тока перегрузки в защищаемой цепи к величине уставки (кратность перегрузки), тем быстрее нарастает температура электрооборудования и, соответственно, необходимо более быстрое срабатывание теплового реле. Из видов нагрева термобиметаллических элементов в тепловых реле перегрузки производства Schneider Electric и АВВ было выявлено, что используется косвенный и комбинированный нагрев. При чем в электротепловых токовых реле производства Schneider Electric комбинированный нагрев ТБЭ применяется в диапазоне токов от 1,2 до 65 А, а в реле производства АВВ комбинированный нагрев применяется в диапазоне токов от 1,3 до 13 А. При остальных токах (от 30 до 175 А) применяется косвенный нагрев Термобиметаллического элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловые реле перегрузки, защита двигателей от перегрузки или обрыва фазы (Технические данные и документация). – Режим доступа: <https://new.abb.com/low-voltage/ru/products/oborudovanie-dlya-upravleniya-i-zashchiti-electrovdigatelei/3--kontakty-i-rele-peregruzki-dlya-puska-electrovdigateley/teplovy-rele-perezruzki> (дата обращения: 01.11.2022).
2. Каталог продукции АВВ для защиты у управления двигателями. Режим доступа: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?>

DocumentID=1SBC100220C0201_FR&LanguageCode=en&DocumentPartId= &Action=Launch (дата обращения: 01.11.2022).

3. Каталог продукции Schneider electric – Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=MKTED210011EN.pdf&p_Doc_Ref=MKTED210011EN (дата обращения: 01.11.2022).

4. ГОСТ 16308-84. Реле электротепловые токовые. Общие технические условия; введ. 01.01.1985. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 24 с.

Авторы:

Яковлев Дмитрий Витальевич, аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», руководитель департамента АО «ЧЭАЗ». Окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2016 году. E-mail: dmitriy21_21@mail.ru.

Сорокин Николай Николаевич, ассистент кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Главный конструктор по ЭА АО «ЧЭАЗ». Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 1995 году. E-mail: n.sorokin@cheaz.ru.

Якимов Евгений Александрович, инженер-конструктор АО «ЧЭАЗ». Окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2020 году. E-mail: 79373828220@yandex.ru.

Котик Валентин Юрьевич аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2022 году. E-mail: kotikvalentin@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В РАЗНЫЕ МОМЕНТЫ НАЧАЛА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Матвеев Е.К., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Славутский А.Л., Обособленное подразделение ООО «Юнител Инжиниринг», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Анализируются результаты моделирования насыщения трансформатора тока при коротком замыкании (КЗ) в линии электропередач. Показано, что в зависимости от фазы тока в момент начала КЗ, режимы насыщения трансформатора существенно отличаются. Искажение сигнала тока во вторичной обмотке трансформатора может начинаться как через доли периода сигнала промышленной частоты, так и через несколько периодов. То есть для оценки времени от начала переходного процесса до начала искажений тока во вторичной обмотке необходимо учитывать фазу тока и напряжения в момент КЗ.*

***Ключевые слова:** насыщение трансформатора тока, вторичная обмотка, фаза тока, нелинейные искажения.*

Современные требования к устройствам релейной защиты и автоматизации (РЗА) предполагают оценку нелинейных искажений сигналов [1,2]. В частности, необходимо оценивать время от начала переходного процесса при КЗ до начала искажений во вторичной обмотке трансформатора тока (ТТ) при его насыщении (ГОСТ Р 58669-2019). Это может делаться при обработке и структурном анализе сигналов [3,4]. Для этого требуется моделирование не только режимов ТТ с учетом гистерезисных явлений в сердечнике, но и моделирование участков энергосистемы [5,6]. Наиболее эффективные инструменты такого моделирования основаны на методе синтетических схем (алгоритме Доммеля) [7].

В настоящей работе для моделирования насыщения ТТ при КЗ использован симулятор PSCAD.

Рассмотрим модель сети, показанную на рис. 1. Два источника переменного напряжения 230 кВ, 50 Гц, мощностью 100 МВА разделены развязывающим силовым трансформатором, кроме того использован имитатор КЗ. Использована модель ТТ

«Current Transformer (CT) - JA Model», описывающая гистерезисные явления в сердечнике трансформатора, на основании уравнений Джайлса-Атертона [8]. Для обработки сигналов использован алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для изменения начальных условий при моделировании переходных процессов применялся режим симуляции многоразового запуска. При моделировании задавались следующие параметры: количество витков в первичной и вторичной обмотках ТТ, мощность или сопротивление вторичной нагрузки, индуктивность рассеяния ТТ по вторичной обмотке, параметры магнитопровода (геометрические и магнитные), фаза тока при начале КЗ.

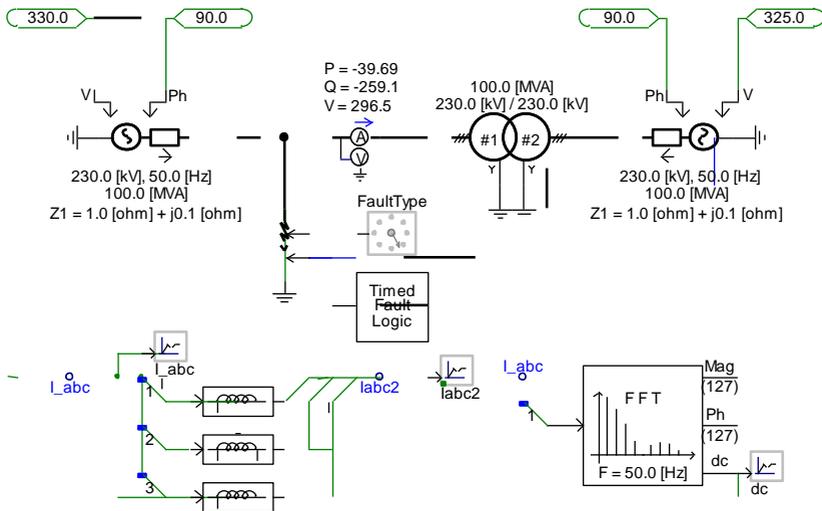


Рис. 1. Модель электрической сети с КЗ в среде PSCAD

В процессе моделирования пакет PSCAD дает возможность строить петли намагничивания ТТ в координатах В-Н во время переходного процесса при КЗ.

На рис. 2 приведены два характерных результата моделирования, отличающихся только моментом начала переходного процесса (фазой тока в первичной обмотке ТТ). Здесь показана форма токов в первичной и вторичной обмотке и апериодические составляющие (пунктир), полученные при помощи фильтра Фурье.

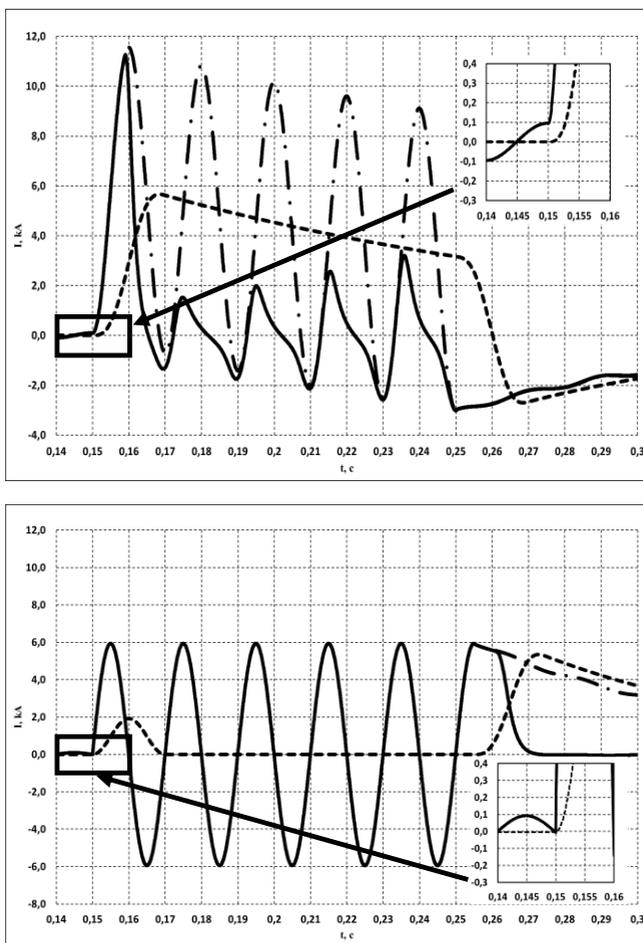


Рис. 2. Результаты моделирования тока в первичной и вторичной обмотке ТТ при КЗ в разные моменты времени

Если в верхней части рисунка значение тока в момент начала переходного процесса близко к максимуму, то на нижней части ток близок к нулю. То есть разница во времени начала КЗ составляет порядка четверти периода сигнала промышленной частоты. При этом картина искажения тока во вторичной обмотке принципиально отличается. Соответствующие отличия наблюдаются и в петлях намагничивания сердечника ТТ (рис. 3).

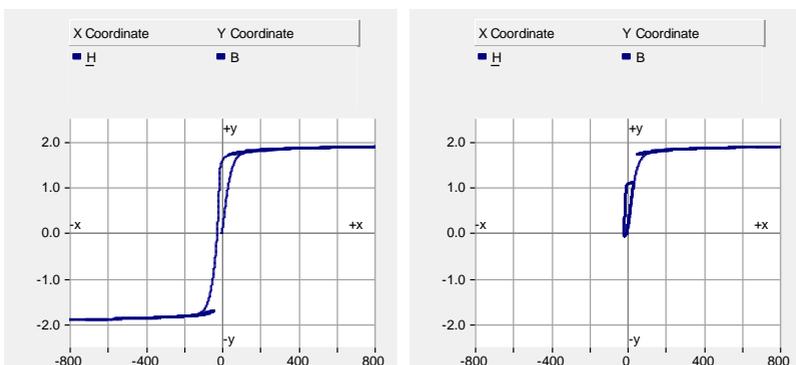


Рис. 3. Петли намагничивания ТТ

В первом случае апериодическая составляющая тока вместе с соответствующими нелинейными искажениями и уровнем высших гармоник сопоставимы с сигналом основной частоты [4,9,10] уже в первой четверти периода после начала переходного процесса. Во втором случае нелинейные искажения сигнала во вторичной обмотке ТТ начинаются более чем через 100 мс после начала КЗ (примерно 5,5 периода промышленной частоты).

Таким образом, моделирование в среде PSCAD режимов насыщения трансформаторов при коротких замыканиях в элементах энергосистемы позволяет сделать следующие выводы:

1. Даже с учетом значительных погрешностей модели трансформатора, которые неизбежны из-за сложности описания динамических характеристик его магнитной системы, показано, что нелинейные искажения тока во вторичной обмотке очень существенно зависят от фазы тока и напряжения в сети в момент начала переходного процесса.

2. Моделирование и оценка нелинейных искажений сигналов при насыщении трансформатора должна проводиться с учетом того, что фаза, соответствующая началу переходного процесса является величиной случайной.

3. Режимы насыщения трансформаторов должны изучаться с учетом сдвига фаз между напряжением и током в электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуревич В.* Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 2 / В. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3(104). – С. 91–96.

2. *Кужеков С.Л.* Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока / С.Л. Кужеков, Г.С. Нудельман // Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 12–17.

3. *Vorobyev E., Antonov V., Ivanov N., Naumov V. and Soldatov A.* Fundamentals of Multichannel Structural Analysis of Electrical Signals // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), 2021, P. 30-34, doi: 10.1109/USSEC53120.2021.9655762.

4. *Andreev O. N., Slavutskiy A. L., Slavutskii L. A.* Neural network in a sliding window for power grids signals structural analysis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 990 012054. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/990/1/012054>.

5. *Законьшек Я.В.* Современные программно-аппаратные комплексы на базе симулятора RTDS для моделирования по технологии Phil / Я.В. Законьшек, М.А. Шамис, Ф.А. Иванов // Сборник докладов научно-технической конференции: V Международная научно-практическая конференция, Чебоксары, 23–26 апреля 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 243–246.

6. Новые возможности по детальному моделированию переходных процессов в больших энергосистемах / М.А. Шамис, Ф.А. Иванов, С.П. Васильев, Я. Законьшек // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апреля 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 204–207.

7. *Dommel H.W.* Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks / H.W. Dommel // IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. – 1969. – VOL. PAS-88. – NO. 4. – P. 388–399.

8. *Славутский А.Л.* Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 122–130.

9. *Коцеев М.И., Славутский А.Л., Славутский Л.А.* Элементарный перцептрон как инструмент анализа переходных процессов // Вестник Чувашского университета. № 3. 2020. С. 84–93. DOI 10.47026/1810-1909-2020-3-84-93.

10. Slavutskiy A, Slavutskii L., Slavutskaya E. Neural Network for Real-Time Signal Processing: the Nonlinear Distortions Filtering // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 84–88. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559619.

Авторы:

Матвеев Евгений Константинович, магистрант второго года обучения факультета радиоэлектроники и автоматики, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, окончил факультет радиоэлектроники и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2021 г. E-mail: mzhenyak@yandex.ru.

Славутский Александр Леонидович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела разработки программных продуктов, Обособленное подразделение ООО «Юнител Инжиниринг» в г. Чебоксары; в 2011 г. окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета, в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем». E-mail: slavutskii@gmail.com.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ РЕАКТОРОВ ДУГОГАШЕНИЯ С НЕМАГНИТНЫМИ ЗАЗОРАМИ В СЕРДЕЧНИКЕ МАГНИТОПРОВОДА

Медведев В.Г., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. Приведены результаты сравнительных исследований существующих методов расчета индуктивности электрических реакторов дугогашения двухстержневыми и бронестержневыми магнитопроводами с немагнитными зазорами по геометрическим параметрам устройства. Предложены выражения корректировки определения величин эффективной площади обмотки реакторов по шунтирующему магнитному потоку.

Ключевые слова: немагнитный зазор в стержне стального магнитопровода, индуктивное сопротивление реактора, площадь эффективного шунтирующего магнитного потока, площадь сегмента обмотки реактора по шунтирующему магнитному потоку.

Известно, что роль электрических реакторов, называемых катушками Петерсена [1-10], в обеспечении надежной работы высоковольтных сетей среднего класса напряжения имеет важное и принципиальное значение в борьбе с емкостными токами электрической сети и последствиями однофазных замыканий на землю.

Суммарное потокосцепление Ψ_{Σ} реактора состоит из главного потокосцепления, проходящего по стали $\Psi_{ст}$ и шунтирующего потокосцепления, проходящего вне сердечника $\Psi_{ш}$ описывается уравнением [9, 10]

$$\Psi_{\Sigma} = \Psi_{ст} + \Psi_{ш} = w[\Phi_{ст} + \Phi_{ш}] = w[B_{ст} + \Phi_{ш}] = w[B_{ст}S_{ст} + B_{ш}S_{ш}], \quad (1)$$

где w - число витков обмотки; $\Phi_{ст}, \Phi_{ш}$ - главный и шунтирующий магнитные потоки; $B_{ст}, B_{заз}, B_{ш}$ - магнитная индукция в сердечнике (стали), в зазоре и вне стали; $S_{ст}, S_{заз}, S_{ш}$ - площадь сердечника, зазора и площадь сечения пути, шунтирующего путь главного потока.

$$\Psi_{\Sigma} = LI_p = w[B_{заз}S_{заз} + B_{ш}S_{ш}] = w[B_{ст}S_{ст} + B_{ш}S_{ш}], \quad (2)$$

Следуя [9] для $B_{ш}$ можно записать $I_p w = \frac{B_{ш} h_{об}}{\mu_0}$, откуда

$$B_{ш} = \frac{\mu_0 I_p w}{h_{об}} \quad \text{или} \quad B_{заз} = \frac{\mu_0 I_p w}{nl_{заз}} = \frac{B_{ст} S_{ст}}{S_{заз}}, \quad \text{где } \mu_0 - \text{магнитная постоянная.}$$

Рис. 1. К определению площади обмотки реактора на толщине $b/3$ от внутреннего диаметра

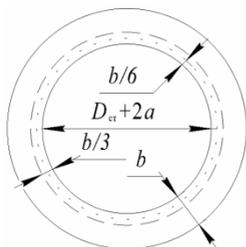


Рис. 1. К определению площади обмотки реактора на толщине $b/3$ от внутреннего диаметра

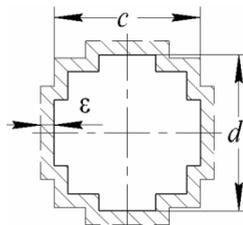


Рис. 2. К вычислению периметра стержня $P_{ст}$ с учетом ширины бокового потока ε

Тогда получим $LI_p = w \left[B_{ст} S_{ст} + \frac{\mu_0 I_p w}{h_{об}} S_{ш} \right]$. С другой стороны

полное потокосцепление равно произведению индуктивности дросселя на ток реактора.

Индуктивность реактора с равномерными зазорами через геометрические размеры магнитопровода из (2) определяется

$$L = w \left[\frac{B_{ст} S_{ст}}{I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}} \right].$$

Причем $B_{ст} S_{ст} = B_{зая} S_{зая}$:

$$L = w \left[\frac{B_{зая} S_{зая}}{I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}} \right] = w \left[\frac{\mu_0 I_p w S_{зая}}{n l_{зая} I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}} \right].$$

$$L = \mu_0 w^2 \left[\frac{S_{зая}}{n l_{зая}} + \frac{S_{ш}}{h_{об}} \right].$$

где $S_{зая} = S_{ст} + P_{ст} \varepsilon$ - эквивалентное сечение сердечника; n - количество зазоров; $l_{зая}$ - длина одного зазора;

$$S_{ш} = S_{вн} - S_{ст} - \frac{3}{4} P_{ст} \varepsilon + S_{1/3}; \quad S_{вн} = \frac{\pi(D_{ст} + 2a)^2}{4} - \text{площадь круга}$$

по внутреннему диаметру круглой обмотки; $D_{ст}$ - диаметр сердечника; $S_{ст}$ - сечение (площадь) сердечника; $P_{ст} = 2(c + d + 2\varepsilon)$ - коэффициент вычисления уширения с учетом ε ; c, d - стороны сечения сердечника; $S_{1/3} = l_{эфф} \cdot b/3$ - площадь трапеции, равной площади обмотки реактора на толщине $b/3$ от внутреннего диаметра; $l_{эфф}$ - длина окружности обмотки эффективной зоны участка шунтирующего потока; ε - выпуклость магнитного поля в зазоре; a - расстояние от обмотки до сердечника; b - радиальный размер (толщина) обмотки; $h_{об}$ - высота обмотки.

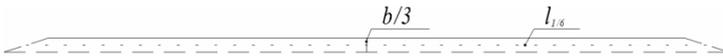


Рис. 3. К вычислению площади трапеции, равной площади обмотки реактора на толщине $b/3$ от внутреннего диаметра

В формулах (7) и (11) работы [9] в последнем слагаемом в выражении $S_{ш}$, на наш взгляд, для определения длины окружности вместо $l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + b)$ следовало бы записать $l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + b/3)$ [10]. Величина $b/3$ получается как $b/3 = b/6 + b/6$. В этом случае при вычислении площади обмотки на радиальном размере $b/3$ в отличие от [9] длина окружности $l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + 2b/6)$. Фактически вычисляется площадь кольца, толщиной $b/3$, приведенной на рис. 1. При такой форме записи выражения $l_{эфф}b/3$ вместо площади кольца вычисляется эквивалентная площадь, равная площади трапеции (рис. 3) с длиной средней линии трапеции $l_{1/6}$. Если же применить запись в виде $D_{ст} + 2a + b$, следуя [9], то толщина кольца будет равна не $b/3$, а $b/2$, что существенно меняет представление о наиболее эффективном влиянии шунтирующего магнитного потока в соответствии с [9] на толщине обмотки $b/3$ (рис. 1) со средней длиной окружности на толщине обмотки $b/2$. Поэтому после детальной коррекции $S_{1/3} = \pi(D_{ст} + 2a + b/3) \cdot b/3$ окончательно получим:

$$L = \mu_0 w^2 \left[\frac{S_{ст} + P_{ст} \varepsilon}{nl_{зав}} + \frac{S_{вн} - S_{ст} - \frac{3}{4} P_{ст} \varepsilon + S_{1/3}}{h_{об}} \right]. \quad (4)$$

В работе Уотерса [6], куда ссылаются также и авторы книги [7, 8] в формуле (187) на странице 346 при расчете эффективно-го магнитного потока через радиальное сечение обмотки, в дальнейшем применяемого для вычисления индуктивности реактора от геометрических параметров магнитопровода и обмотки реактора площадь обмотки реактора на толщине $b/3$ от внутреннего диаметра определяется как

$$S_{1/3} = l_{эфф} \cdot b/3, \quad l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + b/2).$$

Несколько отличная от [9] методика определения индуктивности дросселя с воздушным зазором в железном сердечнике применена в [11]. В части определения приведенной к полному

числу потокосцепления площади сечения пути, шунтирующего путь главного потока как и в [9] содержит выражение, как указывает автор, для определения средней длины обмотки и обозначено как U , что соответствует $l_{\text{эфф}}$ настоящей статьи

$$L = \mu_0 w^2 \left[\frac{S_{\text{зав}}}{nl_{\text{зав}}} + \ln \left(\frac{n^2 - p^2}{n-1} \right) \frac{l_{\text{эфф}}}{2\pi} + \left(1 - \frac{1}{p} \right) \cdot \ln \left(\frac{p^2 - m^2}{1-m} \right) \frac{2l_{\text{эфф}}}{3} \frac{2}{2\pi} \right] \quad (5)$$

где $n = \frac{H_D}{H_b}$, $m = \frac{H_C}{H_b}$, $p = \frac{h_{\text{ок}}}{l_{\text{зав}}}$, $h_{\text{ок}}$ - высота окна магнитопровода,

H_D , H_b , H_C - напряженности магнитного поля [11].

При этом в [11] выражение для так называемой средней длины обмотки $U = l_{\text{эфф}}$ не раскрыто. Однако исследование числовых расчетов на стр. 267 [11] в виде $l_{\text{эфф}} = 3,14 \cdot (300 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 100 / 3) = 1298 \text{ мм} \approx 1,3 \text{ м}$ показывает, что выражение средней длины обмотки определено как $l_{\text{эфф}} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a + 2b/3)$. Если же представить длину окружности $U = l_{\text{эфф}}$ как длину средней линии трапеции, то и высота приведенной трапеции должна быть равна $2b/3$. Проверка расчетов вычисления $S_{1/3}$ по рисунку 16 в [11] показала, что

$$S_{1/3} = 3,14 \frac{413,2^2 - 340^2}{4} = 43280,38 \text{ мм}^2, \quad \text{однако эквивалентная}$$

площадь трапеции по [11], на наш взгляд, должна быть равна $S_{1/3} = 3,14 \cdot (300 + 2 \cdot 20 + 110 / 3) = 43280,38$ вместо

$$S_{1/3} = 3,14 \cdot (300 + 2 \cdot 20 + 110 \cdot 2 / 3) = 47501,92.$$

В работе [12] автор полностью ссылаясь на методы определения индуктивности дросселя от геометрических размеров магнитопровода и обмотки, предложенные в [11], раскрывает выражение для нахождения средней длины окружности обозначив как $A = U$, т.е. $A = l_{\text{эфф}}$, на толщине обмотки $b/3$ от внутреннего диаметра обмотки, равной длине средней линии трапеции в виде $l_{\text{эфф}} = \pi(D_{\text{ст}} + a + b/3)$. В формуле (5) работы [12], на

наш взгляд, имеется опечатка, заключающаяся в отсутствии коэффициента 2 перед величиной расстояния a от сердечника до обмотки. При корректировке выражения для U в [11] по выражению для A , приведенному в [12] и с добавлением недостающего коэффициента, длина средней линии обмотки на толщине $b/3$ вычисляется правильно, что в свою очередь влияет и на конечный результат нахождения значения индуктивности L . Однако анализируя работы [11] и [12] необходимо отметить, что при вычислении площади $S_{1/3}$ длина эффективной средней линии трапеции $l_{\text{эфф}}$ умножается не на величину $b/3$, как это показано в [9], а выражается через логарифмическую функцию, что не является предметом обсуждения в настоящей статье.

В работах [13, 14, 15] выражение для длины эффективной средней линии рабочей обмотки реактора: $l_{\text{эфф}} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a + b/2)$, где $b/2$ получается как $b/2 = b/4 + b/4$. При этом высота трапеции для определения площади $S_{1/3}$ равна $b/3$.

Исследованию заземляющих дугогасящих реакторов с плавным регулированием индуктивности посвящена работа [16], в которой в формулах (9) и (10) для определения длины эффективной средней линии рабочей обмотки реактора имеется выражение вида $D + a + b/3$. Сравнительный анализ формул (9), (10) с рис. 1 в [16] показывает, что величина D содержит значение диаметра стержня и две половины расстояния от стержня до обмотки, т.е. в формулах (9) и (10) работы [16] $D = D_{\text{ст}} + a$ в сопоставлении с настоящей статьей $l_{\text{эфф}} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a + b/3)$. Отметим, что, в [16] авторы ссылаются на [9, 11, 12], в работе имеется опечатка, на мой взгляд, пропущена величина π .

Индуктивность обмотки одного стержня с равномерными зазорами в пределах обмотки в зависимости от геометрических размеров стержня и зазоров в соответствии с [17, стр. 281], определяется как

$$L = \mu_0 w^2 \left[\frac{S_{\text{зав}}}{nl_{\text{зав}}} + \frac{S_{b/3} - S_{\text{ст}} - \frac{3}{4} P_{\text{ст}} \varepsilon}{h_{\text{об}}} \right]. \quad (6)$$

При описании приведенной здесь формулы (9-94) из [17], хотя автор книги и ссылается на работу [9] из списка литературы настоящей статьи, однако не раскрывает вид для переменной $S_{b/3}$, оговаривая лишь, что это площадь витка, отстоящего на треть толщины обмотки b от внутреннего витка [14]. Следуя такому описанию в [17] можно предположительно принять $S_{b/3} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a + 2b/3)^2 / 4$ либо, следуя (4) настоящей работы, $S_{b/3} = S_{\text{вн}} + S_{1/3} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a)^2 / 4 + \pi(D_{\text{ст}} + 2a + b/3)b/3$. Обе последние записи имеют геометрически одинаковый смысл и равны между собой.

При расчет индуктивности двухстержневого реактора с зазорами в формуле (5) работы [18] для расчета потокосцепления или собственной индуктивности выражение эквивалентной (приведенной) площади канала рассеяния $S_{1/3}$ приведено как

$$S_{1/3} = \frac{\pi}{4} \left(d - 2\frac{b}{6} \right)^2, \quad (7)$$

где по пояснениям на рис. 2 работы [18] $d = D_{\text{ст}} + 2a + 2 \cdot 2b/3$. Однако при подстановке этого выражения вместо d в (7) полу-

чим: $S_{1/3} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{ст}} + 2a + b)^2$, что не соответствует объяснению эффективной площади рассеяния на толщине $1/3$ обмотки от внутреннего диаметра в соответствии с [6, 8, 9]. Поэтому в (7), по нашему предположению, нужно корректировать либо как $d = D_{\text{ст}} + 2a + b$, либо вместо записи $2\frac{b}{6}$ применить запись в виде

$2\frac{b}{3}$ с тем, чтобы получить правильное выражение в виде

$S_{1/3} = \left(\pi(D_{\text{ст}} + 2(a + b/3))^2 \right) / 4$ в формуле (7) работы [18]. В виду

неоднозначной записи выражения для $S_{1/3}$ с пояснениями по рис. работы [18] приведем расчеты по [18], которая и соответствует нашим объяснениям выше.

В работах последних лет, например в [19], индуктивность реактора определяется через витки, размеры витков и стержня

точно так же, как по (6) настоящей работы, где $S_{1/3} = \left(\pi(D_{\text{ст}} + 2a + 2b/3)^2 \right) / 4$ - эквивалентная по потокосцеплению площадь поперечного сечения витков (обмотки). В этом случае запись в виде $2b/3$ справедлива в силу того, что вычисляется площадь круга без учета эквивалентной площади трапеции что и было пояснено по формуле (6) настоящей работы. Также отметим, что в формуле вычисления индуктивности реактора в [19] видимо имеется опечатка в выборе обозначения величины вычисления площади зазора.

В работе [20] в формуле (6) $S_{1/3} = l_{\text{эфф}} \left(\frac{\delta_{\text{к}}}{4} + \frac{b}{3} \right)$, где $l_{\text{эфф}} = \pi(D_{\text{ст}} + 2a + b)$. Высота эквивалентной трапеции в формуле (6) работы [20] задана как $\frac{\delta_{\text{к}}}{4} + \frac{b}{3}$, однако автор не поясняет значение величины $\delta_{\text{к}}$. Как было отмечено при анализе работ [9–12, 13–19] в выражении $l_{\text{эфф}}$ вместо величины b следует записать $\frac{b}{3}$. Однако замена b на $\frac{b}{3}$ недостаточна в силу того, что высота эквивалентной трапеции в [20] равна $\frac{\delta_{\text{к}}}{4} + \frac{b}{3}$. Поэтому уточненное выражение для вычисления площади обмотки на ее толщине $\frac{b}{3}$ с учетом $\frac{\delta_{\text{к}}}{4}$, по нашему предположению, должна быть равна $S_{1/3} = \pi \left(D_{\text{ст}} + 2a + \left(\frac{\delta_{\text{к}}}{4} + \frac{b}{3} \right) \right) \left(\frac{\delta_{\text{к}}}{4} + \frac{b}{3} \right)$.

Выводы

Расчет зависимости L от $(nl_{\text{ззз}})$ для разных выражений $S_{1/3}$ показывает, что влияние $S_{1/3}$ заметно при увеличении общей высоты (длины) зазоров, а также и/или при уменьшении $h_{\text{об}}$. Результаты полученных вычислений могли бы быть полезно использованы при проектировании новых дугогасящих реакторов [21-23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petersen W.*, “Der aussetzende Erdschluss”, ETZ, Bd 38, S. 553-555; ETZ, Bd 47, S. 564-566; ETZ, Bd 48, 1917.
2. *Petersen W.*, “Limitation of earth current and suppression of earth fault arcs by the earthing coil”, ETZ Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 40, 1919. Jan; 40 (5-7): 17-9.
3. *Petersen W.* Forschung und Technik. Verlag Julius Springer, Berlin 1930. 576 p.
4. *Буткевич Г.В., Михайлов В.В., Помгауз И.И.* Реакторы. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1933, 184 с.
5. *Willheim R.* Das Erdschlufproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1936, 342 p.
6. *Waters Malcolm.*, The calculation of flux, losses and forces in ironcored reactors with distributed air gaps, EI. Res. Assoc., London, Report Q/T 137, 1952.
7. *Willheim, R., Waters M., Rudenberg R.* Neutral Grounding in High-Voltage Transmission. Elsevier Science Ltd, 1956, 670 p.
8. *Вильгельм Р., Вомерс М.* Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959, 415 с.
9. *Манькин Э.А.* Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами. // Электричество. 1959. № 7. С. 35–40.
10. *Кузьмин А.А., Медведев В.В., Петров М.И., Хадыев И.Г.* К вопросам оценки параметров активной части реактора дугогашения с распределенными зазорами // Вестник Чувашского университета. – 2019. - № 3. – С. 119–126.
11. *Kulda J.* Induktivitat einer drosselspule mit luftspalt im esenkern // Acta technicala/ 1961 № 3. P. 251 – 270.
12. *Ружска Антонова.* Определяне на работната въздушна междина в дьогасителна bobина с подвижно ядро посредством ЕЦИМ. Електропромишленост и приборостроене. София 1972. № 2. С. 56–59.
13. *Пилецкий Л.И.* Максимальная мощность сглаживающих дросселей стержневой конструкции. Известия Томского ордена октябрьской революции и ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. Том 210. 1974. С 61–65.
14. *Бики М.А., Юрченко Е.А.* Расчет индуктивности броневых реакторов // Электротехника. 1978. № 4. С. 10–12.
15. *Бики М.А.* Оптимизация параметров сглаживающих реакторов высокого напряжения // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1979. Вып. 2 (94). С. 16–20.

16. Головчан В.Д., Бурак Н.В., Гильман С.Д. Заземляющие дугогасящие реакторы с плавным регулированием индуктивности // Электротехника. 1980. № 7. С. 21–24.

17. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.

18. Блаватская Н.А., Лейтес Л.В. Расчет вебер-амперных характеристик реакторов с помощью схем магнитных цепей // Электротехника. 1985. № 5. С. 41–46.

19. Иванков В.Ф. Синтез і розрахунок оптимальних конструкцій електричних реакторів з проміжками в стрижні магнетопроводу // Технічна електродинаміка. 2008. № 3. С. 66–70.

20. Стойков, К. Электромагнитно оразмеряване на токоограничаващи реактори със стоманен магнетопровод и въздушни междини за работа с трансформатори за напрежение 400кв // Годишник на ТУ – София. т. 62. кн. 3. 2012. С. 133–140.

21. Баязитов И.Р., Галимзянов Р.Р., Медведев В.Г., Петров М.И. Некоторые вопросы расчетов реакторов дугогашения с немагнитными зазорами в сердечнике магнетопровода. В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. Нижний Новгород, 2021. С. 158–165.

22. Bayazitova I.R., Medvedev V.G., Petrov E.M., Petrov M.I. Magnetic Field in Arc-Quenching Reactors with Smooth Control over the Non-magnetic Gap. Russian Electrical Engineering, 2021, Vol. 92, No. 10, pp. 598–602.

23. Баязитов И.Р., Медведев В.Г., Петров Е.М., Петров Е.М. Магнитное поле в дугогасительных реакторах с плавным регулированием немагнитного зазора. Электротехника. № 10. С. 60–64.

Автор

Медведев Вячеслав Германович, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». Факультет Радиоэлектроники и информатики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 1996 г. В 2002 г. получил ученую степень кандидата технических наук по теме «Численное исследование стохастической динамики моделей нелинейных систем автоколебательного типа радио и оптического диапазона». E-mail: mwg71@mail.ru.

ПРОБЛЕМЫ ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

Садыкова Л.А., Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Казахстан

***Аннотация.** Национальная Энергетическая Система Казахстана испытывает сегодня трудности и серьезные проблемы. Линии электропередач и распределительные сети изношены в большинстве регионов на 60-80%. В статье рассмотрено состояние дел в Западно-Казахстанской области, в Западно-Казахстанской распределительной компании и указаны пути решения этих проблем и что планирует Министерство Энергетики Казахстана для решения вопроса изношенности линий электропередач в Казахстане.*

***Ключевые слова:** линии электропередач, электросети, станции, подстанции, ремонт, реконструкция.*

В состав Национальной Энергетической Системы (НЭС) Казахстана входят 376 воздушных линий электропередачи общей протяженностью 26,9 тыс. км и 81 электрическая подстанция напряжением 35-1150 КВ с установленной мощностью трансформаторов 38 746,05 МВА. Все они находятся на балансе Системного оператора Единой электроэнергетической системы Республики Казахстан АО «КЕГОС». Производство электрической энергии в Казахстане осуществляют 190 электрических станций различной формы собственности. По состоянию на 01.01.2022 г. общая установленная мощность электростанций Казахстана составляет 23957,3 МВт, располагаемая мощность 19004,0 МВт.

На 3 части разделены линии электропередачи и распределительные сети страны: две на севере и одна на юге. На севере она соединена с Единой энергетической системой России и на юге с Объединённой энергетической системой Средней Азии. В одних областях Казахстана избыток энергии (на севере), в других - недостаток (на юге), нет у нас единой диспетчерской службы и единой запитательной сети.

В настоящее время ведётся строительство линии, которая соединит Северную и Южную энергосистемы и рассматривается возможность строительства линии, соединяющей Западную энергосистему с Северной.

Электрические станции разделяются на электростанции национального значения, электростанции промышленного назначения и электростанции регионального назначения, большинство которых находится в частной собственности. Большая часть высоковольтных линий приближается к полувеку. Сети уже требуют замены. Энергосистема в регионах требуют модернизации, расширения мощностей и реконструкции. Из-за растущего спроса на электроэнергию требования к работе усиливаются. Выгодным условием для Казахстана является модернизация и улучшение инфраструктуры системы электрических сетей с использованием мощности угольных и гидроэлектростанций [1].

В 2020 году производство электрической энергии в Казахстане осуществлялось на тепловых (угольных) электростанциях – 81,1 % от общего производства, на гидроэлектростанциях – 9,4 %, на газотурбинных электростанциях – 8,5 %, а доля ВИЭ (ветер и солнце) составила порядка 1,1 %.

Одно из главных преимуществ экономики Казахстана то, что мы – третья страна мира с самым дешёвым электричеством. Это связано с тем, что электричество в Казахстане производится в основном за счет угля, что является одним из самых дешевых способов производства электроэнергии. И запасов угля в Казахстане достаточно, чтобы сохранять это конкурентное преимущество еще на более чем 100 лет.

Президент Касым-Жомарт Токаев заявил о намерении Казахстана к 2060 году добиться полной углеродной нейтральности экономики. 1 июля 2021 года вышел новый «Экологический кодекс Республики Казахстан», по которому необходимо уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. К первой, наивысшей категории относятся «сжигание топлива, за исключением газа, на станциях с общей номинальной тепловой мощностью 50 мегаватт (МВт) и более» [2].

По прогнозам правительства на ближайшие семь лет, для того чтобы удовлетворить растущие потребности населения и бизнеса в электроэнергии нужно будет вывести из работы 1 ГВт устаревших энергетических мощностей и ввести 7 ГВт новых мощностей [3].

Отсутствие достаточного объема инвестиций в традиционную электроэнергетику приведет к катастрофическим последствиям в этой отрасли.

В отдельных регионах показатели износа превышают 80 %. К таким регионам относится Западно-Казахстанская область.

ТОО «Западно-Казахстанская электросетевая компания» основано в 2021 году и является субъектом естественной монополии, оказывающей услуги по передаче и распределению электрической энергии по сетям на территории Западно-Казахстанской области.

В состав предприятия входят городские электрические сети (ГЭС) и 16 районные электрические сети (РЭС). Состояние сетей показано на рис. 1.

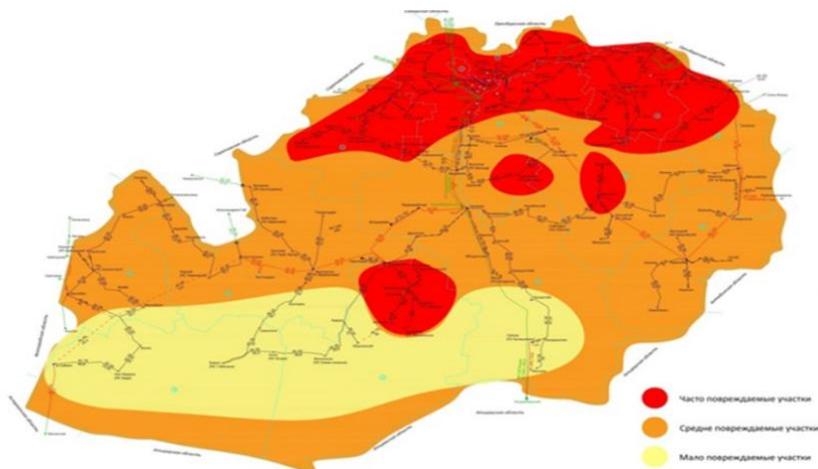


Рис. 1. Карта районов Западно-Казахстанской области, наиболее подверженных повреждениям от гололедных явлений

Общая протяженность линий электропередач по трассе 20304 км, износ линий электропередач 82 %. Средний износ подстанций (ПС), комплектных трансформаторных подстанций (КТП), распределительных пунктов (РП), трансформаторных подстанций (ТП)-80 %.

Основной причиной частых отключений в январе 2022 года послужило обледенение проводов воздушных линий электропередачи. Отключения за 3 года показаны на рис. 2.

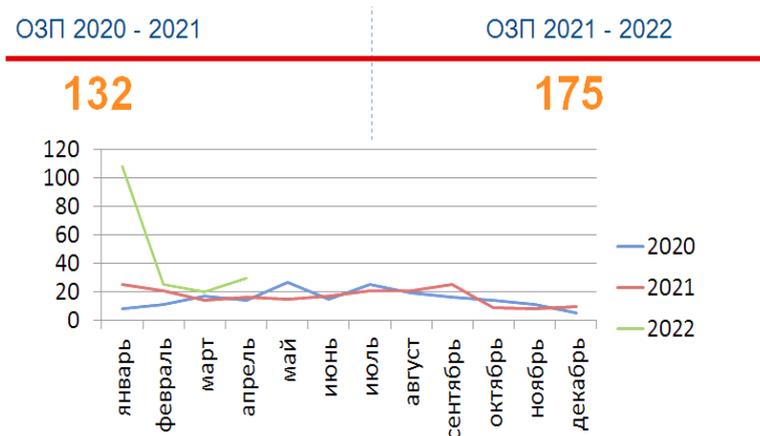


Рис. 2. Количество аварийных отключений на сетях электроснабжения

Были приняты меры: произведен ремонт объектов электроснабжения протяженностью 1830 км, который позволил сократить износ объектов электроснабжения на 2%:

- заменено 159 опор на ВЛ-10 кВ ПС «Фрунзе»;
- закуплены 16 силовых трансформаторов на КТП 10/0,4 кВ;
- отремонтировано 17 подстанции и 252 комплексно-трансформаторных подстанций.

Укрепление материальной базы сократило время устранения аварий на электросетях на 30%:

- приобретено 17 спецтехники на общую сумму 495 млн. тенге (1,3 млн долл.).

Общая кредиторская задолженность по состоянию на 01.05.2021г. составила 882 млн. тенге (1,8 млн долл.), в том числе: энергопроизводящие организации – 616 млн. тенге (1,3 млн долл.).

По состоянию на 01.05.2022г. задолженность составила 225 млн. тенге (470 млн.долл), в том числе: энергопроизводящие организации – 180 млн тенге (375 тыс. долл.).

В результате проведенных работ по снижению задолженностей и оптимизации расчетов, общая кредиторская задолженность уменьшилось на 74 %.

Предприятием «ЗапКазЭК» было запланировано на 2022 год ремонт линий электропередачи 2560 км, ремонт 13 подстанций, комплектно-трансформаторных подстанций – 347. Планируемая сумма на подготовку к отопительному сезону – 707,2 млн. тенге (1,5 млн долл.), планируемый срок завершения работ – до начала отопительного сезона. Работы были выполнены в срок.

Совместно с управлением Энергетики и жилищно-коммунального хозяйства ЗКО была разработана проектно-сметная документация на реконструкцию сетей электроснабжения области в количестве 37 проектов на общую сумму 113,2 млн тенге (235 тыс. долл.). В нее входят:

- реконструкция 2019,5 км электрических сетей области;
- снижение износа сетей с 82 % до 60 %;
- обеспечение энергетической стабильности региона;
- ВЛ-110 кВ протяженностью 138,1 км;
- ВЛ-35 кВ – 193,9 км (7 проектов).

В районах ЗКО:

- ВЛ-10 кВ – 1082,33 км;
- ВЛ-0,4 кВ – 294,33 км;
- КТП-10/0,4 кВ в количестве 295 шт.

По г.Уральск:

- ВЛ-10кВ протяженностью 81,84 км;
- КТП-10/0,4 кВ 69 шт.;

Строительство РП-10кВ в п. Мичурино, район Байтерек:

- ВЛ-0,4 кВ протяженностью 176,69 км;
- КЛ-10 кВ – 31,92 км;
- КЛ-0,4 кВ – 20,16 км.

Реализацию данных проектов планируется осуществить за 2024-2026 гг. за счет бюджетных средств, необходимая сумма для реализации проектов – 20 млрд тенге (42 млн долл.).

Аналитики зарубежной консалтинговой компании «Accenture» указали на риски, которые ожидают электропередающие компании.

Казахстанские специалисты считают, что необходим резерв электроэнергии: развитие ВИЭ. Но источники альтернативной энергии будут подключаться к распределительным сетям. Возникнет необходимость строительства маневрирующих мощностей и готовность к новым режимам работы распределительных сетей; необходимость диспетчеризации, которая потребует колоссальной, мгновенной трансформации.

В ближайшее десятилетие наступит неожиданно такой момент и не все энергосистемы смогут перестроиться в короткий период времени, ведь эта работа требует значительных капитальных вложений [3].

Для решения вопроса изношенности линий электропередач в Казахстане планируют выделить 123 млрд. тенге (256 млн.долларов). По информации Министерства Энергетики, за счет этих средств будет приведено в порядок 6,3 тыс. км электросетей, в том числе 41,3 км в Западно-Казахстанской области, где изношенность превышает 82%.

Покрыть дефицит электроэнергии решили путем строительства атомной электростанции. Но такой системы, в которой отключения не будут случаться, в мире пока нет. Европа постепенно отходит от использования атомной энергии, произошла резкая переоценка использования этой энергии после трагедии на Фукусиме.

Выводы:

Национальная Энергетическая Система Казахстана находится в плачевном состоянии, для выхода из этого состояния необходим:

1. Достаточный объем инвестиций в традиционную электроэнергетику.

2. Дополнения в законопроект по внедрению устойчивого механизма для исполнения финансовых обязательств перед энергопроизводящими организациями, использующими ВИЭ за купленную электроэнергию.

3. В связи с низким уровнем развития современных технологий и оборудования в области энергетики необходимо периодически проводить семинары в рамках научно-технического партнерства с другими государствами.

4. Создавать благоприятные условия, стимулировать и инвестировать проекты по новым энергоэффективным, энергосберегающим технологиям.

5. Вводить поэтапную модернизацию действующих подстанций в направлении их цифровизации.

6. Для создания существенного прогресса в области успешного применения новой техники и новых технологий необходимы квалифицированные кадры. Для этого необходимы стажировки, семинары, курсы повышения квалификации, организация круглых столов, диалогов для профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений страны по обмену опытом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нургалиев Д. / Технология, меняющая индустриальный мир. Казахская правда. – 201. – С. 8.

2. Экологический кодекс Республики Казахстан/№400-VI ЗРК.02.01.2021г.

3. <https://ism.kz/energetika-kazahstana-problemy-puti-resheniya-i-perspektivy>.

Автор

Садыкова Лязат Анатольевна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет. Закончила факультет «Автоматика и вычислительная техника» Казахского политехнического института им. В.И. Ленина в Алма-Ате, 1981г. Аспирантура в Саратовском государственном университете им. Н.И. Вавилова. Ученая степень с 2002 года, тематика по защите «Оптимизация параметров электроремонтных предприятий в условиях неопределенности». E-mail: archisad@mail.ru.

ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ НА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВУЮ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ СВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Емельянов Б.В., АО НПП «ПУЛЬСАР», г. Москва, Россия.

Емельянов В.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматривается влияние паразитных колебаний фронтов импульсов модуляции (джиттера) на амплитудно-фазовую нестабильность твердотельных импульсных сверхвысокочастотных широкополосных усилителей мощности. Показаны различные способы импульсной модуляции твердотельных СВЧ усилителей мощности с возможностью формирования радиоимпульсов с заданным временем нарастания фронта и спада, рассмотрены их достоинства и недостатки.*

***Ключевые слова:** амплитудно-фазовая нестабильность, импульсный усилитель мощности, джиттер, импульсная модуляция.*

Поскольку в радиолокации длительность радиоимпульса определяет минимальную дальность определения цели, в современных радиолокационных станциях (РЛС) для обнаружения близколетящих целей применяются коротко-импульсные СВЧ зондирующие сигналы [1]. Также для обеспечения электромагнитной совместимости к РЛС предъявляют требования к полосе спектра излучаемого сигнала. Для обеспечения требований по спектру излучаемого сигнала в оконечных усилителях мощности РЛС формируются «плавные» фронт и спад радиоимпульсов. Соответственно в оконечных усилителях мощности минимальная длительность радиоимпульса ограничивается временем его нарастания и спада. Для модулирования радиоимпульсов с требуемыми временами фронта и спада в АО НПП «ПУЛЬСАР» были разработаны следующие модуляторы, позволяющие сформировать импульсы с «плавными» фронтом и спадом.

Модулятор биполярного СВЧ-транзистора по эмиттеру

Данный модулятор позволяет управлять СВЧ каскадом на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общей базой, изменяя сопротивление эмиттер-база по постоянному току. Типовая схема включения биполярного СВЧ транзистора показана на рис. 1.

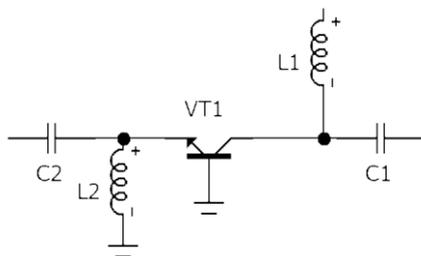


Рис. 1. Типовая схема включения СВЧ транзистора с общей базой

На схеме через индуктивность L_1 подаётся смещение по постоянному току коллектор-база, L_2 обеспечивает нулевое сопротивление эмиттер-база по постоянному току. L_1, L_2, C_1, C_2 – элементы согласующих и корректирующих цепей (СКЦ).

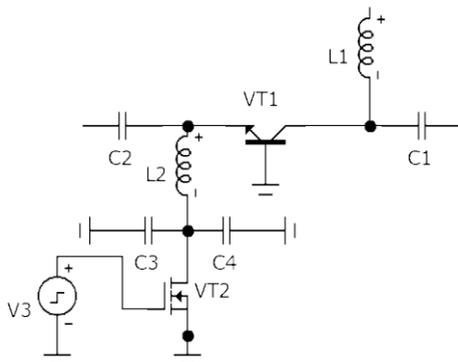


Рис. 2. СВЧ усилительный каскад на биполярном транзисторе с модулятором, где $L_1, L_2, C_1, C_2, C_3, C_4$ - СКЦ

Управляя действительной частью сопротивления L_2 , можно изменять смещение база-эмиттер. Для модуляции усилительного каскада с общей базой в цепь база-эмиттер был включен полевой транзистор, упрощенная схема данного модулятора с СВЧ транзистором показана на рис. 2.

В схеме полевой транзистор VT2 работает как ключ – разрывая цепь эмиттер-база по постоянному току. V3 – сигнал модуляции. При положительном сигнале модуляции – транзистор

VT2 открывается, эмиттер СВЧ транзистора по постоянному току замыкается на землю, тем самым смещая рабочую точку, эмиттер-база на 0 вольт, позволяя транзистору работать в классе С. При нулевом сигнале модуляции, транзистор VT2 закрывается, и транзистор VT1 запирается.

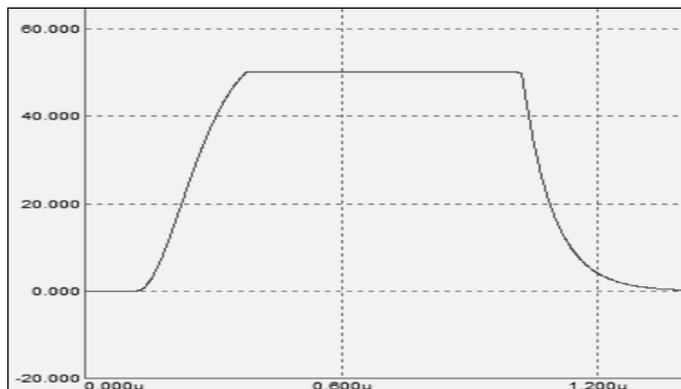


Рис. 3. Огибающая модулированного выходного радиоимпульса $U(t)$, где напряжение U , В; время t , мкс

Поскольку к оконечным усилителям мощности РЛС предъявляются требования к времени нарастания фронта и спада – в цепь модуляции были введены дополнительные элементы, формирующие плавное нарастание и плавный спад радиоимпульса. Индуктивностью L_2 определяется время нарастания фронта радиоимпульса, емкостью C_4 определяется время спада радиоимпульса. Пример огибающей, выходного радиоимпульса, сформированного, при помощи этого модулятора $U(t)$, на рис. 3. Как видно на рис. 3, импульс имеет «плавный» фронт и спад, что позволяет уменьшить ширину спектра излучаемого сигнала.

Модулятор полевого транзистора по стоку

Для модуляции выходного радиосигнала усилительного каскада на полевом транзисторе требуется другой тип модуляторов (показан на рис. 4). $L_1, L_2, C_1, C_2, C_3, C_4$ - СКЦ

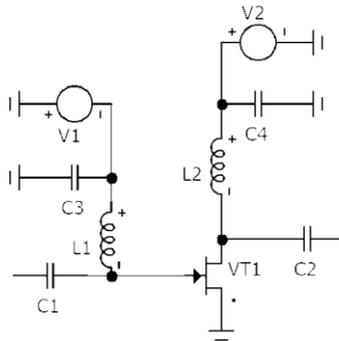


Рис. 4. СВЧ усилительный каскад на полевом транзисторе

Модуляция полевых транзисторов возможна коммутацией напряжения питания стока V_2 , либо управлением смещения затвора V_1 . Поскольку в полосе рабочих частот импеданс и коэффициент усиления каскада различается – при модуляции смещением затвора сложно сформировать фронты и спады выходных радиоимпульсов с фиксированным значением времени нарастания и спада.

Для формирования сигнала с необходимыми временами был разработан модулятор стока полевого транзистора. (рис. 5).

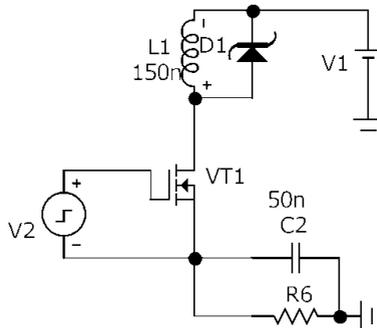


Рис. 5. Модулятор СВЧ усилительного каскада на полевом транзисторе

В данном модуляторе полевой n-канальный транзистор коммутирует напряжение питания СВЧ каскада, индуктивность

L_1 обеспечивает плавное нарастание фронта импульса питания, емкость C_2 обеспечивает плавный спад импульса питания. Диод D_1 шунтирует обратный выброс тока после закрытия транзистора VT1. V2 – взвешенный сигнал модуляции, формирование которого возможно, при помощи драйвера верхнего уровня. L_1 , D_1 , C_2 , R_6 - СКЦ.

Влияние джиттера на амплитудно-фазовую нестабильность

Минимальная длительность выходного радиоимпульса РЛС ограничена временем нарастания и спада. Соответственно весь радиоимпульс состоит из нарастания и спада, без «плоской вершины». Пример огибающей такого импульса $U(t)$ на рис. 6.

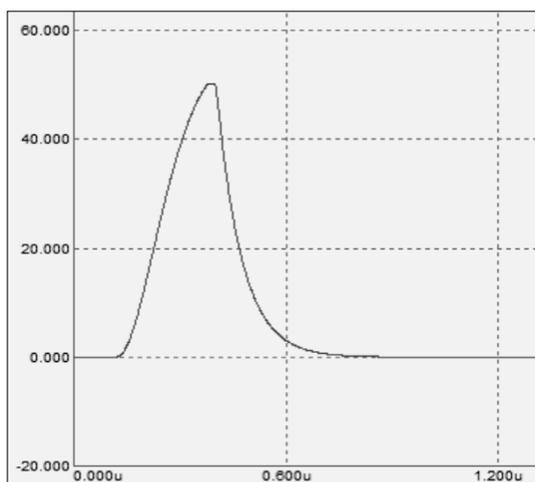


Рис. 6. Коротко-импульсный зондирующий сигнала $U(t)$, где напряжение U [В], время t [мкс]

Поскольку данные импульсы состоят только из нарастания и спада – амплитуда данных импульсов будет зависеть от длительности импульса. Соответственно при флуктуации фронта и спада импульсов модуляции будет флуктуировать амплитуда выходных радиоимпульсов, что в свою очередь вызовет ухудшение амплитудно-фазовой нестабильности. Для определения

влияния джиттера на нестабильность произведён расчёт влияния флуктуации сигнала модуляции на мощность выходных радиоимпульсов. А по уровню флуктуации выходной мощности расчёт амплитудно-фазовой нестабильности [2]. Расчёт производился на модели биполярного транзистора [3]. Результаты расчётов сведены в таблице.

Таблица

Зависимость уровня флуктуации выходной мощности и амплитудно-фазовой нестабильности от джиттера

Джиттер, [нс]	Флуктуация выходной мощности, [%]	Амплитудно-фазовая нестабильность, [дБ]
1	0,004	-87 дБ
2	0,009	-80 дБ
3	0,014	-77 дБ
4	0,019	-74 дБ
5	0,026	-71 дБ
10	0,089	-61 дБ
20	0,48	-46 дБ

По результатам таблицы, можно сделать вывод о нелинейном влиянии джиттера на амплитудно-фазовую нестабильность коротко-импульсных сигналов.

Модулятор полевого транзистора по затвору

Обычно **модуляция напряжения по стоку** СВЧ транзисторов обеспечивает устойчивую работу усилителя и хорошее подавление сигнала в паузе между импульсами. Однако, имеет и недостатки: огибающая СВЧ сигнала может иметь неравномерность амплитуды до нескольких процентов, недостаточно крутые передние и задние фронты импульса. При модуляции по стоку требуется мощный ключевой транзистор, так как импульсный ток стока достигает десятков ампер, в тоже время, при модуляции по затвору импульсный ток затвора не превышает десятков миллиампер. Однако, ограничение применения модуляции напряжения по затвору имеет причины:

– неустойчивой работой усилителя при переходных процессах включения импульсного напряжения затвора;

– разными значениями напряжения рабочей точки СВЧ транзисторов, особенно при использовании в усилителе каскада из более десятка транзисторов;

– необходимостью использования импульсного СВЧ входного сигнала для подавления сигнала в паузе.

В работе [4] исследованы характеристики мощных СВЧ гетероструктурных GaAs полевых транзисторов «Принц», 1-50, 2-70, 4-105, $P_{\text{вых}} = 1 \dots 8$ Вт, с модуляцией напряжения по затвору. Измерения значение затухания мощности в паузе между импульсами для разных типов транзисторов показали, что затухание при **модуляции по стоку** составляет минус 8 дБ, при **модуляции по затвору** минус 14...15 дБ на каскад.

При модуляции по затвору были измерены затухание и ток стока каскада с разными значениями входной мощности. Результаты измерений на рис. 7, 8.

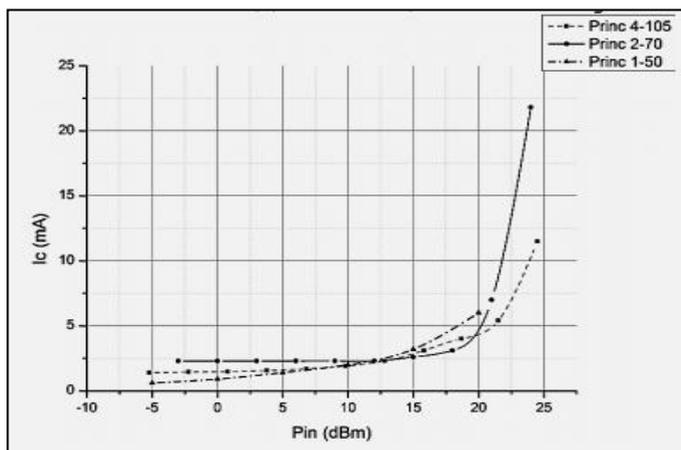


Рис. 7. Ток стока в паузе в зависимости от $P_{\text{вх}} (I_c)$

Как видно из рис. 8, просачивающаяся мощность в паузе для всех типов транзисторов имеет линейную зависимость от $P_{\text{вх}}$, однако, ток стока рис. 7 резко возрастает при значении $P_{\text{вх}} = 15-17$ дБм.

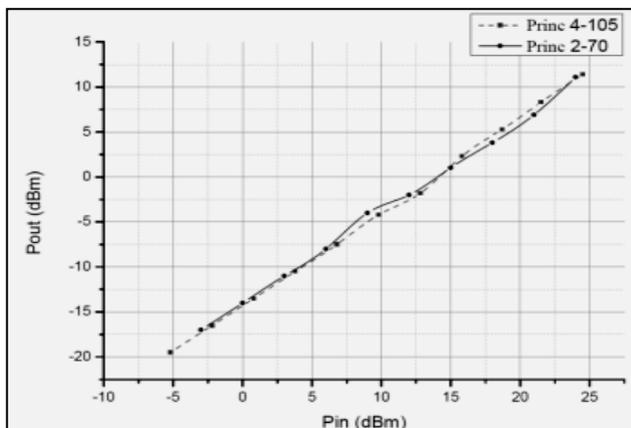


Рис. 8. Зависимость просачивающейся мощности от $P_{\text{вх}}$ ($P_{\text{вых}}$) в паузе

Оценка показывает, каким будет затухание у усилителя с выходной импульсной мощностью 10 Вт на частоте 10 ГГц с модуляцией по затвору. Усилитель должен быть 4-х каскадный. Таким образом, затухание в паузе будет 55...60 дБ относительно входного сигнала, при этом $P_{\text{вх}}$ (непрерывная) не должна превышать 17 дБм. Уменьшение каскадов усилителя возможно только при наличии мощного входного импульсного сигнала правильной формы. Характеристики огибающей СВЧ каскада, в режиме максимальной мощности 8 Вт, при модуляции по затвору: $T_{\text{имп}} = 50$ мкс, передний фронт 9 нс, задний фронт 16 нс, скос 0,2 % при скважности 10.

Выводы

Для обеспечения требований по электромагнитной совместимости в выходных усилителях мощности РЛС были разработаны модуляторы с формированием плавного фронта и спада выходных зондирующих радиоимпульсов. Но данный метод ограничивает минимальную длительность радиоимпульсов, а также вносит влияние джиттера на амплитудно-фазовую нестабильность. Для обеспечения низкой нестабильности короткоимпульсных сигналов с «плавным» нарастанием и спадом радиоимпульса необходимо обеспечить низкий джиттер модули-

рующего сигнала. Показаны преимущества и ограничения модуляции по стоку и затвору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солонина А.И.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб. БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

1. *Сколник М.И.* Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Сколника. Книга 1. – М.: Техносфера, 2015. С. 38–61.

2. *Емельянов Б.В.* Мощные широкополосные твердотельные импульсные СВЧ-усилители мощности с высокой амплитудно-фазовой стабильностью / Емельянов Б.В. // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2020. № 3 (258). С. 53-59

3. *Аронов В.Л., Евстигнеев А.А.* Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учетом квазинасыщения / Аронов В.Л., Евстигнеев А.А. // Электронная техника. Серия 2 «Полупроводниковые приборы», 2005, вып. 1-2. С. 24–33.

4. *Пчелин В.А., Гринберг Д.С., Басманов М.А., Калита Д.В., Корчагин И.П., Муштайкин Е.В., Щёголев С.А.* / Выходной импульсный сигнал транзисторного СВЧ усилителя мощности с модуляцией напряжения затвора // VII Всероссийская НТК «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2019, 3-6 июня, Санкт-Петербург, Россия. С. 574-576.

Авторы:

Емельянов Борис Вячеславович, кандидат технических наук, начальник лаборатории АО НПП «ПУЛЬСАР». Окончил факультет радиотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в 2010 году. В 2022 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методы снижения амплитудно-фазовой нестабильности мощных твердотельных широкополосных СВЧ усилительных каскадов в нелинейном режиме». E-mail: etelyanovi@mail.ru.

Емельянов Вячеслав Арсентьевич, инженер-программист ФГБОУ ВО ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил физический факультет Ленинградский государственный университет в 1992 году. E-mail: etelyanovi@mail.ru.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЛАБ И CODESYS ДЛЯ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ АСУТП В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Павлова А.В., Васильева Л.Н., Охоткин Г.П., Григорьев А.Т., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье разработана технология взаимодействия программных сред Matlab и CoDeSys для прототипирования АСУТП при помощи OPC сервера в режиме реального времени. Технологические процессы, полученные в результате взаимодействия программ, идентичны процессам, протекающим в имитационной модели. Технология позволяет ускорить процесс проектирования АСУТП, тестировать пользовательские программы в режиме реального времени во всех режимах работы технологического оборудования.*

***Ключевые слова:** Matlab Simulink, CoDeSys, OPC-сервер, виртуальный контроллер PLCWinNT, АСУТП, термокамера.*

Для исследования и моделирования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) находят широкое применение пакет прикладных программ Matlab и др. Разработка управляющих программ контроллеров фирмы ОВЕН осуществляется в среде CoDeSys. Такой процесс разработки программ пользователя контроллеров значительно удлиняет сроки проектирования АСУТП [1, 2]. Отсутствие доступа к технологическому оборудованию не позволяет полноценно тестировать программы управления технологическим процессом. Поэтому задача автоматизация проектирования алгоритмов управления и их тестирования во всех режимах работы технологического оборудования является актуальной.

Целью статьи является разработка технологии взаимодействия двух программ Matlab и CoDeSys для прототипирования АСУТП на одной платформе при помощи OPC сервера в режиме реального времени.

OPC-сервер от CoDeSys взаимодействует с Matlab, представляющий собой OPC-клиент. Имитационная модель объекта управления, разработанная в пакете Matlab Simulink, обеспечивает обмен данными с OPC-сервером CoDeSys через блоки OPC Configuration, OPC Read и OPC Write (рис. 1) [3]. Установка и

настройка OPC-клиента в Matlab могут быть выполнены с помощью специальных функций пакета OPC Toolbox.

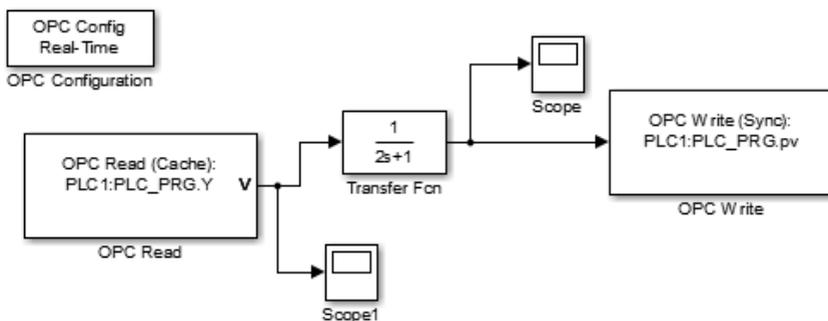


Рис. 1. Схема взаимодействия модели с OPC-сервером

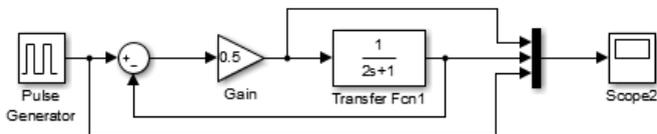
Технология взаимодействия на основе OPC-сервера позволяет использовать как виртуальный, так и реальный контроллер. При отсутствии реального контроллера на начальном этапе проектирования можно воспользоваться виртуальным контроллером PLCWinNT от CoDeSys [4].

В качестве примера рассмотрим непрерывную систему автоматического регулирования (САР) температуры термокамеры с пропорциональным (П) регулятором с коэффициентом передачи K_p . Математическая модель термокамеры представляется инерционным звеном первого порядка $W_o(p) = 1/(T_n p + 1)$.

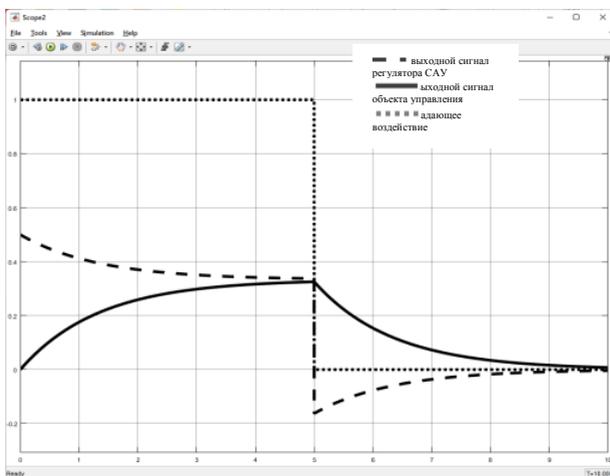
Моделирование динамических процессов проведем в среде Matlab Simulink. Для определенности примем следующие параметры: $T_n = 2$ с – постоянная времени термокамеры; $K_p = 0,5$ – коэффициент усиления пропорционального регулятора. Имитационная модель САР представлена на рис. 2, а, а кривые, характеризующие динамические процессы на рис. 2, б.

Виртуальный контроллер PLCWinNT от CoDeSys с алгоритмом пропорционального регулятора на языке CFC представлен на рис. 3.

Взаимодействие виртуального регулятора с имитационной моделью объекта управления, реализованного в Matlab Simulink, осуществляется на основе OPC-сервера. В результате получены кривые динамических процессов, представленные на рис. 4.



а



б

Рис. 2. Имитационная модель САУ температуры

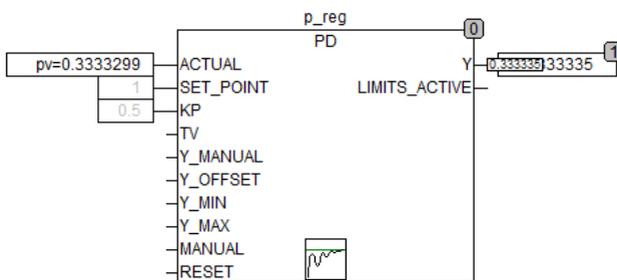


Рис. 3. П-регулятор на языке CFC

Кривая, приведенная на рис. 4, б полностью совпадает с кривой, приведенной на рис. 2, б. Цифровой регулятор формирует дискретизированный во времени и квантованный по уров-

ную сигнал. Поэтому кривая на рис. 4, *а* имеет ступенчатый характер изменения во времени. Кроме того, цифровой регулятор формирует выходной сигнал с задержкой на один интервал дискретности. С учетом особенностей работы цифрового регулятора можем считать, что кривая на рис. 4, *а* соответствует кривой на рис. 2, *б*. Из вышесказанного следует, что работа OPC-технологии достоверно отображает технологический процесс.

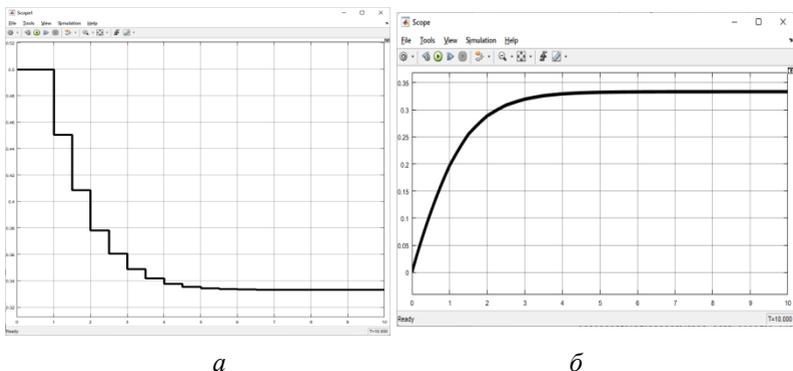


Рис. 4. График выходного сигнала регулятора САУ (*а*) и выходного сигнала объекта управления (*б*)

Организации связи между Simulink и виртуальным контроллером CoDeSys позволяет имитировать работу АСУТП в реальном масштабе времени и полноценно тестировать программу управления во всех режимах работы термокамеры. Кроме того, данная технология ускоряет процесс проектирования АСУТП.

Выводы:

1. Разработанная технология взаимодействия сред программирования Matlab Simulink и CoDeSys подтвердила адекватность протекающих процессов динамическим процессам в имитационной модели.

2. Технология позволяет ускорить процесс проектирования АСУТП, тестировать пользовательские программы в режиме реального времени во всех режимах работы технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Охоткин Г.П., Романова Е.С.* Синтез логического устройства и распределителя импульсов САР тока // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. 2013. – С. 194–203.

2. *Охоткин Г.П.* Разработка методики синтеза релейных регуляторов САР тока при симметричной и диагональной коммутациях транзисторов ВП // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. – С. 66–74.

3. *Макаров В., Макаров Н.* Организация обмена данными между MatLab Simulink и пользовательской программой // Компоненты и технологии. 2012. №3. С. 114–116.

4. *Рыбалев А.Н.* Имитационное моделирование АСУ ТП / А.Н. Рыбалев. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. – 408 с.

Авторы:

Павлова Анжелика Владимировна, магистр 1 курса факультета радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 2022 году закончила ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» факультет радиоэлектроники и автоматики с квалификацией бакалавр, специальность 27.03.04 - Управление в технических системах. E-mail: lika-pavlova-00@mail.ru.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. Математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, 2000 год, Кандидатская диссертация по теме: «Методика формирования профессионально-математической компетентности студентов технических направлений на основе интеграции математики и информатики», 2015 год. E-mail: oln2404@mail.ru.

Охоткин Григорий Петрович, доктор технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и автоматики, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 1982 году закончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2007 г. получил ученую степень доктора технических наук по теме «Развитие теории динамических процессов и разработка быстродействующих полупроводниковых преобразователей для электропривода», специальность 05.09.12 – Силовая электроника. E-mail: elius@list.ru.

Григорьев Александр Тальянович, бакалавр 4 курса факультета радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». E-mail: sashagrigorev@vk.com.

СОВРЕМЕННОЕ ЗАЩИТНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Кравченко Г.А., Львова Э.Л., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** При проектировании системы электроснабжения жилых, административных зданий и помещений необходимо обеспечить безопасность работы, проживания людей, а также сохранность бытовой и офисной техники.*

Защитное оборудование должно удовлетворять нормативным документам в части обеспечения требований селективности, быстродействия и чувствительности.

В статье дан обзор современного защитного оборудования для возможного использования в жилых и административных зданиях и помещениях.

***Ключевые слова:** электроприемники, защитное электрооборудование, вводно-распределительное устройство, распределительные щиты.*

Электроснабжение жилых домов является неотъемлемой частью проживания людей в современном мире. При проектировании системы электроснабжения таких объектов необходимо обеспечить безопасность проживания, а также сохранность бытовых приборов и различного оборудования дома.

Одним из важных вопросов при разработке рациональной схемы распределительной сети является грамотное определение требуемого критерия по уровню надежности электроснабжения потребителей.

На жилом объекте можно выделить две группы электроприемников: электроприёмники квартир (электроплиты, осветительные и бытовые электроприборы) и электроприёмники общедомового назначения (освещение лестничных пролетов, технических этажей, служебных помещений, лифтовые установки, система противопожарного комплекса, домофоны и т.п.).

Согласно ПУЭ [1], многоквартирные жилые дома с электроплитами относятся к электроприёмникам *второй категории надежности*, перерыв в их электроснабжении приводит к нарушению нормальной деятельности значительного количества жителей.

Электроприёмники противопожарных устройств, лифты, эвакуационное и аварийное освещение относятся к электроприёмникам *первой категории* надежности, перерыв в их электропитании может повлечь за собой опасность для жизни людей, нарушение функционирования важных элементов городского хозяйства. Электроприёмникам первой категории надежности требуется питание от двух независимых источников. Это могут быть силовые трансформаторы, подключенные к различным, не связанным распределительным устройствам высшего напряжения. При этом резервное питание электроприёмников должно иметь автоматическое включение (АВР).

Перерыв в электроснабжении потребителей первой категории допускается лишь на время срабатывания АВР. Перерыв в электроснабжении потребителей второй категории надежности допустим на время необходимое для включения резервного питания действиями оперативно дежурного персонала.

Также при использовании некачественных, не защищенных заземлением электроприборов возможен непосредственный контакт человека с напряжением. При попадании человека под действие электрического тока система защиты должна максимально быстро среагировать и предотвратить поражение электричеством при помощи специальных автоматических устройств. Выбранное защитное оборудование должно удовлетворять нормативным документам в части обеспечения требований селективности, быстродействия и чувствительности [2].

В настоящее время существуют различные *защитное электрооборудование*, применяемое в жилых комплексах для обеспечения надежного электропитания и безопасности людей.

В каждом жилом, административном и производственном помещении в обязательном порядке устанавливаются вводно-распределительные устройства (ВРУ) для приема электроэнергии от источника – силовых трансформаторов либо от питающих линий электрической сети. В ВРУ монтируются коммутационные и защитные аппараты, приборы учета.

От общего ВРУ запитываются этажные распределительные щиты (ЩЭ). Они служат для приема электроэнергии от ВРУ и распределения ее на несколько квартирных щитков (ЩК). В ЩК

устанавливается прибор учета квартиры, а также защитные аппараты (рис. 1, 2).

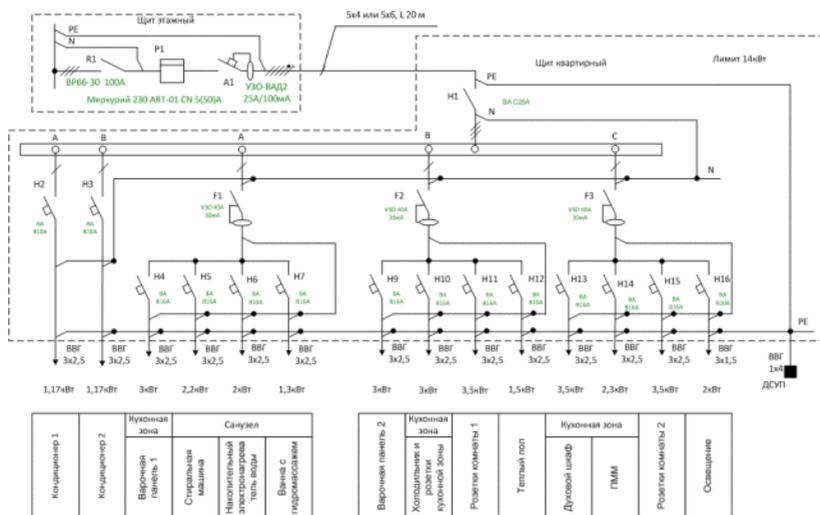


Рис.1. Однолинейная схема распределительных щитов

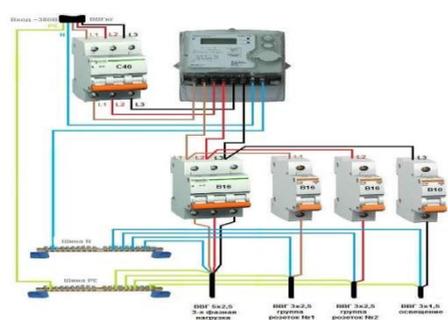


Рис. 2. Схема распределительного щита частного дома на 380 В

Устройства защиты щитов могут включать в себя следующее оборудование: реле контроля напряжения, устройство защиты multifunctional, устройство защиты от искрения, устройство защитного отключения, ограничитель перенапряжений (ОПН) или устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) и др.

Напряжение в электрической сети не всегда стабильно. Перепады напряжения пагубно влияют на электроприборы в доме.

Решать проблему скачков напряжения в сетях помогает *реле контроля напряжения*, которое контролирует нахождение напряжения в заданных уставками пределах. При отклонениях реле сигнализирует расцепителю (силовой части), который отключает сеть. Все бытовые реле контроля напряжения включаются автоматически через определенное время. Схема подключения реле контроля напряжения представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема подключения реле контроля напряжения

Устройство защитного отключения (УЗО) – это быстродействующая защита, реагирующая на изменение какого-либо параметра электрической цепи, информирующая о появлении опасности поражения электрическим током и отключающая электроустановку (рис. 1, 4). Распространены УЗО реагирующие на дифференциальный ток. Дифференциальный автомат объединяет в едином корпусе два типа защиты: от перегрузки и короткого замыкания, от токов утечки

УЗО состоит из двух основных элементов – датчика информации о наличии опасной ситуации, реагирующего на один из параметров сети, и исполнительного органа – автоматического выключателя. В УЗО, реагирующем на дифференциальный ток, таким датчиком является дифференциальный трансформатор тока.

Устройство защиты многофункциональное (УЗМ) предназначено для отключения оборудования при выходе сетевого напряжения за допустимые пределы в однофазных сетях и защиты подключённого к нему оборудования от разрушающего воздействия импульсных скачков напряжения, вызванных срабатыва-

нием близкорасположенных и подключенных к этой же сети электрооборудования и установок (двигателей, магнитных пускателей, электромагнитов).

Основные функции: ограничение потребляемой мощности, регулируемый порог защиты от снижения напряжения и перенапряжения, защита от импульсных перенапряжений, фиксирует число отключений и причины срабатывания, а также минимальное и максимальное значение напряжения. Данное устройство не заменяет другие аппараты защиты (автоматические выключатели, УЗИП, УЗО и пр.).

Включение устройства после аварийного отключения происходит автоматически после восстановления сетевого напряжения через время задержки, устанавливаемое пользователем. УЗМ зарекомендовало себя надежностью и простотой подключения (рис. 4, а).

Однофазное устройство защиты от искрения УЗИС-С1 относится к классу устройств защиты от дуговых пробоев (УЗДП), в соответствии с ГОСТ IEC 62606-2016.1.2.

В местах нарушения нормального электрического контакта между элементами электрических сетей и электроустановок может возникать искрение, которое не распознается токовыми автоматами, дифференциальными автоматами или УЗО, т.к. не вызывает роста тока или его утечки на землю.

В отличие от обычных автоматов и УЗО, УЗИС-С1 распознает опасное искрение при неисправностях в электроустановках и электрических сетях помещения и отключает сеть от электропитания, предупреждая возникновение пожара (рис. 4, б).

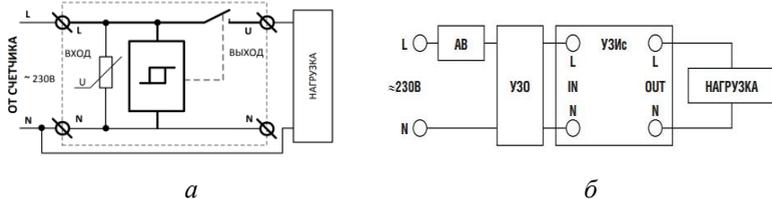


Рис. 4. Схема подключения: а- УЗМ, б-УЗИС вместе с УЗО

Устройство защиты от импульсного перенапряжения (УЗИП) предназначены для защиты оборудования и техники от

импульсных перенапряжений при ударах молнии в систему молниезащиты здания или воздушную линию электропередач (ЛЭП), а также от коммутационных бросков питания.

УЗИП является устройством, наиболее эффективно защищающим электросеть именно от перенапряжения, которое возникает вследствие грозового разряда. Другие защитные устройства (устройство защитного отключения, реле напряжения и др.) не могут защитить электроприборы при скачке в несколько киловольт. Это особенно актуально для индивидуальных жилых домов, снабжающимся электроэнергией по воздушным линиям электропередач. Импульс перенапряжения способен возникнуть в сети даже при ударе молнии в ЛЭП за много километров от дома.

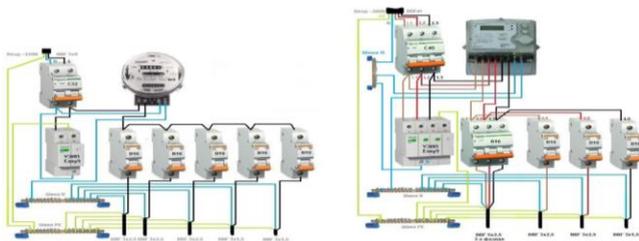


Рис. 5. Схема подключения УЗИП в однофазной и трехфазной сети системы TN-S

Обязательное условие безопасной эксплуатации электроприборов – качественное *заземление*. Оно обеспечивает защиту человека от поражения током в тех случаях, когда на корпусе электроприбора по какой-либо причине появляется напряжение.

Наиболее распространенная система заземления для частного дома – это ТТ. Щит учета с системой заземления TN-C-S собрать сложнее.

Заключение

Проблема электроснабжения производственных и жилых объектов занимает на сегодняшний день приоритетную роль. Электроснабжение жилого дома должно быть максимально безопасно для человека. Применение различного защитного

оборудования повышает безопасность и надежность электро-снабжения жилых помещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройств электроустановок. Издание 7 (ПУЭ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pue7.ru/pue7/sod.php>.

2. СП 31-110-2003 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» М.: ЦНИИПромзданий, 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200035252>.

Авторы:

Кравченко Галина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончила факультет электронной техники ЛЭТИ им В.И. Ульянова (Ленина) в 1992 году. В 2012 году защитила диссертацию на тему «Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона». E-mail: krav68@bk.ru.

Львова Эльвира Львовна, старший преподаватель кафедры Электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Окончила факультет электроснабжения промышленных предприятий Чувашского государственного университета в 1973 году. E-mail: elyalvov1@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Петров А.Р., Грачева Е.И., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань,
Россия.

***Аннотация.** В статье проведено исследование зависимостей величины потерь активной мощности на полюс в автоматическом выключателе ВА04 от основных параметров оборудования. С использованием каталожных данных разработана функциональная зависимость активных потерь от номинального тока аппаратов. Составлены аппроксимирующие функции данных характеристик и вычислена величина коэффициента детерминации полученных функций величины активных потерь.*

***Ключевые слова:** автоматические выключатели, номинальный ток, надежность, аппроксимирующие функции, потери мощности, функционирование.*

Основными факторами, определяющими величину потерь активной мощности в автоматических выключателях, являются [1]:

- величина номинального тока электрического аппарата;
- форма и размеры контакта;
- частота коммутации;
- материал контактных деталей;
- сечения токопроводящих частей аппарата.

Рассмотрим автоматический выключатель в литом корпусе марки ВА04. Проведем анализ функциональных зависимостей динамики величины потерь активной мощности от основных технических характеристик выключателя.

Определим аппроксимирующие функции зависимостей величины потерь мощности от значений номинальных токов [2]. Для каждой функции рассчитан коэффициент детерминации R^2 и средняя ошибка аппроксимации.

Аппроксимацией называют замену одних математических объектов другими, близкими к исходным:

$$\Delta P = F(I_{\text{ном}}), \quad (1)$$

где $F(I_{\text{ном}})$ – функциональные зависимости значений потерь активной мощности от величины номинального тока; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток.

Коэффициент детерминации R^2 является статистической мерой согласия, с помощью которой можно определить, насколько модель регрессии соответствует данным, на которых она построена. Коэффициент R^2 лежит в диапазоне от 0 до 1 [3].

Коэффициент R^2 вычисляется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - y)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где y_i – фактические значения; y – расчетные значения исследуемой величины; $\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ – среднее значение исследуемой величины; $\sum_i (y_i - y)^2$ – сумма квадратов ошибок регрессии; $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

На рис. 1 представлены графические зависимости потерь активной мощности на полюс автоматического выключателя в литом корпусе ВА04 с $I_{\text{ном}} = 16 \div 250$ А и некоторые аппроксимирующие функции.

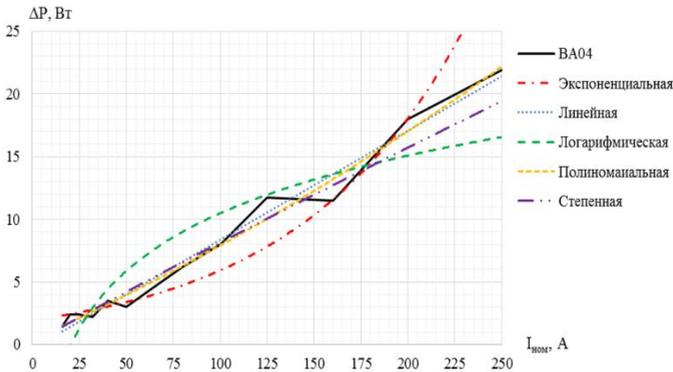


Рис. 1. Графические зависимости потерь активной мощности в контактных системах автоматического выключателя ВА04 в функции номинального тока

В табл. 1 приведены аппроксимирующие функции потерь активной мощности автоматических выключателей марки ВА04 завода-изготовителя «Курский электроаппаратный завод».

Таблица 1
Аппроксимирующие функции потерь активной мощности автоматических выключателей ВА04

Аппроксимирующая функция	R^2	\bar{A} , %
Экспоненциальная $\Delta P = 1,9379e^{(0,0112 \cdot I)}$	0,9168	19,48
Линейная $\Delta P = 0,0869 \cdot I - 0,3237$	0,9798	16,36
Логарифмическая $\Delta P = 6,6325 \cdot \ln(I) - 20,065$	0,8207	55,9
Полиномиальная $\Delta P = 8 \cdot 10^{(-5)} \cdot I^2 + 0,0673 \cdot I + 0,3855$	0,9833	11,45
Степенная $\Delta P = 0,1014 \cdot I^{(0,9518)}$	0,9589	14,2

Данные табл. 1 показывают, что наибольшую точность имеет полиномиальная функция с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9833$, которая наиболее точно описывает зависимость $\Delta P = F(I_{ном})$ [4], а наименее точно функциональные зависимости описывает логарифмическая функция.

Вычислим коэффициент детерминации для полиномиальной функции:

$$R^2 = 1 - \frac{(1,5 - 1,48)^2 + \dots + (21,9 - 22,21)^2}{(1,5 - 7,438)^2 + \dots + (21,9 - 7,438)^2} = 1 - \frac{8,59}{515,11} = 0,9833.$$

Чем ближе значение коэффициента к 1, тем существеннее зависимость.

Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right| \cdot 100\% ; \quad (3)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{13} \cdot \left[\left(\frac{1,5 - 1,48}{1,5} \right) + \dots + \left(\frac{21,9 - 22,21}{21,9} \right) \right] \cdot 100\% = 11,45\% .$$

Ошибка составила менее 15 %, что свидетельствует о достаточно высоком точности аппроксимации. Результаты расчета показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента детерминации
для полиномиальной функции R^2

y_i	y	\bar{y}	$(y_i - y)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$\sum_i (y_i - y)^2$	$\sum_i (y_i - \bar{y})^2$	R^2	$\bar{A}, \%$
1,5	1,48	7,44	0,0003	35,265	8,59	515,11	0,9833	11,45
2,4	1,76		0,4051	25,381				
2,4	2,13		0,0795	25,381				
2,2	2,62		0,1773	27,437				
3,5	3,2		0,0867	15,508				
3	3,95		0,9035	19,696				
4,4	4,94		0,2948	9,229				
6,2	6,28		0,0066	1,533				
8	7,92		0,0071	0,316				
11,7	10,05		2,7291	18,165				
11,5	13,2		2,8951	16,500				
18	17,04		0,9111	111,55				
21,9	22,21		0,0964	209,15				

Выводы

Таким образом, определены зависимости изменения потерь мощности на полюс автоматических выключателей ВА04 от номинального тока. Наиболее достоверной в результате исследований выявлена полиномиальная аппроксимирующая функция с коэффициентом детерминации 0,9833 и средней ошибкой аппроксимации 11,45 %, наименее точной является логарифмическая функция – коэффициент детерминации 0,8207. Исследование эксплуатационных особенностей и характеристик автоматических выключателей позволяет применить полученные результаты при оценке уровней потерь электроэнергии во внутризаводских сетях.

водских электрических сетях предприятий, а также выявить наиболее энергоэффективные типы оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.

2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65–74.

3. Доугерти К. Введение в эконометрику. Москва, ИНФРА-М, 2009, 465 с.

4. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надёжность электроснабжения. Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2017.

Авторы:

Петров Алмаз Радикович, аспирант, место учебы: ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета (КГЭУ). E-mail: petroval13@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета (КГЭУ). 2014 г. «Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий». E-mail: grachieva.i@bk.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Петрова Р.М., Грачева Е.И., ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В статье приведено описание надежности силовых трансформаторов, представлены основные виды и причины повреждений силовых трансформаторов. Рассчитана интенсивность отказов силового трансформатора ТМ-1600/10/0,4 за 40 лет эксплуатации и показан график изменения интенсивности отказов.*

***Ключевые слова:** надежность, силовой трансформатор, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, срок службы, перегрузка, функция Лапласа.*

Надежность силовых трансформаторов определяется их безотказной работой в течение срока службы. [1]

Как известно, на срок службы трансформатора влияют такие основные факторы, как: [2]

- перенапряжения в сети;
- короткие замыкания ;
- аварийные перегрузки:
 - кратковременные;
 - длительные.

Безотказная работа трансформатора зависит, в основном, от:

- а) длительности перегрузок;
- б) температуры различных частей трансформатора, а именно, обмоток, изоляции, температуры масла в баке;
- в) наличия влаги в изоляции и масле;
- г) содержания кислорода и других газов в изоляции и масле;
- д) количества, размера и вида частиц примесей в масле.

Основные виды повреждений силовых трансформаторов

В табл. 1 представлены основные виды повреждений силовых трансформаторов и возможные причины их возникновения.

Данные табл. 1 показывают, что наибольший процент дефектов приходится на повреждения маслонаполненного бака трансформатора (29 %). Другие повреждения связаны с дефектами обмоток, изоляторами ввода, магнитопроводом и системой охлаждения.

Таблица 1

Основные виды повреждения силовых трансформаторов 10/0,4 кВ

Вид повреждения	Возможные причины повреждения	Доля, %
Повреждения ввода	Перекрытие на корпус или между фазами	18
	Наличие трещин	
	Загрязнение внутренних поверхностей	
	Токи утечки	
Повреждения магнитопровода	Нарушение изоляции между листами	16
	Сильные местные нагревы стали	
	Вихревые токи	
Повреждения в обмотке	Межвитковые замыкания	21
	Внутренние повреждения	
Повреждения системы охлаждения	Перегрузка	12
	Течь масла	
Повреждения маслонаполненного бака	Наличие трещин бака	29
	Нарушения уплотняющих прокладок	
Иные причины		4

Исследуем изменения интенсивности отказов силовых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ.

Интенсивность отказов силовых трансформаторов

Для расчета интенсивности отказов силового трансформатора используем выражение в соответствии с нормальным законом распределения:

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot \Phi\left(\frac{T_{cp} - t}{\sigma}\right)} \quad (1)$$

где t – время наблюдения, год;

T_{cp} – средняя наработка на отказ, год;

σ – среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, год;

Φ – функция Лапласа. [3]

Определим интенсивность отказов трансформатора ТМ-1600/10/0,4 по имеющимся данным:

– за 10 год эксплуатации:

$$\lambda(t=10) = \frac{e^{-\frac{(10-20)^2}{2 \cdot 2,5^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot \Phi\left(\frac{20-10}{2,5}\right)} = \frac{e^{-8}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot \Phi(4)} = 5,35 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}$$

– за 15 год эксплуатации:

$$\lambda(t=15) = \frac{e^{-\frac{(15-20)^2}{2 \cdot 2,5^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot \Phi\left(\frac{20-15}{2,5}\right)} = \frac{e^{-2}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot \Phi(2)} = 0,0221 \text{ 1/год}$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов интенсивности отказов силового трансформатора за 40 лет эксплуатации.

Таблица 2
Интенсивность отказов трансформатора ТМ-1600/10/0,4

Время наблюдения t , год	Значение $\frac{T_{\text{ср}} - t}{\sigma}$	Значение функции $\Phi\left(\frac{T_{\text{ср}} - t}{\sigma}\right)$	Интенсивность отказов, 1/год
10	4	1,000	$5,35 \cdot 10^{-5}$
11	3,6	1,000	$2,45 \cdot 10^{-4}$
12	3,2	0,999	$9,55 \cdot 10^{-4}$
13	2,8	0,997	0,00318
14	2,4	0,992	0,00903
15	2	0,977	0,02210
16	1,6	0,945	0,04695
17	1,2	0,885	0,08780
18	0,8	0,788	0,14706
19	0,4	0,655	0,22481
20	0	0,500	0,31923
21	-0,4	0,345	0,42761
22	-0,8	0,212	0,54710
23	-1,2	0,115	0,67519
24	-1,6	0,055	0,80985
25	-2	0,023	0,94952
26	-2,4	0,008	1,09302
27	-2,8	0,003	1,23946
28	-3,2	0,001	1,38818

Продолжение таблицы 2

Время наблюдения t , год	Значение $\frac{T_{\text{ср}} - t}{\sigma}$	Значение функции $\Phi\left(\frac{T_{\text{ср}} - t}{\sigma}\right)$	Интенсивность отказов, 1/год
29	-3,6	0,000	1,53871
30	-4	0,000	1,69067
31	-4,4	0,000	1,84377
32	-4,8	0,000	1,99781
33	-5,2	0,000	2,15261
34	-5,6	0,000	2,30805
35	-6	0,000	2,46401
36	-6,4	0,000	2,62042
37	-6,8	0,000	2,77721
38	-7,2	0,000	2,93433
39	-7,6	0,000	3,09172
40	-8	0,000	3,24936

На рис. 1 показан график изменения интенсивности отказов силового трансформатора ТМ-1600/10/0,4.



Рис. 1. График интенсивности отказов трансформатора ТМ-1600/10/0,4

Выводы

В результате проведенных расчетов интенсивности отказов трансформатора ТМ-1600/10/0,4 можно сделать вывод, что интенсивность отказов за 40 лет эксплуатации возросла приблизительно на 3,25 1/год. По данным эксплуатационных служб ряда

промышленных предприятий г. Казани установлено, что в настоящее время в эксплуатации находится значительное количество трансформаторного оборудования с существенно превышающими паспортные значения сроков службы – более 60 %.

Полученные в результате исследований данные могут быть использованы для расчетов надежности схем систем внутриводского электроснабжения, а также для составления графиков планово-предупредительных ремонтов.[4, с. 79]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грачева Е.И.* Разработка регрессионных моделей для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии в низковольтных сетях / Е.И. Грачева, Т.А. Серпионова // Вестник КГЭУ. – 2015. – № 2(26). – С. 45–51.

2. *Садыков Р.Р.* Формирование моделей оценки эксплуатационной надежности систем внутриводского электроснабжения / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. 2017. № 1(47). С. 1–10.

3. *Садыков Р. Р.* Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, Р.Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. 2017. № 1(36). С. 48–52.

4. *Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В.* Исследования показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 9–10.

Авторы:

Петрова Рената Маратовна, аспирант, место учебы: ФГБОУ ВО «КГЭУ». Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета (КГЭУ). E-mail: 1998renata@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета (КГЭУ). 2014 г. «Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий». E-mail: grachieva.i@bk.ru.

IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ

ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В БЛИЖАЙШЕЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

Воробьев Е.С., Андреев В.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. Проанализированы тенденции и перспективы развития в ближайшие годы солнечной энергетики в мире. В целом в современном мире имеет место быстрый рост темпов выработки энергии на солнечных электростанциях.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, фотоэлектрические преобразователи, солнечная батарея.

Жизнь современного общества неразрывно связана с потреблением различных видов энергии. Так, выработка электрической энергии осуществляется различными станциями, работающими на разных принципах и с использованием различных видов топлива. Например, более 60% электроэнергии в Российской Федерации вырабатывается тепловыми электростанциями. Однако, они имеют ряд существенных недостатков: загрязнение окружающей среды, снижение концентрации кислорода в атмосфере. Кроме того, на таких электростанциях применяются в качестве топлива различные горючие ископаемые, являющиеся невозобновляемыми. Также следует отметить, что запасы горючих ископаемых на Земле распределены неравномерно. Строительство гидроэлектростанций, с одной стороны, обоснованно только на определенных реках с постоянным сильным течением, с другой стороны, их возведение в большинстве случаев является причиной нарушения естественной проходимости рек, а также может привести к другим нежелательным последствиям для окружающей среды. Выработка энергии на атомных электро-

станциях росла до аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году, но после этого атомная энергетика приостановила свое развитие, а во многих странах полностью отказались от неё. Совокупность перечисленных факторов, а также некоторых других, является стимулом для развития альтернативных методов производства электроэнергии [1, 2]. Одним из таких методов представляется солнечная энергетика, перспективы которой приведены, в частности, в работах [3-10].

Как показано в работе [11], в качестве солнечных батарей могут выступать любые наборы модулей, объединенных в одно устройство и способных воспринимать солнечное излучение. КПД фотоэлектрических преобразователей в настоящее время достигает 17% у массово производимых образцов и более 40% в опытных. В солнечных батареях практически отсутствуют подвижные части, что, наряду с простотой конструкции, является одним из главных их преимуществ [12]. В результате они имеют малый вес, высокую надежность, а также при максимальной простоте монтажа требуются минимальные требования к обслуживанию в процессе эксплуатации. Энергия, вырабатываемая солнечными панелями, напрямую преобразуется в электричество, являющееся на сегодняшний день наиболее гибкой и удобной формой для использования. Из недостатков солнечных батарей можно выделить:

- 1) зависимость от погоды и времени суток;
- 2) невысокий КПД;
- 3) чувствительность к высокой температуре;
- 4) чувствительность к неравномерности освещения;
- 5) чувствительность к загрязнению;
- 6) довольно высокая стоимость;
- 7) необходимость использования дорогостоящих аккумуляторов.

В работе [13] проанализированы экологические преимущества солнечной энергетика, а также отмечено, что на поверхности Земли, где солнце находится в зените, интенсивность солнечной радиации составляет примерно 1350 Вт/м^2 . Следовательно, в безоблачный полдень в такой местности с незагрязнённой прозрачной атмосферой мощность падающего солнечного излучения на площади $7,5 \text{ м}^2$ равна примерно 10 кВт. Если же

солнце расположено с наклоном к горизонту, то потери увеличиваются вследствие большей длины пути, который проходят солнечные лучи через атмосферу. Кроме того, присутствие пыли или водяного пара в атмосфере уменьшает поток энергии солнечной радиации. Обычно в местности, где солнце находится в зените, в середине ясного летнего дня поток солнечной радиации составляет около 1000 Вт/м^2 в направлении, перпендикулярном солнечным лучам. В центральных регионах России, где в полдень часто наблюдаются плотные облака, солнечная радиация на земной поверхности равна примерно 100 Вт/м^2 . Она может быть меньше этой величины в нечастых случаях, когда облака очень плотные. Тогда аналогичная мощность в 10 кВт достигается, если все солнечное излучение без потерь и отражений сосредоточено на площади 100 м^2 (что больше в 13 раз).

Одна из важнейших расчетных задач при проектировании всех типов солнечных электростанций состоит в выборе оптимального угла установки солнечных панелей [14]. Наиболее эффективна панель, ориентированная перпендикулярно к направлению солнечного излучения. Однако в этом случае потребуются возможность вращения панелей в двух плоскостях, так как положение солнца на небе зависит не только от времени суток, но и от сезона. Хотя такая система технически осуществима, но она сложна, следствием чего являются дороговизна и ненадежность. Кроме того, большие панели требуют больше места для плавного вращения. Панели, поворачивающиеся вслед за Солнцем, вырабатывают большее количество энергии по сравнению с неподвижными панелями. Однако, её эффективность превышает эффективность неподвижных панелей менее, чем на 30%. Поэтому панели на всех солнечных электростанциях практически всегда устанавливаются в фиксированном положении. Это делает их относительно дешевыми в установке и более надежными. В этом случае выбор угла наклона панели особенно важен.

Солнечные электростанции генерируют электричество днем. Поэтому возникает необходимость аккумулирования энергии для её использования в вечернее и ночное время суток. В этом плане предлагаются различные решения [15]. Одно из направлений связано с разработкой более эффективных аккумуляторов. Также предлагается для покрытия вечернего пика энер-

гопотребления использовать электричество от «классических» электростанций. Таким образом, проблемой солнечной энергетики является, наряду с необходимостью повышения КПД и снижения стоимости, решение вопросов аккумулирования и покрытия потребности в электроэнергии в периоды суток, когда интенсивность солнечного излучения недостаточна для эффективной работы солнечных электростанций. Без использования аккумуляторов солнечную энергетику можно рассматривать как способ сэкономить ископаемое топливо в дневное время суток. Однако, в этом случае не уменьшается общее количество классических электростанций. Солнечная энергетика сегодня может быть экономически целесообразна в удаленных регионах России, где нет возможности подключиться к электрической сети, например, в случае отдаленной от населенных пунктов станции сотовой связи.

В настоящее время в мире происходит интенсивный рост вновь вводимых мощностей генерации электрической энергии на солнечных электростанциях. В целом в мире в последние годы имеет место тенденция экспоненциального роста объемов потребления солнечной энергии (см. данные сайта <http://www.bp.com/statisticalreview>). Промежуток времени, в течение которого удваивается объем потребляемой в мире электрической энергии, генерируемой солнечными электростанциями, составляет в среднем три года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев В.В.* Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики: сб. тр. VI Всерос. научн. конф. (19-20 октября 2018 г., Чебоксары) / под ред. А.В. Кокшиной, А.В. Смирнова, В.Д. Кочакова, Е.И. Терукова, А.В. Бобыля. – Чебоксары, 2018. С. 114–120.

2. *Андреев В.В.* Перспективы развития ветроэнергетики // Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение: сб. тр. Междунар. летней научной школы-конференции, посв. 155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2018. С. 191–194.

3. *Gabor A.M., Schneller E.J., Seigneur H. et al.* The Impact of Cracked Solar Cells on Solar Panel Energy Delivery // 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 2020. P. 0810-0813.
4. *Tawil I.H., Benabeid M., Belhaj S., Sowid B.* Simulation and Evaluation of The Solar Energy Systems in The Public Buildings in The City of Tripoli-Libya: Mosques Sector // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC). 2021. P. 1–5.
5. *Hachim B., Dahlioui D., Barhdadi A.* Electrification of Rural and Arid Areas by Solar Energy Applications // 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). 2018. P. 1–4.
6. *Rojas D., Rivera M., Wheeler P.* Basic principles of solar energy // 2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). 2021. P. 1-6.
7. *Fang Y., Zhao S., Li Z.* Concentrating Solar Power Station Optimal Operation Model // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. P. 1–6.
8. *Qi Q., Jiang Y., Deng Sh.* A simulation study on solar energy seasonal storage by phase change material // 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2008. P. 106–109.
9. *Yi L., Bing-xi L., Yi Z., Zhong-bin F., Xin-hai X.* Study on Hybrid Solar Energy and Ground-Source Heat Pump System // 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. 2009. P. 845–848.
10. *Mina K.* The heat battery: Solar thermal energy storage for heating loads // 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference. 2012. P. 311–314.
11. *Глазырин М.А.* Солнечная энергия в энергетике // Аллея науки. 2018. Т. 7, № 11(27). С. 170–176.
12. *Коновалов Ю.В., Лукьянов А.В.* Перспективы развития солнечной энергетики // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 62–65.
13. *Коротков С.Е.* Экологическое преимущество возобновляемых источников энергии (ветровая и солнечная энергетика) // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Юрга, 27–28 ноября 2014 года / Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета. – Юрга: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. С. 172–174.
14. *Воробьев Е.В., Корзенков П.Г.* Солнечная энергетика: состояние и перспективы // Инновационные процессы и технологии в совре-

менном мире: Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 29–30 ноября 2013 года / Искужин Т.С. (отв. редактор). – Уфа: Автономная некоммерческая организация «Исследовательский центр информационно-правовых технологий», 2013. С. 150–152.

15. *Исаков Д.А.* Солнечная энергетика. Основные виды солнечной энергетики // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации: сборник статей международной научно-практической конференции, Пермь, 25 ноября 2016 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2016. С. 82–86.

Авторы:

Воробьев Евгений Сергеевич, аспирант кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил факультет энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» в 2019 году (магистратура). E-mail: ves_asp@mail.ru.

Андреев Всеволод Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил физико-математический факультет Чувашского государственного университета в 1989 году. Учёную степень по теме «Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых гранулах катализатора» получил в 1994 году. E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru.

УСТРОЙСТВО СИНХРОНИЗАЦИИ С ТРЕХФАЗНОЙ СЕТЬЮ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УСТРАНЕНИЯ ГОЛОЛЕДОБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Якупов Н.М., Арсланов А.Д., Малаева Е.Д., ФГБОУ ВО КГЭУ, г. Казань, Россия.

Аннотация. В работе описана проблема гололедообразования на высоковольтных линиях электропередачи в осенне-зимний период. Описывается метод решения данной проблемы с помощью системы мониторинга и устранения гололедообразования на воздушных линиях электропередачи. Рассматривается алгоритм работы модуля плавки изморозевых отложений в данном комплексе. Приводится описание

работы устройства синхронизации модуля плавки с трехфазной сетью.

Ключевые слова: плавка гололеда, система мониторинга гололедообразования, высоковольтные линии электропередачи, датчик фазы.

Для передачи электроэнергии на большие расстояния используют высоковольтные линии электропередачи (ВЛЭП). В осенне-зимний период особо актуальной является проблема гололедно-изморозевых отложений. Для решения данной проблематики осуществляется мониторинг гололёда (рис. 1) с помощью датчика контроля для последующей плавки изморози, при наличии критических масс наледи, с помощью установки плавки, которая связана с датчиком контроля. Данный комплекс питается от трёхфазной дизель-генераторной установки. Модуль плавки гололёда в данной установке должен синхронизироваться с трехфазной питающей сетью. Для этого в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была разработана плата для синхронизации блока управления с трёхфазной сетью переменного тока.

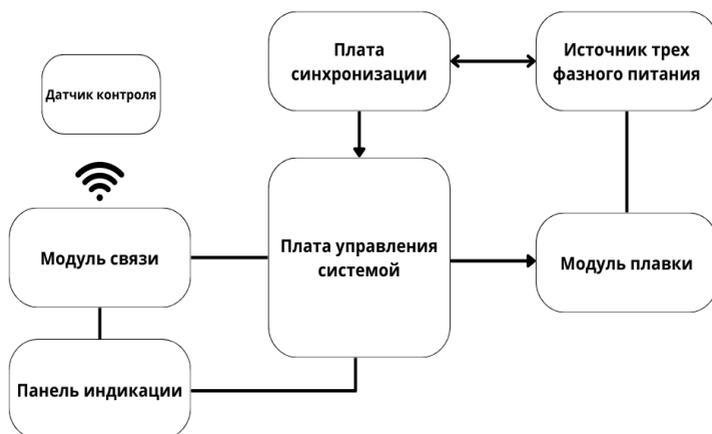


Рис. 1. Блок-схема системы мониторинга гололедообразования на высоковольтных линиях электропередач

Для разработки устройства синхронизации были проведены исследования способов работы схемы датчика фазы, оптогаль-

ванической развязки, работы с трехфазной сетью и принципы действия стабилизаторов.

Плата синхронизации с трехфазной сетью была представлена на рис. 2. Также ниже приводится схема электрическая принципиальная разработанного устройства и описание ее работы (рис. 3).

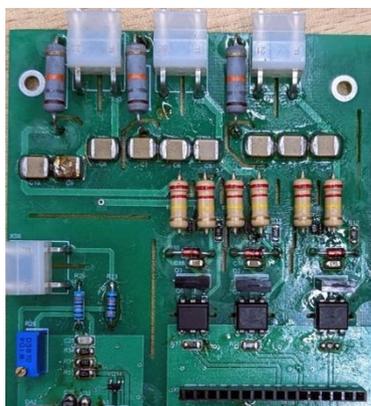


Рис. 2. Блок синхронизации с трехфазной сетью на печатной плате

Когда на канал А подается положительная полуволна, заряжаются конденсаторы С2-С4, предназначенные для сглаживания напряжения и формирования временной задержки. Затем заряжается конденсатор С13, предназначенный для поддержки напряжения на составном транзисторе Q1. После того, как конденсатор С13 зарядился, открывается составной транзистор и начинается протекание тока через светодиод в оптопаре Q2 с высоким выходным напряжением. На выходе канала из оптопары через резистор R18 выходит прямоугольный импульс обратной полярности на SA, который поступает затем на вход микроконтроллера в системе управления плавкой для синхронизации по фазе. Во время отрицательной полуволны конденсаторы С2-С4 и С13 разряжаются и через составной транзистор, и через оптопару ток не идет. Диоды VD2 и VD3 используются в качестве защиты оптопары. Аналогично работает схема также и для каналов В и С. На рис. 4 приводится осциллограмма работы данного узла, где верхние 3 графика соответствуют моментам

появления пиковых значений напряжения на всех фазах, а нижний отображает выход синхронизации по каналу А.

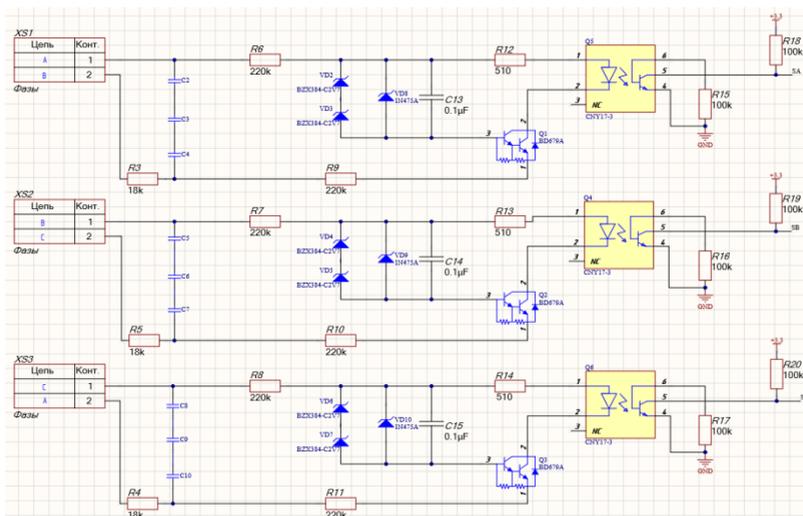


Рис. 3. Схема платы синхронизации с трехфазной сетью

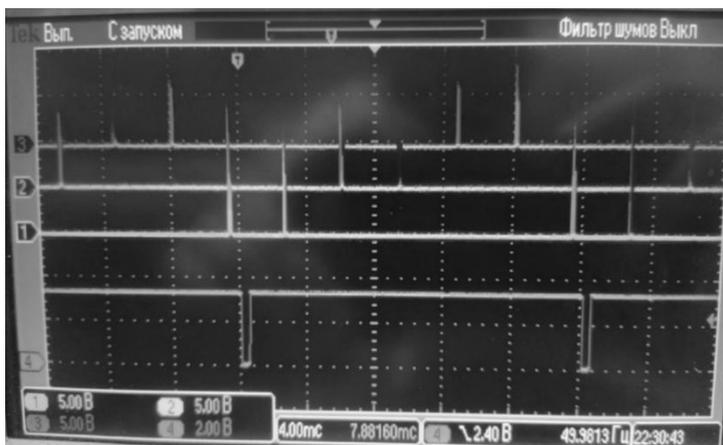


Рис. 4. Сигнал синхронизации по фазе и импульсы, управляющие отпиранием тиристоров в выпрямителе

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федера-

ции в рамках госзадания на выполнение НИР по теме "Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей" (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллазянов Э.Ю.* Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов / Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Шумихина О.А., Гибадуллин Р.Р. – Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 23(6). С. 3-15.

2. *Бучинский В.Е.* Гололед и борьба с ним. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 68 с.

3. *Дьяков А.Ф.* Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / Засыпкин А.С., Левченко И.В. – Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000. 284 с.

4. *Левченко И.И.* Плавка гололёда на проводах и тросах воздушных линий высокого напряжения: Учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 1998. 44 с.

5. Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация». В 3 т. Т. 1. Электроэнергетика и электроника: матер. конф. (Казань, 28–29 апреля 2020 г.) / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. 636 с.

6. *Стороженко Д.Ю.* Совершенствование методики применения устройств встроенной диагностики контактной сети / Рыжков А.В. – Известия Транссиба. 2016. № 4. С. 37–46.

7. *Ярославский Д.А.* Методика мониторинга гололедных отложений на проводах ВЛ с учетом разрегулировки линейной арматуры / Садыков М.Ф., Конов А.Б., Иванов Д.А., Горячев М.П., Ямбаева Т.Г. – Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 5–6. С. 89–97.

Авторы:

Якупов Нияз Маратович, ФГБОУ ВО КГЭУ, студент кафедры Промышленная электроника, гр. ПЭ-1-20. E-mail: janijaz@yandex.ru.

Арсланов Амир Динарович, ассистент кафедры Теоретические основы электротехники. E-mail: arslanovad97@gmail.com.

Малаева Ева Денисовна, ФГБОУ ВО КГЭУ, студент кафедры Промышленная электроника, гр. ПЭ-2-20. E-mail: mallaeva_eva01@mail.ru.

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю., Горячев М.П., ФГБОУ ВО КГЭУ, г. Казань, Россия.

Аннотация. В данной статье приводится сравнительный анализ существующих роботизированных комплексов, а также информация об разработанном аналоге.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, аналоги, ВЛЭП, анализ, перспективы развития.

Электрическая энергия в современном обществе используется повсеместно во всех сферах человеческой деятельности, начиная с мелких бытовых приборов и устройств, заканчивая огромными промышленными машинами. Передача энергии на большие расстояния осуществляется по средству воздушных линий электропередач (ВЛЭП). Поэтому наиболее важным для распределительного электросетевого комплекса является создание условий для бесперебойной передачи электрической энергии, а следовательно, и в эффективном обследовании состоянии линии и активном обслуживании при обнаружении проблем на них. Однако в связи с их протяженностью и в некоторых случаях труднодоступностью, воздушные линии могут находиться в болотистой местности, в лесонасаждении, а также перекинуты между противоположными берегами рек, что делает их анализ достаточно трудным и не эффективным. Поэтому для таких целей более целесообразно использовать автономные роботизированные комплексы, которые уменьшают опасность непосредственного осмотра, а также более эффективны в не доступных для человека местах.

В связи с этим многие страны начали активно разрабатывать и применять различные комплексы для осмотра ВЛЭП. Рассмотрим некоторые из них. Начнем с робота США LineRanger, представленного на рис. 1.

Данный комплекс содержит четыре двигателя, что позволяет ему быстро и эффективно перемещаться по линии, цифровую

камеру способную изменять угол наклона, при помощи которой диспетчер управляет роботом, и тепловизор [1].



Рис. 1. Робот LineRanger

Одним из недостатком робота является необходимость наличия двух проводов для перемещения, а также наличие персонала для его установки.

Следующим роботом достойным внимания является LineScout [2], разработанный в канадском институте Hydro-Québec представленный на рис. 2.



Рис. 2. Канадский робот LineScout

Причиной его создание стала снежная буря, из-за которой на проводах образовался значительный слой льда. Это привело к тому, что значимая воздушная линия оборвалась под его весом нарушив подачу электрической энергии.

Данный робот в отличие от аналогов способен закручивать и раскручивать различные крепления, убирать снег с проводов, а также при наличии убирать с линии различный мусор. Так же в нем присутствует GPS и ряд камер, позволяющих получать данные в реальном времени. Для дистанционного управления используется специальный джойстик [3, с. 267].

Отечественные инженеры показали свою концепцию для обследования воздушных линий. Робот Канатоход, представленный на рис. 3, выполнен на базе квадрокоптера, к которому присоединены различные датчики.



Рис. 3. Канатоход

В него входят тепловизор, датчик чрезвычайных ситуаций, система дистанционного контроля. Он служит для облета воздушных линий, однако здесь и проявляется его существенный недостаток сбор данных возможен только при хороших погодных условиях, т. к. при сильном ветре управление данным комплексом становится затруднительным, и в некоторых случаях невозможным.

Проанализировать данные разработки, на базе ФГБОУ ВО «КГЭУ» был разработан, опытный образец роботизированного комплекса, для обследования воздушных линий рис. 4 [4].



Рис. 4. Экспериментальный образец

Планируется что робот будет выполнять следующие задачи:

- удалённое управление платформой;
- система автоматического подъёма на провод ВЛ;
- электромагнитная/ультразвуковая диагностика изоляторов на ВЛ;
- магнитный контроль состояния стального сердечника при наличии;
- построение трёхмерных моделей окружающих объектов;
- инфракрасная съёмка;
- автоматизированный процесс обработки данных;
- борьба с гололёдно-изморозевыми отложениями плотностью не более $0,3 \text{ кг/м}^3$ [4, 5].

На рис. 5 [5] представлен планируемый результат, в виде 3D модели.

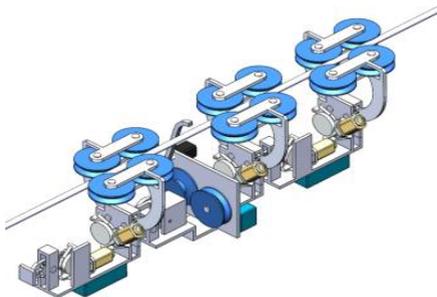


Рис. 5. 3D модель роботизированного комплекса

Выводы

Таким образом, проанализировав плюсы и минусы существующих аналогов, можно утверждать, что проблема обследования и предотвращения аварийных ситуаций на ВЛЭП, решена не полностью, что делает актуальным работы по созданию специального роботизированного комплекса. В разрабатываемой нами модели роботизированного комплекса планируется устранить основные недостатки существующих аналогов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Примеры использования роботов в энергетике [Электронный ресурс] <http://elektrik.info/main/news/1188-ispolzovanie-robotov-v-energetike.html> (дата обращения: 20.10.2022).

2. Электроэнергетика и роботы [Электронный ресурс] <https://robotrends.ru/robopedia/elektroenergetika-i-roboty> (дата обращения: 20.10.2022).

3. Хамидуллин И.Н. Обзор роботов инспекторов, используемых для диагностики и обслуживания высоковольтных ЛЭП // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация». Сб. статей/ Под. Ред. Э.Ю, Абдуллазянова. Казань, 2022. С. 266-269.

4. Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020; 22(3):97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106> (дата обращения 20.10.2022).

5. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф. Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19 (3-4):69-79. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-69-79> (дата обращения 20.10.2022).

Авторы:

Хамидуллин Ильдар Ниязович ФБГОУ ВО КГЭУ, бакалавр, студент, студент кафедры «Промышленная электроника». E-mail: ildar.ildar-xam2017@yandex.ru.

Маслов Савелий Юрьевич ФБГОУ ВО КГЭУ, бакалавр, студент, студент кафедры «Промышленная электроника». E-mail: saveli2000@gmail.com.

Горячев Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», ФБГОУ ВО КГЭУ. E-mail: goryachev91@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ БИОМАССЫ В СМЕСЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОПОРЦИЯМИ

Лавренов В.А., Фалеева Ю.М., Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия.

***Аннотация.** Использование растительной биомассы в качестве источника для получения энергии может способствовать снижению зависимости от ископаемого топлива. В статье рассмотрен пиролиз, процесс термохимической конверсии биомассы. В качестве метода исследования использовали термогравиметрический анализ процесса пиролиза трех компонентов растительной биомассы в бинарных смесях при четырех скоростях нагрева.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, биоэнергия, биомасса, пиролиз, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин.*

В связи с экологическими проблемами и нехваткой традиционных ископаемых топлив все более актуальным становится использование возобновляемых источников энергии. Растительная биомасса является экологически чистым, возобновляемым и широко распространённым сырьём для производства энергии, а также ценных химикатов. Производство энергии из растительной биомассы в последние годы привлекает особое внимание, поскольку оно имеет много преимуществ, включая снижение зависимости от ископаемого топлива, а также содействие защите окружающей среды [1]. Растительная биомасса является CO₂-

нейтральным топливом: при ее сжигании выделяется столько же углекислого газа, сколько было поглощено растением из атмосферы в его период роста. Биомасса может быть преобразована в энергию или топливо с помощью термохимических и биохимических процессов. Пиролиз считается фундаментальным процессом термохимической конверсии биомассы и заключается в нагревании углеводородного сырья в инертной среде и деструкции высокомолекулярных соединений. Продуктами пиролиза являются твёрдый остаток (биоуголь), жидкость (биомасло) и смесь неконденсируемых газов (CO_2 , H_2 , CO , C_nH_m и пр.). Распределение продуктов пиролиза зависит от многих факторов, таких как вид перерабатываемого сырья, температура, скорость нагрева, время выдержки.

В Объединенном институте высоких температур РАН созданы установки по исследованию и отработке новых методов энергетической утилизации биомассы, которые позволят осуществить переход к низкоуглеродной энергетике [2, 3]. Пиролиз (низко- и высокотемпературный) является основным процессом, происходящим при реализации известных технологий энергетической утилизации биомассы. В связи с этим изучение влияния компонентного состава перерабатываемого растительного сырья на процесс его термохимической деструкции является целью данного исследования.

Органическая часть растительной биомассы состоит из трёх основных компонентов: целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Их процентное содержание в биомассе варьируется в зависимости от типа растительного сырья. Свойства этих компонентов оказывают большое влияние на характеристики пиролиза из-за их различной реакционной способности при воздействии температуры [4, 5]. Целлюлоза представляет собой линейный полисахарид, состоящий из повторяющихся молекул глюкозы. Прочная водородная связь между прямыми цепями придаёт целлюлозе кристаллическую структуру. Гемицеллюлоза также является полисахаридом, но в отличие от целлюлозы аморфным, а также имеет разветвлённую структуру. Оба полимера, целлюлоза и гемицеллюлоза, относительно легко гидролизуются и составляют две трети растительной биомассы. Лигнин представляет собой сильно разветвлённый ароматический полимер, не имею-

щий упорядоченных повторяющихся звеньев. Из всех трёх компонентов лигнин наиболее устойчив к термическому разложению.

Ранее были выполнены исследования пиролиза компонентов по-отдельности [4-6], а также сравнение пиролиза образцов реальной растительной биомассы и модельных смесей, пропорции трёх компонентов в которых совпадали с их пропорциями в реальной биомассе [7]. В результате был сделан вывод о том, что компоненты проявляют различное поведение при пиролизе. Однако можно прогнозировать распределение продуктов пиролиза в зависимости от состава компонентов с точностью до 7,7 % мас. В данном исследовании была поставлена цель изучить относительный вклад каждого из компонентов в процесс термического разложения смесей, состоящих только из двух составляющих.

Для исследования пиролиза были закуплены коммерчески доступные органические компоненты: микрокристаллическая целлюлоза МКЦ 102 (Ц), гемицеллюлоза (ГЦ), полученная из грибов *Trichoderma reesei*, и лигнин гидролизный (Л). Перед началом исследования образцы компонентов были высушены в сушильном шкафу для снижения содержания относительной влажности до 1-3 % мас. Смеси компонентов изготавливались из двух видов материала в пропорции 1:1. Подготовка включала точное взвешивание на лабораторных весах и перемешивание пестиком в ступке для создания контакта между частицами.

Пиролиз образцов проводили в термогравиметрическом анализаторе NETZSCH STA 2500 Regulus (Япония). Скорость нагрева составляла: 5, 10, 20, 30 °С/мин. Инертная среда обеспечивалась продувкой азотом 50 мл/мин. Образцы смесей компонентов массой 20 мг прессовались в таблетки, помещались в корундовые (Al_2O_3) тигли и нагревались до температуры 905 °С с выдержкой при этой температуре в течение 7 мин.

На рис. 1 представлены результаты термогравиметрического анализа образцов смеси Ц-Л (целлюлоза и лигнин в пропорции 1:1). Кривые ТГ и ДТГ показывают потерю массы и скорость потери массы, соответственно. Из рисунка 1 видно, что с увеличением скорости нагрева от 5 до 30 °С/мин кривая потери массы сместилась в сторону более высоких температур. Также

можно заметить, что максимальная скорость пиролиза увеличивалась с ростом скорости нагрева, также как и температуры пиковой скорости пиролиза. Это объясняется тем, что при более высоких скоростях нагрева материал не успевает прореагировать и разложиться до той же степени, что при низких скоростях при той же температуре. Этот факт может быть следствием ограничений по тепло- и массообмену [8]. При увеличении скорости нагрева температура в окружающем пространстве и на поверхности образца может быть выше, чем температура в его центре, и, соответственно, могут происходить разные процессы разложения или скорости высвобождения летучих веществ.

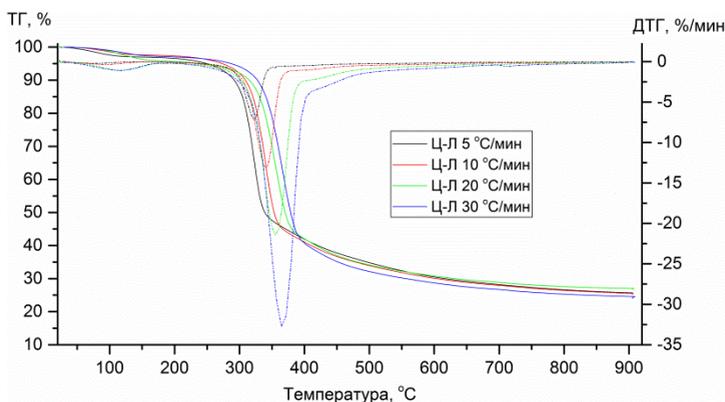


Рис. 1. ТГ и ДТГ кривые пиролиза смеси Ц-Л (целлюлоза и лигнин)

На рис. 2 представлены результаты термогравиметрического анализа образцов смеси ГЦ-Л в пропорции 1:1, а на рис. 3 – образцов смеси Ц-ГЦ в пропорции 1:1.

Как видно из рисунков, пиролиз смесей, содержащих гемицеллюлозу, отличался наличием двух пиков на кривых ДТГ: начало разложения характеризовалось более низкой температурой, чем при пиролизе смеси Ц-Л. Так, разложение смеси ГЦ-Л начиналось при температуре 160-170 °С, смеси Ц-ГЦ – при температуре 180-200 °С, а смеси, не содержащей гемицеллюлозу, при температуре больше 250 °С. Это подтверждает тот факт, что аморфная гемицеллюлоза является наименее устойчивым к воздействию температуры компонентом. Влияние скорости нагрева

на расположение кривых потери массы и на температуры пиково-вой скорости пиролиза было аналогичным тому, что наблюда-лось при пиролизе смеси Ц-Л (рис. 1).

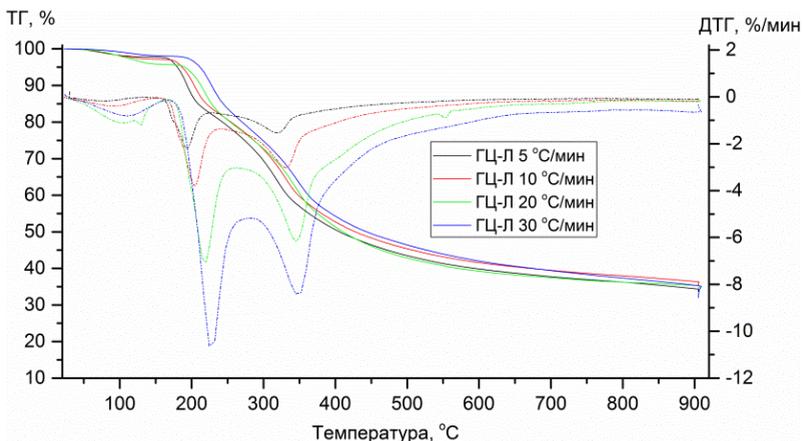


Рис. 2. ТГ и ДТГ кривые пиролиза смеси ГЦ-Л (гемицеллюлоза и лигнин)

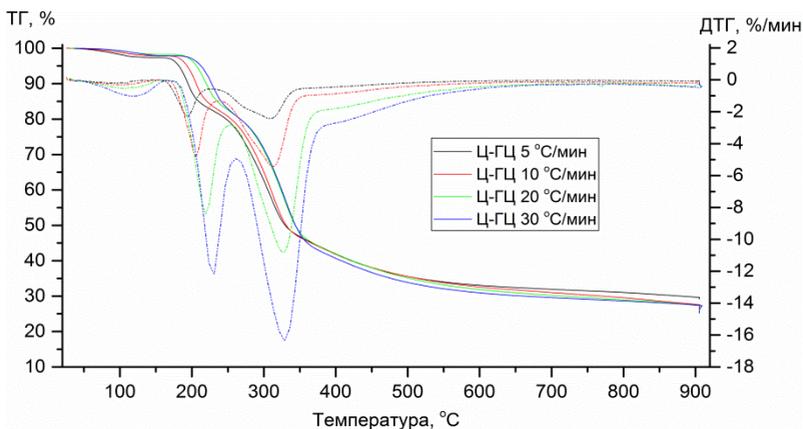


Рис. 3. ТГ и ДТГ кривые пиролиза смеси Ц-ГЦ (целлюлоза и гемицеллюлоза)

В табл. 1 представлены значения температуры, соответст-вующей максимальной скорости потери массы на кривой ДТГ

для различных скоростей нагрева. Значение T1 соответствует температуре первого пика, а значение T2 – температуре второго пика (для смесей, содержащих гемицеллюлозу). В случае смеси Ц-Л второй пик отсутствует.

Таблица 1
Температура максимальной скорости потери массы при пиролизе смесей

Образец	Ц-Л		ГЦ-Л		Ц-ГЦ	
Скорость нагрева, °С/мин	Температура пика на кривой ДТГ, °С					
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
5	322,5	-	193,5	318,9	193,9	309,2
10	326,1	-	204,1	331,6	205,3	312,7
20	355,7	-	218,6	345,7	219,4	327,0
30	366,3	-	227,9	348,1	228,8	328,9

Выводы

Было проведено исследование пиролиза смесей, состоящих из двух компонентов, которое позволило выявить влияние различных скоростей нагрева на разложение перерабатываемого материала. Максимальная скорость потери массы при пиролизе достигается при температуре 366,3 °С в процессе разложения смеси целлюлозы и лигнина при скорости нагрева 30 °С/мин. Важным выводом является тот факт, что растительное сырье с высоким содержанием гемицеллюлозы является наименее устойчивым к термической деструкции, а также имеет два ярко выраженных пика разложения. Растительная биомасса, содержащая в большом количестве целлюлозу и лигнин, подвержено наиболее интенсивному пиролизу, сопровождаемому высокой скоростью разложения материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00835.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pham X.-H. Oxidative pyrolysis of pine wood, wheat straw and miscanthus pellets in a fixed bed / X.-H. Pham [et al.] // Fuel Processing Technology. 2018. № 178. P. 226–235.

2. *Директор Л.Б.* Численное моделирование энерготехнологического комплекса с реактором торрефикации / Л.Б. Директор, В.М. Зайченко, В.А. Синельщиков // ТВТ. 2017. Т 55. № 1. С. 133–140.

3. *Батенин В.М.* Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо / В.М. Батенин [и др.] // Доклады академии наук. 2012. Т. 446. № 2. С. 179–182.

4. *Yu J.* Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass / J. Yu [et al.] // Fuel. 2017. № 191. P. 140–149.

5. *Zhou H.* The pyrolysis simulation of five biomass species by hemicellulose, cellulose and lignin based on thermogravimetric curves / H. Zhou [et al.] // Thermochimica Acta. 2013. № 566. P. 36–43.

6. *Yang H.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis / H. Yang [et al.] // Fuel. 2007. № 86. P. 1781–1788.

7. *Зайченко В.М., Лавренов В.А., Фалеева Ю.М.* Влияние межкомпонентного взаимодействия на теплотехнические характеристики продуктов пиролиза // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву / под ред. В.Г. Султанова, Е.А. Салганского. Черноголовка, 2022. С. 101–102.

8. *Ounas A.* Pyrolysis of olive residue and sugar cane bagasse: Non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis / A. Ounas [et al.] // Bioresource Technology. 2011. № 102. P. 11234–11238.

Авторы:

Лавренов Владимир Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОИВТ РАН. Закончил факультет Энергомашиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Ученую степень получил в 2017 году по направленности Энергетические системы и комплексы. E-mail: v.a.lavrenov@gmail.com.

Фалеева Юлия Михайловна, научный сотрудник, ОИВТ РАН. Закончила факультет Энергомашиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2016 г. E-mail: faleeva.julia@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК К РАБОТЕ НА МЕТАНОВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

Ведерникова К.О., Кесель Л.Г., КНИТУ-КАИ им. А.Н Туполева, г. Казань, Россия.

Кесель Б.А. ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника», г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В статье представлены особенности реконструкции технологических систем энергетических газотурбинных установок, находящихся в эксплуатации, для работы на метановодородном топливе.*

***Ключевые слова:** метановодородное топливо, технологические системы газотурбинных установок, обеспечивающие системы газотурбинных установок, динамические обслуживающие системы газотурбинных установок, система подготовки подачи топлива, система газообнаружения.*

Распоряжением Правительства Российской Федерации № 2162-р от 5.08.2021 г. утверждена «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» [1]. Согласно п. 32 [1] одним из направлений работы инжиниринговых центров, которые планируется создать в рамках указанной концепции, является сфера производства материалов и комплектующих для топливных элементов, газовых турбин и водородных энергетических установок на их основе.

Разработка энергетических газотурбинных установок (ГТУ), способных использовать в качестве топлива метановодородные смеси с различной концентрацией водорода, уже началась в России. По данным [2], в 2020 г. Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва (Самара) и АО «Силовые машины» (Санкт-Петербург) создали совместное конструкторское бюро «Водород СМ», где проектируется ГТУ мощностью 65 МВт, работающая на метановодородном топливе. По заявлению разработчиков указанной установки, использование метановодородной смеси с долей водорода 40–50 % увеличит мощность ГТУ на 10 %.

В промышленной эксплуатации находится значительное количество стационарных и мобильных энергетических газо-

турбинных и приводных установок, которые не приспособлены к работе на водородосодержащем топливе различных видов. Энергоэффективность таких установок является приемлемой, особенно для объектов распределенной энергетики [3, 4]. Для перевода данного парка установок в работу на водородосодержащем топливе необходимы значительные объемы работ по реконструкции газотурбинных двигателей, входящих в их состав, и технологических (вспомогательных) систем ГТУ, обеспечивающих их работу.

Цель работы – определить направления реконструкции вспомогательных технологических систем ГТУ и номенклатуру указанных систем для обеспечения работы на водородосодержащем топливе. В настоящей работе не рассматриваются направления реконструкции газотурбинных двигателей, входящих в состав мобильных ГТУ.

В работе [5] представлена классификация и номенклатура вспомогательных технологических систем стационарных ГТУ.

1. Обеспечивающие вспомогательные системы ГТУ:

- система подачи циклового воздуха;
- система подачи топлива (основного и резервного);
- система электропитания ГТУ;
- система электрического запуска, имеет альтернативное применение (часть газотурбинных двигателей запускается от воздушных (газовых) стартеров, а часть – от электрических стартеров; газотурбинных двигателей с одновременным сочетанием воздушного и электрического запуска не существует);
- система противопожарной защиты.

2. Потребляющие вспомогательные системы ГТУ:

- система выхлопная;
- система охлаждения масла из системы смазки;
- система воздушной рекуперации;
- система передачи крутящего момента.

Реконструкция систем подачи топлива (основного и резервного) и противопожарной системы должна содержать следующие особенности. Объем реконструкции вспомогательных технологических систем ГТУ в значительной степени определяется видом планируемого к применению вида топлива при условии отсутствия потери свойства мобильности. В настоящее время в

качестве водородосодержащего топлива, рекомендованного для работы газовых турбин, его виды, представленные в таблице 1).

Таблица 1

Виды водородосодержащие топлива

№ п/п	Вид сырья	Метод производства	Продукт производства	Хранение	Средства выработки электроэнергии
1	Природный газ	Паровая конверсия метана	Метановодородная смесь	Газ-гольдеры	Газовые турбины на продуктах сгорания метановодородной смеси
2	Метанол	Термохимическая конверсия метанола	Синтез-газ с содержанием водорода до 50 %	Емкости с жидким метанолом	Газовые турбины на продуктах сгорания синтез-газа в составе ГТУ, и встроенной в ГТУ регенеративной системой термохимической конверсии метанола
3	Аммиак	Традиционная технология получения	Сжиженный аммиак	Емкости с жидким аммиаком	Газовые турбины, на продуктах сгорания аммиака

По данным таблицы, наиболее адаптированы к работе на водородосодержащем топливе ГТУ с характеристиками материалов камер сгорания и турбин, адаптированные к работе на сжигании аммиака в воздушной среде и соответствующих продуктов сгорания.

ГТУ, использующие в качестве топлива продукты термохимической конверсии метанола, должны быть доработаны с включением в состав регенеративной системы термохимической конверсии метанола. Это решение позволяет сделать указанную регенеративную систему в приемлемых габаритах на буксируемом автомобильном шасси.

Для ГТУ, использующих в качестве топлива метановодородную смесь, необходимо создание специальных блоков подготовки и получения указанных смесей в малогабаритном исполнении. Создание данных блоков в необходимых габаритах в мобильном исполнении является весьма проблематичным на текущий момент развития химических технологий паровой конверсии природного газа.

Одновременно с реконструкцией топливной системы необходимо будет реконструировать систему регулирования, которая могла бы изменить соотношение новых видов топлива и циклового воздуха в зависимости от режима работы приводного двигателя ГТУ. Соответственно, должна быть изменена настройка аварийного останова по превышению температуры газов перед турбиной, поскольку при использовании водородосодержащего топлива будет повышаться температура газов перед турбиной.

Реконструкции подлежат и системы противопожарной защиты эксплуатируемых ГТУ. Это должно быть актуальным для установок, использующих в качестве топлива метановодородную смесь или метанол. Реконструкция систем противопожарной защиты будет заключаться в замене установок углекислотного пожаротушения на установки азотного пожаротушения. Согласно данным статьи [6] установки азотного пожаротушения используются при возгорании различных горючих веществ, горение которых не может происходить без доступа воздуха, нефтепродуктов, газового конденсата, водорода, водородосодержащих компонентов в замкнутых объемах и помещениях. Кроме того, данные установки применяются для предотвращения возникновения пожаро- и взрывоопасных ситуаций на указанных объектах. Принцип работы установок азотного пожаротушения основан на инертных свойствах создаваемой воздушной смеси с содержанием азота 95–99 %.

Реконструкция системы газообнаружения будет заключаться в установке датчиков газообнаружения, определяющих концентрацию водорода в отсеках ГТУ. Установка указанных датчиков в дополнение к имеющимся в составе ГТУ обусловлена иными свойствами водорода по сравнению с природным газом. Водород при смеси с воздухом образует взрывоопасную смесь

(гремучий газ) в объемном отношении водорода и кислорода 2:1 или водорода и воздуха 2:5 (воздух содержит примерно 21 % кислорода). Природный газ образует взрывоопасную смесь при соотношении 1:4. Минимальная норма объема отсека для установки одного датчика – 100 м³. Датчики должны быть объединены в систему подобно датчикам обнаружения природного газа с соответствующей возможностью выдавать определенные сигналы оператору и на систему автоматического управления ГТУ.

Реконструкция системы вентиляции ГТУ предполагает изменение объемов и производительности используемых вентиляторов в связи с отличительными свойствами компонентов водородосодержащего топлива. Необходимо учитывать производительность вентиляторов в ситуациях несостоявшегося запуска, при срабатывании датчиков загазованности и т.п. Кроме того, в каналах вентиляции необходимо установить герметизирующие стальные заслонки, изолирующие конкретный отсек от окружающей среды. Заслонки должны быть оборудованы автономными приводами.

Работы, выполняемые при реконструкции ГТУ под использование водородосодержащего топлива, могут иметь и другие особенности, связанные с конструктивным изменением системы запуска приводного газотурбинного двигателя, например, при работе на аммиаке в качестве топлива необходимо учитывать его низкую воспламеняемость.

Кроме основных направлений реконструкции технологических (вспомогательных) систем ГТУ, следует отметить отсутствие нормативной документации в части обеспечения безопасности новых или реконструированных ГТУ, использующих водородосодержащие виды топлива.

На рассмотрении Государственной Думы РФ находится Федеральный закон «Технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода», в котором содержатся некоторые нормы на проектирование мероприятий реконструкции ГТУ и создание новых ГТУ, использующих водородное топливо. По мере утверждения данного документа будут разработаны соответствующие нормы проектирования систем ГТУ, использующих метано-водородное топливо.

Анализ приведенных в настоящей работе направлений реконструкции, находящихся в эксплуатации энергетических ГТУ под использование водородосодержащего топлива, позволяет сделать следующие выводы.

Выводы

1. Направление реконструкции энергетических ГТУ, находящихся в эксплуатации, под использование водородосодержащих видов топлива является актуальным и может быть совмещено с проведением капитального ремонта указанных установок.

2. Реконструкция энергетических ГТУ касается ряда технологических вспомогательных систем и транспортных средств, используемых в составе указанных установок.

3. Особое внимание при разработке конструктивных мероприятий при реконструкции следует уделить вопросам обеспечения промышленной безопасности реконструируемых ГТУ.

4. В части обеспечения разработок ГТУ, связанных с использованием водородосодержащего топлива, необходимо создание нормативно-технической документации, обеспечивающей нормы безопасности ГТУ, использующих указанные виды топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения: 16.11.2021).

2. КБ «Водород СМ» приступило к созданию первой в России ГТУ на метановодородном топливе [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/17263860.htm> (дата обращения: 16.11.2021).

3. *Кесель Б.А.* Концепция восстановления служебных характеристик газотурбинных установок, выполненных на базе конвертированных газотурбинных двигателей, модернизацией технологических систем в условиях эксплуатации. Казань: КГЭУ, 2015. 412 с.

4. *Кесель Б.А., Кесель Л.Г.* Энергоэффективность мобильной газотурбинной электростанции малой мощности для электроснабжения

буровой установки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 1. С. 84–87.

5. *Кесель Б.А., Кесель Л.Г., Терентьев Н.Д.* Энерговооруженность мобильных компрессорных станций для перекачки газа из магистральных газопроводов, выводимых в ремонт // Проблемы и перспективы развития энергетики и энергоэффективности: Материалы 3-й Международ. науч.-техн. конф., г. Чебоксары, 14–15 нояб. 2019. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019. С. 394–399.

6. Системы азотного пожаротушения НПК «Грасис» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200050339> (дата обращения: 16.11.2021).

Авторы:

Ведерникова Ксения Олеговна магистрант 2 года КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань.

Кесель Людмила Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Кесель Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент, ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника» Казань, главный конструктор.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОМБИНИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

Семерин В.Г., Оренбургский Государственный Университет, г. Оренбург, Россия.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки модели энергетического комплекса для нескольких источников альтернативной энергии.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, когенерация, модель энергетического комплекса.

В модели энергетического комплекса (ЭК) используются возобновляемые источники энергии, как и все энергетические системы основой модели служит соблюдение баланса выработки и потребления энергии. В состав ЭК входят: ветрогенератор, солнечная панель, накопители энергии блоки нагрузки и резервный источник (роль которого выполняет дизель-генератор).

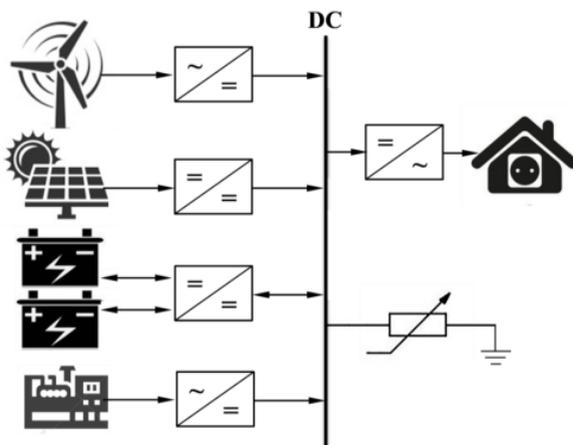


Рис. 1. Функциональная схема энергетического комплекса

Работа ЭК должна выполняться с соблюдением требования бесперебойного электроснабжения потребителя, при этом необходимо использовать альтернативные источники энергии, как можно в большем объеме, а в тех случаях, когда система будет испытывать дефицит энергии, прибегать к резервному источнику питания – дизель-генератору. Переключение будет занимать определённое время, поскольку мы не можем держать дизель-генератор в горячем резерве (из-за постоянного потребления топлива) и придется предусмотреть переключение лишь в момент возникновения дефицита. При возникновении краткосрочных ситуаций недостатка энергии, можно воспользоваться накопителями энергии (блоки аккумуляторных батарей). В том случае, когда нагрузка будет падать и мы имеем ситуацию избытка генерации энергии, можно предусмотреть балластную нагрузку, либо использовать накопители энергии иного рода.

Для моделирования была выбрана среда Matlab Simulink, технические возможности которого полностью обеспечивают задачи моделирования модели разрабатываемого энергетического комплекса.

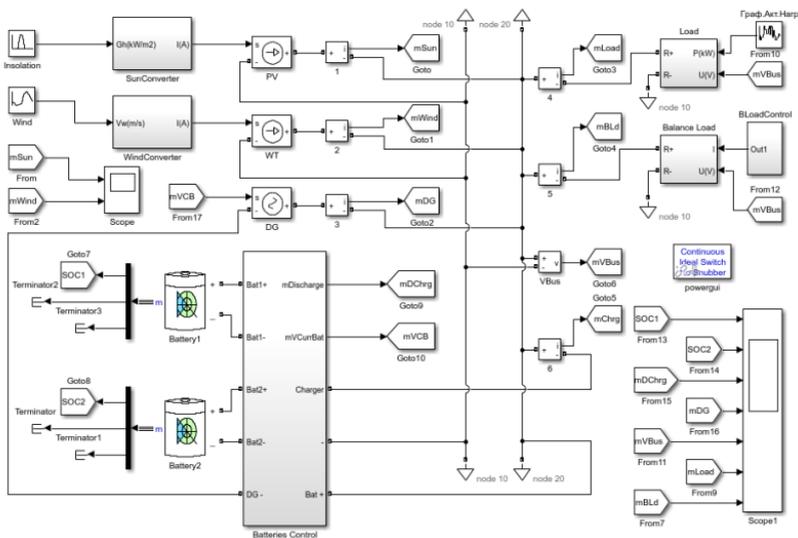


Рис. 2. Вид модели в Matlab Simulink

Для представления принципа переключения блока батарей представим блок схему работы на рис. 3.

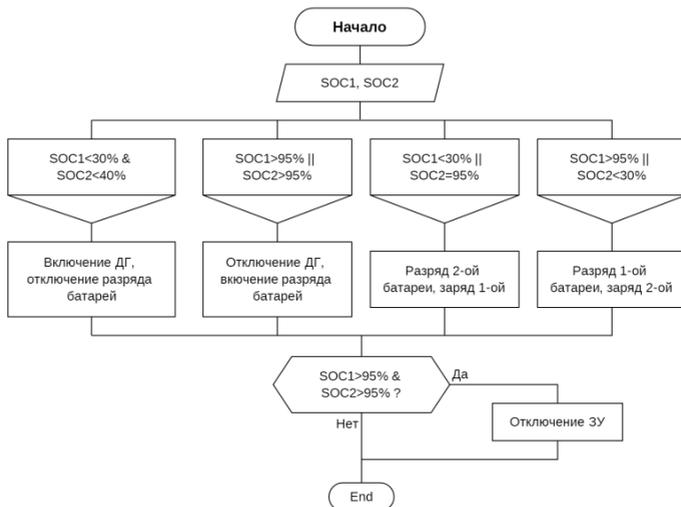


Рис. 3. Блок схема работы АКБ

Балластная нагрузка представлена на рис. 4.

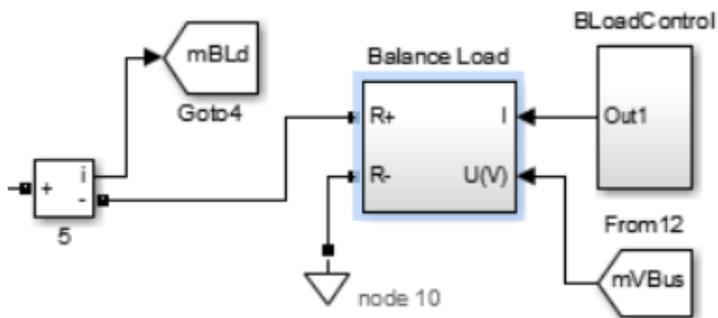


Рис. 4. Балластная нагрузка

Как уже отмечалось, балластная нагрузка служит для компенсации избытка выработки энергии. Может быть представлена, как переменный резистор, в виду этого схема очень напоминает схему полезной нагрузки, но с использованием иного типа управления.

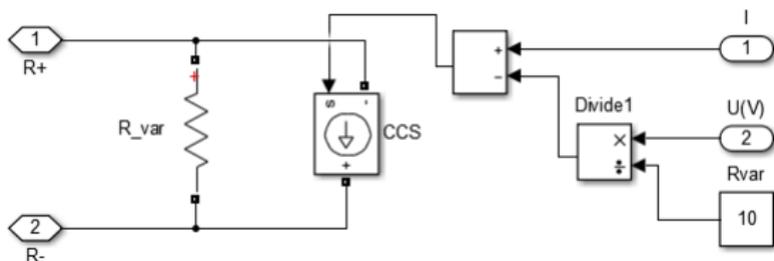


Рис. 5. Схема управления балластной нагрузкой

В отличие от полезной нагрузки, в которой используется график электрической нагрузки (кВт), здесь нужно использовать ток, который потребляется ежемоментно, т.е. в каждую единицу времени. Принцип таков, что работа данного блока будет реализована, только при выключенном дизель-генераторе и в моменты избытка генерации.

Выводы

Разработанная модель энергетического комплекса альтернативных источников энергии на базе ПО Matlab Simulink позволяет описать процессы выработки и потребления энергии разрабатываемого ЭК. В качестве входных параметров для модели могут служить как расчетные данные, так и произвольные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обухов С.Г., Плотников И.А.*, Сравнительный анализ схем построения автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // *Промышленная энергетика*. – 2012 – № 7. – С. 46–51.
2. *Гашимов А.М., Рахманов Н.Р., Ахмедова С.Т.*, Гибридные системы распределенной генерации с возобновляемыми источниками: моделирование и анализ их режимов работы в энергосистеме // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2013. № 2.
3. *Григораиш О.В., Кривошей А.А., Смык В.В.*, Автономные гибридные электростанции // *Научный журнал КубГАУ*. 2016. № 124.
4. *Степаненко В.П.*, Выбор накопителей энергии // *ГИАБ*. 2017. № 3.
5. *Дзензерский В.А., Житник Н.Е., Плаксин С.В., Погорелая Л.М., Соколовский И.И.*, Принципы построения гибридных ветро-солнечных энергоустановок // *Електротехніка і електроенергетика*. 2007. № 1.

Автор

Семерин Виктор Григорьевич, магистрант Оренбургского Государственного Университета. E-mail: semerinv@rambler.ru.

РАЗВИТИЕ ГИДРО- И ВЕТРО- ЭНЕРГЕТИКИ В КАЗАХСТАНЕ

Садыкова Л.А., Захаров В.П., Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Казахстан

***Аннотация.** Гидро- и ветро- энергия являются крупнейшими источниками чистой и зеленой энергии в мире. Для Казахстана развитие этих отраслей особенно важно для увеличения маневренной электрической мощности, для регулирования суточных режимов выработки и потребления электроэнергии. В статье описано состояние гидроэнергетики и ветроэнергетики Республики Казахстан (РК) в прошлом и настоящем, о перспективных проектах в области гидроэнергетики и ветроэнергетики, о проблемах на пути использования возобновляемых источников энергии. Наша страна, следуя мировому тренду, ведет планомерную работу по увеличению числа электростанций возобновляемых источников энергии.*

***Ключевые слова:** гидроэнергетика, гидроэлектростанция, электроэнергия, ветроэнергетика, ветроустановка, ветроэлектростанция, мощность, энергетическая система, зеленая энергетика, возобновляемые источники энергии.*

Гидроэнергия в Казахстане является вторым по удельному весу в топливном балансе электроэнергетики энергоресурсом, уступая лишь углю.

Долгое время гидроэнергетика Казахстана находилась в спящем состоянии, без должного внимания. Преимущественное расположение гидроэлектростанций в республике в двух областях: Восточно-Казахстанской и Алматинской. Наличие рек и горного рельефа создают условия для развития гидроэнергетики. Развитие малых ГЭС – будущее энергетики Казахстана.

Нехватка электроэнергии в течении многих лет покрывается за счёт импорта из России. В 2020 году Республика купила у России 1,132 млрд кВт-ч при общем объёме потребления в 105,2 млрд кВт-ч.

Развитие энергетики за счёт увеличения мощности ГЭС – наиболее привлекательный вариант. Это связано с тем, что ГЭС влияют на маневренную мощность, дефицит которой остро ощущается в республике.

Именно нехватка установленных мощностей ГЭС в РК создает дисбаланс в энергетической системе, приводя к понижению частоты и ухудшению условий устойчивости.

Имеющийся потенциал ГЭС Казахстана не позволяет энергосистеме самостоятельно обеспечить даже нормальный режим в условиях энергонезависимого Казахстана. Даже без интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему, необходимо форсировать развитие ГЭС.

Вызывает удивление отношение государства к гидроэнергетике. ГЭС для энергосистемы – это курица, несущая Золотые яйца. Гидроэнергетика органически, физиологически связана с энергетической системой. Только наличие гидроэнергетики позволяет энергетической системе нормально функционировать и обеспечивать управляемый режим работы энергетической системы.

В первые годы независимости республики, гидростанции – регуляторы энергосистемы, сердце энергетической системы Казахстана, крупнейшие ГЭС: Усть-Каменогорская и Шувльбинская ГЭС были переданы в концессию американской компании AES. ГЭС находились в концессии в течение 20 лет (с 1997 по 2017 год). ГЭС в любой стране являются стратегически важным объектом и допуск иностранцев к ним должен быть запрещён, но не у нас.

На первом этапе развития гидроэнергетики самым актуальным представляется модернизация уже имеющихся станций, сегодня с помощью новых технологий, широко применяемых в Европе можно значительно улучшить КПД ГЭС и выработку энергии.

Наиболее заметные проекты последнего времени – строительство Мойнакской ГЭС и модернизация Шардаринской ГЭС. Новые ГЭС и модернизация старых – это мощный и ценный вклад в инфраструктуру, как сегодняшнего дня, так и для будущих поколений. Ведь гидроресурсы – возобновляемый и наиболее экологичный источник энергии, использование которого ведет к снижению выбросов в атмосферу тепловых электростанций и позволяет сохранять запасы углеводородного топлива для будущих поколений.

В обоих этих проектах принимает участие австрийская компания «Андритц Гидро». Она уже осуществила поставку турбины для малой ГЭС Иссык-2, турбину для Мойнакской ГЭС, в 2016 году модернизировала Шардаринскую ГЭС.

Таблица 1

Гидроэлектростанции Казахстана

Название	Собственник	Мощность (МВт)	Область	Река
Шульбинская ГЭС	Самрук-Энерго (92,14 %)	702	Восточно-Казахстанская область(ВКО)	Иртыш
Бухтарминская ГЭС	Самрук-Энерго (90 %)	675	Восточно-Казахстанская область	Иртыш
Капчагайская ГЭС	Самрук-Энерго	364	Алматинская область	Или
Усть-Каменогорская ГЭС	Самрук-Энерго (89,9 %)	331,2	Восточно-Казахстанская область	Иртыш
Мойнакская ГЭС	Самрук-Энерго (51 %)	300	Алматинская область	Чарын
Шардаринская ГЭС	Самрук-Энерго (100 %)	100	Южно-Казахстанская область	Сырдарья
Алматинский каскад	Самрук-Энерго	46,9	Алматинская область	Большая и Малая Алматинка
Каратальская ГЭС	ТОО «Казцинк-ТЭК»	10,08	Алматинская область	Каратал

Необходимо изучить опыт других стран, например, Норвегии, которая обладает весьма крупными запасами природного газа, но использует в значительной мере свой гидропотенциал, в отличии от Казахстана, который не спешит перенимать опыт зарубежных стран [1].

Расходы при строительстве ГЭС выше, но срок их использования дольше, отсутствуют затраты на горючее, нет проблем с

утилизацией отходов, очень низкие расходы по эксплуатации и техническому обслуживанию.

До конца 2025 года планируется ввести в эксплуатацию 13 объектов ГЭС с установленной суммарной мощностью около 177,67 МВт. Кроме того, в текущем году намечено проведение аукционных торгов на суммарную мощность по возобновляемым источникам энергии, включая маневровые ГЭС. В целом, в 2025 году ожидается доведение доли валового производства электроэнергии ВИЭ до 6 % [2].

Наша страна имеет большой потенциал в развитии ветроэнергетики. На территории всей страны ветер достигает 5-6 м/с, что достаточно для успешной работы ВЭС. По данным на 2022 год на территории РК расположено 4 ВЭС, это: Ерейментауская ВЭС (Акмолинская область), Кордайская ВЭС (Жамбылская область), ВЭС «К-1» (Жамбылская область), Бадамаша (Актюбинская область). По данным Министерства индустрии и новых технологий Казахстана, ветроэнергетический потенциал страны оценивается в 920 млрд. кВт·ч электроэнергии ежегодно. Одним наиболее перспективных мест для строительства является Джунгарский коридор мощностью 17 млрд кВт·ч на квадратный метр. В табл. 2 показаны потенциальные площадки для строительства ВЭС в соответствии с Программой развития электроэнергетики до 2030 года [3].

Таблица 2

Планируемые ветроэлектростанции Казахстана

Потенциальные площадки	Мощность, МВт
Джунгарская ВЭС	40
Шелекская ВЭС	140
Сарыозекская ВЭС	140
Алакольская ВЭС	140
Каройская ВЭС	20
Шенгельдинская ВЭС	20
Курдайская ВЭС	20

Казахстану важно развиваться в области «экоэнергии», хотя наша страна и богата полезными ископаемыми, но чтобы обеспечить дальнейшую жизнь в нашей стране, этого будет недостаточно. Развитие альтернативных источников энергии в Казахстане позволит стране обеспечить стабильную экономику и удовлетворить свой спрос на потребление энергии. К сожалению, несмотря на все достоинства ветроэнергетики, основным недостатком является нестабильность энергии. Этот недостаток можно компенсировать использованием комбинированных альтернативных источников энергии, например: энергию ветра, солнца и биоэнергетику.

Выводы

Первые шаги к развитию гидроэнергетики Казахстан сделал. Но гидроэнергетика не может заменить все другие виды энергии, здесь должен быть здравый подход, но важно, что в мире начали осознавать, что одно из важнейших преимуществ ГЭС связаны с экологической безопасностью.

После трагедии на Фукусиме в мире произошла резкая переоценка использования атомной энергии. Швейцарии, Германии постепенно отходят от ее использования, в Европе активно звучат призывы не использовать атомную энергию. А Казахстан планирует строительство атомной электростанции в Балхаше. Дефицит энергии этим покрыть возможно. Но систем, в которых не будут случаться отключения, в мире пока нет. В стране нет собственной инфраструктуры по обращению с радиоактивными отходами, образованными в результате деятельности в области использования атомной энергии.

Будем стремиться к шагам в направлении использования и развития новых возобновляемых источников энергии, так как зеленая энергетика - это основа прогресса в 21 веке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источник: <https://primeminister.kz/ru/news/do-konca-2025-goda-planiruetsya-vvesti-v-ekspluatatsiyu-13-ges-215240>.
2. Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года. Постановление Правительства РК от 28 июня 2014 года № 724.
3. <https://clck.ru/ggQm3>.

Авторы:

Садыкова Лязат Анатольевна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет. Закончила факультет «Автоматика и вычислительная техника» Казахского политехнического института им. В.И. Ленина в Алма-Ате, 1981 г. Аспирантура в Саратовском государственном университете им. Н.И. Вавилова. Ученая степень с 2002 года, тематика по защите «Оптимизация параметров электро-ремонтных предприятий в условиях неопределенности». E-mail: archisad@mail.ru.

Захаров Виктор Павлович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет. Закончил факультет «Политехнический», Западно-Казахстанский сельскохозяйственный институт, 1980 г. Аспирантура в Саратовском государственном университете им. Н.И. Вавилова. Ученая степень с 2011 года, тематика по защите «Совершенствование структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КАМАЗ-ЕВРО с учетом изменения технического состояния». E-mail: zacharov_57@mail.ru.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАРУЖНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЛАТФОРМ

Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю., ФГБОУ ВО КГЭУ,
г. Казань, Россия.

Аннотация. В данной работе представлена разработанная в Казанском государственном энергетическом университете автоматизированная система управления наружным освещением (АСУНО), уменьшающая энергетические потери в дневное и вечернее время. Рассмотрен принцип действия и дополнительные возможности. Созданная для уменьшения энергетических затрат.

Ключевые слова: умное освещение, автоматизация, управление светильниками, освещенность, энергетические затраты, железнодорожные платформы.

Для освещения железнодорожных платформ и поездов, обычно используют, традиционные светильники РКУ (рис.1), которые имеют высокую мощность (250 Вт), а значит затрачи-

вают достаточную электрическую энергию. Обычно их включают при наступлении сумерек, однако высокий уровень освещенности в данное время не всегда целесообразен, учитывая, что светильники работают на полную мощность.



Рис. 1. Светильник уличный серии РКУ 97

Для решения данной проблемы была разработана автоматизированная система уличного освещения (АСУНО), которая позволяет в автоматическом режиме регулировать мощность, подаваемую на светильники, в зависимости от уровня естественного освещения. В нее входит: контроллера АСУНО NEMA 1-10V, блока управления и связи, веб-сайта, светильника компании «Ферекс». Сами блоки взаимодействуют между собой по беспроводному каналу связи [1, 4, 5].

Разработанная система удовлетворяет всем положенным требованиям: 1) система является надежной; 2) организует высокое качество освещения; 3) безопасно для людей; 4) обладает достаточной долговечностью. К тому же позволяет сэкономить достаточное количество электрической энергии.

Принцип работы показан на (рис. 2).

Каждый светильник сам регистрирует данные на своем участке и передает их остальным, используя беспроводной канал связи.

Система работает автоматически, каждый светильник самостоятельно регистрирует данные в своей рабочей зоне и передает их остальным светильникам по беспроводному каналу связи. В результате такой реализации, в отсутствии центрального бло-

ка управления, пользователь способен заменить светильник или добавить новый без специалиста, не нарушая целостности системы.



Рис. 2. Система уличного освещения

Данная система освещения была применена на железнодорожных платформах «435 км» и «Сортировочная 1,2». На данный момент на платформе «435 км» на опорах установлено 17 светильников РКУ с лампами ДРЛ, мощностью 250 Вт и 5 светодиодных светильников мощностью 75 Вт, на платформе «Сортировочная 1,2» на опорах установлено 24 светодиодных светильника мощностью 75 Вт.

В результате работы системы годовое фактическое потребление электрооборудования, уменьшилось на 17801,69 кВт, платформа «435 км» и на 3438,55кВт, платформа «Сортировочная 1,2», чем у имеющихся светильников. Годовая экономия составила 66045,79 и 12 172,46 рублей соответственно.

Рассмотрим основные преимущества АСУНО:

- автоматическое изменение светового потока светильника в зависимости от уровня естественного освещения;
- автоматическое плавное снижение яркости в ночные часы и переход с рабочего на дежурный режим при отсутствии

поездов и людей на платформе. В обоих режимах светильники также регулируют освещенность в своей рабочей зоне;

- устанавливая необходимый уровень освещения, заданный изначально и различный для обоих режимов;

- возможность замены светильника в системе без нарушения системы;

- автоматическое включение и отключение освещения в утреннее и вечернее время;

- ручное удаленное управление светильниками по беспроводному каналу (с персонального компьютера диспетчера или смартфона на базе Android);

- возможность управления отдельным светильником, группой светильников, всей системой в целом;

- мониторинг состояния светильников. Удаленно можно обнаружить светильники, вышедшие из строя, это позволит сократить время осмотра светильников вручную;

- включение освещения по графику движения поездов;

- значительное снижение затрат на электроэнергию;

- работа в различных режимах;

- удаленный мониторинг состояния каждого светильника;

- автоматическое определение посторонних подключений;

- разработанный веб-сайт, имеет следующие возможности:

- отображение местоположения светильника и щитов управления на карте местности;

- создание или установка сценария на группу или группы светильников;

- автоматическое обнаружение стороннего подключения к электросети;

- вывод статистики и аналитики на каждую группу светильников.

Выводы

В статье рассмотрена проблема больших энергетических затрат на уличное освещение, и представлено возможное решение, автоматизированная система управления наружным освещением (АСУНО) для железнодорожных платформ, которая позволяет самостоятельно регулировать мощность, подающую-

ся на уличные светильники в зависимости от уровня естественного света, а также допускает использование web-сайта для управления освещением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратура контроля параметров световых приборов, осветительных установок и цветоцветовой среды / Шириев Р.Р., Иванов Д.А., Галиева Т.Г. // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 11. С. 14 –17.

2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 12 мая 2018 года) [Электронный ресурс]: распоряжение от 22 ноября 2008 года № 1734-р – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678>.

3. Свод правил 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*) [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/456054197>.

4. Солюянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солюянов В.И. Энергоресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 1. – С. 156 –166.

5. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Development the experimental stand for testing of experimental samples of wireless network for process automation module. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Т. 8. № 12. С. 899 –902.

Авторы:

Хамидуллин Ильдар Ниязович, ФБГОУ ВО КГЭУ, бакалавр, студент, студент кафедры «Промышленная электроника». E-mail: ildar.ildar-xam2017@yandex.ru

Маслов Савелий Юрьевич, ФБГОУ ВО КГЭУ, бакалавр, студент, студент кафедры «Промышленная электроника». E-mail: saveli2000@gmail.com.

У. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРО- ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ «РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР- КОНДЕНСАТОРНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Лавриненко В.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Исследуется система, состоящая из неуправляемого выпрямителя, автономного резонансного инвертора и конденсаторного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, для получения скорости вращения порядка 10000 об/мин без редуктора. Приведена схема резонансного инвертора. Колебательный контур содержит рабочие конденсатор и фазы обмотки статора самого двигателя, которые являются неотъемлемыми элементами системы формирования тока двигателя. Приведены результаты испытаний системы.*

***Ключевые слова:** резонансный инвертор, однофазный асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь частоты, высокоскоростной электропривод.*

Интеграция электрических машин и электронных компонентов является главной тенденцией развития мирового электромашиностроения [1]. В настоящее время развитие электро-механических систем происходит в двух направлениях:

- 1) создание бесконтактных двигателей постоянного тока с использованием полупроводниковых инверторов и датчиков положения ротора;
- 2) синтез асинхронных двигателей с преобразователями частоты.

Расширяется применение постоянных магнитов, постоянно снижается стоимость интегральных схем и силовых транзисторов.

Успехи в развитии силовой полупроводниковой техники позволяют решать задачи создания систем «преобразователь частоты–асинхронный двигатель». Достоинства систем – высокая надёжность, малый момент инерции, низкие уровни шума и радиопомех.

В электроприводах с асинхронными двигателями малой мощности применяются преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Главное достоинство преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока – это возможность получения на выходе за счёт автономного инвертора практически любой изменяемой в широких пределах частоты, независимо от частоты питающей сети. Основным недостатком – это двукратное преобразование энергии, что снижает его коэффициент полезного действия и увеличивает массу и габариты.

Преобразователи частоты с непосредственной связью имеют низкий коэффициент мощности со стороны питающей сети, большой процент высших гармоник в выходном напряжении, сложную систему управления и ограниченное максимальное значение выходной частоты. Максимальная выходная частота преобразователей с непосредственной связью всегда ниже частоты колебаний напряжения сети. Чем меньше число фаз силовой схемы преобразователя, тем ниже частота.

Преобразователи частоты с промежуточным звеном переменного тока повышенной частоты [2, 3] не нашли практического применения в электроприводе из-за относительной сложности силовой схемы и системы управления, двукратного преобразования энергии, меньшего по сравнению с преобразователем с промежуточным звеном постоянного тока диапазона возможных выходных частот.

Для регулируемого электропривода требуется разрабатывать специальные конструкции двигателей. Если система малой мощности проектируется аналогично приводу большой мощности, то она будет иметь сложную структуру из-за большого количества функциональных элементов преобразователя. Важное практическое значение имеют разработки и исследования упрощённых схем электромеханических систем на базе инверторов с

минимальным количеством функциональных элементов и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [4].

В [5] предложена схема резонансного инвертора с выходной частотой, равной собственной частоте колебательного контура, и диодами в цепи управления. В [4] рассмотрен резонансный ведомый инвертор с управляющими импульсами.

Цель статьи – исследование системы на базе двухфазного асинхронного двигателя малой мощности и резонансного инвертора с выходной частотой, равной собственной частоте колебательного контура.

Собранная из отечественных элементов схема резонансного однофазного инвертора со средней точкой трансформатора с закрытым входом на двух тиристорах $VS1$, $VS2$ для двухфазного двигателя приведена на рис. 1.

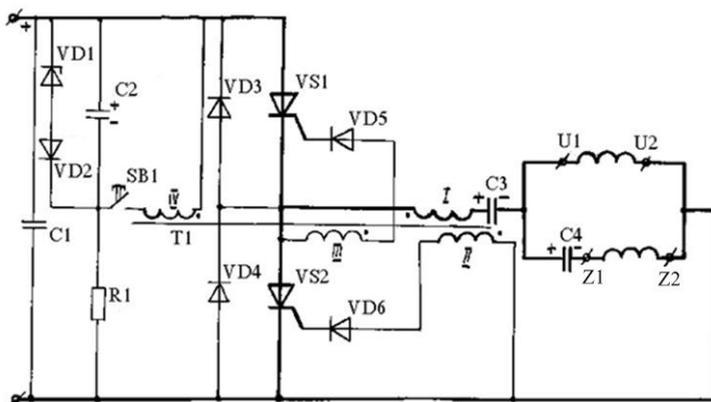


Рис. 1. Схема резонансного однофазного инвертора со средней точкой трансформатора с закрытым входом

Фазы $U1U2$ и $Z1Z2$ двигателя входят в состав колебательно-го контура. С помощью конденсаторов $C3$ и $C4$ в фазах $U1U2$ и $Z1Z2$ запускается колебательный процесс. Инвертор формирует волну тока с формой, близкой к синусоидальной, из первых полуволн тока колебательного контура. Сдвиг во времени токов фаз $U1U2$ и $Z1Z2$ двигателя (рис. 1) осуществляется конденсатором $C4$. Тиристоры $VS1$, $VS2$ отпираются управляющими импульсами, которые формируются в обмотках I-IV им-

пульсного трансформатора $T1$. Запирание тиристоров происходит в моменты времени, когда токи в фазах проходят через нуль.

Для исследования системы составлена математическая модель [6]. Двухфазный асинхронный двигатель преобразован в двухполюсную модель, представленную в неподвижной системе координат (Re, Im). Эквивалентная модель двухфазного асинхронного двигателя показана на рис. 2.

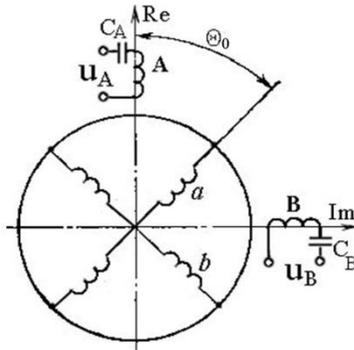


Рис. 2. Эквивалентная модель двухфазного асинхронного двигателя

Число витков фаз A и B , ёмкости конденсаторов C_A , C_B могут быть различными. Напряжения фаз u_A , u_B изменяются во времени по прямоугольному закону. Короткозамкнутая обмотка ротора заменена симметричной двухфазной обмоткой a, b .

Угол между осями фаз A и a

$$\theta = \theta_0 + \Omega_R \cdot t,$$

где θ_0 – начальный угол между осями фаз A и a ; $\Omega_R = \pi \cdot n / 30$ – угловая скорость ротора, рад/с; t – время, с; n – скорость вращения ротора, об/мин.

Напряжения фаз статора

$$u_A = i_A \cdot R_A + L_{AA} \cdot \frac{di_A}{dt} + \frac{1}{C_A} \cdot \int i_A dt + \frac{d}{dt} (L_{Aa} \cdot i_a) + \frac{d}{dt} (L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b);$$

$$u_B = i_B \cdot R_B + L_{BB} \cdot \frac{di_B}{dt} + \frac{1}{C_B} \cdot \int i_B dt + \frac{d}{dt} (L_{Ba} \cdot i_a) + \frac{d}{dt} (L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b);$$

$$0 = i_{Ra} \cdot R_{Ra} + L_{Ra} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} (i_A \cdot L_{aA} \cdot \cos \theta_{aA} + i_B \cdot L_{bB} \cdot \cos \theta_{bB});$$

$$0 = i_{Rb} \cdot R_{Rb} + L_{Rb} \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} (i_A \cdot L_{bA} \cdot \cos \theta_{bA} + i_B \cdot L_{aB} \cdot \cos \theta_{aB}),$$

где $L_{aA} = L_{Aa} = L_{AR} \cdot \cos \theta$; $L_{bA} = L_{Ab} = L_{AR} \cdot \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) = -L_{AR} \cdot \sin \theta$;

$L_{Ba} = L_{aB} = L_{BR} \cdot \sin \theta$; $L_{Bb} = L_{bB} = L_{BR} \cdot \cos \theta$.

Уравнение движения

$$M_e = M_c + J \frac{d\Omega_R}{dt},$$

где $M_e = p \cdot (\Psi_A \cdot i_B - \Psi_B \cdot i_A)$ – электромагнитный момент;

$M_c = M_0 + M_L$ – момент сопротивления;

M_0 – момент в режиме холостого хода;

M_L – момент нагрузки.

Представленная математическая модель использовалась для расчета процесса пуска конденсаторного асинхронного двигателя для электрошпинделя. Процесс набора скорости вращения 24000 об/мин системой «резонансный инвертор–асинхронный двигатель» продолжается 0,12 с и сопровождается колебаниями электромагнитного момента и скорости вращения n двигателя (рис. 3) со значительными амплитудами в начале переходного процесса. Электромагнитные переходные процессы заканчиваются значительно быстрее, чем механические переходные процессы.

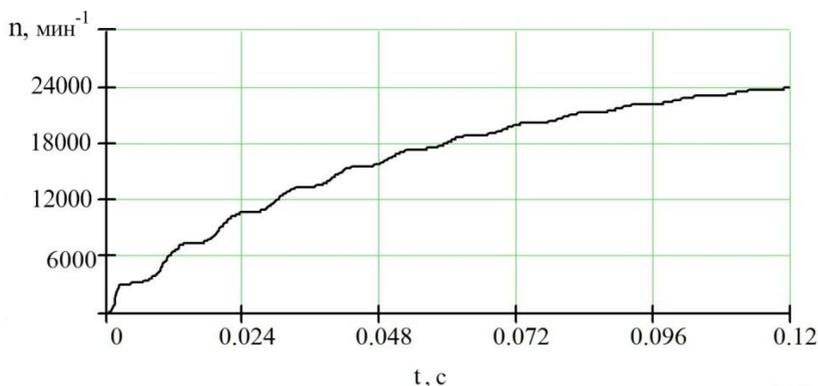


Рис. 3. Зависимость скорости вращения от времени при пуске мотор-шпинделя без нагрузки

Резонансный инвертор настраивается для работы с различными типами двигателей. Высокие скорости вращения получены для двигателей, конструкция и обмоточные данные которых рассчитаны для работы с частотами колебаний напряжения 400 Гц. В таблице приведены результаты опытных испытаний предложенной схемы инвертора с двухфазными асинхронными конденсаторными двигателями: опытным образцом двухполюсного шпиндельного двигателя и серийным восьмиполюсным ДАК–8–50/400 для вентиляторов радиального, канального и осевого типов.

Таблица

Результаты испытаний системы
с конденсаторными асинхронными двигателями

Тип двигателя	U , В	U_A , В	U_B , В	I , А	I_A , А	I_B , А	n , об/мин	f , Гц
ДАК-8-50/400	140	290	165	6,5	–	–	8100	500
ДАК-8-50/400	220	210	300	–	1,9	1,2	9150	800
Мотор-шпиндель	-	100	62	0,8	0,72	0,85	24000	440

Шпиндельный двигатель испытывался без нагрузки на валу, а серийный двигатель–вентилятор ДАК–8–50/400 – с серийным рабочим колесом вентилятора.

У серийного четырёхполюсного однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами ЗДВЛВ–6–4 мощностью 6 Вт вследствие большой индуктивности обмотки не удалось увеличить частоту колебаний напряжения выше 100 Гц и получить более высокие уровни скоростей вращения. Для получения более высоких уровней скоростей вращения требуется коррекция обмоточных данных двигателя с экранированными полюсами с целью уменьшения индуктивности.

Выводы

Благодаря малому числу функциональных элементов и простоте схемы предложенная электромеханическая система может найти применение в медицинской и бытовой технике, и промышленных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lavrinenko V.A. The tendencies of electromechanical systems development. Proc. the All–Russia electrotechnical congress WELC'99. Russia, June 29–July 3 1999, vol.1., pp. 155-157.
2. Bimal K. Bose. Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR, 2002. - 711 p.
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980. – 424 с.
4. Electromechatronic system with small induction motor / Lavrinenko V., Danilov A., Kuzin N., Goncharov I. Proceedings of the Fifth International Conference on Uncon-ventional Electromechanical and Electrical System // Technical University of Szczecin, Szczecin and Miedzyzdroje, Poland, September 5-8, 2001, vol. 3, pp. 929-932.
5. Ефименко Е.И., Кулешов В.А. Высокоскоростные вентильные двигатели // Тез. докл. I Всесоюзной научно-технической конференции по электромеханотронике. Л. 1987. С.234-236.
6. Lavrinenko V. Mathematical model of small induction motors with magnetic asymmetry // Proceedings of IPEMC'2000. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference / Tsinghua University, Beijing, China, August 15-18, 2000, vol. 3, pp. 1342-1346.

Авторы:

Лавриненко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, закончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 1979 году, получил ученую степень в 1988 году, защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование многоскоростных асинхронных двигателей с экранированными полюсами». E-mail: Lv20101974@yandex.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВО-МЕДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Зиновьева Е.Г., Калинин А.Г., Михадаров Д.Г., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В данной работе приведены результаты по изучению удельной теплоемкости жидких теплоносителей для образцов на основе меди и алюминия, полученных по технологии сварки трением с перемешиванием*

***Ключевые слова:** теплоносители, водно-гликолевые смеси, медь, алюминий, удельная теплоемкость*

Теплоёмкостью называют количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на один градус или, другими словами, отношение количества теплоты, поглощаемой телом к изменению температуры. Теплоемкость единицы массы вещества определяется удельной теплоёмкостью. В данной работе мы определяли удельную теплоёмкость при постоянном давлении (C_p).

Значение C_p трудно переоценить. Важным свойством любого теплоносителя является его теплоёмкость. Чем больше C_p и удельный вес теплоносителя, тем больше тепла нужно затратить на нагревание теплоносителя и тем больше тепла он отдает окружающей среде, например, помещению при своем охлаждении. Среднее значение удельной теплоемкости C_p воды в диапазоне 0-100 °С составляет 4,19 кДж/(кг·К). Однако, вода в качестве теплоносителя имеет ряд недостатков. К ним относятся, в том числе и ограниченный температурный диапазон эксплуатации, а также высокая коррозионная активность к сталям и чугунам (за исключением дистиллированной воды). Кроме того, вода при нуле градусов замерзает и при этом расширяется, что приводит к разрывам и поломке отопительной системы. Для устранения вышеперечисленных проблем производители рекомендуют применять водно-гликолевые теплоносители, которые при незначительном снижении теплоемкости не имеют недостатков, присущих воде в качестве теплоносителя.

Нами была определена C_p для трех теплоносителей при различных температурах и выявлена возможность их применения в работе алюминиево-медных конструкций, полученных по технологии сварки трением с перемешиванием [1-5]. Измерения проводили на калориметрической установке, схема которой приведена на рис. 1.

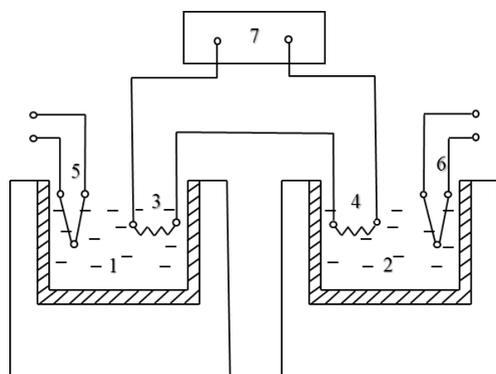


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 – капсула с исследуемой жидкостью, 2 – капсула с эталонной жидкостью, 3, 4 – электрические нагреватели, 5, 6 – термометры, 7 – источник питания

В качестве эталонной жидкости использовали дистиллированную воду. Расчет проводили по следующей формуле

$$C_p = \frac{1}{M_2} \left(\frac{(c_1 \cdot m_1)(c_B \cdot M_1)(t_2 - t_1)}{t_4 - t_3} - c_2 \cdot m_2 \right),$$

где c_B – удельная теплоемкость эталонной жидкости (воды); $c_1 = c_2$ – удельная теплоемкость материала капсул; M_1 – масса воды; M_2 – масса теплоносителя; m_1 и m_2 – масса капсул с термометром; t_1 и t_2 – температура воды в начале и в конце опыта; t_3 и t_4 – температура теплоносителя в начале и в конце опыта.

Результаты опытов приведены на рис. 2. Для исследования были выбраны промышленно выпускаемые теплоносители на основе этиленгликоля (на рис. Т1), пропиленгликоля (Т2) и глицерина (Т3). Все теплоносители также содержат в своём составе воду и присадки.

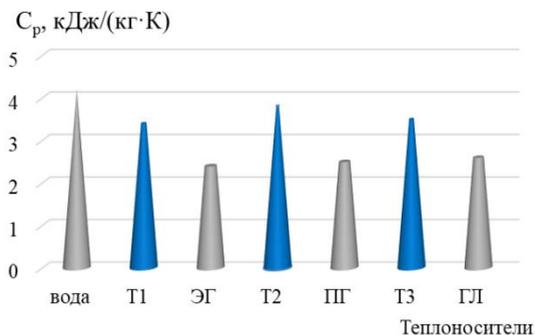


Рис. 2. График зависимости удельной теплоемкости от природы теплоносителей

Как видно по графику максимальное значение C_p наблюдается у воды. Для теплоносителей T1–T3 C_p принимает значения 3,26–3,77 кДж/(кг·К), что составляет в среднем 78–89 % от C_p для воды. Для сравнения на графике (см. на рис. 2 усеченные конусы) приведены C_p для чистых этиленгликоля (ЭГ), пропиленгликоля (ПГ) и глицерина (ГЛ), 2,35, 2,48 и 2,65 кДж/(кг·К), соответственно. Можно заметить, что C_p для водно-гликолевых систем имеет промежуточное значение между теплоемкостью воды и чистых гликолей, что согласуется с правилом смешения смесей.

Выводы

Таким образом, несмотря на небольшое снижение теплоемкости, водно-гликолевые теплоносители можно успешно применять в системах нагрева и охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трилинская А.Н., Смирнов Е.В., Осипов Т.А., Зиновьева Е.Г., Михадаров Д.Г., Калинин А.Г. Изучение свойств теплоносителей на водно-органической основе // Материалы XVII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых». Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. – 2022. С. 158-159. URL: <https://science.volgatech.net/nm/Conferences/Young%20creations/Sborn.pdf>.

2. Осипов Т.А., Трилинская А.Н., Смирнов Е.В., Михадаров Д.Г., Калинин А.Г., Зиновьева Е.Г. Стенд для исследования отвода тепла в

устройствах силовой электроники на основе биметаллического радиатора с жидкостным теплоносителем // Материалы XVII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых». Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. – 2022. С. 158–159. URL: <https://science.volgatech.net/nm/Conferences/Young%20creations/Sborn.pdf>.

3. Михайлов А.Г., Вдовин О.В., Слободина Е.Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4. С. 73–78.

4. Васильев П.А., Шведов М.А., Христофоров О.В., Калинин А.Г., Григорьев В.С. Технология сварки трением с перемешиванием в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова // Сварочное производство. 2021. № 9. С. 48–53.

5. Васильев П.А., Калинин А.Г., Михадаров Д.Г., Зиновьева Е.Г. Гибридный медь-алюминиевый жидкостный охладитель // Силовая электроника. 2022. № 4. С. 44–46.

Авторы

Зиновьева Елена Геннадьевна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры общей, неорганической и аналитической химии, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». Окончила химический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова в 2004 г. Защита диссертации в 2009 г. на тему: *Разработка отверждающих систем на основе триалкил(арил)фосфатных комплексов хлоридов металлов и триэтилентетрамина*. E-mail: zinlgen@mail.ru.

Калинин Алексей Германович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехнологий электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2007 году. Защита диссертации в 2011 году по специальности «05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы». E-mail: hitanoid1984@yandex.ru.

Михадаров Денис Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2003 году. Защита диссертации в 2016 году по специальности «05.09.10 – Электротехнология». E-mail: denis_georg@mail.ru.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Янкевич С.В., Малинин Г.В., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

Аннотация. В представленной работе раскрывается способ повышения энергоотдачи ультразвукового генератора, работающего на магнитострикционную нагрузку, заключающийся в подмагничивании магнитострикционной нагрузки. Для регулирования и измерения тока подмагничивания предлагается использовать метод резистивного шунта как наиболее простой и дешевый способ измерения тока. Приведен график зависимости тока подмагничивания от частоты управления преобразователя.

Ключевые слова: ток подмагничивания, ультразвуковой генератор, резистивный шунт, частотная система управления, магнитострикционный преобразователь.

Введение

Прямой магнитострикционный эффект, изменение размеров (деформация ферромагнетика) при изменении окружающего магнитного поля, положен в основу работы магнитострикционных преобразователей (МСП) ультразвуковых генераторов.

Для увеличения деформации торца МСП помимо обмотки возбуждения, приведенной на рис. 1, вводят блок подмагничивания, благодаря чему рабочая точка на кривой $\Delta l/l = f(H)$ смещается на участок максимальной деформации Δl торца [1]. Блок подмагничивания строится по схеме полного моста или полумоста с частотной системой управления силовыми ключами [2].

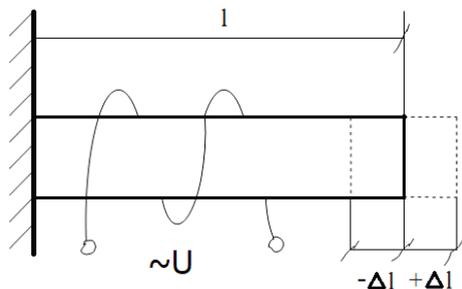


Рис. 1. Деформация торца МСП относительно его длины

Для регулирования тока подмагничивания используются пакеты прямоугольных импульсов напряжения частотой 40–120 кГц и амплитудой 100 В, следующие с частотой 1–12,5 Гц. Для плавного запуска системы подмагничивания первоначальная частота высокочастотного заполнения пачки импульсов составляет 130 кГц.

Постоянное магнитное поле, возбуждаемое блоком подмагничивания, обеспечивает постоянный ток подмагничивания, величина которого не должна вводить МСП в насыщение. С этой целью необходимо измерять и регулировать ток подмагничивания индивидуально для каждого МСП.

Материалы и методы

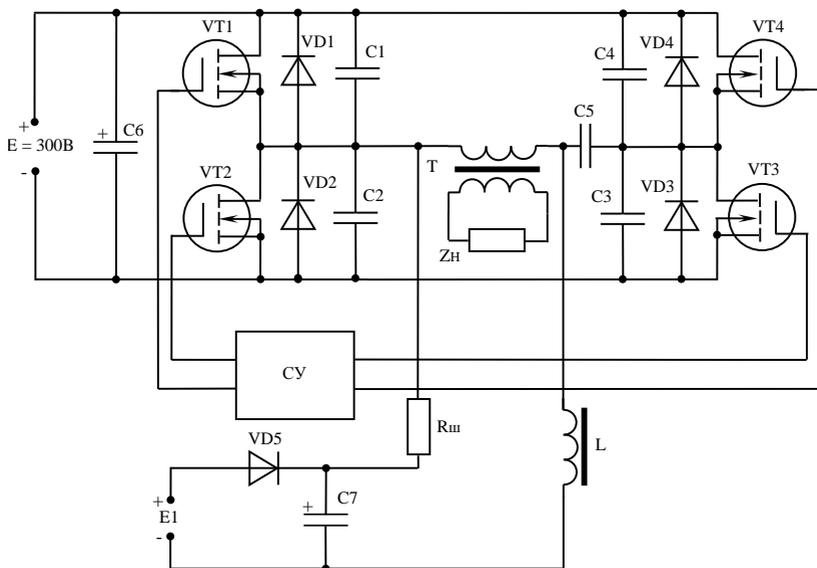


Рис. 2. Структурная схема блока подмагничивания с резистивным шунтом в составе мостового транзисторного инвертора

Для измерения тока подмагничивания в ультразвуковом генераторе, силовая часть которого строится на базе мостового транзисторного инвертора (рис. 2), авторами статьи предлагается использовать резистивный шунт $R_{ш}$, напряжение на котором дает значение и форму тока подмагничивания.

ния. По результатам проведенных измерений построен график зависимости амплитуды тока подмагничивания от частоты управляющих импульсов блока подмагничивания (рис. 4).

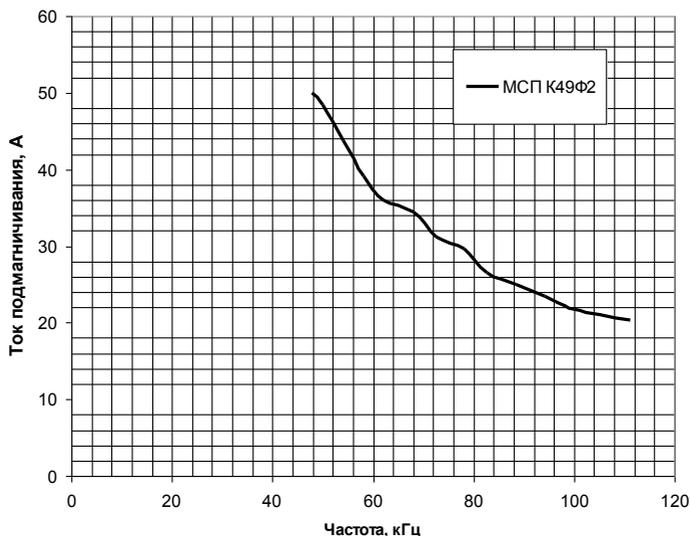


Рис. 4. График зависимости амплитуды тока подмагничивания от частоты управления для МСП, выполненного из материала K49Ф2

Основное преимущество предложенного блока подмагничивания для ультразвукового генератора заключается в более широком диапазоне регулирования тока подмагничивания - от 0 до 60 А в отличие от известных способов подмагничивания, для которых максимальный ток не превышает 30 А для самых мощных ультразвуковых генераторов на 10 кВт. Сам способ подмагничивания отличается введением дополнительного источника питания. В известных ультразвуковых генераторах формирование тока подмагничивания основано на несимметричной работе плеч силового мостового инвертора.

Выводы

Для желаемой амплитуды колебаний торца МСП предлагается настраивать силу тока подмагничивания, тем самым смещая положение рабочей точки на кривой $\Delta I/I = f(H)$. Для регули-

рования силы тока подмагничивания используется частотное управление. Для простоты настройки блока подмагничивания измерения значения и формы тока подмагничивания осуществляется методом резистивного шунта. За счет введения в схему ультразвукового генератора блока подмагничивания повышается его энергоэффективность без дополнительного значительного потребления энергии. Энергоотдача такого генератора, измеряемая в виде выходной акустической мощности, в 20 раз выше, чем у ультразвукового генератора без подмагничивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Янкевич С.В.* Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов / С.В. Янкевич, Г.В. Малинин // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 212–220.

2. *Малинин Г.В.* Логический автомат управления драйвером в системе управления мощными силовыми преобразователями / Г.В. Малинин, С.В. Янкевич // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 187–190.

Авторы:

Янкевич Сергей Владимирович, аспирант, кафедра промышленной электроники, ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил факультет радиотехники и электроники ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2007 г. Магистр по направлению «Электроника и микроэлектроника». E-mail: ds3617@mail.ru.

Малинин Григорий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1996 г. Ученую степень получил по специальности «Силовая электроника». E-mail: malgrig6@mail.ru.

РОЛЬ МИНИ-ТЭЦ В КОММУНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Мышкина Л.С., Фролова Я.А., Иванова Е.М., Новосибирский Государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

***Аннотация.** Проанализированы пути повышения энергоэффективности производства энергии на углеводородном топливе и существующие перспективы трансформации котельных в мини-ТЭЦ. Показаны эффекты, обеспечивающие инвестиционную привлекательность использования когенерационных технологий. Предложены критерии отбора котельных, для получения полезных и значимых системных эффектов.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, системные эффекты, мини-ТЭЦ, когенерация, котельная, критерии отбора, коммунальная инфраструктура.*

Введение

Одним из направлений развития отечественной энергетики является обеспечение ресурсосбережения [1]. Одним из способов ресурсосбережения является повышение энергоэффективности производства энергии, которая характеризуется коэффициентом полезного использования топлива (КПИТ).

Известно, что совместное производство тепла и электроэнергии позволяют снизить объем расходов топлива в 1,5 раза относительно раздельного производства на котельных и тепловых электростанциях (ТЭС). Это обуславливает целесообразность повышения доли ТЭЦ, работающих в теплофикационном режиме в структуре источников тепловой и электрической энергии. КПИТ на ТЭЦ использующих паросиловые установки (ПСУ) достигает 70–75 %. Однако современные газотурбинные и газопоршневые установки (ГТУ и ГПУ) имеют КПИТ 85–89 %.

Следует отметить, что производство электричества на ТЭС с ПСУ осуществляется с КПД 30–35 %, а на ГПУ он достигает 42–45 %. Переход ТЭС на парогазовый цикл (ПГУ) ведет к росту КПД до 60 %, что важно для повышения энергоэффективности производства электроэнергии. Однако с ростом их доли в структуре генерации требуется увеличить количество и мощности котельных для производства тепловой энергии, т.к. потреб-

ность в тепловой мощности по всем регионам страны выше в 3-5 раз, чем в электрической [2].

В составе структуры источников тепловой энергии котельные занимают около 60 %, где более 2000 котельных относятся к средним и крупным котельным, которые отпускают тепло в основном коммунальным потребителям в средних, больших и крупных городах. Их перевод в мини-ТЭЦ позволит повысить энергоэффективность производства энергии, а кроме этого позволит получить значимые и полезные системные эффекты в системах электроснабжения, что обеспечит инвестиционную привлекательность технологического перевооружения и реконструкции котельных. Цель исследований разработать рекомендации по выбору котельных для трансформации в мини-ТЭЦ. Объектом исследований является коммунальная инфраструктура энергоснабжения в муниципальных образованиях. Предмет исследований – средние и крупные отопительные котельные, работающие на природном газе. Результатом является выбор котельных, трансформация которых в мини-ТЭЦ позволит повысить бесперебойность электроснабжения и доступность к недорогим источникам тепловой и электрической энергии. Последнее соответствует целям устойчивого развития городов, ESG стандартам производства энергии, т.к. сокращение используемого для этого топлива сопровождается снижением углеродного следа [3].

Анализ текущего состояния

В 2019 году Правительство Российской Федерации запустило вторую программу договоров поставки мощностей (ДПМ-2), направленную на модернизацию и улучшение технического состояния ТЭС. Результатом станет увеличение срока службы оборудования и повышение электрического КПД ТЭС [2, 3]. В программу включены 128 объектов, в состав которых входят Нижнекамская ТЭЦ, Заинская ГРЭС, Новочеркасская ГРЭС, Каширская ГРЭС, Саратовской ТЭЦ-2 и Пермская ТЭЦ-14. На них планируется реконструкция с использованием отечественных ГТУ большой мощности. В настоящее время на Ивановской ПГУ заканчивается опытно-промышленная эксплуатация ГТУ мощностью 110 МВт произведенной НПО «Сатурн». Также свои

газовые турбины ГТУ-65 и ГТУ-170 создают «Силовые машины».

Суммарные капитальные затраты на реализацию программы ДПМ-2 составят около 420 млрд руб. [4]. Модернизация будет происходить за счет инвестиционных контрактов с гарантированной ставкой доходности в 12 %. Механизм заключения договора ДПМ гарантирует инвесторам возврат вложенных средств за счет повышения стоимости электрической энергии и мощности для потребителей. Возникает противоречие: в итоге потребители оплачивают мероприятия по повышению энергоэффективности производства энергии.

Одновременно можно наблюдать внедрение когенерационных технологий малой мощности. По данным Росстата динамика вводов таких установок велика и в основном они используются на энергоемких промышленных предприятиях. Указанное обусловлено экономическими эффектами по снижению затрат на приобретение электроэнергии из систем централизованного электроснабжения. ГТУ и ГПУ позволяют не только снизить эти затраты, но используя попутный нефтяной газ снизить объем его факельного сжигания, что соответствует экологическим требованиям. Поэтому в ПАО «Лукойл», ПАО «Роснефть», ПАО «Газпром» доля производства электроэнергии на когенерационных технологиях растет. По экспертным оценкам установленная мощность таких источников составляет не менее 10 ГВт [5-7]. Значительно меньше используются ГТУ и ГПУ в коммунальной инфраструктуре, но есть примеры показывающие эффективность их использования в этих целях в Московской области, в г. Новосибирске, на острове Сахалин.

Перспектива использования мини-ТЭЦ

Мини-ТЭЦ – установки, служащие для совместного производства тепловой и электрической энергии суммарной электрической мощностью от 5 до 25 МВт. Ограничение мощности в 25 МВт обусловлено работой электростанции на розничном рынке электрической энергии и мощности, что позволяет заключать двухсторонние договора с потребителями энергии и использовать конкурентные преимущества близости производ-

ства и потребления энергии. Ограничение в 5 МВт относится к разделению на микро-ТЭЦ и мини-ТЭЦ.

Условиями для создания мини-ТЭЦ стали широкий набор когенерационных установок малой мощности и масштабная газификация страны. Основными системными эффектами от включения мини-ТЭЦ в состав коммунальной инфраструктуры являются:

- сокращение затрат на развитие и реконструкцию электросетевого комплекса, что сопровождается снижением темпов роста тарифа на передачу электроэнергии;
- рост надежности электроснабжения потребителей, что сопровождается сокращением частоты и времени прерывания потребителей третьей категории надежности;
- повышение качества электрической энергии, что сопровождается сокращением технологических потерь в распределительных сетях;
- повышение долговечности генерирующего и электросетевого оборудования, которое обеспечивается их работой в облегченных режимах.

Очевидно, что на фоне повышения эффективности и снижения затрат на производство энергии, инвестиционная привлекательность мини-ТЭЦ определяется предельным уровнем цен на электрическую и тепловую энергию, долей сетевой составляющей в этой цене и режимом работы мини-ТЭЦ, как источника электроэнергии. Размер этих эффектов зависит от того на какой территории создается и как используется мини-ТЭЦ. Наличие значимых и полезных экономических эффектов, получаемых от мини-ТЭЦ, обеспечит привлечение частных инвестиций.

Очевидно, что размер экономических эффектов возрастает при трансформации котельных, выполняющих функции единой теплоснабжающей организации (ЕТО). Появление источников совместного производства энергии в коммунальной инфраструктуре позволяет муниципальным органам исполнительной власти переходить к ценовой зоне теплоснабжения, что открывает возможности создания рыночных, конкурентных отношений и привлечь инвестиции в ремонт и реконструкцию тепловых сетей, которые в городах находятся в неудовлетворительном состоянии.

Основные положения методики отбора котельных

С позиций использования ГТУ и ГПУ следует рассматривать газовые отопительные котельные, т.к. они присоединены к системам газоснабжения и водоснабжения. Это снизит затраты на получение необходимых для их работы энергоресурсов.

Наличие тепловой нагрузки характерно для котельных выполняющих функции ЕТО, что обеспечит высокую долю использования тепла полученной от когенерационных установок. Это важно для снижения себестоимости тепловой энергии производимой мини-ТЭЦ.

Очевидно, эффективность мини-ТЭЦ возрастает с их созданием в дефицитных по электроэнергии районах. В этом случае можно получить эффект от снижения затрат на развитие электросетевого комплекса, обеспечив рост электропотребления в энергорайонах запитанных от «запертых» центров питания районных подстанций (ПС).

Указанные три критерия позволяют выбрать котельные для трансформации в мини-ТЭЦ. Но это не означает, что из выбора выпадают крупные котельные, где велик размер электропотребления на собственные нужды, Учитывая требования к надежности электроснабжения котельных и экономическую эффективность производства энергии, имеет смысл оснащать их когенерационными установками, как минимум для покрытия собственных нужд.

Очевидно, что на размер когенерации накладываются технологические ограничения. Нельзя допустить выдачу электрической мощности мини-ТЭЦ более 50% от мощности трансформатора районной ПС. Иначе в часы минимальных электрических нагрузок снижается загрузка трансформаторов и может возникнуть реверсивный переток, что недопустимо.

Работая по переменному суточному электрическому графику нагрузки, когенерационные установки не могут обеспечить требуемый график отпуска тепловой энергии. Суточные, недельные и годовой графики электрической нагрузки отличаются от соответствующего теплового графика. Поэтому на мини-ТЭЦ устанавливаются водогрейные котлы для покрытия пиковой тепловой нагрузки и регулирования теплового графика в зависимости от работы ГТУ и ГПУ. Особенно это важно, если работа

мини-ТЭЦ предназначена выравнять график нагрузки на шинах центра питания районных ПС, что обеспечивает облегченный режим работы сетевого и генерирующего оборудования энергосистемы.

Кроме этого при установке ГТУ или ГПУ возникает проблема с выдачей электрической мощности мини-ТЭЦ в электрическую сеть энергорайона. Редко при трансформации средней котельной тепловой мощностью до 100 МВт не требуется реконструкция схемы присоединения, которая рассчитана на обеспечение собственных нужд по критерию N-1. Если электрическая мощность мини-ТЭЦ трехкратно превышает собственные нужды, то необходима реконструкцией сети 10(6) кВ в энергорайоне.

Выводы

Перевод коммунальных газовых отопительных котельных в мини-ТЭЦ ведет к повышению энергоэффективности производства энергии и сопровождается системными эффектами.

При их выборе котельные для трансформации в мини-ТЭЦ следует учитывать технические и рыночные ограничения.

Предлагаемая методика отбора котельных позволяет свести задачу выбора к многокритериальной и решать ее известными способами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20278, <https://rscf.ru/project/22-29-20278/> и гранта № р-19 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» // Правительство Российской Федерации, 2020 г.
2. Бойко Е. Е., Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Гибкость и энергоэффективность систем энергоснабжения // Энергетик. - 2022. – № 9. – С. 24–28.
3. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 3–15.

4. Информация о генерирующих объектах тепловых электростанций, в отношении которых заключены договоры на модернизацию, URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/kommod/index.htm>.

5. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределенная энергетика – потенциал в России. 2018 г. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf.

6. Армашова-Тельник Г. С. Оценка потенциала технологий распределенной энергетика в качестве компенсации потребности в генерирующих мощностях до 2035 года // Вестник ВГУИТ. 2020. №1 (83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-potentsiala-tehnologiy-raspredelennoy-energetiki-v-kachestve-kompensatsii-potrebnosti-v-generiruyuschih-moschnostyah-do-2035>.

7. Рыхтер В.О., Зильберштейн О.Б. Тенденции развития рынка оборудования малой генерации. Интернет-журнал «Науковедение» URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/31EVN415.pdf>.

Авторы:

Мышкина Людмила Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Окончила факультет Энергетики НГТУ в 2013 году, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Моделирование и анализ надежности при развитии региональных электрических сетей на основе новых технологий» защищена в 2018 году. E-mail: Lsmushkina@gmail.com.

Фролова Яна Андреевна, старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Окончила факультет Энергетики НГТУ в 2015 году. E-mail: ya.abramova1991@gmail.com

Иванова Елизавета Михайловна, сотрудник научно-образовательного центра «Интеллектуальная энергия», магистрант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. E-mail: lizai2000@mail.ru.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ И ДЕГИДРАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Малинин Г.В., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Арзамасов В.Л., Сергеев А.Г., ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В данной публикации рассматривается энергоэффективная и экологически чистая электротехнология очистки нефтяных и газовых скважин от отложений.*

***Ключевые слова:** нефтяные и газовые скважины, нагревательные кабели, прямой электронагрев, выходная частота тока.*

Одна из самых распространенных причин отказов оборудования нефтяных и газовых скважин – образование значительных асфальтосмолопарафиновых и гидратных отложений на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб (НКТ) и фонтанных труб, поверхности насосных штанг, в проточных каналах устьевой запорной арматуры, контактирующих со скважинной продукцией, что приводит к значительному сужению проходных сечений, возрастанию гидравлического сопротивления (вплоть до полного прекращения подачи скважинной продукции вследствие образования парафиновых и гидратных пробок). При этом снижается дебит скважины, увеличиваются расходы электроэнергии при откачке жидкости и газа, сокращается период между подземными ремонтами скважин и, как следствие, повышается себестоимость добываемой продукции. В настоящее время эксплуатационные расходы на электроэнергию и обслуживание энергетического комплекса в стоимости нефти и газа доходят до 45-50 %, при этом до 40 % дорогостоящих подземных ремонтов скважин выполняется вследствие запарафинирования и гидратизации НКТ и фонтанных труб.

Основными условиями, способствующими парафино- и гидратообразованию, являются снижение давления и температуры скважинной продукции при ее добыче.

Электронагрев НКТ представляет собой экономичную и экологически чистую альтернативу таким решениям пробле-

мы борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АС-ПО) и гидратизацией, как обработка горячей нефтью или паром, механическое удаление, ввод химических присадок или нагнетание пара.

В электронагревательном способе можно выделить два вида: косвенный, при котором тепло от источника электрической энергии передается нагреваемой среде контактным путем, и прямой, при котором преобразование электроэнергии в тепло происходит в нагреваемой среде. В установках косвенного электронагрева применяются специальные электронагреватели и нагревательные кабели.

Специальные электронагреватели спускаются на грузонесущем кабеле внутрь НКТ (эксплуатационной колонны) в зону асфальтосмолопарафиновых и гидратных отложений в скважинах с электроцентробежными насосами, газлифтных, фонтанных. Недостатками применения специальных электронагревателей являются большие тепловые потери при передаче тепла от источника нагрева к контактным поверхностям, локальность зоны нагрева скважинной продукции, необходимость в протяженном силовом кабеле, небольшой срок службы и несовместимость с режимом добычи нефти в нефтяных скважинах, оснащенных штанговыми насосными установками.

В последнее десятилетие для косвенного электронагрева широко применяются нагревательные кабели [1]. Кабели спускаются в межтрубное пространство в скважинах со штанговыми насосными установками или в НКТ в скважинах с погружными электроцентробежными насосами, газлифтных, фонтанных. Кабели для предупреждения парафино-гидратных отложений в НКТ, освоенные отечественным производством, аналогичны основным конструкциям, выпускаемым за рубежом (Франция, США, Германия, Финляндия, Япония). Питание большинства марок нагревательных кабелей осуществляется постоянным током. Максимальная рабочая температура кабелей составляет (90 – 100) °С, максимальная длина кабеля равна 2000 м.

Недостатками систем косвенного нагрева скважин с применением нагревательных кабелей являются:

- сложность конструкции кабеля, состоящего из 3-4 нагревательных жил с одно- или двухслойной изоляцией из поли-

мерного материала, подушки под броню, одно- или двухслойной брони из стальной ленты или стальных оцинкованных проволок;

- большие тепловые потери при передаче тепла от нагревательных жил к контактной поверхности кабеля, что особенно негативно сказывается при нагреве НКТ плоским кабелем, закрепленным на внешней поверхности НКТ;

- высокая трудоемкость спуска и подъема кабеля;

- неремонтопригодность кабеля;

- ускоренное старение изоляции нагревательных жил вследствие воздействия высокой температуры нагрева;

- высокая себестоимость кабеля.

В установках прямого электронагрева в качестве нагревательного элемента используются составные части подземного оборудования скважины. В этом виде нагрева можно выделить два метода: индукционный и резистивный.

Индукционный нагрев осуществляется токами промышленной или высокой частоты. Стационарные индукторы монтируются снаружи НКТ на глубине начала отложений, в качестве сердечника используется сама НКТ. При подаче переменного тока в изолированную от НКТ обмотку индуктора труба разогревается индуктированным током и передает тепло проходящей через индуктор скважинной продукции. К недостаткам индукционного нагрева относятся локальность обогрева НКТ, необходимость в протяженном силовом кабеле для питания обмотки индуктора, сложность размещения стационарного индуктора в скважине, вероятность местного пережога металла трубы, необходимость компенсации потребляемой реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей.

Прямой резистивный электронагрев является универсальным методом электронагрева, т.е. принципиально может работать со всеми способами подъема нефти и газа. Метод заключается в том, что в скважине создается электрическая цепь, элементами которой являются НКТ (или эксплуатационная колонна) и обсадная колонна, соединенные погружным электрическим контактом на глубине примерно на 30 метров ниже начала зоны парафино-гидратного отложения.

Схему замещения электрической цепи скважины с распределенными параметрами можно привести к простой электрической цепи с последовательно соединенными активным и индуктивным сопротивлением, которые зависят от частоты и величины тока, а также от глубины установки погружного контакта.

При пропускании по цепи электрического тока происходит разогрев НКТ за счет выделения в ней активной мощности, при этом парафины и гидраты откачиваются вместе со скважинной продукцией наверх. Равномерно распределенный подогрев является наиболее эффективным для поддержания заданной температуры на устье скважины. С целью обеспечения электробезопасности персонала устье скважины заземляется. Для изоляции цепи электрического тока необходимо выполнить:

- электрическую изоляцию НКТ от обсадной колонны до глубины установки погружного контакта при помощи специальных изоляторов;

- электрическую изоляцию подземной части НКТ от наземной скважинной аппаратуры при помощи изоляционной муфты;

- электрическую изоляцию подземной части стальной штанги в нефтяной скважине от наземной скважинной аппаратуры с помощью изоляционной штанги в скважине, оснащенной штанговой насосной установкой (не требуется, если применяется стеклопластиковая насосная штанга).

Примером промышленного применения прямого электронагрева является установка «Paratrol» фирмы «Production Technologies International Incorporation» с выходной частотой тока 60 Гц, разработанная в США в 1988 г. Питание на установку электронагрева подается через разделительный однофазный силовой трансформатор, подключенный к фазе вторичной обмотки скважинного трехфазного трансформатора. Использование однофазного трансформатора приводит к неравномерной нагрузке питающей сети и асимметрии в выходном напряжении скважинного трансформатора, что негативно отражается на работе скважинного асинхронного электродвигателя.

С уменьшением выходной частоты тока снижается напряжение, подводимое к электрической цепи скважины, уменьшается полная мощность трансформатора установки, увеличивает-

ся коэффициент мощности установки электронагрева. Снижение напряжения в устье скважины при уменьшении выходной частоты упрощает требования по электроизоляции к изоляторам-центраторам, устанавливаемым в межтрубном пространстве, и повышает надежность работы установки [2].

Очевидно, что самым выгодным режимом по затратам электроэнергии является режим нагрева постоянным током. Однако в этом случае происходит ускоренная электрохимическая коррозия металла труб скважины. Кроме того, при протекании через НКТ и обсадную колонну постоянного тока большой величины в межтрубном пространстве возможен электролиз воды с образованием гремучего газа и опасностью взрыва. Верхняя граница выходной частоты определяется из условия максимальной электрической проводимости сечения трубы НКТ и равна примерно 4 Гц.

Регулирование выходной частоты выполняется с помощью трехфазно-однофазного преобразователя частоты.

Испытания установок прямого электронагрева с пониженной частотой тока проходили в ОАО «Татнефть» в 2000-х годах и дали положительные результаты.

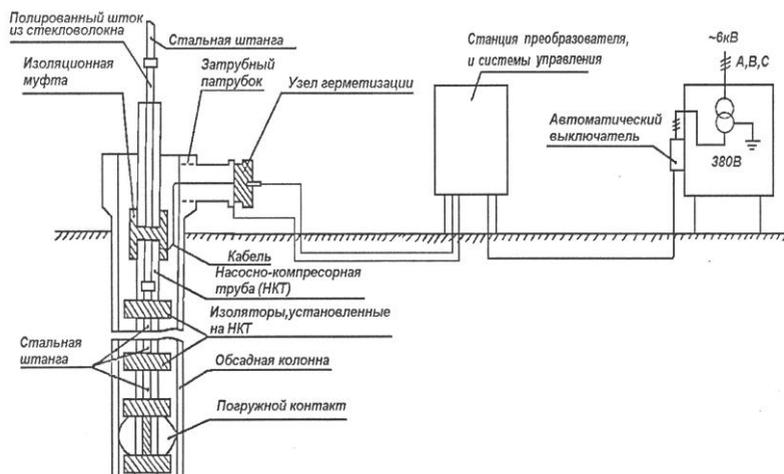


Рисунок. Установка прямого электронагрева с питанием от трехфазного трансформатора

Обобщенная структура комплекса оборудования установки электронагрева, состоящей из наземной и подземной частей, показана на рисунке.

Установки прямого электронагрева могут выполняться в передвижном и стационарном исполнении. Внедрение установок прямого электронагрева нефтяных и газовых скважин обеспечивает:

- увеличение дебита скважины вследствие отсутствия АСПО, гидратов;
- уменьшения вязкости продукции в нефтяной скважине;
- сохранение эксплуатационных качеств пласта нефти и газа;
- экологическую безопасность при откачке нефти и газа;
- очистку НКТ нефтяной скважины без остановки штанговой насосной установки;
- низкие эксплуатационные затраты на очистку по сравнению с другими методами;
- снижение общих расходов по обслуживанию скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ковригин Л.А., Макиенко Г.П., Акмалов И.М. Нагревательные кабели и управление температурным полем нефтяных скважин // Инженер. 2004. № 3. С.18-20.

2 Миронов Ю.М., Иванов А.Г., Арзамасов В.Л., Михайлов В.В. Оптимизация установок электронагрева для депарафинизации нефтескважин // Электричество. 2001. № 6. С. 56-62.

Авторы:

Малинин Григорий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1996 г. Ученую степень получил по специальности «Силовая электроника». E-mail: malgrig6@mail.ru.

Арзамасов Владислав Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИР». Закончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1981 году. Ученую степень получил по специальности «Силовая электроника». E-mail: varzamasov@vniir.ru.

Сергеев Александр Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИР». Закончил факультет

радиотехники и электроники ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2001 году. Ученую степень получил по специальности «Силовая электроника». E-mail: sergeyev07@mail.ru.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Свешников А.Г., Михеев Г.М., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В работе представлены различные способы водоснабжения сельских населённых пунктов, которые имеют определённые преимущества и недостатки. В ней также рассмотрены всевозможные причины утечки жидкости. Особое внимание уделено влиянию утечки питьевой воды в системе водоснабжения из-за неисправного обратного клапана в результате попадания в него механических примесей, а также в результате износа насосной части погружного агрегата.*

***Ключевые слова:** механические примеси, обратный клапан, программный продукт, сельские населённые пункты, система водоснабжения, утечка жидкости, устройства частотного регулирования.*

В последние годы малые сельские населённые пункты снабжаются питьевой водой разными способами. Самым распространённым из всех этих способов является использование водонапорных башен. За ним следует добыча этого ценного сырья путём применения скважинного насоса, снабжённого устройством частотного регулирования. Третий способ предполагает комбинированное применение этих двух способов, т.е. использование водонапорной башни в летнее время и эксплуатация скважинного насоса с использованием устройства частотно регулируемым приводом в зимний период [1, 2, 3].

В настоящее время в малых населённых пунктах всё шире стали использовать скважинные насосы, снабжённые устройствами частотного регулирования. Данное решение имеет ряд положительных факторов [4, 5].

Система водоснабжения с устройствами частотного регулирования позволяет уменьшить стоимость её строительства, под-

держат стабильность давления в системе за счет автоматического регулирования, производительности насоса в зависимости от текущего расхода жидкости [6]. Она также позволяет улучшить качество питьевой воды за счёт уменьшения её окисления, что важно для соответствия ценного продукта к требованиям нормативных документов [7].

Однако у этой системы имеется большой недостаток, который заключается в трудности обнаружения утечки жидкости из-за малого объема воды в системе.

Известно, что питьевая вода в такой системе сосредоточена лишь в объёмах трубопровода. По этой причине утечка жидкости в ней приводит к потерям, как электрической энергии, так и самого ценного сырья.

В работе [8, 9] показано, что наличие или отсутствие утечки жидкости в упомянутой системе водоснабжения вполне возможно. Оно возможно в том случае, когда в ней установлена система слежения за работой электронасоса.

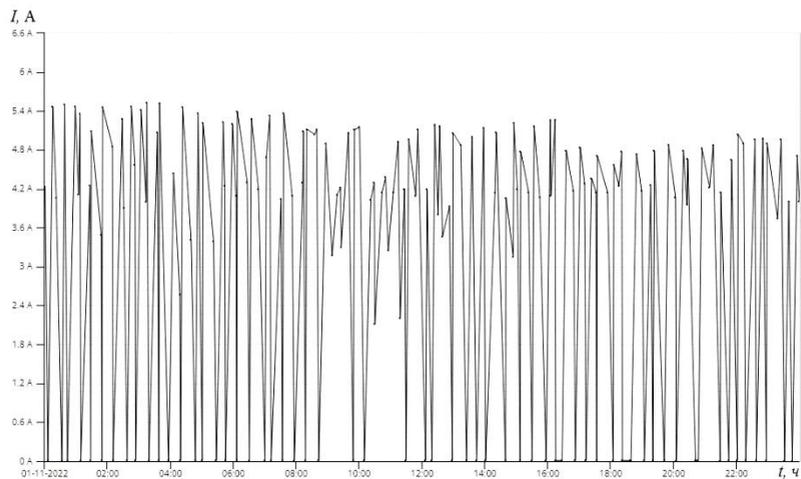
Демонстрируем пример в пользу этого высказывания. На рис. 1 показаны графики работы электронасоса, установленного на одном из сельских населённых пунктов Нижегородской области.

Из рис. 1, *а* видно устойчивое повышение количества циклов работы насоса даже в часы фактического отсутствия потребления воды. На рис. 1, *б* просматривается цикличность работы насоса, что означает об отсутствии утечки жидкости. В утренние и дневные часы данный агрегат всё время находится в работе, а в остальное время он практически бездействует.

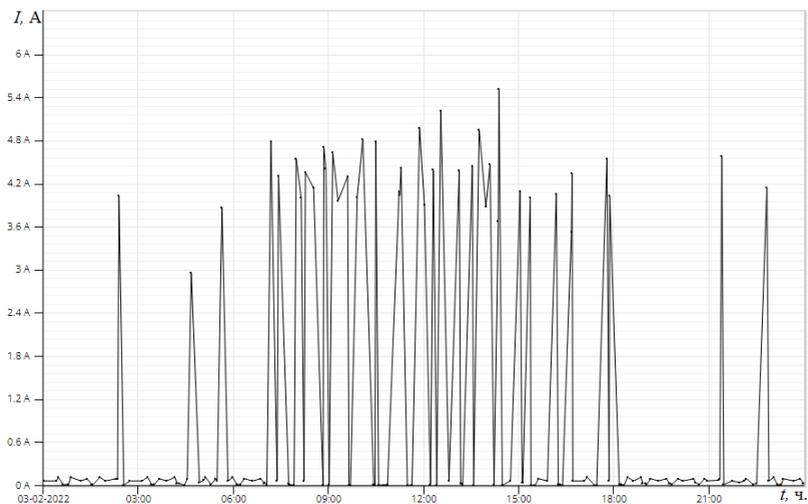
После обследования объекта предположение об утечке воды подтвердилось.

Графики, продемонстрированные на рис. 1, выполнены при помощи информационной облачной среды «*OwenCloud*». Она разработана для удалённой работы с оборудованием компанией ОВЕН [10].

С помощью интерфейса облачного сервиса «*OwenCloud*» осуществляется сбор, хранение и консолидация данных как для приборов с жесткой логикой, так и для программируемых контроллеров.



a



б

Рис. 1. График потребления тока электронасосом скважинного агрегата в течение суток в селе «Русское Маклаково» Спасского района Нижегородской области: *a* – график потребления тока электронасосом системы водоснабжения с наличием утечки воды за 01.11.2022 г.; *б* – график потребления тока электронасосом в безаварийном режиме за 03.02.2022 г.

Данная облачная среда решает многие задачи: контроль, мониторинг, настройка оборудования. Она также способна уведомить об авариях, передать данные через OPC-сервер, а также обеспечить различные варианты отображения данных и устройств на карте.

Тем не менее, графики анализа потребления тока электронасосов могут не дать однозначного ответа о причинах утечки воды. Теоретически утечка воды возможна по причине неполадок не только в водопроводной сети. Она может происходить от неисправности обратного клапана системы водоснабжения (рис. 2). Практический опыт показывает, что со временем происходит износ насосной части погружного агрегата. Это обстоятельство также приводит к утечке жидкости [11].

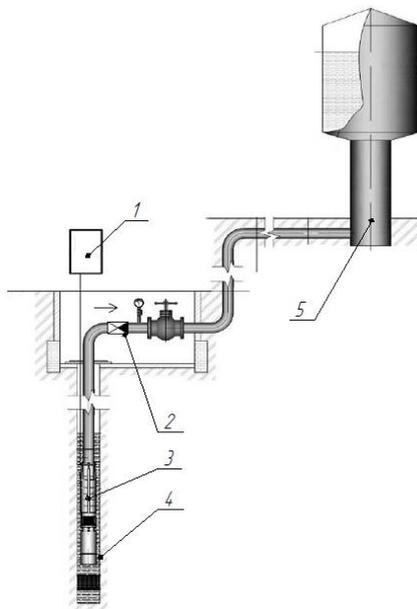


Рис. 2. Схема водоснабжения, где: 1 – станция управления; 2 – обратный клапан; 3 – скважинный насос; 4 – скважина; 5 – водонапорная башня

В то же время существует большая вероятность попадания механических примесей из насосной части погружного насоса в

обратный клапан. Для наглядности понимания этого процесса на рис. 3 показана конструкция погружного насоса типа ЭЦВ.

Механические примеси в виде сорванных частей отвода лопаточного 6 (крыльчатки) (рис. 3.) доходят до обратного клапана (рис. 2) и заклинивают его в промежуточном состоянии между положениями «закрыто» и «открыто». Все эти случаи приводят к утечке жидкости обратно в скважину, вызывая лишнюю потерю электрической энергии.

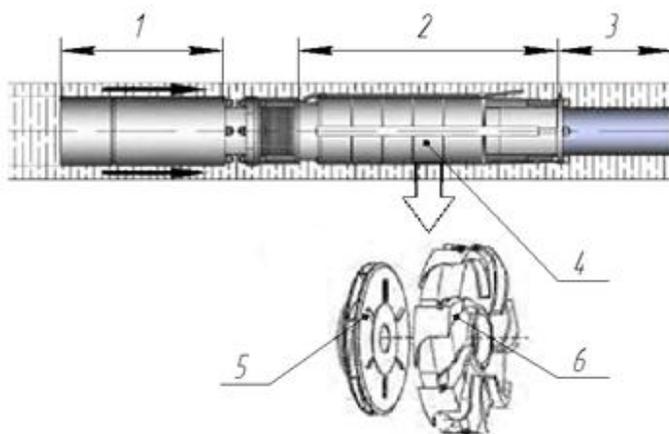


Рис. 3. Конструкция погружного насоса ЭЦВ, где:
1 – электродвигатель; 2 – насос; 3 – водоподъёмная труба;
4 – секция насоса; 5 – рабочее колесо; 6 – отвод лопаточный

Для того чтобы определённо сказать о причинах утечки жидкости в системе водоснабжения частотно регулируемым электроприводом следует анализировать работу этих устройств и проводить дальнейшие исследования.

На наш взгляд, решение этой проблемы можно осуществить с помощью современных технологий и автоматизированных систем с применением математического моделирования и вновь разрабатываемых программных продуктов.

Выводы

1. Наличие или отсутствие утечки жидкости в системе водоснабжения с применением скважинного насоса, снабжённого устройством частотного регулирования возможно определить

при наличии слежения за потреблением тока в течение времени с записью информации.

2. Применение облачного сервиса «*OwenCloud*» компании ОВЕН способствует обнаружению факта утечки жидкости в системе водоснабжения.

3. Износ насосной части погружного агрегата приводит к утечке воды обратно в скважину, увеличивая потери электрической энергии.

4. Попадание механических примесей в обратный клапан системы водоснабжения вызывает не полное его закрытие, что вызывает утечку жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свешников А.Г., Михеев Г.М. /Эксплуатация и проектирование систем водоснабжения населенных пунктов с целью обеспечения их эффективности/ Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2022. – №2. – С. 9-14.

2. Михеев Г.М. Вопросы выявления утечки воды в разных системах водоснабжения / Г.М. Михеев, А.Г. Свешников // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 351–354.

3. Павлинова И.И. Водоснабжение и водоотведение: учебник и практикум для СПО / И.И. Павлинова, В.И. Баженов, И.Г. Губий. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2017. – 380 с.

4. Как ищут скрытые утечки воды из подземных трубопроводов систем водоснабжения. Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <https://vodablog.livejournal.com/118322.html>. Дата обращения 10.01.2022.

5. Свешников А.Г. Особенности водоснабжения сельских населённых пунктов / А.Г. Свешников, Г.М. Михеев, А. Г. Зиганшин // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы III Международной науч.-практ. конф. (г. Чебоксары, 26 февраля 2021 г.). – Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, 2021. – С. 105–109.

6. Свешников А.Г. Утечки воды как расход электроэнергии / А.Г. Свешников // Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, Чебоксары, 22 ок-

тября 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2021. – С. 244–246.

7. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М., 2002. – 103 с.

8. Свешников А.Г. Возможность обнаружения утечки жидкости в системе водоснабжения с применением скважинного насоса с частотным регулированием / А.Г. Свешников, Г.М. Михеев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 3. – С. 36–39.

9. Свешников А.Г. Определение утечки воды по графику нагрузки скважинного насоса / А.Г. Свешников, Г.М. Михеев // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2(21). – С. 107–113.

10. *OwenCloud* Облачный SaaS-сервис для удаленного мониторинга, управления. Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <https://owen.ru/owencloud>. Дата обращения 12.02.2022.

11. Документация АО «Ливнынасос». Электронный ресурс. Заглавие с экрана. Доступ свободный: <https://www.livnasos.ru/dokumentaciya/>. Дата обращения 12.09.2022.

Авторы:

Свешников Артемий Григорьевич, аспирант кафедры механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства, Чувашский государственный аграрный университет. E-mail: artemachaki@mail.ru.

Михеев Георгий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Фёдорова, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. E-mail: mikheevg@rambler.ru.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРУКТУРНОЙ СИСТЕМЫ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Кесель Л.Г., Смирнова А.С., КНИТУ-КАИ им. А.Н Туполева, г. Казань, Россия.

Кесель Б.А., ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника», г. Казань, Россия.

***Аннотация.** В статье представлены результаты разработки системы зарядки электромобилей в условиях распределённой энергетики с применением мобильной газотурбинной электростанции. Выполнен подбор необходимого технологического оборудования и произведена оценка энергоэффективности указанной системы.*

***Ключевые слова:** техническая система, системотехнический комплекс, уровень моделирования системы, структура технической системы, объектная модель технической системы, распределённая энергетика, газотурбинная электростанция, конвертированный ГТД, критерий энергоэффективности.*

Отсутствие централизованного обеспечения электроэнергией в отдельных регионах России является одним из сдерживающих факторов создания сети зарядных станций для обеспечения эксплуатации электромобилей. Одним из актуальных направлений развития современной электроэнергетики является тенденция создания объектов распределённой генерации. Согласно работе [1], распределённая генерация (РГ) – это «совокупность электростанций, расположенных близко к месту потребления энергии и подключенных либо непосредственно к потребителю, либо к распределительной электрической сети (в случае, когда потребителей несколько)». Задача обеспечения электрической энергией станций зарядки электромобилей по всей территории России может быть решена путём создания сети независимых источников электрогенерации, представляющей собой сложную техническую систему.

Актуальность разработки данной технической системы обусловлена тем, что тенденции развития общества направлены на снижение углеродных выбросов в атмосферу, а современные транспортные средства являются одним из значительных источников её загрязнения.

Цель настоящей работы – разработка структурной модели системы зарядки электромобилей в условиях отсутствия централизованных источников генерации электрической энергии с применением мобильной газотурбинной электростанции малой мощности.

В данной работе осуществлена разработка структурной модели системы зарядки электромобилей в условиях распределённой энергетики. Структурная модель наиболее чётко определяет состав элементов разрабатываемой системы и их взаимосвязей внутри системы и связей системы с окружающей средой.

Условием для разработки структурной модели указанной системы является наличие элементов дорожной сети с твёрдым покрытием, по которой осуществляется движение электромобилей. Кроме того, для разработки модели необходимы данные по инфраструктуре топливозаправочных станций, расположенных на конкретных элементах дорожной сети, сведения о наличии или отсутствии источников генерации электрической энергии в непосредственной близости к дорожной сети и набор технических средств для генерации электрической энергии, для хранения электрической энергии и её отпуска потребителям.

Известные структурные модели систем зарядки электромобилей и реализованные по данным моделям проекты зарядных станций ориентированы на получение электрической энергии от сетей какого-либо централизованного производителя данной энергии. Произведённая электроэнергия через посредство соответствующей сетевой компании, и преобразование получаемой энергии отпускается на индивидуальных устройствах зарядки для каждого заряжаемого объекта. Задача по разработке универсальной системы зарядки электромобилей в условиях отсутствия стационарных станций для реализации указанной технологической операции является многоплановой. На начальном этапе необходимо определить структурную схему системы зарядки электромобилей и определить тип созданной системы. Затем разработать функциональную схему разрабатываемой системы, осуществить необходимый подбор технологического оборудования и выполнить комплексную оценку вариантов указанной системы по известным группам показателей и критериев

технических систем, сформулированных в известных работах [2, 3].

В качестве основного критерия, оценивающего преимущество варианта разрабатываемой системы, предлагается использовать критерий энергетической эффективности.

С точки зрения системотехники разрабатываемая система представляет собой мегакомплекс и может быть реализована в двух вариантах: как централизованный мегакомплекс или как автоматизированный мегакомплекс. С учётом того, что данная система разрабатывается впервые, предлагается последовательная реализация её решений. На начальном этапе система зарядки электромобилей выполняется как централизованный мегакомплекс. В последующем, при положительных результатах подконтрольной эксплуатации данного мегакомплекса, осуществляется переход к его полной автоматизации, т.е. создания автоматизированного мегакомплекса. Границы мегакомплекса носят совершенно условный характер. Он может быть ограничен, например, рамками одной магистральной трассы между какими-то конкретными населёнными пунктами или ограничен какими-либо другими условными границами.

Мегакомплекс включает в себя отдельные системотехнические комплексы (СТК). СТК содержит в своём составе: операционную систему, управляющую систему, обслуживающую систему, обеспечивающую систему. Группа СТК управляется координирующей системой мегакомплекса (системой управления более высокого уровня).

Основу СТК составляет операционная (производящая) система. В рассматриваемом решении роль такой системы предлагается отвести мобильной газотурбинной электростанции (ГТЭ). Соответственно продукт, производимый такой системой – трехфазный электрический ток напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Совместно с ГТЭ в состав операционной системы входит совокупность всех технических средств, позволяющих выполнять все необходимые технологические операции по выработке, преобразованию, доставке потребителю электроэнергии в необходимом объёме и необходимого качества.

Схема СТК мобильной системы зарядки электромобилей представлена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ГТЭ – мобильная газотурбинная электростанция, ЗУ – мобильное зарядное устройство, ЭБ – «Power bank» – мобильный накопитель энергии.

В соответствие с работой [4] в общем случае, операционная система СТК как составная часть организационно-технической схемы может быть отнесена к одному из следующих структурных представлений:

- в виде списочной (парковой) структуры однородных объектов, между которыми отсутствует взаимодействие (каждый объект выполняет свою функцию).
- в виде сетевой структуры технической системы – совокупности технических объектов, между которыми есть взаимодействие.
- в виде линейной технической системы.

Представленная на рис. 1 организационно-техническая схема СТК может быть реализована в виде сетевой структуры.

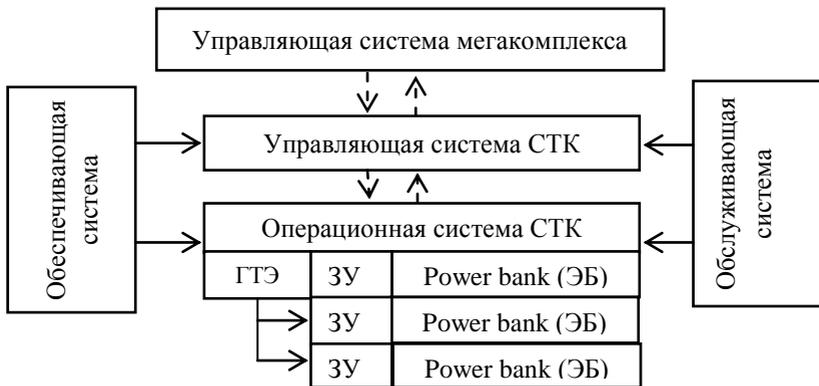


Рис. 1. Организационно-техническая схема СТК

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ГТЭ – мобильная газотурбинная электростанция, ЗУ – мобильное зарядное устройство, ЭБ – «Power bank» – мобильный накопитель энергии.

Оборудование, включенное в состав СТК, подобрано по принципу серийно-выпускаемого на момент разработки его структуры и представляет собой один из возможных вариантов.

В условиях серийного выпуска отечественного оборудования, импортное оборудование может быть заменено на отечественное. Оборудование, включённое в состав СТК, имеет следующие технические характеристики

Газотурбинная электростанция ГТЭ-1000 (ГТЭ), производства АО «УЗГА», выполнена на базе газотурбинного двигателя ТВ-2-117. Всё оборудование ГТЭ размещено в 20-ти футовом контейнере. В состав ГТЭ входят 2 двигателя ТВ-2-117, мощность каждого двигателя при работе на режиме, соответствующем крейсерскому, составляет порядка 500 кВт, при расходе жидкого топлива (керосин ТС-1) 272 кг /ч (керосин ТС-1). Обороты выходного вала свободной турбины двигателя составляют 12 000 об/мин. Каждый газотурбинный двигатель через свой редуктор типа Р-530 соединен с генератором переменного тока типа СГ- 600-2УХЛЗ. Двигатель ТВ-2-117 прошел конвертирование и оборудован двухтопливной системой (жидкое топливо - газовое топливо). Данная особенность позволяет использовать в процессе эксплуатации различные виды топлива. Редуктор Р-530 представляет собой 2-ступенчатый редуктор с передаточным числом 4 и обеспечивает обороты его выходного вала $n=3000$ об/мин. Редуктор использует в своей системе смазки масло МС-8 одноимённое с маслом, используемым в системе смазки ГТД. Генератор СГ-600-2УХЛЗ синхронного типа имеет мощность 600 кВт (750 кВА), рабочие обороты генератора 3000 об/мин., к.п.д. генератора 89 %, и поставляется в комплекте с системой возбуждения. Генератор вырабатывает переменный ток с частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Газотурбинная электростанция ГТЭ-1000 оборудована системой синхронизации работы генераторов.

Газотурбинная электростанция ГТЭ -1000, выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55196-2012 [5].

Зарядное устройство (ЗУ) производства АО «ПКК Миландр» имеет следующие технические характеристики [6]:

- максимальную выходную мощность 22,5 кВт, что позволяет зарядить аккумулятор электромобиля ёмкостью 30 кВт ч до уровня 80 % примерно за 1 час;
- выходное напряжение 50-450 В;
- максимальный выходной ток 50 А;

- максимальное значение к.п.д. 95 %;
- питание ЗУ от трёхфазной сети переменного тока с напряжением 380 В, 50 Гц.

Зарядное устройство соответствует ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013 [7].

Устройство «Power bank» (ЭБ) [8] производства компаний «Porsche» и «Ads-tec». Устройство смонтировано на грузовом прицепе, который содержит в себе аккумуляторные батареи общей ёмкостью 2.1 МВт ч, способные полностью зарядить до 30 экземпляров автомобилей марки «Porsche Taycan», которые являются спорткарами. При этом на одном проводе могут заряжаться 10 автомобилей за раз. Данное техническое устройство включено в разрабатываемую схему в качестве аналога, демонстрирующего принципиальную возможность создания оборудования, на основе которого необходимо разработать подобное отечественное устройство.

Вопрос топливообеспечения работы ГТЭ решается достаточно просто. Снабжение жидким топливом осуществляется непосредственно с автомобиля-топливозаправщика. Снабжение газообразным топливом может осуществляться от входных газопроводов АГРС (автоматических газораспределительных станций) ПАО «Газпром».

Энергоэффективность предложенного системотехнического комплекса может быть определена по формуле (1):

$$K_e = \frac{(Q_{100} - Q_{CH}) \cdot \eta_{ЗУ} \cdot \eta_{ЭБ}}{Q_{100}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где K_e – коэффициент энергоэффективности;

Q_{100} – суточная выработка электроэнергии без учёта потерь, кВт ч;

Q_{CH} – суточный расход электроэнергии на собственные нужды ГТЭ кВт ч;

$\eta_{ЗУ}$ – к.п.д. преобразования энергии в зарядном устройстве;

$\eta_{ЭБ}$ – к.п.д. зарядки аккумуляторов устройства типа «Power bank».

Расчёт, выполненный по формуле (1) показал, что энергоэффективность предложенного системотехнического комплекса

составляет 69,2 % (при $\eta_{ЭБ} = 0,81$) Запасённая в устройстве «Power bank» энергия позволит за сутки заправлять 38 аккумуляторных батарей электромобилей в одном СТК. В связи с тем, что количество автомобилей, заряжаемых на конкретных СТК, является случайной величиной, заложенная в данном комплексе мобильность всех элементов операционной системы позволит оперативно наращивать производящие ресурсы или регулировать их количество.

Выводы

В работе рассмотрены особенности разработки структурной схемы СТК для зарядки электромобилей с интегрированной в данную систему мобильной газотурбинной электростанции.

Интеграция ГТЭ в структурную схему системы зарядки электромобилей позволит выполнять данную технологическую операцию в условиях распределённой энергетики.

Оценка энергоэффективности предложенного в настоящей работе схемного решения с подбором необходимого для его реализации оборудования показала достаточно высокий уровень энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Хохлов, Ю.В. Мельников и др., Распределённая энергетика России: потенциал развития, Энергетический центр Московской школы управления Сколково, 2018 – 87 с.
2. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 361 с.
3. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 512 с.
4. Запорожцев А.В. Моделирование технических систем. Ж. Фундаментальные исследования. № 8 (часть 6), раздел технические науки. – 2014 – С. 1288–1294.
5. ГОСТ Р 55196-2012 Установки газотурбинные малой мощности для привода турбогенераторов. Общие технические условия, М.: Стандартиформ. 2014, – 11 с.
6. Беляков Д.Н., Бескровный С.И. Быстрая зарядная станция электромобилей. Ж. Компоненты и технологии № 5, 2020, С.12-14 [Электронный ресурс]/Сайт: www.kit-e.ru.

7. «Power bank» на колесах: [Электр.ресурс]/Сайт: https://zen.yandex.ru/media/unlock_autoblog/powerbank-na-kolesah-peremescaemaia-zariadnaia-stanciia-dlia-elektromobilei-518dce6d9095e028..., 2021, С1-4.

8. ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013 Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования., М.: Стандартиформ 2014, – 46 с.

Авторы:

Кесель Людмила Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. Окончила в 1974 году физфак КГУ им. В.И. Ленина, г. Казань, ученая степень с 1997 года по квантовой электронике.

Кесель Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент, ООО «Научно-производственное предприятие «Авиатехника» Казань, главный конструктор. Окончил в 1974 году КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, ф. двигатели летательных аппаратов. учёная степень с 1999 г. по тепловым двигателям Л.А.

Смирнова Анна Сергеевна, магистрант 2 года КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань.

ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ МАРКИ ГРАФИТОВОГО ТИГЛЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Яковлев А.С., СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.

***Аннотация.** При небольшом производстве металлы можно плавить в электрических, а также в тигельных индукционных печах. Особо чистые бескислородные металлы и сплавы плавят в вакуумных индукционных печах. Для повышения скорости нагрева предлагается рассмотреть влияние различным марок графита, из которых изготавливают тигли.*

***Ключевые слова:** скорость нагрева, тигель, индукционный нагрев, магнитное поле, электропроводимость.*

Современные производители предлагают широкий выбор тиглей из различных материалов. Одну группу изделий состав-

ляют металлические тигли. Их используют довольно редко, поскольку они имеют свойство сплавляться с другими металлами. Более практичные изделия выполнены из твёрдого стекла и кварца. Они отлично подходят для работы с металлами с низкой температурой плавления, но для алюминиевых сплавов они уже непригодны. Также тигли изготавливают из окислов-силикатов, извести, огнеупорной глины и многих других материалов, но все они в плане прочности значительно уступают графитовым изделиям.

Тигли изготавливают из графита марок ЭПГ, МГ-1, ГМ-3, ППГ, МПП-6 в зависимости от места их применения (табл. 3). Графитовые тигли хорошо электропроводны и могут применяться главным образом в вакуумных и высокочастотных печах или в печах с защитной атмосферой при температуре до 2000 °С, что дает возможность ускорить плавку металла, а срок службы этих тиглей по сравнению с набивными значительно больше. Графитированные тигли из искусственного графита могут применяться в высокочастотных печах вместо набивных тиглей. Тигли из искусственного графита теряет механическую прочность при 2800-3000 °С и испаряется в вакууме при температуре около 2300 °С, но окисляется на воздухе примерно при 600 °С. Поэтому графитированные тигли не пригодны для работы в открытых горновых или других печах, где нагрев и плавление производится твёрдым топливом, газом или нефтяной форсункой с окислительным пламенем.

Таблица

Свойства марок графита

Наименование марки	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельное электросопротивление, $\text{мкОм} \cdot \text{м}$	Электропроводность, $\frac{\text{См}}{\text{м}}$
ЭПГ	1650	15	66 666
МГ-1	1600	8	133 333
ГМ-3	1650	13	76 923
ППГ	1700	13	76 923
МПП-6	1600	11	90 909

Данные, приведенные в таблице, были использованы в математическом моделировании, а именно в свойствах материала графита (рис. 1). В состав моделирования входит индукционный нагрев меди.

Property	Value	Unit
Relative permeability	1	1
Electrical conductivity	133333[S/m]	S/m
Heat capacity at constant pressure	710[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
Relative permittivity	1	1
Density	1650[kg/m^3]	kg/m ³
Thermal conductivity	278[W/(m*K)]*(300[K...]	W/(m·K)
Surface emissivity	1	1
Ratio of specific heats	1	1

Рис. 1. Свойства графита марки МГ-1

Стоит отметить, что немаловажную роль в свойствах графита имеет электропроводность, т.к. она напрямую влияет на скорость нагрева шихты, находящейся в тигле.

Полученные результаты распространения теплового поля медной заготовке в тигле, который изготовлен из разных марок графита, представлены на рис. 2.

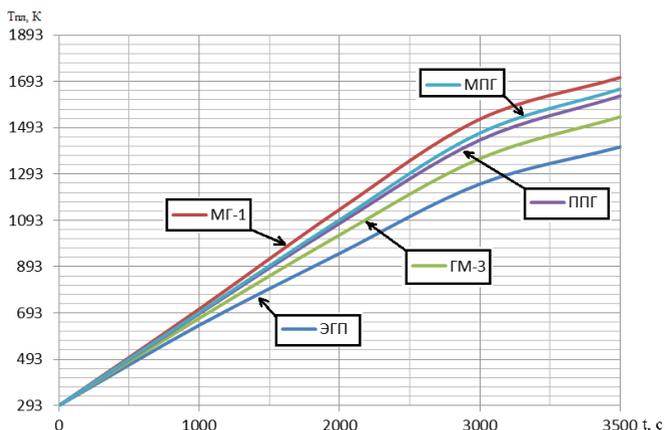


Рис. 2. Влияние марки графита на индукционный нагрев

Демонстрация окончательного распространения температурного поля представлена на рис. 3.

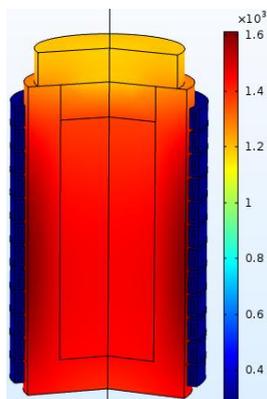


Рис. 3. Распределение полей температур медной шихты в установке индукционного нагрева

Выводы

Анализируя рис. 2, представленный выше, можно утверждать, что наиболее рациональным и энергоэффективным будет графит марки МГ-1, в связи его высокой электропроводностью и более быстрым нагревом. Выбор этой энергоэффективной марки графитового тигля позволит сократить расходы на электроэнергию, а также ускорит электротехнологический процесс нагрева и плавки меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прахт В.А. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа COMSOL / В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Спутник+, 2011. – 158 с.
2. Башенко В.В. Электроплавильные печи цветной металлургии / В.В. Башенко, А.В. Донской, И.М. Соломахин. – М.: Металлургия, 1971. – 320 с.
3. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи: учебное пособие для вузов / А.М. Вайнберг. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.

Автор

Яковлев Андрей Сергеевич, аспирант, ассистент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Окончил институт энергетики и транспортных систем в 2020 году. E-mail: red.and2012@yandex.ru.

ВНЕДРЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ПОДСТАНЦИЙ

Назаров М.А., г Тольятти, Россия.

Хренников А.Ю., г. Москва, Россия.

Александров Н.М., г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Применение частотного управления электродвигателями систем охлаждения трансформаторов и систем утилизации тепловых потерь на нужды отопления зданий с применением тепловых насосов сокращает расходы на собственные нужды подстанций.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, собственные нужды подстанции, снижение потерь.*

Объекты собственных нужд подстанций (СН ПС), такие как тепловые и циркуляционные насосы, вентиляторы охладителей трансформаторов и другие потребители, потребляют ощутимую часть электроэнергии – в определенных случаях до 7 % от всей передаваемой энергии. Получается, что сама электроэнергетика также является одним из крупнейших потребителей электроэнергии. Заметим, что большая часть данных механизмов управляется неэффективно и имеют обычно избыточное энергопотребление [1, 2].

Для того, чтобы определить возможности сокращения расхода на СН ПС была проведена оценка потенциала и показателей эффективности различных мероприятий по сокращению расхода: по существующим ПС на 15–30 %, по новым и проектируемым ПС на 40–50 % от удельного потребления электроэнергии [3].

При планировании мероприятий и анализе эффективности работы оборудования СН ПС приходится ориентироваться на структуру нормативного расхода, корректируя ее в соответствии с величиной фактического расхода по каждой ПС. Такой подход вносит определенную погрешность, но в целом позволяет оценить структуру расхода электроэнергии на собственные нужды по каждой подстанции. Результаты оценки структуры расхода для всех ПС ПАО «ФСК ЕЭС» приведены на рис. 1.



Рис. 1. Структура расхода электроэнергии на СН ПС

Преобразователи частоты на сегодня является наиболее распространённым способом управления производительностью электроприводов компрессоров тепловых насосов (рис. 2) на ПС, дутьевых вентиляторов охлаждения трансформаторов, циркуляционных насосов (масляного контура и отопительного контура).

Преобразователи частоты позволяют регулировать скорость вращения электродвигателя за счет изменения входной частоты питающего напряжения.

Рассмотрим ещё одно направление повышения энергетической эффективности.

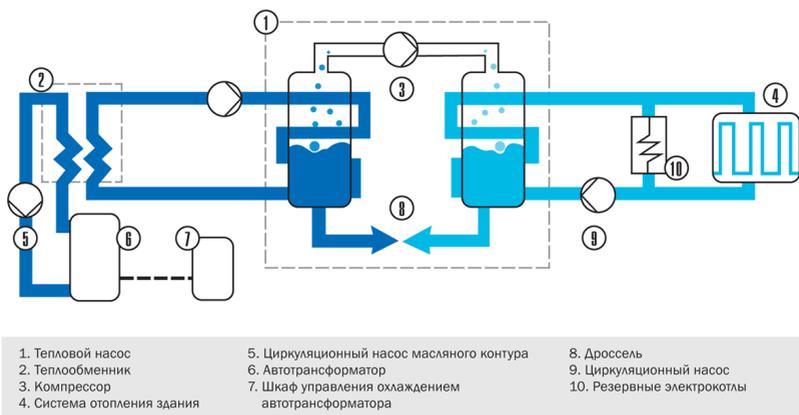


Рис. 2. Принципиальная схема установки утилизации тепла трансформатора

Два основных направления повышения энергоэффективности на ПС ПАО «ФСК ЕЭС»:

- для снижения расхода электроэнергии на отопление здания общеподстанционного пункта управления (ОПУ) внедрена система утилизации тепла масла автотрансформатора (рис. 2).

- преобразователи частоты позволяют изменять производительность дутьевых вентиляторов и маслонасосов систем охлаждения трансформаторов в зависимости от условий работы [4, 5].

Применение частотно-регулируемых приводов позволяет получить значительную экономию электроэнергии за счет регулирования расхода (до 60%). С помощью преобразователей частоты можно регулировать производительность системы охлаждения трансформатора путём изменения уровня частоты вращения, при этом, поддерживая заданный уровень технологического параметра.

Использование частотного привода позволяет также экономить значительные объемы (более 30%) электроэнергии за счет регулирования скорости электроприводов насосов отопительного контура ОПУ. Помимо экономии электроэнергии за счет снижения давления в системе уменьшаются утечки воды в контуре ОПУ, а следовательно, экономится перекачиваемая жидкость, до 10%.

Также, преобразователи частоты позволяют избежать повреждения двигателей, так как за их счет осуществляется плавный пуск и отсутствуют прямые пуски с 6-7 кратными пусковыми токами. Гибкое управление за счет простоты перенастройки параметров технологического цикла (изменение скорости). Встроенные в преобразователи частоты функции позволяют реализовывать сложные задачи автоматического управления без дополнительных внешних устройств.

Преобразователь частоты имеет ряд встроенных защитных функций для работы с насосами – обнаружение утечек, защита от сухого хода и др. Данные защитные функции увеличивают срок службы насосов и повышают надежность их работы, исключая возможные аварийные остановки.

Выводы

Таким образом, преобразователи частоты позволяют значительно повысить эффективность использования энергоресурсов,

а также являются подходящим решением для оптимизации работы потребителей подстанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранчикова Н.И., Епифанов С.П., Исаков И.М., Цуканов С.Т. Особенности применения частотных преобразователей на насосных агрегатах в системах теплоснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 5. С. 22–29.

2. Использование преобразовательной частоты в энергетике [Электронный ресурс]: Официальный сайт продукции Danfoss Drives. URL: <https://drives.ru/po-otraslyam/energetika/#>.

3. Рябин Т.В., Давыдов Е.Ю., Паринов И.А. Возможности снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций // Энергосбережение. 2016 № 6. С. 36–45.

4. Хренников А.Ю. Техническая диагностика и аварийность электрооборудования. Учебно-методич. пособие / ЛИТРЕС, 2021.– 230 с.

5. Хренников А.Ю., Точилкин В.Г. Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики. Учебно-методическое пособие для магистратуры/ Директ-Медиа – М, 2021. – 212 с., ил.

6. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие для магистратуры/ А. Ю. Хренников, Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Александров Н.М. Директ-Медиа, М: 2021. – 336 с.

7. Хренников А. Ю. Обслуживание автоматики и средств измерений электростанций / Кнорус – М, 2022. – 262 с., ил.

Авторы:

Назаров Максим Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет».

E-mail: maximnazarov27@gmail.com.

Хренников Александр Юревич, доктор технических наук., профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС – начальник отдела АО "НТЦ ФСК ЕЭС" Россети, электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1986 году, кандидат технических наук. – 1997 году, Докторская диссертация: «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования», 2009. E-mail: ak2390@inbox.ru.

Александров Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭЭиАП ЧувГУ, начальник отдела НПП «Динамика», г. Чебоксары.

РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (ТКЗ) НА ВЫВОДАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Юдина А.А., ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия.

Хренников А.Ю., АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети, г. Москва, Россия.

Александров Н.М., НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Расчёт токов КЗ на выводах силовых трансформаторов позволяет повысить надежность их конструкции и обеспечить бесперебойность электроснабжения потребителей электроэнергией.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, собственные нужды подстанции, снижение потерь.*

В случае возникновения КЗ в результате внутреннего повреждения обмоток трансформатора в процессе эксплуатации или при КЗ на выводах обмоток НН наибольший установившийся ток КЗ по стороне ВН в двухобмоточном режиме без учета промежуточных элементов схемы рассчитывается по формуле (1):

$$I_{\text{КЗВН}} = \frac{U_{\text{НОМ.ОТВ.}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{ТР.}} + Z_{\text{С}})}, \quad (1)$$

где $U_{\text{НОМ.ОТВ.}}$ – номинальное напряжение отпайки трансформатора;

Сопротивление КЗ трансформатора рассчитывается по формуле (2), где U в кВ, S в МВА:

$$Z_{\text{ТР.}} = \frac{u_{\text{к}}(\%) \times U_{\text{НОМ.ОТВ.}}^2}{100 \times S_{\text{НОМ.}}}, \quad (2)$$

Сопротивление КЗ сети рассчитывается по формуле (3):

$$Z_{\text{С}} = \frac{U_{\text{С_НОМ.}}^2}{S_{\text{КЗ_С}}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{С_НОМ.}}$ – номинальное напряжение сети; $S_{\text{КЗ_С}}$ – мощность КЗ системы, определяемая мощностью сети.

Коэффициент трансформации рассчитывается по формуле (4):

$$K_{\text{Т}} = \frac{W_{\text{ВН}}}{W_{\text{НН}}}, \quad (4)$$

где $W_{ВН}$ – число витков обмотки ВН; $W_{НН}$ – число витков обмотки НН.

Установившийся ток в обмотке НН рассчитывается по формуле (5):

$$I_{кзНН} = I_{кзВН} \times K_T \quad (5)$$

Нормируемые значения апериодических составляющих (ударных) токов КЗ рассчитываются по формуле (6) и (7):

$$I_{\text{апер.ВН}} = \sqrt{2} K_{\text{уд.}} I_{\text{кзВН}}, \quad (6)$$

$$I_{\text{апер.НН}} = \sqrt{2} K_{\text{уд.}} I_{\text{кзНН}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{уд.}}$ – значение ударных коэффициентов тока КЗ, для мощных трансформаторов принимается $K_{\text{уд.}} = 1,8$ [5].

Проведем оценку к токам КЗ трансформаторов типа ТДЦ-250000/220, ТДЦ-80000/110 и ТЦ-666000/500 на ПС 750 кВ №1 и ПС 750 кВ №2.

Для ПС 750 кВ №1 рассмотрим вариант 1а и 1б:

1а) выделенная ВЛ 500 кВ ГРЭС – ПС 750 кВ №1 для исключения ненормированных режимов на отходящих линий, т.е. будем считать их не задействованными в опытах КЗ;

1б) с учетом подпитки мощности КЗ по ВЛ 500 кВ.

Для ПС 750 кВ №2 рассмотрим вариант 2, когда питание осуществляется только со стороны ГРЭС при не задействованных в опытах КЗ ВЛ 750 кВ и сохранении транзита электроэнергии по ВЛ 750 кВ.

Нормируемое значение ударной (апериодической) составляющей тока КЗ для обмотки ВН трансформатора составит для трансформатора ТДЦ-250000/220 – 12,4 кА по стороне 220 кВ, ТДЦ-80000/110 – 8,26 кА по стороне 110 кВ, ТЦ-666000/500 – 10,28 кА по стороне 500 кВ.

Вариант 1а. ПС 750 кВ №1

Исходные данные:

$I_{\text{кз}} = 24,6$ кА (действующее значение фазного тока КЗ на шинах ГРЭС, данные Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра);
 $U_{\text{ном}} = 500$ кВ.

Соответственно, мощность КЗ на шинах ГРЭС:
 $S_{КЗ} = \sqrt{3} \cdot 24,6 \cdot 500 = 21\,279 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$

Сопrotивление ВЛ 500 кВ ГРЭС – подстанция №1
 $Z_{л} = 26,56 \text{ Ом}; l = 88,9 \text{ км}$ (данные Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра).

Нормируемые значения ударного тока КЗ:

- для ТДЦ-250000/220 – 12,4 кА по стороне 220 кВ;
- для ТДЦ-80000/110 – 8,26 кА по стороне 110 кВ;
- для ТЦ-666000/500 – 10,28 кА по стороне 500 кВ.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-250000/220 имеем в соответствии с формулами (8) – (11):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{ном.отв.}^2}{100 \times S_{ном.}} = \frac{11,13 \times 242^2}{100 \times 250} = 26,07 \text{ Ом}, \quad (8)$$

$$Z_c = \frac{U_{с.ном.}^2}{S_{КЗ_с}} = \frac{220^2}{21\,279} = 2,274 \text{ Ом}. \quad (9)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{ном.отв.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c + Z_{л})} = \frac{242}{\sqrt{3}(26,07 + 2,274 + 26,56)} = 2,548 \text{ кА}, \quad (10)$$

$$I_{апер.ВН} = \sqrt{2} K_{уд} I_{кзВН} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 2,548 = 6,665 \text{ кА}. \quad (11)$$

Ударный ток составляет 53,8 % от нормируемого значения (12,4 кА по стороне 220 кВ).

Итак, максимально возможный ударный ток схемы составляет всего лишь немного более половины от нормируемого, и потому данная схема ПС не представляет опасности для электродинамической стойкости трансформаторов.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-80000/110 имеем в соответствии с формулами (12) – (15):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{ном.отв.}^2}{100 \times S_{ном.}} = \frac{11,64 \times 121^2}{100 \times 80} = 21,3 \text{ Ом}, \quad (12)$$

$$Z_c = \frac{U_{с.ном.}^2}{S_{КЗ_с}} = \frac{110^2}{21\,279} = 0,568 \text{ Ом}, \quad (13)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{ном.отв.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c + Z_{л})} = \frac{121}{\sqrt{3}(21,3 + 0,568 + 26,56)} = 1,444 \text{ кА}, \quad (14)$$

$$I_{\text{ап.ВН}} = \sqrt{2} K_{\text{уд.}} I_{\text{кзВН}} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 1,444 = 3,777 \text{ кА}. \quad (15)$$

Ударный ток составляет 45,7 % от нормируемого значения (8,26 кА по стороне 110 кВ). Значит, и для трансформатора типа ТДЦ-80000/110 ТКЗ не представляют опасности.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТЦ-666000/500 имеем в соответствии с формулами (16) – (19):

$$Z_{\text{тр.}} = \frac{u_{\text{к}}(\%) \times U_{\text{НОМ.ОТВ.}}^2}{100 \times S_{\text{НОМ.}}} = \frac{15,6 \times 525^2}{100 \times 666} = 64,56 \text{ Ом}, \quad (16)$$

$$Z_{\text{с}} = \frac{U_{\text{с-НОМ.}}^2}{S_{\text{КЗ-с}}} = \frac{500^2}{21\,279} = 11,748 \text{ Ом}, \quad (17)$$

$$I_{\text{кзВН}} = \frac{U_{\text{НОМ.ОТВ.}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{тр.}} + Z_{\text{с}} + Z_{\text{л}})} = \frac{525}{\sqrt{3}(64,56 + 11,748 + 26,56)} = 2,95 \text{ кА}, \quad (18)$$

$$I_{\text{ап.ВН}} = \sqrt{2} K_{\text{уд.}} I_{\text{кзВН}} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 2,95 = 7,717 \text{ кА}. \quad (19)$$

Ударный ток составляет 75,07 % от нормируемого значения (10,28 кА по стороне 500 кВ). Токи КЗ не опасны, трансформатор должен их выдержать.

Вариант 16. ПС 750 кВ №1 с учетом подпитки мощности КЗ по ВЛ 500 кВ.

Исходные данные:

$I_{\text{КЗ}} = 31,8 \text{ кА}$ (фазное значение на шинах ПС 750 кВ №1),

$U_{\text{НОМ}} = 500 \text{ кВ}$.

Мощность КЗ на шинах ПС 750 кВ № 1:

$$S_{\text{КЗ}} = \sqrt{3} \cdot 31,8 \cdot 500 = 27\,507 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

Нормируемое значение ударного тока КЗ для обмотки ВН трансформатора:

– ТДЦ-250000/220 – 12,4 кА по стороне 220 кВ,

– ТДЦ-80000/110 – 8,26 кА по стороне 110 кВ,

– ТЦ-666000/500 – 10,28 кА по стороне 500 кВ.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-250000/220 имеем в соответствии с формулами (20) – (23):

$$Z_{\text{тр.}} = \frac{u_{\text{к}}(\%) \times U_{\text{НОМ.ОТВ.}}^2}{100 \times S_{\text{НОМ.}}} = \frac{11,13 \times 242^2}{100 \times 250} = 26,07 \text{ Ом}, \quad (20)$$

$$Z_c = \frac{U_{c_НОМ.}^2}{S_{КЗ_c}} = \frac{220^2}{27507} = 1,76 \text{ Ом} , \quad (21)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{НОМ.ОТВ.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c)} = \frac{242}{\sqrt{3}(26,07 + 1,76)} = 5,026 \text{ кА} , \quad (22)$$

$$I_{апер.ВН} = \sqrt{2}K_{уд.} I_{кзВН} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 5,026 = 13,148 \text{ кА} . \quad (23)$$

Ударный ток составляет 106,03 % от нормируемого значения (12,4 кА по стороне 220 кВ). ГОСТ требует $(100 \pm 5) \%$. Токи КЗ даже превосходят нормируемые значения, что может вызвать возникновение электродинамических деформаций и привести обмотки к разрушению.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-80000/110 имеем в соответствии с формулами (24) – (27):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{НОМ.ОТВ.}^2}{100 \times S_{НОМ.}} = \frac{11,64 \times 121^2}{100 \times 80} = 21,3 \text{ Ом} , \quad (24)$$

$$Z_c = \frac{U_{c_НОМ.}^2}{S_{КЗ_c}} = \frac{110^2}{27507} = 0,44 \text{ Ом} , \quad (25)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{НОМ.ОТВ.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c)} = \frac{121}{\sqrt{3}(21,3 + 0,44)} = 3,217 \text{ кА} , \quad (26)$$

$$I_{апер.ВН} = \sqrt{2}K_{уд.} I_{кзВН} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 3,217 = 8,42 \text{ кА} . \quad (27)$$

Ударный ток составляет 101,89 % от нормируемого значения (8,26 кА по стороне 110 кВ), Токи КЗ немного превосходят нормируемые значения, что может вызвать возникновение электродинамических деформаций и довести обмотки до разрушения.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТЦ-666000/500 имеем в соответствии с формулами (28) – (31):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{НОМ.ОТВ.}^2}{100 \times S_{НОМ.}} = \frac{15,6 \times 525^2}{100 \times 666} = 64,56 \text{ Ом} , \quad (28)$$

$$Z_c = \frac{U_{c_НОМ.}^2}{S_{КЗ_c}} = \frac{500^2}{27507} = 9,09 \text{ Ом} , \quad (29)$$

$$I_{\text{кзВН}} = \frac{U_{\text{НОМ.ОТВ.}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{ТР.}} + Z_{\text{С}})} = \frac{525}{\sqrt{3}(64,56 + 9,09)} = 4,12 \text{ кА}, \quad (30)$$

$$I_{\text{апери.ВН}} = \sqrt{2}K_{\text{уд.}}I_{\text{кзВН}} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 4,12 = 10,778 \text{ кА}. \quad (31)$$

Ударный ток составляет 104,85 % от нормируемого значения (10,28 кА по стороне 500 кВ). Токи КЗ превосходят нормируемые значения, что может вызвать возникновение электродинамич. деформаций и довести обмотки до разрушения.

Вариант 2. ПС 750 кВ №2

Исходные данные:

$I_{\text{КЗ}} = 24,6$ кА (фазное значение на шинах ГРЭС);

$U_{\text{НОМ}} = 500$ кВ (линейное напряжение на шинах ГРЭС);

Мощность КЗ системы $S_{\text{КЗ}} = \sqrt{3} \cdot 24,6 \cdot 500 = 21\,279$ МВА (на шинах ГРЭС, данные Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра).

Сопrotивление ВЛ ГРЭС – ПС 750 кВ №2 $Z_{\text{Л}} = 0,12$ Ом, $l = 0,43$ км (данные Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра).

Нормируемое значение ударной (апериодической) составляющей тока КЗ для обмотки ВН трансформатора составит:

ТДЦ-250000/220 – 12,4 кА по стороне 220 кВ;

ТДЦ-80000/110 – 8,26 кА по стороне 110 кВ;

ТЦ-666000/500 – 10,28 кА по стороне 500 кВ;

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-250000/220 имеем в соответствии с формулами (32) – (35):

$$Z_{\text{ТР.}} = \frac{u_{\text{к}}(\%) \times U_{\text{НОМ.ОТВ.}}^2}{100 \times S_{\text{НОМ.}}} = \frac{11,13 \times 242^2}{100 \times 250} = 26,07 \text{ Ом}, \quad (32)$$

$$Z_{\text{С}} = \frac{U_{\text{С.НОМ.}}^2}{S_{\text{КЗ}_\text{С}}} = \frac{220^2}{21279} = 2,274 \text{ Ом}, \quad (33)$$

$$I_{\text{кзВН}} = \frac{U_{\text{НОМ.ОТВ.}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{ТР.}} + Z_{\text{С}} + Z_{\text{Л}})} = \frac{242}{\sqrt{3}(26,07 + 2,274 + 0,12)} = 4,915 \text{ кА}, \quad (34)$$

$$I_{\text{апери.ВН}} = \sqrt{2}K_{\text{уд.}}I_{\text{кзВН}} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 4,915 = 12,856 \text{ кА}. \quad (35)$$

Ударный ток составляет 103,7 % от нормируемого допустимого значения (12,4 кА по стороне 220 кВ). Токи КЗ даже превосходят нормируемые значения, что может вызвать возник-

новение электродинамической деформаций и довести обмотки трансформатора до разрушения.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТДЦ-80000/110 имеем в соответствии с формулами (36) – (39):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{ном.отв.}^2}{100 \times S_{ном.}} = \frac{11,64 \times 121^2}{100 \times 80} = 21,3 \text{ Ом}, \quad (36)$$

$$Z_c = \frac{U_{с_ном.}^2}{S_{КЗ_с}} = \frac{110^2}{21279} = 0,568 \text{ Ом}, \quad (37)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{ном.отв.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c + Z_{л})} = \frac{121}{\sqrt{3}(21,3 + 0,568 + 0,12)} = 3,18 \text{ кА}, \quad (38)$$

$$I_{анер.ВН} = \sqrt{2}K_{уд.} I_{кзВН} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 3,18 = 8,32 \text{ кА}. \quad (39)$$

Ударный ток составляет 100,73 % от нормируемого значения (8,26 кА по стороне 110 кВ). Токи КЗ немного превосходят нормируемые значения, что может вызвать возникновение электродинамической деформации и довести обмотки до разрушения.

При КЗ на выводах обмотки НН трансформатора типа ТЦ-666000/500 имеем в соответствии с формулами (40) – (43):

$$Z_{тр.} = \frac{u_k(\%) \times U_{ном.отв.}^2}{100 \times S_{ном.}} = \frac{15,6 \times 525^2}{100 \times 666} = 64,56 \text{ Ом}, \quad (40)$$

$$Z_c = \frac{U_{с_ном.}^2}{S_{КЗ_с}} = \frac{500^2}{21279} = 11,748 \text{ Ом}, \quad (41)$$

$$I_{кзВН} = \frac{U_{ном.отв.}}{\sqrt{3}(Z_{тр.} + Z_c + Z_{л})} = \frac{525}{\sqrt{3}(64,56 + 11,748 + 0,12)} = 3,97 \text{ кА}, \quad (42)$$

$$I_{анер.ВН} = \sqrt{2}K_{уд.} I_{кзВН} = \sqrt{2} \times 1,85 \times 3,97 = 10,38 \text{ кА}. \quad (43)$$

Ударный ток составляет 101,04 % от нормируемого значения (10,28 кА по стороне 500 кВ). Токи КЗ даже превосходят нормируемые значения, что может вызвать возникновение электродинамической деформации и довести обмотки до разрушения.

Выводы

Таким образом, результаты расчетов величин токов КЗ для рассматриваемых вариантов показали, что на ПС 750 кВ № 1 (только при условии питания со стороны ГРЭС и подпитки

мощности КЗ по ВЛ 500 кВ) и на ПС 750 кВ № 2 (даже при варианте питания по выделенной линии только со стороны ГРЭС при не задействованных в опытах КЗ ВЛ 750 кВ) токи КЗ превышают нормированные (допустимые) значения токов КЗ трансформаторов типа ТДЦ-250000/220, ТДЦ-80000/110 и ТЦ-666000/500.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хренников А.Ю. Техническая диагностика и аварийность электрооборудования. Учебно-методич. пособие / ЛИТРЕС, 2021. – 230 с.
2. Хренников А.Ю., Точилкин В.Г. Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики. Учебно-методическое пособие для магистратуры / Директ-Медиа. – М, 2021. – 212 с., ил.
3. Хренников А.Ю. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие для магистратуры / А.Ю. Хренников, Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Александров Н.М. Директ-Медиа, М: 2021. – 336 с.
4. Хренников А. Ю. Обслуживание автоматики и средств измерений электростанций / Кнорус. – М, 2022. – 262 с., ил.
5. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях // Сборник статей. Под редакцией Лурье А.И. Труды ВЭИ, М.: – «Знак», 2005, 520 с., ил.

Авторы:

Юдина Анастасия Андреевна, аспирант, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», окончил Электротехнический факультет Самарского государственного технического университета в 2020 году. E-mail: n.astysha@yandex.ru.

Хренников Александр Юревич, доктор технических наук, профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС – начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети, окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1986 году, кандидат технических наук – 1997 году. Докторская диссертация: «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования», 2009 год. E-mail: ak2390@inbox.ru.

Александров Николай Михайлович, кандидат технических наук, начальник отдела первичного оборудования НПП «Динамика» г. Чебоксары. E-mail: nickdynamics@gmail.com.

ПРОВЕРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПРОВЕРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Хренников А.Ю., АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети, г. Москва, Россия.

Александров Н.М., НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В докладе рассмотрены особенности проверки трансформаторов тока, применяемые в системах релейной защиты, с использованием устройств производства НПП «Динамика». Приведены методы и схемы проведения испытаний, позволяющих оценить их техническое состояние и надежность. Приводится предложение по автоматизации проведения периодических проверок трансформаторов тока с целью улучшения качества проведения испытаний.*

***Ключевые слова:** трансформатор тока, тестирование, ВАР.*

Трансформаторы тока играют важную роль в мониторинге и защите электроэнергетических систем. Неисправность ТТ может вызвать значительные повреждения основного электрооборудования, что может сказаться на бесперебойности питания ответственных потребителей электроэнергии. Для обеспечения надежной работы систем проводится периодическая проверка трансформаторов тока, основной целью которой являются проверка работоспособности и оценка их технического состояния. В основном выделяют такие причины неисправностей ТТ, как повреждение изоляции, повреждение магнитопровода, дефекты в обмотках.

Периодическая проверка позволяет выявить неисправности на ранней стадии их развития и предотвратить серьезные последствия, вызванные серьезными повреждениями трансформаторов тока. Визуальный осмотр позволяет оценить чистоту поверхностей, наличие сколов на изоляции, состояние клемм подключения, а также выявить наличие внешних дефектов. Для полноценного анализа необходимо проведение электрических проверок, которые описаны в нормативной документации.

Измерение сопротивления изоляции

Измерение сопротивления изоляции производится на законченной обмотке относительно корпуса. Другая обмотка долж-

на быть закорочена и заземлена. Показания сопротивления записываются через 1 минуту после начала измерений. Резкое падение значений сопротивления изоляции во время измерения указывает на ухудшение качества изоляции, и для диагностики проблемы требуются дальнейшие исследования.

Измерения производятся с применением мегаомметра на 2500 В (схема испытаний с применением устройства РЕТОМ-6000 приведена на рис. 1), а для трансформаторов тока на 600 В или менее обычно выполняются при 1000 В постоянного тока.

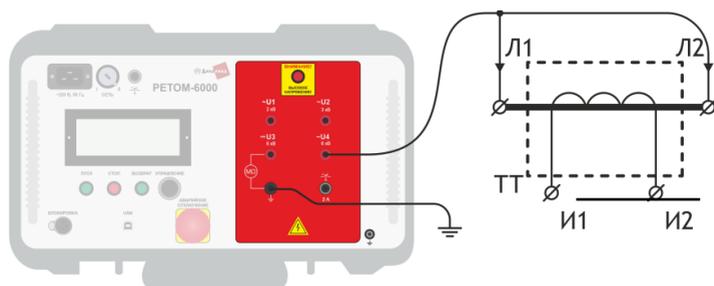


Рис. 1. Измерение сопротивления изоляции первичных цепей ТТ

У каскадных трансформаторов тока сопротивление изоляции измеряется для трансформатора тока в целом. При неудовлетворительных результатах таких измерений сопротивление изоляции дополнительно измеряется на каждой ступени. Граничные значения сопротивлений изоляции приведены в соответствующей нормативной документации [1].

Измерение коэффициента трансформации

Коэффициент трансформации ТТ представляет собой отношение первичного входного тока ко вторичному выходному току. Измеренное значение данного коэффициента сравнивается с паспортными данными с целью выявления короткозамкнутых витков обмотки. В случае отсутствия проверочного оборудования с необходимым диапазоном выдачи переменного тока для измерения может быть использован источник напряжения. В данном случае напряжение прикладывается ко вторичной обмотке и измеряется напряжение на первичной обмотке. Для

обеспечения точности при таком подходе необходимо учитывать потери, поэтому формула для расчета коэффициента трансформации ТТ будет выглядеть следующим образом (1):

$$K_{\text{ТТ}} = \frac{U_{\text{тест}} - I_{\text{тест}} \cdot R_{\text{обм}}}{U_{\text{перв}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{тест}}$ – напряжение, прикладываемое ко вторичной обмотке ТТ,
 $I_{\text{тест}}$ – ток, протекающий по вторичной обмотке во время проведения измерения,

$R_{\text{обм}}$ – сопротивление вторичной обмотки,

$U_{\text{перв}}$ – напряжение на первичной обмотке ТТ.

Схема измерения с помощью устройства РЕТОМ-21 приведена на рис. 2. В данной иллюстрации проверка выполняется путем подачи тока на первичную обмотку и измерения тока на вторичной обмотке.

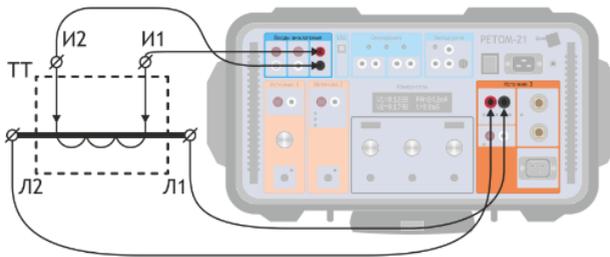


Рис. 2. Схема измерения коэффициента трансформации ТТ

Проверка полярности ТТ

Под полярностью ТТ понимается определенный порядок расположения выводов его вторичной обмотки, обеспечивающий условия для передачи токового сигнала в нужной фазе.

Существует несколько способов проверки полярности ТТ с помощью оборудования НПП «Динамика»:

Применение комплекса РЕТОМ-21. Схема подключения соответствует схеме измерения коэффициента трансформации (рис. 2), однако необходимо настроить прибор для отображения на экране значения разности фаз между измерителем первичного и вторичного тока. При нулевой разнице фазы считается, что

катушки включены правильно. В противном случае (разница фаз – 180 градусов) контакты второй обмотки необходимо поменять местами.

Применение вольтамперфазометра РЕТОМЕТР-М3 (рис. 3), в котором предусмотрен специальный режим, позволяющий определить прямое или обратное подключение обмоток.

Применение блока РЕТ-ПТ, позволяющего определять полярность ТТ и ТН, а также целостность цепей (рис. 4).



Рис. 3. Проверка полярности ТТ с помощью ВАФ РЕТОМЕТР-М3

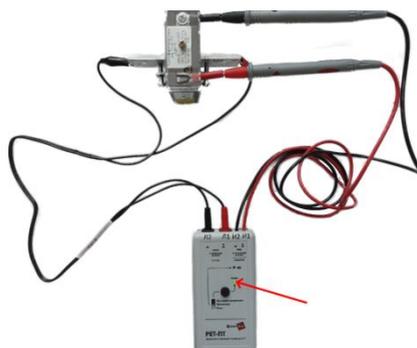


Рис. 4. Проверка полярности ТТ с помощью блока РЕТ-ПТ

Проверка характеристики намагничивания ТТ

Характеристика намагничивания (или вольт-амперная характеристика) трансформатора тока представляет собой зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от тока, протекающего по ней и является одной из наиболее важных харак-

теристик ТТ. При проведении испытания выводы первичной обмотки остаются разомкнутыми, а на выводы вторичной обмотки подаётся регулируемое напряжение от независимого источника (схема приведена на рис. 5). В зависимости от особенностей ТТ, РЕТОМ-21 может использоваться для снятия ВАХ как отдельно (до 500 В), так и совместно с блоком РЕТ-ВАХ-2000 (до 2000 В).

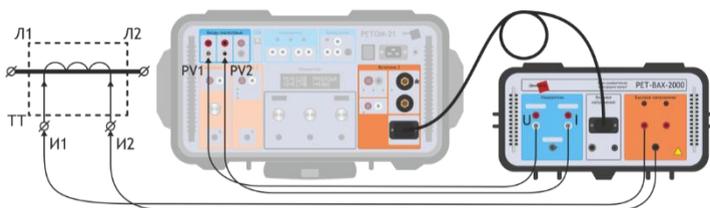


Рис.5. Схема измерения характеристики намагничивания ТТ с помощью РЕТОМ-21 и РЕТ-ВАХ-2000

Снятие характеристики намагничивания описано во многих нормативных документах, среди которых ПУЭ-7 (п 1.5.17), СТО 34.01-23.1-001-2017, ГОСТ-7746-2001 (п.9.8), РД 153-34.0-35.301-2002 (п.3.7), МЭК 60044, МЭК 61869-2, IEEE C57/13. Поэтому важным аспектом данного испытания является наличие тока и напряжения по разным стандартам (приведены в проверочном устройстве возможности проведения измерения необходимого типа. табл. 1). В РЕТОМ-21 реализованы все необходимые типы измерения, позволяющие проводить расчет точки перегиба по любому из приведенных стандартов.

Измерение сопротивления обмоток ТТ

Измерение сопротивления обмотки постоянному току является важным испытанием для определения целостности обмотки и наличия обрывов/замкнутых витков. Рекомендуется периодически измерять сопротивление обмотки постоянному току.

Сопротивление обмотки трансформатора тока определяется отношением падения напряжения на обмотке (измеренного милливольтметром постоянного тока) к протекающему через обмотку постоянному току (2). Схема представлена на рис. 7.

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2)$$

Несмотря на то, что индуктивная составляющая сопротивления трансформаторов тока значительно ниже, чем в силовых трансформаторах, измерение требуется проводить с применением источников стабилизированного постоянного тока при насыщении магнитопровода трансформатора. Пульсации тестового тока или недостаточное намагничивание магнитопровода могут значительно увеличить погрешность измеренного сопротивления. После измерения сопротивления обмотки трансформатора тока следует размагнитить во избежание бросков тока намагничивания при включении ТТ в работу.

Измерение сопротивления обмотки ТТ можно осуществить с использованием следующего оборудования НПП «Динамика»:

- микрометра РЕТ-МОМ.2 (рис. 8, а),
- комплекса РЕТОМ-21 совместно с модулем РЕТ-СФ (рис. 8, б).

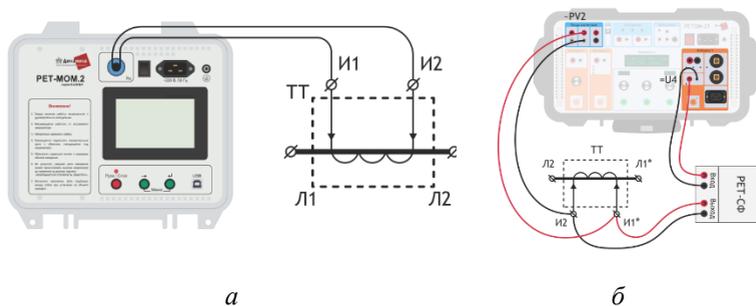


Рис. 8. Схемы измерения сопротивления обмотки ТТ:
 а – с применением РЕТ-МОМ.2; б – с применением РЕТОМ-21
 совместно с РЕТ-СФ

Поскольку сопротивление проводников зависит от температуры, сравнение результатов измерений сопротивления постоянному току возможно только при одной и той же температуре. Пересчет сопротивления на другую температуру производится по формуле (2).

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{(K + t_2)}{(K + t_1)}, \quad (2)$$

где R_1 – сопротивление, измеренное при температуре t_1 ;
 R_2 – сопротивление, приводимое к температуре t_2 ;
 K – коэффициент, равный 245 для обмоток из алюминия и
235 – для обмоток из меди.

Заключение

В статье приведены схемы проведения проверок ТТ с использованием современного оборудования серии РЕТОМ, отвечающее всем современным требованиям для получения достоверных результатов проверок, что позволяет сделать вывод о техническом состоянии трансформаторов тока. В настоящий момент предприятием НПП «Динамика» ведутся разработки устройства, позволяющего автоматизировать проверку ТТ без необходимости коммутаций схемы во время измерения, а также позволяющего оценивать остаточную намагниченность ТТ.

Авторы:

Хренников Александр Юревич, доктор технических наук, профессор ТГУ, Учёный секретарь НТС – начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети, электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1986 году, кандидат технических наук – 1997 году, Докторская диссертация: «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования», 2009 год. E-mail: ak2390@inbox.ru.

Александров Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭЭиАП ЧувГУ, начальник отдела НПП «Динамика», г. Чебоксары.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В УПРАВЛЕНИИ

Филина О.А., Прокопенко С.С., Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия.

***Аннотация.** Предлагаемая теория позволяет обеспечить объективное, в зависимости от текущего технического состояния, применение ремонтно-восстановительных составов (РВС), что приведет к увеличению ресурса механизма и экономии эксплуатационных расходов.*

***Ключевые слова:** техническая диагностика, надежность оборудования, виды разрушений, контроль, система, целостность.*

Человек живет и действует в объективно существующем реальном мире. Но все свои действия он осуществляет в соответствии со своими представлениями об этом мире, о своих действиях и их результатах.

Общая схема любого активного действия может быть представлена в следующем виде на рис. 1.

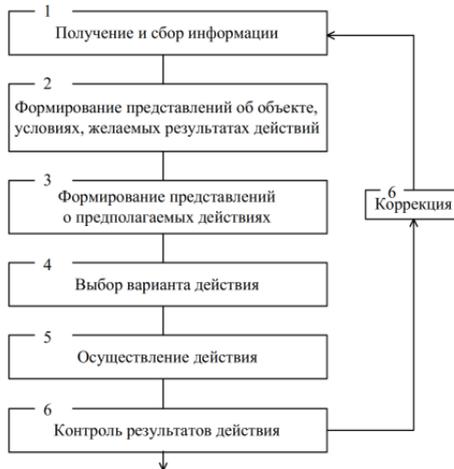


Рис. 1. Схема активного действия

Все представления, исходя из которых действует человек, он формирует на основании личного опыта, опыта предшествующих и современного поколений. Личный опыт приобретает-

ся человеком в процессе его деятельности путем воздействия на соответствующие объекты и изучения, исследования результатов воздействия. При этом объектами воздействия служат либо сами объекты, о которых необходимо создать представление, либо объекты, их замещающие, исследование и изучение которых позволяет создать представление о замещаемом объекте. Опыт поколений, в сущности, является их представлением о реальном мире, хранимым и передаваемым в той или иной форме от поколения к поколению.

Сами представления, в свою очередь, являются объектами, которыми человек в процессе своей деятельности замещает окружающий мир.

От того, насколько правильно воспринимает человек реальный мир, зависит результат его действий. Особенно это касается целенаправленных действий, т.е. действий, связанных с получением вполне определенного желаемого результата. В этом случае стараются действовать наиболее рациональным образом, что предъявляет повышенные требования к объектам замещения, на основе которых формируются соответствующие представления. Таким требованиям в наибольшей степени отвечают объекты, создание и выбор которых для замещения производится на научной основе с использованием аппарата соответствующих наук и научных направлений. При выполнении определенных условий эти объекты называют моделями, а процесс создания моделей и замещения ими исследуемых объектов – моделированием.

Бурное развитие модельных методов, протекающее особенно интенсивно в последние десятилетия, повлекло за собой формирование ряда специфических понятий, представлений и приемов, связанных с построением, анализом и использованием моделей различных классов. Сегодня есть все основания говорить о моделировании и модельных методах как о самостоятельной области знаний, сфера приложений которых простирается от теории познания до решения сугубо практических производственных вопросов [1].

Повышенный интерес к модельной проблематике обусловлен той ролью, которую методы моделирования, особенно математического, приобрели в современных исследованиях. Кроме того, этот интерес стимулируется, с одной стороны, прогресси-

рующей сложностью задач, которые приходится решать человеку в своей деятельности, а с другой – большими успехами в развитии прикладной математики, вычислительной техники и программирования, исследования операций, научных дисциплин кибернетического цикла. В совокупности с традиционными областями науки они дают возможность – во всяком случае, принципиальную – для решения значительной части прикладных задач научными методами с целью получения оптимальных в том или ином смысле результатов.

Первым в истории примером в полной мере научно обоснованного применения метода моделирования, по-видимому, можно считать работы по исследованию гидродинамических характеристик судов в опытовых бассейнах, которые развернулись во второй половине XIX века.

Однако даже в первые десятилетия двадцатого столетия наиболее распространенное толкование понятия "модель" по-прежнему было связано не с наукой, а с производством (литейным делом) и архитектурой.

Переломными в развитии моделирования оказались 40–50-е годы XX века, годы становления научных дисциплин кибернетического цикла, методов исследования операций, бурного развития прикладной математики, вычислительной техники и компьютерного программирования. В этот период значительно расширился круг исследовательских и прикладных задач, решаемых научными методами, что повлекло за собой необходимость выявления и описания, существенных для каждой задачи свойств и черт множества самых разнообразных объектов, т.е. необходимость вполне осознанного построения их моделей. Непрерывно растущие возможности численных математических методов и реализующих эти методы автоматизированных вычислительных систем не только стимулировали математическую формализацию разнообразных задач и моделей, но и способствовали развитию связанного с моделями концептуального аппарата. Именно в эти годы сложились современные понятия аналоговой и алгоритмической математической модели, получили значительное развитие методы численного, в том числе статистического имитационного моделирования и моделирования на компьютерах, были разработаны специальные приемы для мо-

дельного исследования систем сложной структуры, методы идентификации объектов-оригиналов и т.д. По существу, только начиная с 40-х годов двадцатого столетия, можно говорить о моделях и моделировании как о сознательно используемом научном методе, применяемом для решения различных задач, связанных с объектами произвольной природы.

Математические модели стали играть в моделировании решающую роль, что было обусловлено широкими возможностями математики обеспечивать хотя бы теоретически научно обоснованное моделирование любых объектов, свойствами математических моделей, а также уровнем и темпами развития современных информационных средств и технологий, позволяющих относительно легко осуществлять математическое моделирование.

В первую очередь, такая оценка роли математических моделей справедлива для управления сложными объектами, к которым, несомненно, относятся организационные системы, включая науку и высшую школу со своими подразделениями. Невозможно представить современную и будущую теорию управления организационными системами без применения математического моделирования, и приближение этого будущего зависит от темпов развития математического моделирования и соответствующих информационных средств и технологий. Поэтому в учебном пособии и рассматриваются математические модели и методы математического моделирования.

Основу современной теории управления сложными объектами составляют системный подход и реализующие его системные научные направления, к которым относятся кибернетика, системный анализ, общая теория систем, системотехника, исследование операций, квалиметрия и т.д.

Материал пособия позволяет сформировать у читателя современную систему модельных представлений, овладение которой дает специалисту в управлении не только инструмент для решения конкретных задач, особенно в плохо формализуемых сферах человеческой деятельности, но и аппарат хорошо организованного, а, следовательно, наиболее эффективного мышления, способствует ясности в понимании сущности процессов, протекающих в моделируемых объектах, позволяет творчески и

методологически правильно оперировать с широким кругом модельных понятий, представлений и методов моделирования. Именно этими качествами и должен обладать специалист в области менеджмента.

Одним из основных понятий, играющих важную роль в теории управления и других системных научных направлениях, является понятие "система". В настоящее время существует много определений данного понятия, которые применяются в соответствии с целями и решаемыми задачами. Эти определения различаются, главным образом, степенью общности, обусловленной количеством и детальностью описания свойств объектов, классифицируемых как системы. Достаточно полным и конструктивным, т.е. соответствующим целям и задачам курса, можно считать следующее определение.

Система – единое целое, представимое совокупностью взаимосвязанных и взаимодействующих объектов, обладающее свойствами (хотя бы одним), которых не имеет ни одна из частей целого при любом способе его членения, и не выводимыми из свойств частей.

Исходя из данного определения выделим основные свойства системы: целостность, ограниченность, членимость, интегративность, организованность.

Целостность – свойство, характеризующее внутреннее единство, завершенность, законченность системы. Оно обусловлено наличием внутренних связей, т.е. связей между объектами, образующими систему, и взаимодействием этих объектов. Для обеспечения целостности системы внутренние связи и взаимодействия должны быть достаточно сильными.

Ограниченность (обособленность) определяет возможность отграничить (обособить, выделить) систему из окружающего мира. Это свойство обусловлено относительной слабостью связей системы с внешней средой.

Между целостностью и ограниченностью существует довольно тесная связь. Чем более система выделена, ограничена от окружающего мира, тем более она внутренне целостна. Целостность и ограниченность системы свидетельствуют о том, что внутренние связи в системе сильнее, чем внешние.

Членимость характеризует возможность членения (декомпозиции) системы, т.е. представления ее в виде совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих объектов. Мысленно можно представить любые членения системы, однако, допустимыми являются только естественные, которые определяются самой сутью системы, ее внутренними свойствами. Такие членения позволяют, изучая их структуру, выявить существенные свойства системы. В то же время членения, не связанные с сущностью и внутренними свойствами системы, не дают возможности увязать свойства системы и ее частей, выявить преэссенциальность этих свойств, а сами свойства в этом случае производят впечатление неустойчивых, случайных.

Интегративность системы обусловлена наличием у нее интегративных (системных) свойств.

Интегративное (системное) свойство – свойство системы, которое не имеет ни одна из ее частей при любом способе членения и не выводимое из свойств частей.

Системные свойства формируются путем накопления, усиления и проявления одних свойств частей системы с одновременным нивелированием, ослаблением и сокрытием других при взаимодействии частей.

На определенном уровне взаимодействия происходит скачок (переход количества в качество) – появление у совокупности взаимодействующих объектов свойств, не присущих этим объектам.

Наличие у системы интегративных свойств свидетельствует о том, что, во-первых, система не сводится к простой совокупности объектов и, во-вторых, расчлняя систему на отдельные части и изучая их, нельзя познать все свойства системы.

Организованность характеризует внутреннюю упорядоченность системы, согласованность взаимодействия ее частей.

Приведенное выше понятие системы уже, чем используемое в философии. Философское понятие определяет систему как отграниченную совокупность взаимодействующих объектов. Тем самым в класс систем включается любая совокупность объектов, так как в мире все взаимосвязано, а любая совокупность всегда обладает свойствами, отличными от свойств образующих

ее объектов. Это означает, что систему определяют как одну из форм существования материи.

В теории управления организационными системами из класса систем исключают суммативные системы, у которых сила внутренних и внешних связей одного порядка. Это зависит от того, что объектом изучения в теории управления являются особые, так называемые сложные, системы, которые будут рассмотрены далее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яшагина А.В., Осетинский Г.В., Филина О.А. Общие требования к системам диагностики / В книге: Новые технологии в учебном процессе и производстве. Материалы XX Международной научно-технической конференции, посвящённой 165-летию со дня рождения основоположника космонавтики, создателя теории межпланетных сообщений, Константина Эдуардовича Циолковского. Сборник тезисов. Рязань, 2022. С. 90–92.

2. Ахметов Р.Р., Сахапов Д.В. Методика оценки критериев согласия и параметров теоретического и эмпирического распределений с применением метода наименьших квадратов / В сборнике: ACADEMIC SUCCESS 2022. Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск, 2022. С. 144–156.

3. Зинатуллин А.Р., Платонов С.А. Оценка критериев согласия и параметров теоретического и эмпирического распределений в теории точности / В сборнике: МОЛОДЕЖЬ. НАУКА. БУДУЩЕЕ. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2022. С. 45–49.

4. Неуймин Я.Г. Модели в науке и технике. История, теория, практика. / Л.: Наука, 1984. 189 с.

Авторы:

Филина Ольга Алексеевна, старший преподаватель, каф. ЭТКС, Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань. ЭМФ Казанский Государственный Энергетический Университет 2006. E-mail: olga_yuminova83@mail.ru.

Прокопенко Святослав Сергеевич, студент 2 курса гр. ЭМКу-1-20, Казанский Государственный Энергетический Университет.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Дадабаев Ш.Т., Худжандский политехнический институт таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан.

***Аннотация.** В работе проведено исследование пусковых переходных процессов электропривода насосной установки методом компьютерного моделирования. С этой целью разработана компьютерная модель для исследования пусковых переходных процессов асинхронного двигателя, которая служила приводом для насосной установки. Новизна работы заключается в моделировании асинхронного двигателя в абсолютных единицах, а не в относительных единицах. Моделирование в абсолютных единицах является более сложным, однако результаты исследования в этом случае можно получить детальнее.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, переходные процессы, электромагнитный момент, насосная установка, компьютерное моделирование, MATLAB/Simulink.*

I. Введение

Насосные установки (НУ) широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, как в коммунальном хозяйстве, в промышленности, сельском хозяйстве и т.п. Обычно для насосных установок используют электроприводы (ЭП) переменного тока безредукторного типа. В качестве электродвигателя в электроприводах НУ, часто используют асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Такой двигатель по конструкции считается самой простой и надежной электрической машиной, однако имеет и недостатки. Одним из таких недостатков является сложные пусковые переходные процессы, где пусковые токи могут превышать от номинала больше восьми раз, а максимальный пусковой момент может изменяться знакопеременным значением и превышать до трех раз от номинальных значений [3, 4]. Эти факторы негативно сказываются на состоянии изоляции обмоток двигателя и токопроводящих частей аппаратуры электропривода в целом [5, 6]. Согласно требованиям прямые пуски АД допустимы, если запуск АД не приведут к

провалу напряжения в сети больше чем на 10 %. Кроме провалов напряжения в сети, пусковые токи АД могут вызывать нагревы и износ изоляции обмоток [3, 5]. Переходные процессы в пусковых режимах АД сложно исследовать по физическим моделям, так как эти модели требуют во первых финансовые затраты, а во вторых ограничения по количеству эксперимента над моделью. Эти трудности в компьютерном моделировании отсутствуют, а также в современных специализированных программах для моделирования имеются широкий инструментарий для проведения различных экспериментов и составления отчетов. По этой причине для детального исследования пусковых переходных процессов АД проведем компьютерное моделирование с использованием программы MATLAB/Simulink [1, 2, 9, 10].

II. Компьютерное моделирование

На рис. 1 приведена разработанная компьютерная модель для исследования пусковых режимов АД.

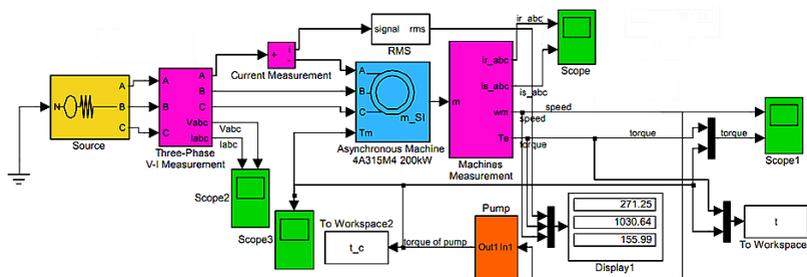


Рис. 1. Компьютерная модель для исследования пусковых переходных процессов асинхронного электропривода насосной установки

Модель (рис. 1) разработана в программе MATLAB, с использованием библиотеки SimPowerSystem. Эта библиотека служит для разработки моделей устройств, аппаратов и систем по энергетике и электротехнике [9, 10]. По модели (рис. 1) видно, что основные элементы в модели являются источник питания и АД марки 4A315M4. Двигатель имеет синхронную скорость 1500 об/мин, мощность 200 кВт, ток 382 А. В модели АД служит приводом для насосной установки, механическая характеристика которого приведена на рис. 2.

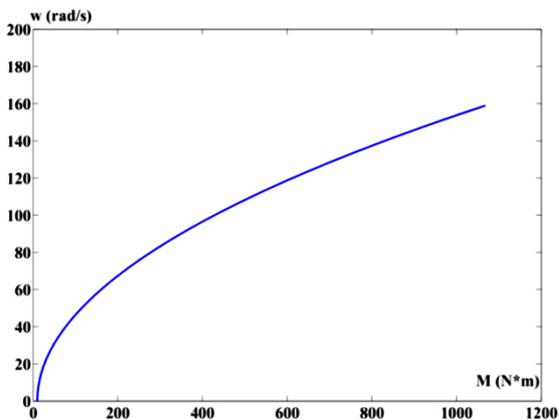


Рис. 2. Характеристика насосной установки

III. Результаты моделирования

Характеристика насоса (рис. 2) показывает, что насос имеет вентиляторный характер нагрузки. Такой вид нагрузки считается весьма сложной, так как по мере увеличения скорости насоса, его момент тоже увеличивается [4, 6, 8]. Характеристика АД показано на рис. 3.

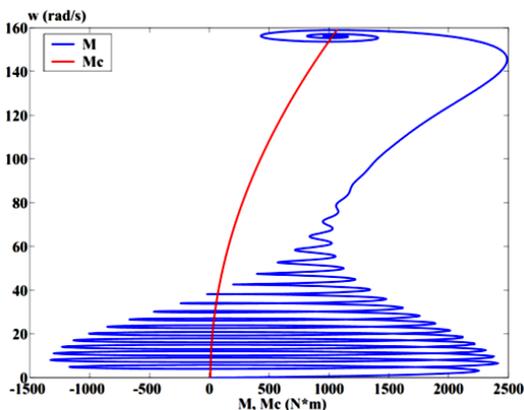


Рис. 3. Механическая характеристика асинхронной машины

Графики тока и напряжения источника питания и двигателя при пуске АД приведены на рис. 4 и 5.

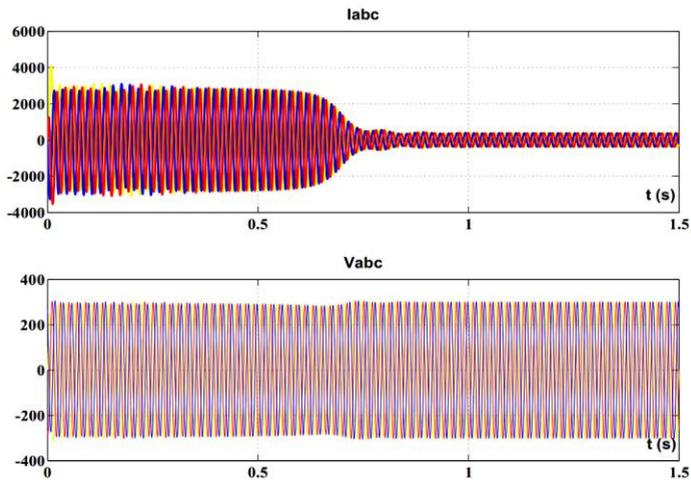


Рис. 4. Графики изменения токов и напряжения источника питания при пусковом режиме АД

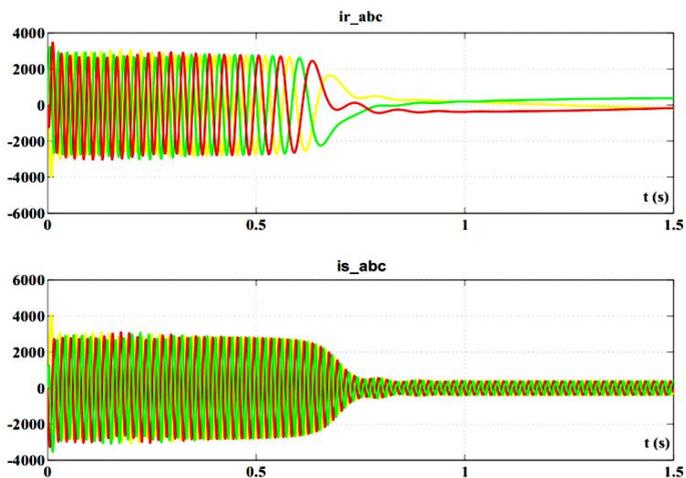


Рис. 5. Графики изменения токов и напряжения АД при пуске

С учетом уравнения движения электропривода, момент ЭП должен быть больше статического момента [7, 8]. На рис. 6 приведены графики изменения скорости, момента и статического момента насоса.

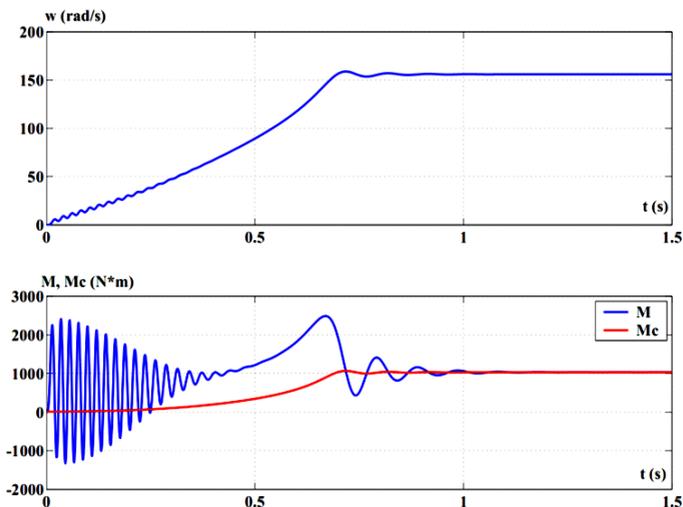


Рис. 6. Графики изменения параметров электропривода: угловой скорости, электромагнитный момент, статический момент

По графикам (рис. 6) видно, что при пусковом режиме момент АД изменяется знакопеременно, а статический момент насоса изменяется по нарастающей до установившегося режима.

Выводы

- результаты компьютерного моделирования совпадают расчетным и практическим результатам;
- при прямом пуске значения электромагнитного момента АД увеличился в два раза от номинальных значений;
- по графикам рис. 4 видно, что при пуске АД наблюдается провалы напряжения;
- при прямом пуске, пусковой ток АД марки 4A315M4 составил более 3 кА (рис. 5).

Разработанная модель позволил более детально исследовать переходные процессы асинхронного электропривода с насосной установкой и модель можно использовать для других механизмов. Также разработанная модель может стать базовой моделью для исследования других вопросов в АД, как исследования потери мощности, нагрева обмоток, оценки надежности и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герман-Галкин С.Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/ С. Г. Герман-Галкин – СПб.: КОРОНА – Век, 2008. – 368 с.
2. *Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, – 2003. – 256 с.
3. *Дадабаев Ш.Т.* Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 618–621.
4. *Дадабаев Ш.Т.* Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370–375.
5. *Дадабаев Ш.Т., Рахматов Х.А., Абдумаликов Б.А.* Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 256–262.
6. *Дадабаев Ш.Т.* Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 11. С. 29–34.
7. *Ковач К.П.* Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.
8. *Поздеев А.Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А.Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
9. *Терёхин В.Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
10. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

Автор

Дадабаев Шахбоз Толибджонович, старший преподаватель, Худжандский политехнический институт ТТУ имени академика М.С. Осими г. Худжанд, Таджикистан. Закончил технологический факультет Худжандского филиала таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими в 2010 году. Является автором более 60 научных работ, опубликованных в изданиях индексируемых в Scopus, РИНЦ и т.д. E-mail: shahbozadoboev@mail.ru.

ДУГОВАЯ ПЕЧЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПЕРЕПЛАВА АЛЮМИНИЯ

Михадаров Д.Г., Васильев И.Н., Петросов Ю.М., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассмотрены перспективные возможности переработки алюминия. Предложена конструкция дуговой печи постоянного тока.*

***Ключевые слова:** дуговая печь постоянного тока, лом алюминия, переплав.*

Сырьевые регионы России являются локомотивами роста экономики страны [1]. Однако многие из них сталкиваются с серьезной проблемой истощения месторождений природных ископаемых и снижением их добычи.

Большинство субъектов РФ, ведущих разработку полезных ископаемых, сталкивается также с серьезной экологической проблемой, обусловленной колоссальным количеством отходов, накопленных в период интенсивного промышленного освоения территорий. Они представляют собой вторичные природные ресурсы, которые необходимо и целесообразно вновь вовлечь в хозяйственный оборот.

Отрасль лома черных и цветных металлов является стратегически важной для социально-экономического развития нашего государства, этот факт был подчеркнут Правительством Российской Федерации в «Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года» [2].

Для вторичной переработки лома цветных металлов применяются как агрегаты, работающие на газовом топливе так и электрические печи.

Печи на газовом топливе в большинстве случаев применяются для переплава алюминиевых шлаков [3] с содержанием алюминия от 20 до 80 %. Потребление энергии при переработке в таких печах зависит от содержания алюминия в шлаке (табл. 1).

Таблица 1

Расход энергии в зависимости от состава шлака

Шлак	Расход энергии, кВт·ч/т
Содержание алюминия 80 %	740
Содержание алюминия 40 %	1500

Для переплава лома алюминия в большинстве случаев используются электрические печи:

- печи сопротивления;
- индукционные тигельные печи;
- дуговые печи постоянного тока.

К преимуществам электрических печей относятся:

- меньшие потери на угар;
- возможность получить более чистый металл.

Дуговые печи постоянного тока позволяют за короткое время получить требуемый объем жидкого металла. Теоретический расход электроэнергии [4] в таких печах составляет 410 кВт·ч/т для малых печей и уменьшается с ростом емкости плавильного агрегата (табл. 2).

Таблица 2

Теоретический удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т
в зависимости от емкости электродуговой печи

Емкость печи, т	0,5	1,5	3,0
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	410	390	380

Печи емкостью от 300 кг до 3 тонн находят применение для плавки цветных металлов на отечественных предприятиях: ОАО «Ступинская металлургическая компания», ОАО «ГМК «Норильский никель», «Невский Завод» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Ковровский электромеханический завод», ОАО «Компания «Сухой «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», (г. Комсомольск-на-Амуре), АО «АБС ЗЭиМ Автоматизация» (г. Чебоксары) и др.

В Чувашском госуниверситете И.Н. Ульянова совместно с АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (АО «ЧЭАЗ») в рамках научно-исследовательской работы и на основе проведенных ранее исследований [5, 6, 7] спроектирована электро-термическая установка (ЭТУ) для переплава алюминиевого лома. Технические параметры установки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Техническая характеристика ЭТУ

Параметр		Значение
Емкость печи, кг		50
Номинальная мощность, кВт		100
Питающее напряжение, В		380
Номинальное напряжение на выходе источника питания, В		100
Номинальный ток, А		1 000
Диапазон регулирования тока, %		20-100
Точность поддержания тока $(0,5-1,0) \cdot I_n$, %		2
КПД, не менее, %		95
Внутренний диаметр тигля, мм		250
Высота жидкой металлической ванны, мм		260
Диаметр сводового электрода (графит), мм		80
Габариты ш×в×г, мм	Источник питания	1000×2500×700
	ЭТУ	1300×2000×1500

Конструктивно ЭТУ представляет собой дуговую печь постоянного тока (рис. 1), состоящую из графитового тигля, установленного в сварном каркасе. Тигель изолирован от каркаса изолирующими прокладками. Питание ЭТУ осуществляется от источника питания, разработанного АО «ЧЭАЗ».

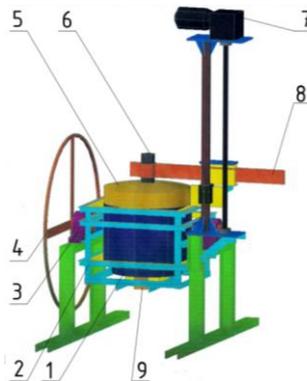


Рис. 1. Конструкция ЭТУ для переплава лома алюминия:
 1 – графитовый тигель; 2 – сварной каркас; 3 – подшипниковый узел;
 4 – маховик для наклона ЭТУ; 5 – свод; 6 – сводовый электрод;
 7 – мотор-редуктор; 8 – токоведущая шина; 9 – подовый электрод

Источник питания выполнен по схеме «полууправляемый выпрямитель / инвертор напряжения / ВЧ трансформатор / ВЧ неуправляемый выпрямитель».

Выводы источника питания соединены со сводовым и подовым электродами с помощью вторичного токоподвода.

Перемещение электрода вверх/вниз осуществляется с помощью механизма, приводимого в действие посредством мотор-редуктора. Наклоняется корпус печи вручную с помощью маховика.

Предлагаемая установка может использоваться для проведения исследовательских работ:

- по переработке других видов промышленных отходов;
- по газификации твердых видов топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстолесова Л.А. Использование вторичных природных ресурсов как фактор экономического развития сырьевых регионов России / Л.А. Толстолесова // Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения: Сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции. [Электронный ресурс] / Под ред.: С.Г. Костюк [и др.]. – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 331.1–331.4.

2. Попов Е.А. Отрасль лома черных и цветных металлов России: состояние, проблемы и перспективы развития / Е.А. Попов // Стратегия бизнеса. Том 9, № 2, 2021. – С. 36–41.

3. Никитин К.В. Рециклинг металлов на основе алюминия: учебное пособие / К.В. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 67 с.

4. Малиновский В.С., Малиновский В.Д. Плавка алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока. Статус и перспектива новой технологии / В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, М.А. Мешков, Л.В. Ярных // Металлургия машиностроения, № 4, 2004.

5. Миронов Ю.М., Михадаров Д.Г. Электродинамические взаимодействия в дуговых печах постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2010. – С. 31–34.

6. Миронов Ю.М., Михадаров Д.Г. Взаимосвязь технологических процессов со статической вольт-амперной характеристикой дуги постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 93–95.

7. Михадаров Д.Г. Электрическая дуга постоянного тока в дуговой печи / Д.Г. Михадаров // Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия – 2015», Новокузнецк. С. 209–213.

Авторы:

Михадаров Денис Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова в 2003 году. Защита в 2016 году по специальности «Электротехнология». E-mail: denis_georg@mail.ru.

Васильев Иван Николаевич, инженер кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Окончил Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова в 2022 году. E-mail: vanya2001.vasiljev@gmail.com.

Петросов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Окончил в 1979 году энергетический факультет Азербайджанского Института Нефти и Химии (г. Баку). В 1990 году защитил кандидатскую диссертацию во Всесоюзном научно-исследовательском институте электротермического оборудования (ВНИИЭТО) по специальности 05.09.10 «Электротехнология». E-mail: petrosov58@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА

Матюнин А.Н., Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Медуницын А.В., ООО «АскольдЭнерго», г. Чебоксары,
Россия.

***Аннотация.** Представлены результаты экспериментального исследования компенсации реактивной мощности силового трансформатора в режиме холостого хода, проведено компьютерное моделирование соответствующей модели в программе SimInTech, сделан предварительный анализ результатов.*

***Ключевые слова:** трансформатор, конденсатор, компенсация мощности, холостой ход, SimInTech.*

Трансформаторы потребляют реактивную и активную мощности во всех режимах работы. В режиме холостого хода (х.х.) трансформатор подобен катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником, и потребление мощности в этом режиме определяется магнитными процессами, имеющими обязательный переменный (обычно периодический) характер. Известно, что потребляемая активная мощность в режиме х.х. трансформатора обусловлена магнитными потерями в сердечнике в результате вихревых токов и гистерезиса. Реактивная намагничивающая мощность трансформатора ($Q_{\text{намагн.}}$) равна полной мощности магнитных процессов х.х. ($S_{\text{магн.х.х.}}$) за вычетом активной мощности магнитных потерь ($P_{\text{х.х.}}$) – для мгновенных значений:

$$Q_{\text{намагн.}}(t) = S_{\text{магн.х.х.}}(t) - P_{\text{х.х.}}(t). \quad (1)$$

В случае синусоидальных величин можно записать выражение для полной мощности, потребляемой фазой трансформатора (S_{ϕ}), в комплексном виде:

$$\dot{S}_{\phi} = \dot{U}_{\phi} \cdot \dot{I}_{\phi} = P_{\phi} + Q_{\phi} \cdot j, \quad (2)$$

где \dot{U}_{ϕ} – комплексное фазное напряжение;

\dot{I}_{ϕ} – комплексно сопряжённый фазный ток;

P_{ϕ} – потребляемая фазой активная мощность;
 $+Q_{\phi}$ – потребляемая фазой реактивная мощность (индуктивный характер).

Активная мощность магнитных потерь ($P_{x.x.}$) пропорциональна удельным потерям в единице массы магнитопровода (p , Вт/кг). Удельные, а также общие магнитные потери изменяются с изменением индукции B и частоты f магнитного поля в соответствии с соотношением:

$$p \sim B^m f^n. \quad (3)$$

Для силовых трансформаторов с сердечником из листов холоднокатаной стали: $m = 2 - 3$, $n = 1,25$ [1].

Реактивная потребляемая мощность трансформатора соответствует переменным магнитным процессам без учёта потерь. Широко известным способом компенсации потребления реактивной мощности является применение косинусных конденсаторов в качестве компенсирующих устройств [2, 3].

Источник питания идеального (без потерь) трансформатора в случае последовательного включения ёмкости в цепь первичной обмотки и резонансе напряжений будет работать в режиме короткого замыкания, а в случае параллельного включения ёмкости и резонансе токов будет работать в режиме холостого хода. В реальном трансформаторе параллельное включение ёмкости в случае резонанса токов приведёт к полной компенсации потребления реактивной мощности. На рис. 1 приведена схема включения компенсирующей ёмкости (C) в цепь питания трёхфазного трансформатора.

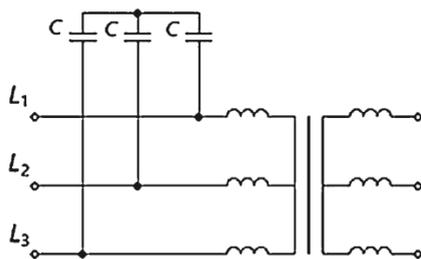


Рис. 1. Схема включения компенсирующего конденсатора в цепь питания трёхфазного трансформатора

Экспериментальное исследование

Исследуемый трёхфазный двухобмоточный силовой трансформатор имеет следующие номинальные параметры:

- номинальная мощность ($S_{\text{ном}}$): 40 кВА;
- номинальное напряжение обмотки НН ($U_{\text{НН ном}}$): 0,4 кВ;
- номинальное напряжение обмотки ВН ($U_{\text{ВН ном}}$): 10 кВ;
- схемы соединения обмоток: Yн (НН), Y (ВН);
- номинальный ток обмотки НН ($I_{\text{НН ном}}$): 57,74 А;
- номинальный ток обмотки ВН ($I_{\text{ВН ном}}$): 2,31 А;
- коэффициент трансформации ($k = U_{\text{ВН ном}}/U_{\text{НН ном}} = I_{\text{НН ном}}/I_{\text{ВН ном}}$): 25.

Фотография остова трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора с естественным воздушным охлаждением ТС(КС)-40-10/0,4 Y/Yн-0 (для КРУ) на испытательном участке изображена на рис. 2.



Рис. 2. Исследуемый трансформатор

При проведении экспериментов питание трансформатора осуществлялось **со стороны обмотки НН**. В результате проведения опыта холостого хода и опыта короткого замыкания были определены следующие параметры:

- ток холостого хода в процентах от $I_{\text{НН ном}}$ ($i_{\text{х.х.}}$): 4,2 %;
- потери холостого хода ($P_{\text{х.х.}}$): 233 Вт;
- напряжение к.з. в процентах от $U_{\text{НН ном}}$ ($u_{\text{к}}$): 2,9 %;
- потери к.з., приведённые к 115 °С ($P_{\text{к.з.}}$): 687 Вт.

Проведено исследование зависимости потребляемого тока ($I_{x.x.}$) и активной мощности ($P_{x.x.}$) от напряжения питания обмотки НН в режиме холостого хода ($I_{BH} = 0$) с подключённым компенсирующим конденсатором 3×10 мкФ и без него. Сравнительные экспериментальные зависимости изображены на рис. 3 и рис. 4.

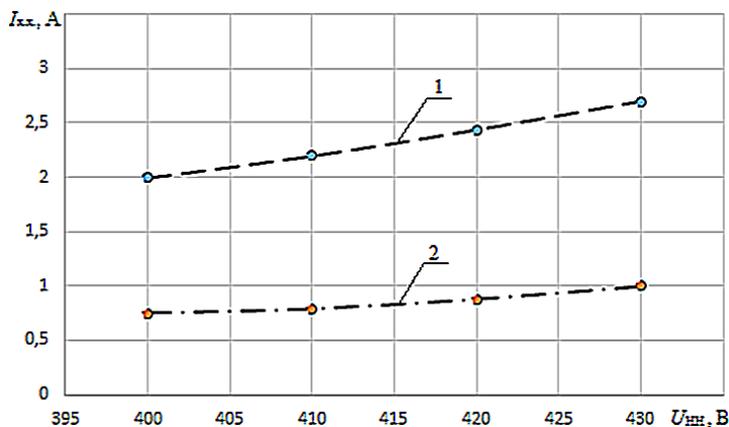


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики холостого хода трансформатора: 1 – без конденсатора, 2 – с конденсатором

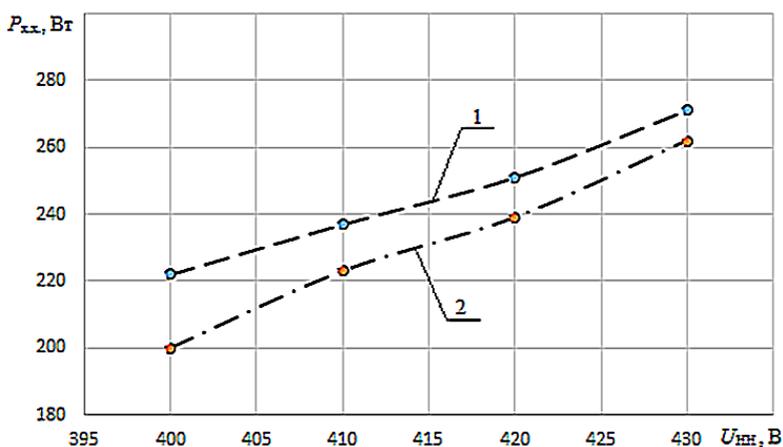


Рис. 4. Зависимость потерь холостого хода от напряжения: 1 – без конденсатора, 2 – с конденсатором

Компьютерное моделирование

На рис. 5 представлена однолинейная схема для исследования компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора, составленная в программе SimInTech [4]. Данная схема позволяет определять действующие и комплексные значения параметров исследуемого трансформатора при наличии компенсирующего конденсатора и без него, изменять значение ёмкости конденсатора.

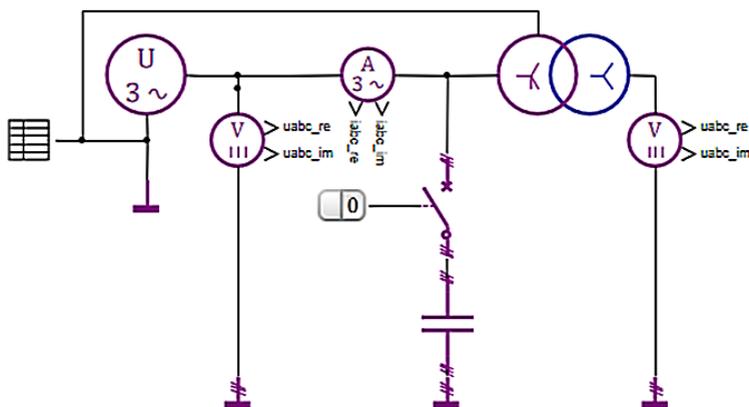


Рис. 5. Структурная схема для определения действующих и комплексных значений параметров исследуемого трансформатора

SimInTech – отечественная программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для программируемых контроллеров. В отношении объектов электротехники и электроэнергетики она позволяет проводить анализ цепей в мгновенных значениях (библиотека «ЭЦ Динамика») и в действующих значениях (библиотека «ЭЦ Статика»).

В таблице представлены определённые по показаниям вольтметра и амперметра фазные значения напряжения (\dot{U}_ϕ) и тока (\dot{I}_ϕ) трансформатора на входе (для фазы A), а также рассчитанные значения полной мощности фазы (\dot{S}_ϕ) и суммарной

активной мощности трёх фаз (P_{Σ}) в зависимости от значения ёмкости компенсирующего конденсатора (C).

Таблица 1

Параметры исследуемого трансформатора в режиме холостого хода в зависимости от ёмкости компенсирующего конденсатора, полученные с помощью программы SimInTech

C , мкФ	\dot{U}_{ϕ} , В	\dot{i}_{ϕ} , А	\dot{S}_{ϕ} , В·А	P_{Σ} , Вт
0	231	$0,337 - 2,4j$	$78 + 554j$	234
10	231	$0,337 - 1,67j$	$78 + 386j$	234
20	231	$0,337 - 0,95j$	$78 + 219j$	234
30	231	$0,337 - 0,22j$	$78 + 51j$	234
40	231	$0,337 + 0,5j$	$78 - 116j$	234

Выводы

1. Применение компенсирующего (косинусного) конденсатора, включённого параллельно источнику питания и первичной обмотке трансформатора, позволяет снизить потребление тока за счёт компенсации мощности.

2. Существующие математические модели и компьютерные модели на их основе позволяют определить значение ёмкости компенсирующего конденсатора, требуемое для компенсации потребляемой реактивной мощности намагничивания трансформатора.

3. Требуется дополнительное исследование влияние компенсирующего конденсатора на потребляемую трансформатором активную мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тихомиров П.М.* Расчёт трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

2. *Кудряшев Г.С.* Автоматизация компенсации реактивной мощности / Г.С. Кудряшев, А.Н. Третьяков, О.Н. Шпак // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России. Материалы II Международной научной конференции. Красноярск, 2022. – С. 82–85.

3. *Bashirova E.M.*, Application of Fuzzy Logic in Hydrogen-containing Gas Purification Plant for Reactive Power Compensation /

Е.М. Bashirova, D.E. Matveev, A.S. Khismatullin, I.V. Prahov // Components of Scientific and Technological Progress. – 2022. – 3 (69). – P. 5–8.

4. SimInTech [Электронный ресурс]. URL: <https://simintech.ru>.

Авторы:

Матюнин Алексей Николаевич, кандидат технических наук, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2009 год. Диссертация на тему «Исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами», 2019 год. E-mail: matyugin86@mail.ru.

Медуницын Алексей Валентинович, технический директор ООО «АскольдЭнерго». Машиностроительный факультет, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019 год.. E-mail: Alexmed94@ya.ru.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ SYMPY В PYTHON ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Афанасьев А.А., Генин В.С., Иванова Н.Н., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Приведены результаты аналитического расчета магнитоэлектрического вентильного двигателя методом разделения переменных, основанного на разбиении его активной области на совокупность геометрически однородных листов. Для проведения расчета использована библиотека символьных вычислений SymPy в Python. Полученное решение системы параметрических уравнений, описывающей расчетную схему индуктора двигателя, можно использовать для описания магнитных потенциалов и индукций вентильных двигателей различных геометрий.*

***Ключевые слова:** двигатель, магнит, индукция, магнитное поле, уравнение Лапласа, система уравнений, Python, библиотека SymPy.*

Аналитический расчет вентильного двигателя методом разделения переменных, основан на разбиении его активной области на совокупность геометрически однородных листов [1]. Рас-

чётная схема индуктора беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя, содержащая 4 среды, показана на рисунке.

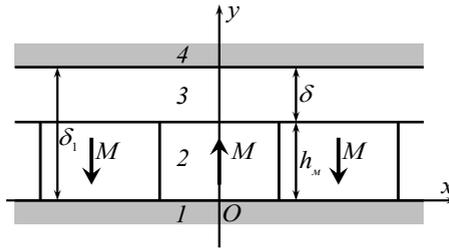


Рисунок. Расчётная схема с четырьмя средами:
1, 4 – ферромагнитные ярма; 2 – постоянные магниты с намагниченностью M ; 3 – воздушный зазор

Скалярные магнитные потенциалы $u_n(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(x, y)$ в средах ($n = 1, 2, 3, 4$) согласно методу разделения переменных Фурье могут быть описаны следующим образом [1, 3, 4,]:

$$\begin{cases} u_1(x, y) = Ae^{k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ B_{1y}(x, y) = -\mu_0\mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0\mu_p k\sigma Ae^{k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ y \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_2(x, y) = (Be^{k\sigma y} + Ce^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x, \\ B_{2y}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial y} + M_{yk} \cos k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 (-k\sigma Be^{k\sigma y} + k\sigma Ce^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x + \mu_0 M_{yk} \cos k\sigma x, \\ 0 \leq y \leq h_m, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_3(x, y) = (De^{k\sigma y} + Ee^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x, \\ B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial y} = -\mu_0 (k\sigma De^{k\sigma y} - k\sigma Ee^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x, \\ h_m \leq y \leq h_m + \delta = \delta_1, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_4(x, y) = Fe^{-k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ B_{4y}(x, y) = -\mu_0\mu_c \frac{\partial u_4}{\partial y} = \mu_0\mu_c k\sigma Fe^{-k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ y \geq h_m + \delta = \delta_1, \end{cases} \quad (4)$$

где μ_p , μ_c – относительные магнитные проницаемости сердечников ротора и статора; $\sigma = \pi/\tau$.

С учетом граничных условий:

$$\begin{aligned} u_1(x, 0) &= u_2(x, 0), \quad B_{1y}(x, 0) = B_{2y}(x, 0), \\ u_2(x, h_m) &= u_3(x, h_m), \quad B_{2y}(x, h_m) = B_{3y}(x, h_m), \\ u_3(x, \delta_1) &= u_4(x, \delta_1), \quad B_{3y}(x, \delta_1) = B_{4y}(x, \delta_1), \end{aligned}$$

получаем, что при использовании метода разделения переменных Фурье условия сопряжения (1)–(4) сводятся к решению системы линейных уравнений относительно переменных A , B , C , D , E и F [1]:

$$\frac{m_k (\epsilon^2 (1 - \mu_c) + \epsilon (\epsilon_1^2 (-\mu_c - 1) + \mu_c - 1) + \epsilon_1^2 (\mu_c + 1))}{\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)}$$

$$\begin{cases} A = B + C; \\ -\mu_p A = -B + C + m_k; \\ B\epsilon + C\epsilon^{-1} = D\epsilon + E\epsilon^{-1}; \\ -B\epsilon + C\epsilon^{-1} + m_k = -D\epsilon + E\epsilon^{-1}; \\ D\epsilon_1 + E\epsilon_1^{-1} = F\epsilon_1^{-1}; \\ -D\epsilon_1 + E\epsilon_1^{-1} = \mu_c F\epsilon_1^{-1}, \end{cases} \quad (5)$$

где m_k – k -е слагаемое разложения Фурье намагниченности магнита, $m_k = M_{yk} / (k\sigma)$; $\epsilon = e^{k\sigma h_m}$; $\epsilon_1 = e^{k\sigma \delta_1}$; $\delta_1 = h_m + \delta$.

Для произведения символьных вычислений в Python используется библиотека с открытым кодом SymPy [5]. Данная библиотека может выступать альтернативной таким математическим пакетам, как Mathematica, MathCad и др.

Решение системы уравнений (5) с использованием SymPy в Python относительно неизвестных A, B, C, D, E, F получено в виде

$$A = \frac{m_k (\epsilon^2 (1 - \mu_c) + \epsilon (\epsilon_1^2 (-\mu_c - 1) + \mu_c - 1) + \epsilon_1^2 (\mu_c + 1))}{\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)};$$

$$B = \frac{m_k (\epsilon^2 (-\mu_c \mu_p - \mu_c + \mu_p + 1) + \epsilon (2\mu_c - 2) + \epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1))}{2\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)};$$

$$C = \frac{m_k (\epsilon^2 (\mu_c \mu_p - \mu_c - \mu_p + 1) + \epsilon_1^2 (\epsilon (-2\mu_c - 2) - \mu_c \mu_p + \mu_c - \mu_p + 1))}{2\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)};$$

$$D = \frac{m_k (\epsilon^2 (-\mu_c \mu_p - \mu_c + \mu_p + 1) + \epsilon (2\mu_c - 2) + \mu_c \mu_p - \mu_c - \mu_p + 1)}{2\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)};$$

$$E = \frac{\epsilon_1^2 m_k (\epsilon^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) + \epsilon (-2\mu_c - 2) - \mu_c \mu_p + \mu_c - \mu_p + 1)}{2\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)};$$

$$F = \frac{\epsilon_1^2 m_k (\epsilon^2 (\mu_p + 1) - 2\epsilon - \mu_p + 1)}{\epsilon (\epsilon_1^2 (\mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p + 1) - \mu_c \mu_p + \mu_c + \mu_p - 1)}.$$

Выводы

С использованием библиотеки символьных вычислений *SymPy* в *Python* получено решение системы параметрических уравнений, описывающей расчётную схему индуктора беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя. Решение системы параметрических уравнений в общем виде позволяет использовать полученные результаты для описания магнитных потенциалов и индукций двигателей различных расчетных геометрий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев А.А.* Аналитические вычисления при расчёте магнитоэлектрического вентильного двигателя методом разделения переменных / *А.А. Афанасьев, В.С. Генин, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 45–52. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-45-52.*

2. *Афанасьев А.А.* Аналитический расчёт беспазового микродвигателя, не имеющего статорного сердечника / *А.А. Афанасьев,*

В.А. Ваткин, В.С. Генин и др. // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 13–22.

3. *Афанасьев А.А.* Аналитическое и численное моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей / А.А. Афанасьев, В.С. Генин, В.А. Ваткин и др. // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 72–78.

4. *Афанасьев А.А.* Математическое моделирование электромеханических систем / А.А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – 274 с.

5. SymPy Documentation. Release 1.10.1. SymPy Development Team. March 19, 2022. URL: <https://github.com/sympy/sympy/releases/download/sympy-1.10.1/sympy-docs-pdf-1.10.1.pdf>.

Авторы:

Афанасьев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах. Окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 году. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 году. E-mail: afan39@mail.ru.

Генин Валерий Семенович, доктор технических наук, доцент, профессор, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах. Окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1976 году. Докторскую диссертацию «Методы и технические средства управления, контроля и испытаний электротехнического и технологического оборудования нефтегазодобывающих предприятий» защитил в МЭИ в 2008 году. E-mail: v.s.genin@mail.ru.

Иванова Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем. Окончила математический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1999 году. Диссертацию «Устройства вычислительной техники для цифровой обработки сигналов, аппроксимированных цепями Маркова, в системе остаточных классов» защитила в 2011 году в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. E-mail: niva_mail@mail.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСООСНОСТИ РОТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 6ДВМ300 А35

Афанасьев А.А., Генин В.С., Иванова Н.Н., Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Проведены результаты исследование магнитного поля в воздушном зазоре вентильного двигателя 6ДВМ300 А35 при несоосности ротора. Показано, что несоосность ротора приводит к появлению несинусоидальности ЭДС и пульсаций электромагнитного момента с частотой, превышающей в $3p$ раз частоту вращения ротора (p – число пар полюсов). Постоянная составляющая электромагнитного момента растет с увеличением несоосности.*

***Ключевые слова:** вентильный двигатель 6ДВМ300 А35, магнитное поле, магнитная индукция, ротор, пульсации, электромагнитный момент.*

В [2] представлена математическая модель магнитного поля в рабочем зазоре магнитоэлектрического вентильного двигателя 6ДВМ300 А35¹ при несоосности ротора относительно оси статора и проведено исследование магнитного поля в воздушном зазоре. Исследование выполнено с использованием конформного преобразования неравномерного воздушного зазора в равномерный (круговое кольцо) [1–3].

Рассмотрен случай, когда участок воздушного зазора с минимальным размером неподвижен и связан с конкретным местом поверхности расточки статора. Зубчатость статора учитывалась в среднем с помощью коэффициента Картера. Магнитное поле в неоднородном воздушном зазоре, создаваемое магнитами ротора и током обмотки статора, принималось плоскопараллельным, имеющим двумерный характер.

Получено, что при несоосности ротора, связанной с вращательным движением участка воздушного зазора с минимальным размером, появляется несинусоидальность ЭДС и возникают пуль-

¹ Серийно выпускаемый АО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) вентильный двигатель [4].

сации электромагнитного момента с частотой, превышающей в $3p$ раз частоту вращения ротора (p – число пар полюсов) (рис. 1).

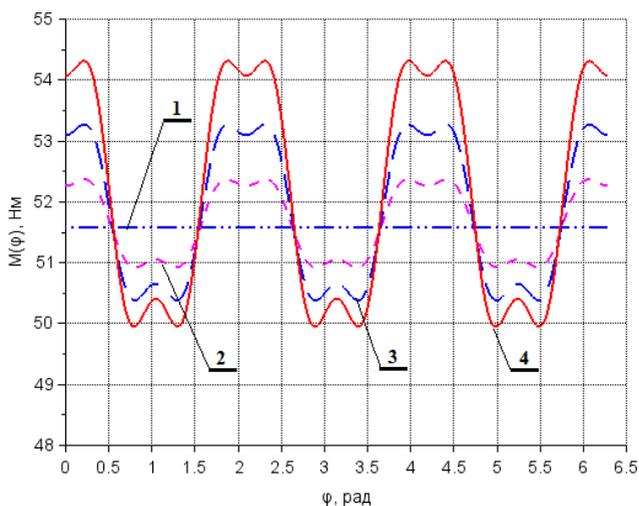


Рис. 1. Электромагнитный момент при номинальном токе статора в функции углового положения ротора φ при различных значениях несоосности: 1 – $d = 0$ мм; 2 – $d = 0,4$ мм; 3 – $d = 0,8$ мм; 4 – $d = 1,2$ мм

Получено, что частота пульсаций момента в 6 раз превышает частоту тока статора. Величина пульсаций увеличивается с ростом величины несоосности.

Пульсации момента электромагнитного момента двигателя вызваны появлением преимущественно 3-й и 9-й гармоник, величины которых с увеличением несоосности растут по закону, близкому к линейному.

Амплитудный спектр пульсаций электромагнитного момента двигателя при смещении оси вращения ротора относительно оси статора на 1 мм показан на рис. 2.

Постоянная составляющая электромагнитного момента несколько растет с увеличением несоосности (рис. 3). Это может быть объяснено уменьшением минимального воздушного зазора при смещении оси вращения ротора к поверхности статора.

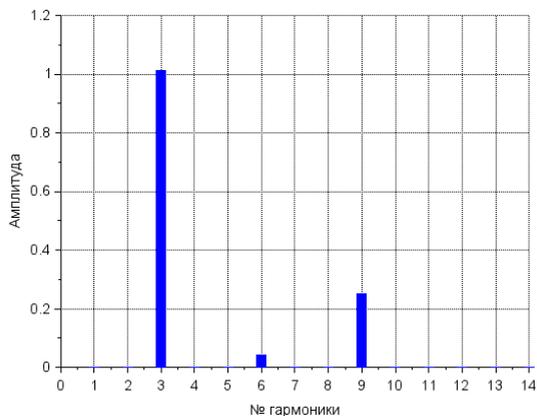


Рис. 2. Амплитудный спектр пульсаций

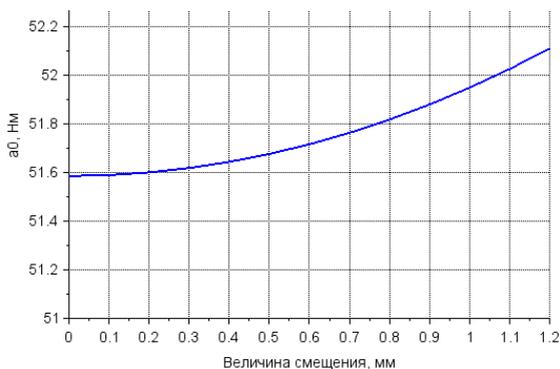


Рис. 3. Зависимость постоянной составляющей электромагнитного момента двигателя от величины несоосности

При неподвижном положении участка воздушного зазора с минимальным размером наводится переменная ЭДС вдоль вала ротора, вызывающая переменный ток в контуре: вал – подшипники – подшипниковые щиты – корпус статора.

Выводы

Получено, что несоосность ротора приводит к появлению несинусоидальности ЭДС и пульсаций электромагнитного момента с частотой, превышающей в $3p$ раз частоту вращения ротора (p – число пар полюсов). Постоянная составляющая элект-

ромагнитного момента растет с увеличением несоосности. Пульсации момента при этом вызваны преимущественно 3-й и 9-й гармониками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев А.А.* Аналитический расчёт магнитного поля синхронной машины с неравномерным воздушным зазором / А.А. Афанасьев // Электротехника. – 2022. – № 7. – С. 41–45.

2. *Афанасьев А.А.* Влияние несоосности ротора на характеристики магнитоэлектрического вентильного двигателя / А.А. Афанасьев, В.С. Генин, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 35–44. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-35-44.

3. *Афанасьев А.А.* Математическое моделирование электромеханических систем / А.А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – 274 с.

4. Двигатели вентильные серии 6ДВМ. Основные технические характеристики [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cheaz.ru/assets/images/production/10-ensber/1-electrodvig/2-6-dvm/6dvm.pdf>.

Авторы:

Афанасьев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах. Окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 году. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 году. E-mail: afan39@mail.ru.

Генин Валерий Семенович, доктор технических наук, доцент, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах. Окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1976 году. Докторскую диссертацию «Методы и технические средства управления, контроля и испытаний электротехнического и технологического оборудования нефтегазодобывающих предприятий» защитил в МЭИ в 2008 году. E-mail: v.s.genin@mail.ru.

Иванова Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем. Окончила математический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1999 году. Диссертацию «Устройства вычислительной техники для цифровой обработки сигналов, аппроксимированных цепями Маркова, в системе остаточных классов» защитила в 2011 году в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. E-mail: niva_mail@mail.ru.

VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

УПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКОЙ КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА

Афанасьева О.В., Данилов А.М., Казакова Е.Ю., Ковалев В.Г., Шестакова Л.А., Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Исследованы проблемы подготовки кадров высшей квалификации для совершенствования взаимодействия региональной власти, работодателей и образовательных учреждений. Выявлены нарастающие проблемы дефицита специалистов и описаны мероприятия в рамках участия факультета в проекте университета «Непрерывная подготовка кадров для цифровой энергетики» на основе стратегического партнерства университета и предприятий инновационного территориального электротехнического кластера (ИН-ТЭК).*

***Ключевые слова:** целевая подготовка кадров, профессиональная ориентация, образовательная траектория, трудоустройство.*

Повышение уровня технологической безопасности является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности в области науки, технологий и образования [1]. Высшие учебные заведения в решении задач инновационного развития решают две важные задачи: во-первых, формирование перспективных научно-технологических направлений и поддержка научных школ в исследованиях, во-вторых, подготовка высококвалифицированных исследовательских и инженерных кадров [2]. Третьей задачей, решение которой позволяет ускорить достижение технологической безопасности, является взаимодействие с бизнес средой, позволяющие коммерциализировать новые знания и продукты на рынки. В современных условиях санкционных ограничений для технологического развития

и импортозамещения вопрос о совершенствовании системы подготовки кадров становится еще более значимым.

В рамках федеральной инновационной образовательной площадки (ФИП) [3] в Чувашском государственном университете реализуется проект «Непрерывная подготовка кадров для цифровой энергетики» на основе стратегического партнерства университета и предприятий инновационного территориального электротехнического кластера (ИНТЭК) Чувашской Республики. Актуальность выбранного направления определяется не только задачами, стоящими перед энергетикой [4], но и тем, что предприятия ИНТЭК являются крупнейшими в России поставщиками интеллектуального электротехнического оборудования предприятиям различных отраслей промышленности и ранее конкурировали с крупнейшими электротехническими компаниями мира. Совершенствование системы воспроизводства научных знаний, новых технологий, совмещенное с производством продукции и подготовкой кадров, должно позволить обеспечить конкурентоспособность и технологическую независимость отечественной энергетики и электротехники по ряду важнейших направлений.

Целевая подготовка специалистов имеет большую историю и непрерывно совершенствуется, в том числе в ведущих энергетических вузах страны, готовящих кадры по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. Интересен опыт Национального исследовательского университета «МЭИ» по созданию треков подготовки исследователей, решающих важную задачу поддержания и развития научных школ университета. Интересен опыт НГТУ НЭТИ, который совместно с ИЯФ СО РАН организывает специализированную подготовку студентов кафедры электронных приборов для обеспечения высококвалифицированными кадрами проектов Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») и Ускорительного комплекса со встречными электрон-позитронными пучками – Супер С-Тау фабрики. В обоих случаях уклон проектов – подготовка научно-исследовательских кадров для университетов и институтов академии наук, а также то, что они реализуются в динамично развивающихся регионах.

В случае Чувашского государственного университета, речь идет о взаимодействии с частными партнерами – предприятиями ИНТЭК. В отличие от многих вузов, готовящих кадры по направлению «Электроэнергетика и электротехника», рынок труда в республике формируется, прежде всего, предприятиями, создающими и продающими интеллектуальные электротехнические устройства. Предприятиям, эксплуатирующим это оборудование, требуются кадры иного качества, имеющие компетенции в технологиях энергетики, владеющие современными методами исследований и проектирования электротехнических устройств, знающие технологии их производства, монтажа и наладки. Все это требует совмещения различных компетенций у выпускников университета, а, следовательно, анализа всей технологической цепочки подготовки, согласования требований с работодателем, способностей обучающегося и инструментария образовательного процесса.

Цель этой работы – исследование трех взаимосвязанных ключевых вопросов целевой подготовки: во-первых, определение количественной потребности кадров по направлениям и профилям, во-вторых, формирование приема на соответствующую траекторию обучения и в-третьих, закрепление выпускников на предприятиях. Речь идет об исследовании и совершенствовании системы воспроизводства высококвалифицированных кадров в региональном аспекте, о взаимодействии структур государственного управления, образовательных учреждений и работодателей. Существующие методики расчета прогноза баланса трудовых ресурсов, например, города Москвы, используют известные методики [5] определения показателей, с коррекцией на основе региональных особенностей и собственных подходов. Однако данные методики оперируют укрупненными показателями рынка труда, которые не достаточны для принятия управленческих решений подготовки кадров. Как следствие, выпускники учебных заведений трудоустраиваются не по профилю, а часто и не по направлению подготовки. Работодатель сталкивается с проблемой необходимости перепрофилирования квалификации, соответственно, бюджетные средства используются не эффективно.

В рамках реализации проекта, задачи количественного определения рынка по профилям направлений подготовки решаются университетом во взаимодействии с Правительством и Министерством промышленности и энергетики Чувашской Республики. Ежегодно министерство и университет проводят анкетирование предприятий кластера с глубиной прогноза 4 года по профилям бакалавриата и 2 года по программам магистратуры. Результаты анкетирования, проведенного в 2021 году, показаны на диаграмме (рис. 1).

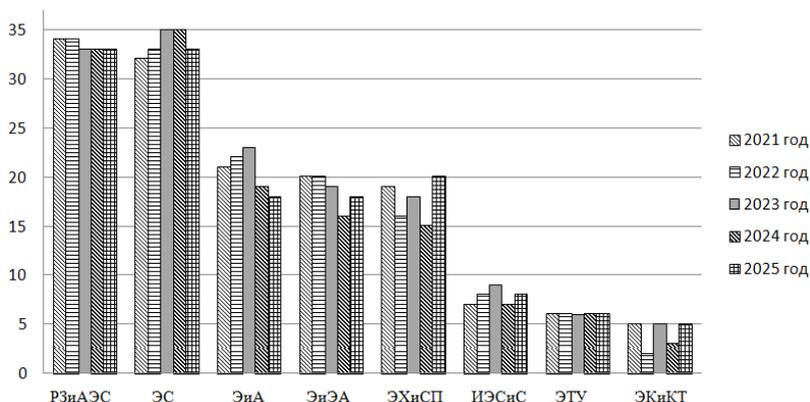


Рис. 1. Распределение ожидаемой потребности бакалавров по годам: Р3иАЭС – Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, ЭС – Электроснабжение, ЭиА – Электропривод и автоматика, ЭиЭА – Электрические и электронные аппараты, ЭХиСП – Электрическое хозяйство и сети предприятий, организаций и учреждений, электрооборудование низкого и высокого напряжения, ИЭСиС – Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети, ЭТУ – Электротехнологические установки и процессы, установки и приборы электронагрева, ЭКиКТ – Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника

Следует отметить, что потребность в кадрах на предприятиях ИНТЭК по профилям в рамках направления 13.03.02 достаточно устойчива по годам. Это позволяет распределить обучающихся по группам и организовать подготовку специалистов с последующим наиболее вероятным трудоустройством их на соответствующие полученному образованию инженерно-технические вакансии. Анализ контрольных цифр приема и вы-

пуска бакалавров показывает нарастающий дефицит кадров, так, в 2022 году по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, только по предприятиям ИНТЭК дефицит составил 35-40 человек. Это приводит к конкуренции за лучших студентов и расширяющемуся опыту трудоустройства на работу на условиях неполного рабочего дня. Дефицит бакалавров, подготовка которых ведется по очной форме, частично покрывается выпускниками заочной формы. Как правило, это выпускники организаций СПО по соответствующим направлениям подготовки. Ежегодно на заочную форму обучения принимается около 100 студентов, из них до 40 % имеют профильное среднее техническое образование, и переводятся на ускоренную форму обучения, совмещающую учебу с работой на предприятии.

Предприятия ИНТЭК – это, как правило, предприятия полного цикла, их конкурентоспособность обеспечивается как прикладными научными разработками и созданием новых устройств и технологий, так и организацией производства электротехнических устройств, а также: инжинирингом, монтажом и наладкой, последующим сопровождением в эксплуатации оборудования и программно-технических комплексов. Наличие НИР и ОКР на инновационных предприятиях привело к существенному изменению потребности в высококвалифицированных специалистах. Наиболее востребованы магистры и кандидаты наук, которые участвуя в работе научных коллективов инновационных предприятий, включающих преподавателей университета, разрабатывают новые технологии, устройства и программное обеспечение в развитие продуктовых направлений предприятий. Спрос на магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» ежегодно составляет 59-74 человека и покрывается выпускниками очной и очно-заочной форм обучения (рис. 2).

Особенностью подготовки является 90 % трудоустройство магистрантов на полный рабочий день на предприятиях, обучение ведется по будням в вечернее время и по субботам. Это позволяет выполнять ВКР по актуальным для электротехнической промышленности темам, и в случае смены занимаемой должности после завершения обучения легко адаптироваться в трудовом коллективе.

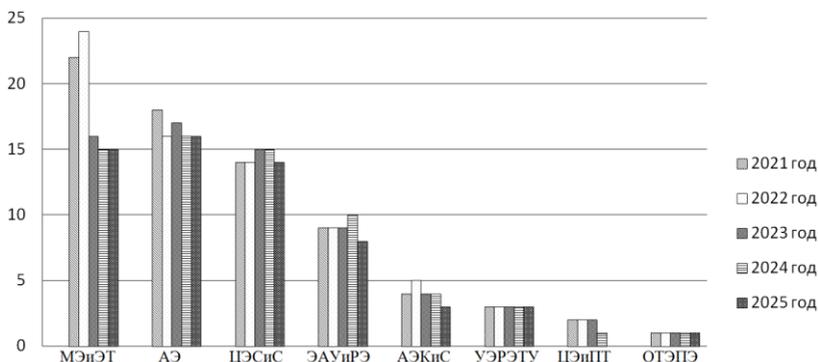


Рис. 2. Распределение по годам ожидаемой потребности магистров МЭиЭТ – Менеджмент в энергетике и электротехнике, ЦЭСиС – Цифровые электроэнергетические системы и сети, ЦЭиПТ – Цифровой электропривод и преобразовательная техника, ОТЭПЭ – Общая теория электромеханического преобразования энергии, ЭАУиРЭ – Электрические аппараты управления и распределения энергии, АЭКиС – Автоматизированные электромеханические комплексы и системы, УЭРЭТУ – Управление энергосберегающими режимами электрооборудования технологических установок, электротехнических комплексов и систем, АЭ – Автоматика энергосистем

В работе проведено исследование рынка труда различных предприятий с общей численностью работающих более 25 тыс. человек. В таблице приведена ожидаемая потребность по направлениям 13.03.02 и 13.04.02.

Таблица

Укрупненные показатели востребованности выпускников

	2021 год	2022 год	2023 год	2024 год	2025 год
Востребованность выпускников по направлению 13.03.02	144	141	148	134	141
% от общего количества сотрудников предприятий	0,58	0,56	0,59	0,53	0,56
% от ИТР предприятий	1,81	1,77	1,86	1,69	1,77
Востребованность выпускников по направлению 13.04.02	73	74	67	65	59
% от общего количества сотрудников предприятий	0,29	0,30	0,27	0,26	0,24
% от ИТР предприятий	0,92	0,93	0,84	0,82	0,74

В исследовании рынка трудовых высококвалифицированных кадров участвовали предприятия Чувашской Республики, в том числе 16 предприятий ИНТЭК, с численностью персонала 12792 человек. Разница между общепромышленными и инновационными предприятиями в востребованности кадрами весьма различна, так, на инновационных предприятиях отношение инженерного персонала к общей численности работающих составляет – 38,49 % (4924 человек), а на общепромышленных предприятиях 24,75 %, (ИТР 3022 человек).

Полученные результаты исследования рынка трудовых ресурсов используются для формирования учебных групп в рамках приема на направления и для работы с абитуриентами и студентами по профессиональной ориентации. Цифры приема и выпуска специалистов ежегодно обсуждаются и согласовываются на правлении ИНТЭК. Высокий показатель трудоустройства выпускников (93 %) подтверждает эффективность проводимых в регионе мероприятий.

Важным показателем успешности ВУЗа является качество абитуриентов, оцениваемое по баллу ЕГЭ. На количественные и качественные показатели приема в регионах влияют как общая ситуация в довузовских образовательных учреждениях, так и профессиональная ориентация, проводимая университетом и работодателем. Анализ динамики численности школьников, сдающих экзамены по естественнонаучным дисциплинам, составляющим базис профессиональной подготовки (рис. 3) показывает ухудшение количественных показателей: сокращается общая численность выпускников, а наиболее сильно сокращается численность выпускников, сдающих ЕГЭ по математике (профильная) и физике. Прослеживается негативная тенденция сокращения школьников сдающих профильную математику и физику, а тестирование первокурсников – снижение уровня знаний по естественнонаучным дисциплинам.

В такой ситуации, Вузы ведут агрессивную работу с абитуриентами для выполнения количественных и качественных показателей приема. Целый ряд мероприятий реализуется в направлении профориентационной работы и повышению качественного состава поступающих. Это и дни открытых дверей в университете и на факультетах, а также на предприятиях ИН-

ТЭК (за последние два года инновационные предприятия посетили более 1100 учащихся школ и учреждений СПО республики). Однако это не решает проблемы сокращения количества учащихся, выбирающих естественнонаучные дисциплины для сдачи ЕГЭ (рис. 3). Одной из причин этой проблемы является дефицит учителей математики, физики и информатики не только в сельских школах, но и в городских. Вопрос может быть решен в рамках реализации [6] Концепции подготовки педагогических кадров для системы образования на период до 2030 года, но очевидно, что потребуется время и дополнительные меры для формирования качественного контингента абитуриентов по техническим направлениям.

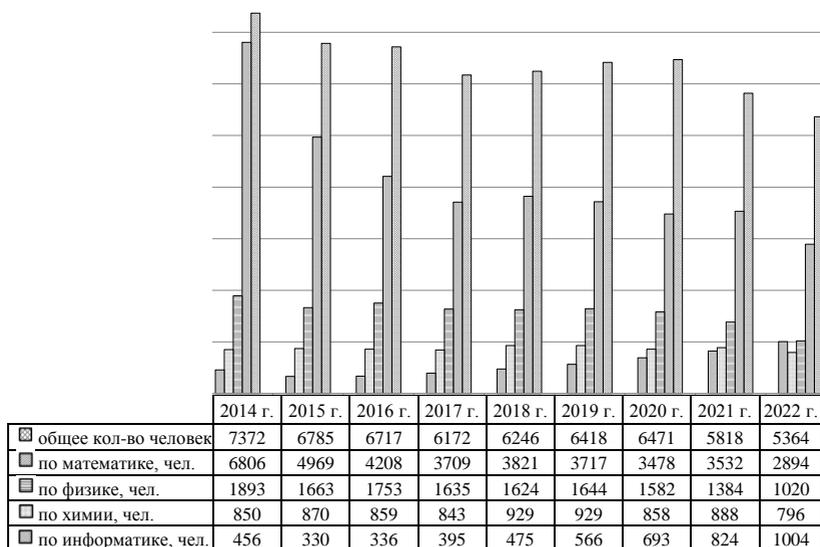


Рис. 3. Динамика сдающих ЕГЭ в Чувашской Республике

Такие условия требуют от работодателя формирование сигнала с рынка труда о престижности профессии инженера, и во взаимодействии с университетом организации углубленной подготовки школьников, отбора способной молодежи на траекторию целевой подготовки. В университете работает Малая электротехническая академия (МЭТА). Каждый год около 90 школьников приходят в университет на дополнительные занятия.

тия, лекционные и лабораторные, которые ведут преподаватели университета, в том числе работники предприятий ИНТЭК. Для них организуется дополнительная профориентация на предприятиях, участие в научных студенческих конференциях университета. Привлечению абитуриентов способствует ежегодное проведение в университете четырех региональных олимпиад (по физике, математике, олимпиады «Надежда электротехники», «Надежда машиностроения») организованные совместно с предприятиями ИНТЭК. Победителей награждают призами на предприятиях или на Международном форуме РЕЛАВЭКСПО, проводимом в Чебоксарах под эгидой Минэнерго России и Правительства Чувашской Республики. Победители и призеры олимпиад имеют право оформить целевой договор и поступить в университет на технические направления.

Как правило, студенты, поступившие на факультет энергетики и электротехники трудоустраиваются на условиях не полного рабочего дня на инновационные предприятия, где имеют возможность под руководством наставника выбрать вид деятельности и определиться с будущим местом работы после окончания университета.

С первого курса все студенты факультета знакомятся с предприятиями, на первом этапе участвуют в квестах, экскурсиях и встречах с ведущими специалистами и учеными. На втором этапе знакомство продолжается в период производственных практик и занятий в фирменных учебно-научных лабораториях университета, занятия проводятся преподавателями – совместителями, сотрудниками предприятий ИНТЭК. Так, на четвертом курсе по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» из 35 студентов трудоустроены 22 человека, что составляет 63 %, а по профилю «Электрические и электронные аппараты» трудоустроены 54 % обучающихся.

Еще более успешно закрепляются на предприятиях учащиеся магистратуры, по ее окончанию в 2022 году 84 % работают на предприятиях кластера. Такая траектория обучения позволяет осуществить качественный набор в аспирантуру и успешно выполнять исследования по актуальным направлениям развития продуктовых направлений предприятий, реализуя задачи технологической независимости отечественной электротехники и

энергетики. За последние два года в специализированных Ученых советах университета защищено 13 диссертаций на соискание степени кандидата технических наук, из которых 7 человек – работники предприятий ИНТЭЖ, а 3 – сотрудники университета, из которых два человека, после защиты диссертаций, трудоустроились на предприятиях.

В рамках реализации проекта ФИП в Чувашской Республике налажено взаимодействие с Правительством и предприятиями кластера по определению потребности и профиля требуемых кадров. Показано, что по статистическим данным о численности работающих в отрасли можно прогнозировать укрупненные показатели потребности в высококвалифицированных кадрах по направлениям подготовки. Изучение рынка труда по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника в республике показывает не достаточное количество выпускаемых специалистов. Однако, количественный и качественный став абитуриентов региональных школ не позволяют снять нарастание дефицита инженерных кадров. Это требует глубокого изучения ранней профессиональной ориентации в соответствии с профилями рынка труда в регионах и обеспечения достаточности качественной и количественной подготовки выпускников в школах.

Для повышения эффективности воспроизводства высококвалифицированных кадров в рамках реализации проекта ФИП, взаимодействие образовательных организаций и работодателя с формированием траектории целевой подготовки бакалавров и магистров, а также аспирантов, позволяет с большим эффектом обеспечить трудоустройство по профилю обучения. Происходит накопление и развитие научно-технического потенциала региона в области энергетики и электротехники, но возникает диспропорция между штатными преподавателями и совместителями из-за разного уровня оплаты труда. Это усложняет функционирование выпускающих кафедр, и может привести к сворачиванию научно-исследовательской деятельности, а, следовательно, и снижению качества подготовки специалистов.

В решении ключевого вопроса технологической независимости России, развития научно-технологического потенциала регионов, необходимо согласование ресурсной поддержки базовых

вых отраслей экономики, научных школ и образовательных учреждений, поставляющих кадры.

В данной статье не рассмотрены вопросы, решаемые в рамках проекта управления образовательной траекторией обучающихся, совершенствования и постановки новых курсов, создания и модернизации учебно-научных лабораторий во взаимодействии с предприятиями-партнерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 31.12.2015 № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».
2. Региональный стандарт кадрового обеспечения промышленного (экономического) роста Версия 2.0.
3. Приказ Минобрнауки России от 22.03.2019 N21н «Об утверждении Порядка формирования и функционирования инновационной инфраструктуры в системе образования».
4. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года, утверждена распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. №1523-р.
5. Методика разработки прогноза баланса трудовых ресурсов, утв. Приказом Минздравсоцразвития России от 29.02.2012 №178н.
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации об утверждении «Концепции подготовки педагогических кадров для системы образования на период до 2030 года», №1688 от 24.06.2022 года.

Авторы:

Афанасьева Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Фёдорова» ЧГУ имени И.Н.Ульянова. Окончила Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 2004 году. E-mail: olga_afanaseva@mail.ru.

Данилов Александр Михайлович, аспирант 1 года обучения кафедры «Теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики» Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, исполнительный директор ассоциации «Инновационный территориальный электротехнический кластер Чувашской Республики». E-mail: danilov83@inbox.ru.

Казакова Екатерина Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Фёдорова» ЧГУ имени И.Н.Ульянова. Окончила Чу-

ваишский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1997 году.
E-mail: kazakova.eu@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета энергетики и электротехники, профессор кафедры «Электротехнологий, электрооборудования и автоматизации производств» Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. E-mail: kovenergy@mail.ru.

Шестакова Лилия Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Федорова» ЧГУ имени И.Н. Ульянова. Окончила Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1993 году. E-mail: lilshestakva @rambler.ru.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ 13.03.02 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ПО ОПЫТУ ПРОВЕДЕНИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТ-ЭКЗАМЕНА ДЛЯ ВЫПУСКНИКОВ БАКАЛАВРИАТА

Мясникова Т.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье рассматривается оценка качества подготовки обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по опыту проведения Федерального интернет-экзамена для выпускников бакалавриата (ФИЭБ). Раскрываются возможности для обучающихся, которые приняли участие в интернет-экзамене. На примере факультета энергетики и электротехники ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» показаны результаты ФИЭБ в 2021 и 2022 гг, отражающие качество подготовки бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.*

***Ключевые слова:** интернет-экзамен, электроэнергетика и электротехника, сертификация выпускников, образовательная программа, измерительные материалы.*

В Федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации» особое место уделяется оценке качества подготовки

обучающихся. Новацией данного ФЗ является проведение такой оценки по инициативе обучающихся, их родителей (законных представителей), а также образовательных организаций [1].

В этом году исполняется восемь лет со дня пилотного запуска федерального интернет-экзамен для выпускников бакалавриата (ФИЭБ). В общей сложности в ФИЭБ приняло участие порядка 47 тыс обучающихся [2, 3].

ФИЭБ реализуется как добровольная сертификация выпускников бакалавриата на соответствие требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника [3, 4].

Педагогические измерительные материалы (ПИМ) по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника имеют комплексный характер и, как правило, не ограничиваются заданиями из нескольких дисциплин. Кроме этого, ПИМы учитывают и различие образовательных программ разных образовательных организаций высшего образования, реализующие программы по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Поэтому была разработана уникальная структура и модель ПИМ для проведения ФИЭБ (рис. 1) [2].

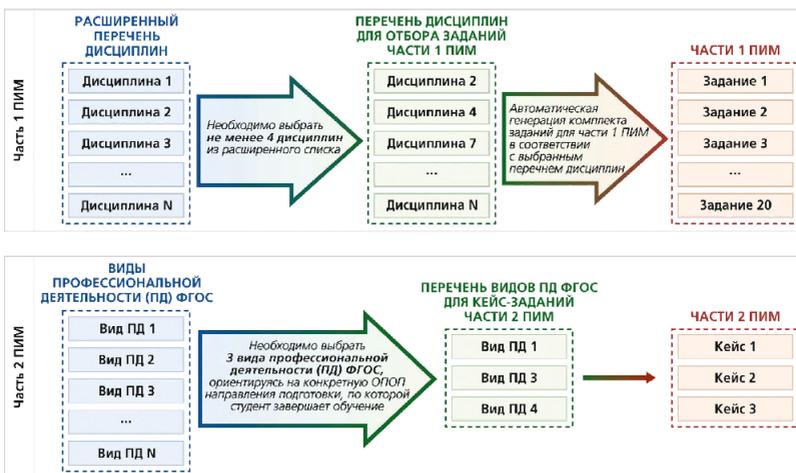


Рис. 1. Структура и модель ПИМ

Задания первой части ПИМ являются полидисциплинарным тестированием на выявление умений решать стандартные, типовые задачи. За каждое правильное задание студент получает два балла. Обучающемуся необходимо выбрать четыре дисциплины из четырнадцати: Безопасность жизнедеятельности, Общая энергетика, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, Силовая электроника, Теоретические основы электротехники, Теория автоматического управления, Техника высоких напряжений, Электрические и электронные аппараты, Электрические машины, Электрические станции и подстанции, Электрический привод, Электроснабжение, Электротехническое и конструкционное материаловедение, Электроэнергетические системы и сети. За первую часть ПИМ можно получить 40 баллов (рис. 2).

Дисциплина «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Задание (укажите не менее двух вариантов ответов)

На энергообъектах ЭЭС, кроме основных защит, устанавливаются резервные защиты с относительной селективностью для ...

Варианты ответов:

- 1) ликвидации повреждений на смежном участке в случае отказа его защиты
- 2) уменьшения времени ликвидации КЗ в ЭЭС
- 3) ликвидации повреждений на защищаемом участке в случае отказа или вывода из работы его основной защиты
- 4) ликвидации повреждений на смежном участке в случае отказа его выключателя
- 5) ликвидации повреждений на защищаемом участке в случае отказа его выключателя

Рис. 2. Пример задания первой части ПИМ

Вторая часть ПИМ представляет собой междисциплинарные кейс-задания, направленная на выявление способностей студента анализировать, обобщать, устанавливать причинно-следственные связи и зависимости между выявленными проблемами. За правильное выполнение кейс-задания студент может набрать 60 баллов (рис. 3).

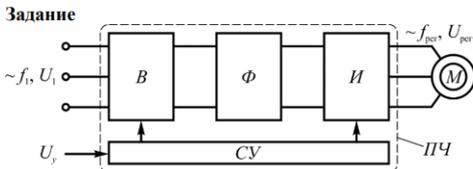
За верное выполнение всех заданий ПИМ можно получить максимально 100 баллов.

В 2021 и 2022 годах по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника приняли участие 34 обучающихся, осваивающих следующие образовательные программы: Электроснабжение – 5 человек, Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети – 4 человека, Релейная защита и автомати-

зация электроэнергетических систем – 16 человек, Электрическое хозяйство и сети предприятий, организаций и учреждений; электрооборудование низкого и высокого напряжения – 4 человека, Электрический привод – 5 человек.

Кейс-задание

(Вид профессиональной деятельности: научно-исследовательская)



Лифтовый механизм оборудован асинхронным электродвигателем M с преобразователем частоты $ПЧ$ с промежуточным звеном постоянного тока, блок-схема которого показана на рисунке (B – выпрямитель; Φ – фильтр звена постоянного тока; I – инвертор). Регулирование скорости вращения производится изменением частоты и величины напряжения.

Частота питающей сети $f_1 = 50$ Гц, линейное напряжение $U_1 = 380$ В. Асинхронный двигатель M с короткозамкнутым ротором имеет номинальную мощность $P = 6$ кВт, число полюсов $2p = 4$, высоту оси вращения $h = 132$ мм, внутренний диаметр рачотки статора $D = 148$ мм.

В процессе наладки электрической части электропривода исследуются характеристики электродвигателя и блоков преобразователя частоты.

Рис. 3. Пример задания второй части ПИМ

По результатам ФИЭБ всем участникам выдаются именные сертификаты: золотые, серебряные, бронзовые, сертификаты участника (рис. 4).

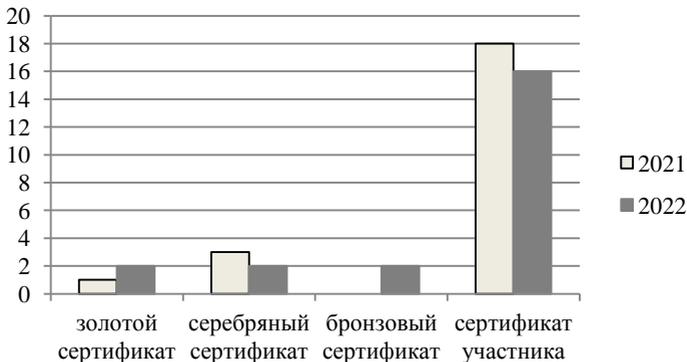


Рис. 4. Распределение студентов по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по уровням сертификатов в 2021-2022 гг

Из 34 участников золотые сертификаты получили три человека: в 2021 году – Петров С.Г. (образовательная программа «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»); в 2022 году – Аркадьев Д.Э. (образовательная программа «Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети») и Иванов К.Э (образовательная программа «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»).

Серебряные сертификаты получили пять обучающихся: в 2021 году – Гришин Д.Е. (образовательная программа «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»); Шушпанов С.В. (образовательная программа «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»); Кузнецов Д.В. (образовательная программа «Электропривод и автоматика»); в 2022 году – Гаврилов А.А. (образовательная программа «Электроснабжение») и Григорьев А.Г. (образовательная программа «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»).

Бронзовые сертификаты получили два человека: в 2022 году – Никифоров А.В. и Осипов Т.А., оба обучались по образовательной программе «Электрическое хозяйство и сети предприятий, организаций и учреждений; электрооборудование низкого и высокого напряжения».

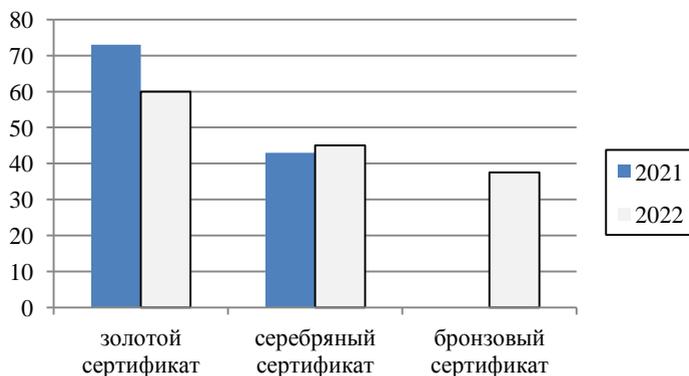


Рис. 5. Средний балл ФИЭБ по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по уровням сертификатов в 2021-2022 гг

Средний балл ФИЭБ по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по уровням сертификатов в 2021–2022 гг представлен на рис. 5.

Суммарное количество именных золотых, серебряных, бронзовых сертификатов ФИЭБ, полученных студентами по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника от общего числа именных сертификатов для данного направления подготовки в 2021 году составило 22,2 %, в 2022 году – 37,5 %.

При приеме на обучение по программам магистратуры обучающиеся, получившие золотой или серебряный сертификат могут получить дополнительные баллы. Так, по итогам приема в 2021 своим сертификатом воспользовались 50 % обучающихся, а по итогам 2022 года – 100 %.

Большинство обучающихся, воспользовавшиеся своим сертификатом, выбирали обучение по программам магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (рис. 6).

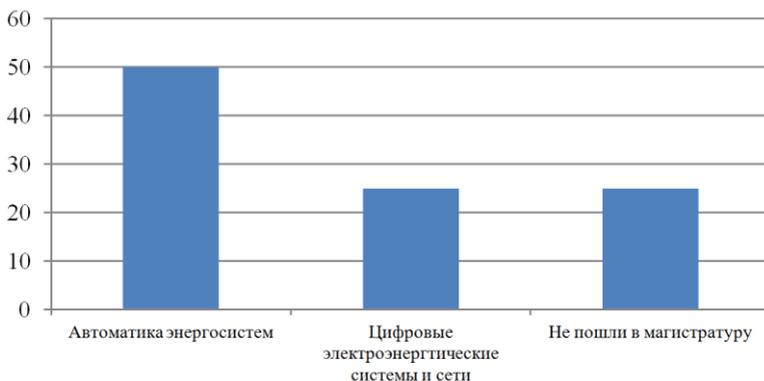


Рис. 6. Распределение обучающихся, имеющих золотой или серебряный сертификат по программам магистратуры

В заключении надо отметить, что независимая оценка качества образования становится неотъемлемой частью образовательного процесса. В целом для образовательной организации, ФИЭБ становится элементом внешней независимой оценки ка-

чества подготовки обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маслихина В.Ю., Богатырев Е.Д., Колесникова Т.Г., Порядина О.В.* Оценка качества подготовки студентов по направлению подготовки Государственное и муниципальное управление по опыту проведения федерального Интернет-экзамена для выпускников бакалавриата // Открытое образование. 2016. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-podgotovki-studentov-po-napravleniyu-podgotovki-gosudarstvennoe-i-munitsipalnoe-upravlenie-po-opytu-provedeniya> (дата обращения: 01.11.2022).

2. Пылин В.В. ФИЭБ: история с продолжением. URL: <https://akvobr.ru/new/publications/414> (дата обращение 31.10.2022).

3. Федеральный интернет-экзамен для выпускников бакалавриата (ФИЭБ). URL: <https://bakalavr.i-exam.ru/> (дата обращение 01.11.2022).

4. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 электроэнергетика и электротехника. URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-13-03-02-elektroenergetika-i-elektrotehnika-144/> (дата обращение 01.11.2022).

Автор

Мясникова Татьяна Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент, заместитель декана по учебной работе, доцент кафедры, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». E-mail: tatyana-masnikova@yandex.ru.

ВОПРОС КВАЛИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА, ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ЦИФРОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ

Димитриев Р.А., НОУ НОЦ ЭКРА, г. Чебоксары, Россия

Димитриев А.А., аспирант, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Поднимается достаточно острая проблема отечественной энергетики – темп цифровизации всего цикла производства, передачи и потребления электрической энергии намного превышает скорость подготовки кадров. Выявлены проблемы в части переподготовки обслуживающего персонала.*

***Ключевые слова:** компетенции, цифровизация, проблемы повышения квалификации, обслуживающий персонал, цифровые подстанции.*

Развитие технологии в современном мире идет непрерывно, постоянно ускоряясь в своем процессе эволюции. Этому способствует внедрение новых технологий во всех отраслях, в частности в электроэнергетике. Актуальной темой науки и производственной деятельности человека в данный момент является «цифровизация» энергетической отрасли. Ряд указов президента РФ, а именно: 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы» и от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в которых определены национальные цели и стратегические задачи развития Российской Федерации на период до 2030 года, а также распоряжения Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р, утверждающего программу «Цифровая экономика Российской Федерации» сподвигли компанию ПАО Россети на разработку концепции “Цифровая трансформация 2030” [1].

Основные принципы цифровой трансформации в рамках электроэнергетической отрасли [1]:

– обеспечение наблюдаемости сетевых объектов и режимов их работы;

- автоматизация управления технологическими и корпоративными процессами;
- применение принципов автоматизированного риск-ориентированного управления;
- построение цифровой СИМ-модели по единому отраслевому стандарту и информационное взаимодействие со всеми контрагентами (сети, потребители и другие субъекты электроэнергетики);
- интеграция и объединение различных информационно-технических систем на иерархических уровнях;
- интеграция сетевых информационных (технологических и корпоративных) систем;

Перечисленные выше принципы задают основной вектор технологического развития для всех предприятий страны.

Согласно стандартам ФСК ЕЭС цифровая подстанция (ЦПС) — это подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами ПС, а также управление работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850 [2]. В свою очередь, МЭК 61850 — стандарт «Сети и системы связи на подстанциях», описывающий форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов объекта электроэнергетики и свод правил для организации событийного протокола передачи данных [3].

Начиная с 2010 года, в нашей стране было реализовано и реализуется на данный момент времени более 100 подстанций, построенных на основе одной из архитектур ЦПС. Взамен физически устаревшему оборудованию, основанному на электро-механической и микроэлектронной компонентной базе, приходят новые цифровые устройства релейной защиты и автоматики. Они обладают более лучшими характеристиками: надежность, быстродействие, чувствительность. Ко всему прочему, стоит отметить, что данные устройства повышают наблюдаемость процессов работы подстанции, путем передачи данных о контролируемом присоединении по цифровым каналам передачи данных [4]. Рост количества ЦПС в России приведен на рис. 1 [5, 6].



Рис. 1. Темпы развития реализации объектов ЦПС в России за 2013-2022 года

В настоящее время высшее образование по электроэнергетическим специальностям, таким как «Релейная защита и автоматика», «Электроснабжение» можно получить в более чем 19 высших учебных заведениях страны. Но ни в одном из них не проводят целенаправленную подготовку специалистов, имеющих высокую степень готовности сразу после окончания высшего учебного заведения заниматься проектированием/наладкой/эксплуатацией цифровых подстанций [7, 8]. При этом, чтобы достичь достаточной компетентности выпускаемого специалиста, нужно обладать не только знаниями релейной защиты, но и хорошо разбираться в системах связи, программировании и работе локальных вычислительных сетей. Самоподготовка инженерно-технического персонала является сложной задачей, так как информация о цифровых технологиях имеет сложно структурированный вид, либо не имеется в свободном доступе.

В связи с этим задача повышения квалификации и компетентности персонала в части организации работ цифровых защит и обмена данными ложится на организации дополнительного профессионального образования. На данный момент, в данной сфере есть несколько явно-выраженных проблем.

Почти каждый научно-образовательный центр или организация повышения квалификации организована на базе предприятия производителя оборудования релейной защиты и автома-

тики на ЦПС. Это означает, что на данных курсах, специалистов обучают только принципам работы с оборудованием данного производителя. В условиях, если одна организация будет обслуживать несколько электроэнергетических объектов с устройствами цифровых защит различных производителей, то непременно возникнет проблема понимания тонкостей работоспособности конкретного терминала.

Высокий порог вхождения в сферу цифровых технологий для обслуживающего электроэнергетические объекты персонала обусловлен тем, что основной возрастной контингент сотрудников тяжело, и зачастую невозможно «подружить» с компьютером. Понятийный аппарат стандарта МЭК 61850 воздействует отталкивающе на технический персонал, который практически всю свою трудовую деятельность работал с ручным инструментом и простыми средствами проверки устройств релейной защиты.

С целью решения данных проблем Научно – образовательный центр «ЭКРА» в 2021 году успешно реализовал курс по цифровым технологиям для наладочного и оперативного персонала. Менее чем за год с начала внедрения курса обучение прошли более 50 человек с разных регионов, с разной степенью компетентности в части понимания принципов работы цифровых устройств РЗА и локальных вычислительных сетей.

В таблице указаны данные количества заездов и человек, прошедших обучение по курсу “Основы технологии «Цифровая подстанция» для наладочного и оперативного персонала”.

Таблица

Оценки обучающихся на курсе ЦПС в НОУ НОЦ «ЭКРА»

Номер заезда	Оценка на экзамене		
	Отлично	Хорошо	удовлетворительно
1	4	2	2
2	3	4	0
3	1	6	1
4	4	0	0
5	2	3	2
6	1	3	0
7	3	3	1
8	3	3	1
9	2	3	0

По результатам итогового экзамена можно сделать следующий вывод – в течении двухнедельных занятий слушатели получают необходимый минимум для работы в сфере ЦПС.

В ходе проведения годового экспериментального курса по подготовке кадров в сфере эксплуатации «Основы технологии «Цифровая подстанция» для наладочного и оперативного персонала» были выявлены следующие проблемы:

- слабый уровень владения персональным компьютером и цифровыми устройствами;
- отсутствие навыков, знаний, компетентности в части организации и функционирования цифрового обмена данными, цифровых защит и сетевого обмена данными;
- отсутствие единой государственной нормативной базы в части ЦПС.

Высокий порог вхождения в сферу цифровых технологий для обслуживающего электроэнергетические объекты персонала обусловлен тем, что основной возрастной категорией являются специалисты старше 45 лет.

Следующей задачей будет сравнение компетентности обучающихся на начальном этапе и на выходном квалификационном экзамене. Так же, будет произведено анкетирование для оценки саморефлексии прошедших обучение специалистов. На основе обратной связи необходимо подготовить и адаптировать для широкого круга учащихся материалы для повышения квалификации в сфере цифровых подстанций и сопутствующих технологий

Выводы

1. Выполнена постановка проблем и задач в сфере повышения квалификации эксплуатационного и наладочного персонала подстанции.

2. Выявлены наиболее проблемные вопросы, которые «тормозят» процессы перехода к цифровизации электроэнергетики.

3. Дальнейшей и конечной задачей является разработка адаптированных программ обучения, методических материалов и учебных пособий, которые будут подготовлены с учетом перечисленных выше проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция цифровая трансформация 2030 [Электронный ресурс] / Россети – Электрон. дан. – URL: <https://www.rosseti.ru/> (дата обращения: 15.10.2022).

2. IEC 61850–7-4 (2010). Communication networks and systems for power utility automation. Part 7–4: Basic communication structure. Compatible logical node classes and data object classes.

3. Опыт наладки и эксплуатации МП устройств РЗА на ЦПС / Е.П. Егоров, И.А. Кошельков, М.А. Хе, Н.А. Тойдеряков // Релейщик. – 2022. – № 2(43). – С. 20–25. – EDN TGTPUU.

4. Опыт работы с испытательными установками на цифровой подстанции / Н.А. Тойдеряков, Е.П. Егоров, М.А. Хе, И.А. Кошельков // Сборник докладов научно-технической конференции: V Международная научно-практическая конференция, Чебоксары, 23–26 апреля 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 45–47. – EDN SJUGES.

5. Горелик Т.Г. Цифровая подстанция: подходы к реализации / Т.Г. Горелик, О.В. Кириенко // Энергетик. – 2013. – № 2. – С. 15–17. – EDN QAMDNF.

6. Курьянов В.Н., Цифровые подстанции. Опыт реализации / В.Н. Курьянов, Л.Р. Куш, Н.Р. Горбунова, В.В. Цыпик // Наука, образование и культура. 2018. №3 (27).

7. Гусев Ю.П. Методическое и техническое обеспечение для обучения основам организации автоматизированных систем управления оборудованием подстанций / Ю.П. Гусев, А.М. Поляков, А.В. Трофимов, // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. № 3.

8. Лизунов И.Н. Современные IT-технологии в образовательном процессе в средних и высших технических учебных заведениях / И.Н. Лизунов, М.Р. Гайнутдинов, А.Р. Бикмурзин // Вестник КГЭУ. 2015. №2 (26).

Авторы:

Димитриев Роман Анатольевич, старший преподаватель, Научно-образовательный центр ЭКРА. Окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ в 2015 году. E-mail: Dimitriev_ra@ekra.ru.

Димитриев Антон Анатольевич, аспирант, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Окончил магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ в 2015 году. E-mail: Meterling21@mail.ru.

ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА ПОДСТАНЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Петров Д.А., Позин Д.О., Музафаров А.Ю., МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Боровских Д.И., МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

***Аннотация.** В работе затрагивается несовершенство методов подготовки будущих специалистов. Произведён анализ внедрения виртуальной реальности в систему образования и выявлены достоинства и недостатки.*

***Ключевые слова:** виртуальная реальность, 3D-тренажер, симулятор, моделирование, электроэнергетика, VR-тренажер, ЗРУ, система образования.*

Обоснование необходимости совершенствования способа освоения материала в области энергоснабжения

Быстроразвивающаяся отрасль электроэнергетики предъявляет повышенные требования к квалификации обслуживающего персонал, так на него возлагается большая ответственность, как на элемент технологического процесса. Людям свойственно ошибаться, как следствие, нужно учитывать человеческие факторы в данной отрасли. Так, развитие конструктивного исполнения электрооборудования в электроустановках достигло высокого уровня относительно своей эффективности, но, не смотря на уровень развития технологий, количество аварий в электроустановках достаточно большое, которые влекут за собой потери человеческих жизней и большой экономический ущерб [1]. Подавляющее большинство аварий в электроустановках происходят по вине персонала как видно из графики, изображенного на рисунке.

Иными словами, в результате развития технологий единственным уязвимым звеном в цепочке производства, преобразования, распределения и потребления электроэнергии может оказаться сам человек. Эту обострившуюся проблему можно решить различными технологиями. Одним из направлений является «индустрия 4.0», которая предлагает внедрять виртуальную и дополненную реальность в процессы обучения.



Рисунок. Процентный график нештатных ситуаций на объектах 6-10 кВ в зависимости от причины возникновения аварии

Оценивая традиционные методы подготовки инженерных кадров, исследователи отмечают старые методы образования и низкий уровень качества приема на специальности, отсутствие коммуникативных навыков и критического мышления [2]. В своей работе, Сафонов С. В. Рассматривает профессионально – личностное становление будущего инженера в стенах вуза. Он пришел к выводу, что за последние десятилетия в системе инженерного образования России появились серьезные проблемы, без решения которых обеспечить устойчивое развитие инженерного образования в стране будет достаточно сложно [3].

В быстроразвивающемся современном мире требуется быстрое, а главное качественное, обновление учебно-методической литературной базы. С каждым днем на свет появляются новые технологии и появляется необходимость адаптации под них. Тогда как в учебных заведениях учебный процесс проходит по старым книжкам. Требуется большое количество времени для разработки новых методических указаний и методов обучения. Ведь то, что вчера было абсолютно новым и актуальным, завтра может стать пережитком прошлого.

Решения некачественного обучения на примере VR-тренажера

На смену имеющимся технологиям пришла виртуальная реальность.

Наблюдая за тенденциями можно сделать вывод, что VR с каждым днем набирает все большую популярность и становится доступнее. Внедрение технологий виртуальной реальности в процесс обучения позволит на выходе из учебного заведения,

подготовить качественные кадры для предприятий. С помощью VR, во время обучения, можно оттачивать навыки и получать опыт необходимый для дальнейшего трудоустройства и качественного выполнения рабочих обязанностей.

Самым важным и ответственным моментом в создании VR-тренажёра является проработка мельчайших деталей. Создать просто модель, которая будет имитировать реальный объект недостаточно. Нужно добиться такого уровня детализации, чтобы было ощущение работы с реальным объектом, с целью установления прочных привычек для гладкой выполнения коммутационных операций на подстанциях обслуживающий персонал или обученные специалисты, целесообразно закрепить знания наглядной тренировкой на специализированных тренажеры [4].

Обратная сторона предложенной технологии

Имеется и негативная сторона медали данного решения. Косвенно связанный с этим момент заключается в следующем. Ценность низко- и среднеквалифицированного труда будет резко снижена, что может привести к снижению доходов и материальных благ среднего класса. Переход на высококвалифицированный труд довольно сложен и будет доступен не всем. Средний класс составляет широкую прослойку населения страны и снижение доходов среднего класса может привести к расшатыванию политической системы в стране. Отсюда вытекает и следующая проблема – имеется предпосылка, что вызванная в результате продвижения этой идеи, низкая покупательская способность населения, приведет к низкому спросу на продукцию, и рентабельность многих предприятий, производящих не жизненно важных продуктов, окажется под вопросом. Но это позволительный риск, чтобы человеческое развитие не находилось в стагнации.

Также будет наблюдаться ощутимая разница между странами, успешно внедривших подобные технологии, и отстающими в этом плане. Мировое богатство будет сосредоточено у стран победителей, ведь они будут на порядок конкурентоспособнее. Многие предприятия, которые не смогут адаптироваться под новые возможности закроются, независимо от их предшествующего долгого успеха.

В связи с тем, что данная технология связана с данными, интернетом, цифровыми технологиями, то появляется и угроза информационной безопасности в лице угрозы хакерских атак, вывод из строя оборудования, хищение секретной информации военных производств, а также информации, обладающей коммерческой тайной предприятия, ведь большинство проектов будет ориентирован на конкретные предприятия, а некоторые из них имеют стратегическую важность. Поэтому требуется реализация средств информационной безопасности и антивирусных обеспечений. Однако в настоящее время даже крупнейшие компании, такие как «Rock star games», не в состоянии защитить себя от злоумышленников. Так столь могущественная компания в сою очередь «отдала» исходный код своего продукта в руки злоумышленникам.

Также опасностью является то, что автоматизация заменит умственную и физическую деятельность людей, производственные работники будут лишь наблюдать за роботами и тем самым у людей может атрофироваться память и другие функции мозга. Необходимо вовлекать людей в решение различных задач для всеобщего развития, а не давать им просто алгоритм действий, который он глухо должен выполнить.

Подводя черту, можно сказать, что данное направление не лишено недочётов, но с должной реализацией можно получить весомый результат от его внедрения.

В данный момент мы стоим на пороге совершенно нового непонятого этапа в развитии всей образовательной сферы. В случае выхода из Болонской системы появится возможность полностью изменить подход к образованию и вводить новые технологии. Сейчас у нас есть возможность сделать первые шаги навстречу технологиям будущего и оказаться в числе первых.

Выводы

Можно сделать вывод, что симуляторы и VR тренажеры с каждым днем находят все более широкое применение в образовании. Тренажеры, в которых моделируется профессиональная деятельность, очень эффективны для обучения. Обучающийся приобретает опыт и навыки, которые необходимы для дальнейшей работы на реальных энергетических объектах [5]. С момента появления технологии виртуальной реальности в современ-

ном образовании и обучении произошли большие изменения. Но не смотря на отрицательные аспекты данной технологии, она проводит углубленное изучение его фундаментальной причины, то есть метод виртуального обучения имеет явные преимущества перед традиционным методом обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619531 Российская Федерация. VR-ENERGY [Текст] заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – № 2022618428; заявл. 06.05.2022; опубл. 23.05.2022.

2. Бондаренко Н.В. Оценка работодателями качества профессиональной подготовки работников / Н.В. Бондаренко, М.Д. Красильникова // Вопросы образования. – 2005. – № 1. – С. 264–275.

3. Сафонов С.В. Профессионально-личностное становление будущего инженера в образовательном процессе вуза / С.В. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 10-2. – С. 96–98.

4. Крастев Г. Имитатор человеческих ошибок на подстанциях систем электроснабжения [Текст] / Г. Крастев и Т. Георгиев // 7-я Международная конференция по энергоэффективности и сельскохозяйственной инженерии. – 2020. – С. 1–3.

5. Мясоедов Ю.В. Оперативные переключения: Учебное пособие [Текст]: // Ю.В. Мясоедов, Л.А. Мясоедова, И.Г. Подгурская. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. – 293 с.

Авторы:

Петров Дмитрий Александрович, студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова.
E-mail: dngnmstrs@gmail.com.

Позин Данил Олегович, студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова.
E-mail: pozindanila@gmail.com.

Музафаров Азамат Юнирович, студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, МГТУ им. Г.И. Носова.
E-mail: muzafaroff@gmail.com.

Боровских Данил Иванович, студент кафедры бизнес информатики и информационных технологий, МГТУ им. Г. И. Носова.
E-mail: borovskixdanil@gmail.com.

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ: ОТ КАЖДОГО ПО СПОСОБНОСТЯМ

Малафеева А.А., Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия.

***Аннотация.** Представлен анализ современных подходов к автоматизации с учетом требований гармоничного взаимодействия людей и автоматики. Показана возрастающая роль человеческого фактора в человеко-машинных системах. Рассмотрены особенности взаимодействия людей и автоматики в условиях качественного обновления средств управления: информатизации, применения новых средств контроля, управления и телекоммуникаций. Выполнен анализ основных особенностей выполнения различных функций операторами и автоматикой. Рассмотрены процессы управления в социально-технической команде.*

***Ключевые слова:** автоматизация, управление, человеческий фактор, эффективность, надежность, безопасность, цифровой двойник*

Введение

В последние десятилетия в области автоматизации промышленных и других сложных систем произошла очередная революция, качественно изменившая процессы управления [1 - 3]. Компьютеры, Интернет, искусственный интеллект, спутниковые системы связи и др. способствуют повышению производительности, качества, эффективности и безопасности за счет широкого использования автоматического управления. Это относится ко всем без исключения системам, например, машинам в горной промышленности, транспорту, электроэнергетике, машиностроению и др. При этом повышение уровня автоматизации в большинстве случаев не приводит к замене людей, взаимодействующих с машинами [1, 2, 4]. Автоматизированные системы при повышении уровня организации управления становятся более сложными. Современная автоматизация, обеспечивающая высокий уровень информирования человека в процессе работы, фактически не уменьшает нагрузку оператора, но изменяет ее характер [5 - 7].

Это влечет за собой усложнение структур диспетчерского управления и определяет потребность в организации нового ка-

чества взаимосвязи и сотрудничества между человеком и машиной. Оператор взаимодействует с процессом через один или несколько уровней компьютеров, на которых реализованы человеко-машинный интерфейс, средства автоматизации и поддержки принятия решений. Результатом эволюции социально-технических систем стал переход от концепции взаимодействия человека–оператора с машиной к парадигме социально-технического взаимодействия [8 - 10]. Функциональные возможности хорошо продуманного взаимодействия человека и машины приобретают первостепенное значение в усовершенствованном управлении технологическими процессами вследствие степени автоматизации, а также увеличения расширенных технических возможностей автоматизации [1]. При этом особый интерес представляют разделение функций и организационная автоматизация.

В работе представлены результаты анализа современного состояния автоматизации с учетом проявлений человеческого фактора и взаимодействия людей с техническими системами.

Организация человеко-машинного взаимодействия

Организационная система, включающая людей и машин, в том числе с интеллектуальным управлением, в результате взаимодействия компонентов разной природы, приобретает новые свойства по сравнению со свойствами образующих ее элементов. Эффективность системы определяется уровнем управления, предусматривающим распределение функций, контроль функционирования, анализ результатов и прогнозирование. Целью организации взаимодействия является эффективная интеграция функций человека и машины таким образом, чтобы их совместная работа обеспечивала оптимальное решение различных задач [1, 11, 12]. В идеале симбиотическая человеко-машинная система будет обладать интеллектом, превосходящим интеллект человека, и обрабатывать данные так, как не способна никакая машина [12].

В [13] выделено четыре этапа взаимодействия человека и автоматики: сбор информации, анализ информации, принятие решений, выбор действий и их реализация. Технические системы способны заменить человека в большом количестве функ-

ций. При этом принципиальные различия людей и автоматики, делающие их незаменимыми друг другом, определяют качественно новые свойства при взаимодействии. Автоматика имеет приоритеты при выполнении повторяющихся рутинных операций, точности выполнения действий, скорости выполнения различных процедур обработки данных, сбору, обработке и хранению больших объемов информации, адаптации, прогнозирования. Качество и надежность технических средств определяется заложенными при проектировании решениями и состоянием в текущий момент времени. При этом в течение жизненного цикла возможно расширение функциональных возможностей и обучение машин. Действия автоматических систем не имеют субъективной и эмоциональной составляющих. В числе причин отказов и снижения характеристик отсутствуют корысть, злые умыслы, месть и др. Невозможно возложить ответственность за аварии и ошибки на технику.

Человеку в системе свойственны творческое мышление, причинно-следственный анализ, интуиция, расстановка приоритетов, стратегическое мышление, планирование, использование долгосрочной и краткосрочной памяти. Работа, выполняемая людьми, сильно ограничена их физиологическими и биомеханическими возможностями. Эффективность принятия решений человеком зависит от его личности и мотивации, уровня знаний, подготовки, природных способностей и возраста. При этом на принятие решений может влиять предвзятость оценок и рассуждений. Такие предубеждения могут быть результатом недостатка знаний или осведомленности о предшествующих событиях, принятие решений на основе догадок, эмоций, личного опыта или советов. Другим негативным фактором является утомляемость человека, и, как следствие, вариации его характеристик во время работы. Усталость оператора влияет на безопасность системы. Вредительское функционирование, состоящее в преднамеренном изменении цели системы лицом или группой лиц, принимающих решения, способно привести ее к разрушению. По оценкам, приведенным в [14], 80% - 90% аварий в техногенных системах связано с ошибками операторов.

Разработка новых систем предполагает взаимодействие нескольких участников и требует организации целенаправленных

сценариев управления, которые классифицируются на основе анализа накопленных данных.

Управление в социально-технической команде

Социально-техническая команда, как и любая организация, предусматривает систему четких правил, регулирующих работу и взаимодействие компонентов в разных ситуациях. Критерии эффективности задаются при проектировании людьми и используются при эксплуатации для оценивания и сравнения показателей достижения целей. В этих условиях должны быть решены вопросы организационного подчинения, доверия, оперативного распределения функций и нагрузок, а также контроля выполнения функций.

Новая технология цифровых двойников способна обеспечить понятное для всех участников представление процесса управления в разных ситуациях. Цифровой двойник может работать в качестве виртуального члена команды при оптимизации управления ресурсами в сложных, повседневных или аварийных ситуациях, контролировать процессы, обеспечивать высокий уровень взаимодействия, в первую очередь, в ситуациях, связанных с потерей осведомленности о режиме.

При адекватной идентификации состояния системы, потоки данных и уровень автоматизация могут динамически перераспределяться между людьми и автоматикой в зависимости от целей управления и изменениях в резервах операторов для эффективного достижения целей управления. Например, в критических ситуациях, когда оператор нуждается в максимальной поддержке, автоматика должна увеличивать объем выполняемых функций для снижения операторской загрузки. Автоматизация со смешанной инициативой позволяет рационально использовать функции людей и вычислительных систем для достижения целей управления.

Контроль состояния, диагностика и прогнозирование – важнейшая функция человеко-машинной системы. Вопросы мониторинга технических компонентов широко используются в современных системах [1]. Для оценки состояния операторов предлагаются различные способы, основанные на контроле изменений в электроэнцефалографии, вариабельности сердечного

ритма, электрокардиограммы, пульсоксиметрии, изменении осанки, кожно-гальванической реакции, температуры тела, электроокулографии, пупилометрия, отслеживании взгляда. Специальные датчики интегрируются в датчики когнитивного состояния, которые дают точную классификацию рабочей нагрузки и других показателей когнитивного состояния, например, усталости, снижения бдительности, невнимательности или умственной и сенсорной перегрузки в режиме реального времени путем отслеживания изменений в поведенческих и физиологических моделях человека [2].

Заключение

В современной технике управления изменяется положение человека в автоматизированном комплексе. Организационная система, включающая людей и машин, в том числе с интеллектуальным управлением, в результате взаимодействия компонентов разной природы, приобретает новые свойства по сравнению со свойствами образующих ее элементов. Целью организации взаимодействия является эффективная интеграция функций человека и машины таким образом, чтобы их совместная работа обеспечивала оптимальное решение различных задач. Важнейшим условием эффективного внедрения новой техники является обеспечение гармоничного взаимодействия человека и автоматики. Этот критерий должен быть доминирующим при проектировании новых систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малафеев С.И.* Эргатическая мехатронная система карьерного экскаватора: новые технические решения и человеческий фактор / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева // Автоматизация в промышленности, 2020, № 1. – С. 10–14.
2. *Boy G.A. (Editor).* The handbook of human-machine interaction. A human-centered design approach. Publisher: Ashgate, UK 2009, 478 p. ISBN: 978-0-7546-7580-8.
3. *Доэрти П.* Человек + машина. Новые принципы работы в эпоху искусственного интеллекта // П. Доэрти, Дж. Уилсон / Пер. с англ. – М., Манн, Иванов и Фербер, 2019. – 280 с.
4. *Цибулевский И.Е.* Человек как звено следящей системы. – М., Наука, 1981. – 288 с.

5. *Scibilia A.* Human Control Model Estimation in Physical Human–Machine Interaction: A Survey // A. Scibilia, N. Pedrocchi, L. Fortuna. *Sensors* 2022, 22, 1732, pp. 1 – 26. <https://doi.org/10.3390/s22051732>.

6. *Hu W.-L., et al.* Computational Modeling of the Dynamics of Human Trust During Human-Machine Interactions. *IEEE Transaction on Human-Machine Systems*, 2018, DOI: 10.1109/THMS.2018.1874188.

7. *Johannsen G.* Human-Machine Interaction // *Control Systems, Robotics and Automation. Encyclopedia of Life Support Systems. – Volume XXI: Elements of Automation.* Edited by *H.D. Unbehauen*, EOLSS, 2009, pp. 132 – 162, DOI:10.4135/9781446215180.n8.

8. *Billings C.E.* Human-centered Aircraft Automation Philosophy. *naSa Technical Memorandum 103885*, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, US, 1991. – 119 p.

9. *Малафеев С.И.* Человек и автоматика: конкуренция или взаимодействие? / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева // *Автоматизация в промышленности*, 2014, № 12. – С. 8–10.

10. *Hoc J.-M.* From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 2000, Vol. 43, No. 7, pp. 833–843.

11. *Damacharla P., et al.* Common metrics to benchmark human-machine teams (hmt): a review. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 38637 – 38655, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2853560.

12. *Johnson M., et al.* Coactive design: Designing support for interdependence in joint activity, *Journal of Human-Robot Interaction*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 43–69.

13. *Parasuraman R.* A model for types and levels of human interaction with automation // R. Parasuraman, T.B. Sheridan, C.D. Wickens. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, 2000, 30, pp. 286–297. doi: 10.1109/3468.844354.

14. *Salminen S.* Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland // S. Salminen, T. Tallberg. *Ergonomics*, 1996, 39 (7), pp. 980–988.

Автор

Малафеева Алевтина Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. Окончила в 1980 году приборостроительный факультет Владимирского политехнического института. Защитила диссертацию «Моделирование процессов управления в сложных системах с эволюцией: геометрический подход» в 1999 году в МГАТУ им. К.Э. Циолковского. E-mail: amalafeeva@rambler.ru.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СМЕСИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Охоткин Г.П., Павлова А.В., Васильева Л.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** В статье разработаны математические и имитационные модели смесительной установки на LabVIEW и в среде программирования Matlab Simulink. Математическая модель «притока стока» жидкости в смесителе представлена интегрирующим звеном с постоянной интегрирования S . Для обеспечения устойчивой работы системы автоматического управления смесителем работа датчиков уровня жидкости описана гистерезисной характеристикой. Достоверность работы модели подтверждается соответствием скорости изменения кривой $h(t)$ заданному в модели интегратора значению Q/S и порогов переключения датчиков уровня жидкости заданным значениям параметров a и b .*

***Ключевые слова:** математическая модель, имитационная модель, LabVIEW, Matlab, Simulink, АСУТП, смесительная установка, датчик уровня жидкости.*

Введение

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) относятся к классу сложных динамических систем, содержащих большое количество элементов и функциональных подсистем. Для синтеза алгоритмов управления АСУТП необходима динамическая модель технологического процесса. Поэтому задача разработки математической модели технологического процесса актуальна.

При автоматизации непрерывных технологических процессов подсистемой АСУТП выступают системы автоматического управления (САУ), а при автоматизации дискретных технологических процессов конечные автоматы. Динамические процессы в САУ описываются дифференциальными или разностными уравнениями, а в конечных автоматах – автоматными языками [1-3]. Описание подсистем АСУТП различными математическими моделями, работа с большими объемами информации (до

нескольких тысяч сигналов), значительно удлиняют сроки, усложняют проектирование алгоритмов и создание программ управления АСУТП.

Целью настоящей работы является разработка адекватной динамической модели технологического процесса с приемлемой погрешностью, позволяющей как синтезировать алгоритм управления, так и полноценно тестировать разрабатываемые программы управления АСУТП, когда нет доступа к реальному объекту автоматизации.

Для повышения качества и скорости разработки программ широкое применение находят различные инструменты для исследования и моделирования сложных динамических систем: LabVIEW, Matlab, SimInTech и др. Разработка управляющих программ контроллеров АСУТП осуществляется в средах программирования LabVIEW, STEP 7, CoDeSys и т.д. Для визуализации и оперативного управления технологическим процессом применяются различные SCADA-системы: SIMATIC WinCC, Trace Mode и др. Для моделирования технологического процесса в реальном режиме времени нужно организовать взаимодействие между этими программами с помощью программы OPC (Open Platform Communications, взаимодействие открытых платформ). При этом динамическая модель технологического процесса, работающая в реальном масштабе времени, позволит протестировать программу управления АСУТП во всех режимах работы системы.

Разработка математической модели смесительной установки

Простейшая смесительная установка, приведенная в [4], показана на рис. 1. Она состоит из цилиндрического бака с приводом мешалки М, трех электромагнитных клапанов Y1, Y2 и Y3 и трех датчиков SL1, SL2 и SL3 уровня жидкости.

Электромагнитный клапан Y1 служит для заполнения бака жидкостью А, а клапан Y2 – жидкостью Б. Клапаны Y1 и Y2 включаются раздельно, обеспечивая последовательный приток жидкостей А и Б в бак. Для выгрузки смеси, т.е. для стока используется клапан Y3. Сток смеси производится после смешивания жидкостей А и Б. Для смешивания жидкостей включается

привод мешалки М. При этом обеспечивается получение смеси определенной концентрации. Датчики SL1, SL2 и SL3 используются для управления электромагнитными клапанами в функции уровня смеси в баке.

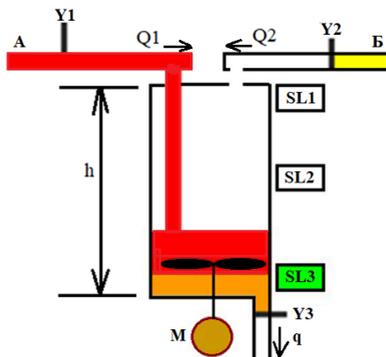


Рис. 1. Смесительная установка

На рис. 1 приняты следующие обозначения: h – уровень смеси в баке, [м]; S – площадь основания бака, [м²]; $Q1$ – объемный расход притока жидкости А, [м³/с]; $Q2$ – объемный расход притока жидкости Б, [м³/с]; q – объемный расход стока смеси, [м³/с].

Изменения уровня жидкостей h в цилиндрической емкости и исток смеси из емкости с площадью основания S можно представить дифференциальным уравнением

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q1(t) + Q2(t) - q(t)}{S}, \quad (1)$$

где $S = \pi R^2$ – площадь основания цилиндрического бака; притоки жидкостей А, Б и сток смеси осуществляется последовательно на определенных интервалах времени, т.е. при наличии притока $Q1$ отсутствуют приток $Q2$ и сток q , т.е. $Q2 = q = 0$, при наличии притока $Q2$ имеем обратную картину, т.е. $Q1 = q = 0$, а при наличии стока q – $Q1 = Q2 = 0$.

Если, например, одновременно открыты все клапаны Y_1 , Y_2 , Y_3 и общий объемный расход притока жидкостей А и Б равен объемному расходу стока смеси, т.е. $Q_1 + Q_2 = q$, то скорость изменения уровня смеси равна нулю $dh/dt = 0$. Постоянство уровня жидкости в баке обеспечивает сохранение материального баланса вещества.

Подвергнув дифференциальное уравнение (1) преобразованию Лапласа при нулевых начальных условиях, составим передаточную функцию математической модели притока жидкости и стока смеси из бака смесителя

$$\frac{h(p)}{Q_1(p) + Q_2(p) - q(p)} = \frac{1}{Sp}. \quad (2)$$

Математическая модель «притока-стока» жидкостей в смесителе представляется интегрирующим звеном с постоянной интегрирования S . Следует помнить, что на входе интегратора на заданном интервале времени действует только один из трех сигналов: Q_1 , Q_2 , q .

Уровень жидкости в баке контролируют три одинаковых датчика SL1, SL2 и SL3. Датчики уровня жидкости с гистерезисной характеристикой обеспечивают устойчивую работу системы автоматического управления смесителем, поэтому выбираем датчики с характеристикой, приведенной на рис. 2.

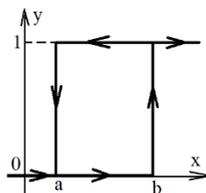


Рис. 2. Характеристика датчика уровня жидкости

Уравнение гистерезисной характеристики представляется в виде

$$F(x; \sigma) = \begin{cases} 1 & \text{для } \begin{cases} x > b, \\ b \geq x > a, \text{ если } \sigma = 1, \end{cases} \\ 0 & \text{для } \begin{cases} x < a, \\ a \leq x < b, \text{ если } \sigma = 0. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

На основе полученных выше соотношений на рис. 3 представлена динамическая модель простейшего смесителя с тремя датчиками уровня жидкости. На входе динамической модели смесителя действуют сигналы: $K1(p)$, $K2(p)$, $K3(p)$, принимающие на определенных интервалах времени значения «0» или «1». Формирование этих сигналов возлагается на систему управления, которые служат для управления электромагнитными клапанами $Y1$, $Y2$ и $Y3$.

Выходные сигналы датчиков обозначены как: s_1 , s_2 и s_3 , они формируются согласно уравнению (3). Пороги включения b и выключения a датчиков устанавливаются исходя из уровня жидкости в баке.

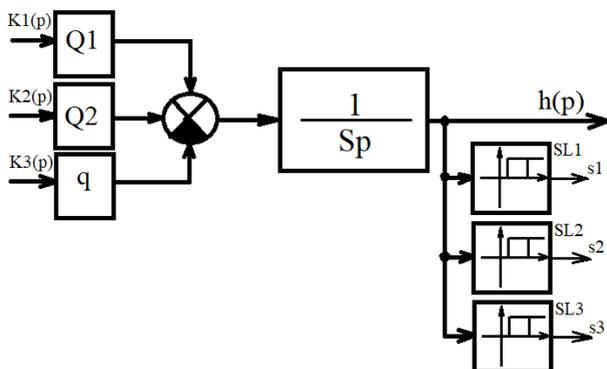
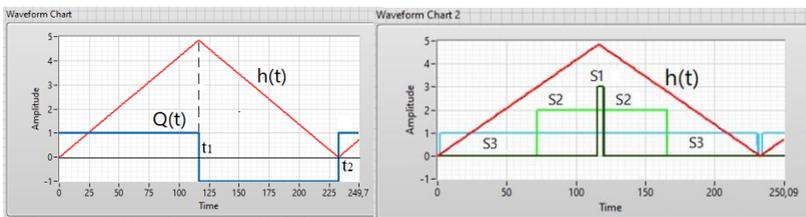


Рис. 3. Динамическая модель смесителя

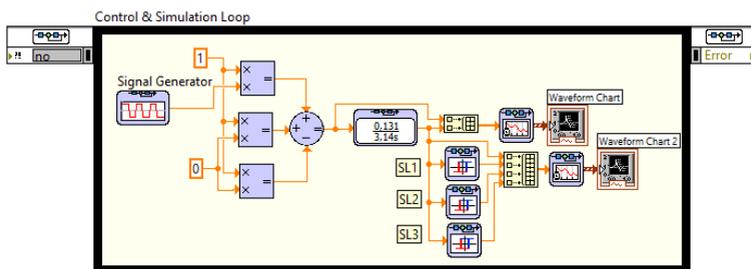
Разработка имитационной модели смесительной установки на LabVIEW

Для определенности примем: $R=1\text{ м}$; $h=5\text{ м}$; $t=120\text{ с}$; $Q=Q1=Q2=q$. Тогда получаем: $S=3,14\text{ м}^2$; $Q=Sh/t=0,131\text{ м}^3/\text{с}$. Также примем следующие пороги переключения датчиков: SL1 ($a=4,7$, $b=4,8$); SL2 ($a=2,8$, $b=3$); SL3 ($a=0,05$, $b=0,08$). Исходя из принятых выше параметров, разработана имитационная модель смесительной установки на LabVIEW [5] и представлена на рис. 4.



a

б



6

Рис. 4. Имитационная модель на LabVIEW

Проверка достоверности работы модели осуществляется тестовым входным сигналом типа меандр $Q(t)$ (рис. 4, *a*). При этом на интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, где сигнал $Q(t)$ имеет положительное значение уровень жидкости $h(t)$ плавно нарастает (приток жидкости), а на интервале времени $t_1 \leq t \leq t_2$, где $Q(t) = -1$ – плавно спадает (сток смеси). Скорость нарастания притока жидкости и спада смеси $dh(t)/dt$ определяется постоянной интегрирования S/Q интегратора, описываемого передаточной функцией (2). На интервале притока жидкости сигнал $h(t)$ линейно возрастает от 0 до ≈ 5 м за 120 с. На интервале стока смеси $h(t)$ линейно спадает от 5 м до 0 за 120 с.

Работа датчиков SL1, SL2 и SL3 на участках притока жидкости и слива смеси представлена на рис. 4, *б*. На участке притока жидкости А, когда включен электромагнитный клапан Y1 (рис. 1), датчик SL3 включается ($s_3 = 1$) при достижении уровня

жидкости в баке $h = 0,08$ м. Уровень жидкости в модели задается порогом включения релейной характеристики датчика SL3 параметром $b = 0,08$.

Когда уровень жидкости А в баке достигает 3 м включается датчик SL2 (на рис. 4, б принято, $s_2 = 2$). При этом выключается электромагнитный клапан Y1, включается электромагнитный клапан Y2 (рис. 1) и начинается приток жидкости Б в бак.

Когда суммарный уровень жидкости (А+Б) в баке достигает $h = 4,8$ м включается датчик SL1 (на рис. 4, б принято $s_1 = 3$). При этом выключается электромагнитный клапан Y2 и включается привод мешалки М (рис. 1) на фиксированное время.

Далее рассмотрим работу датчиков SL1, SL2 и SL3 на участке слива смеси, когда включается электромагнитный клапан Y3 (рис. 1). Когда смесь в емкости спадает до $h = 4,7$ м датчик SL1 выключается ($s_3 = 0$, рис. 4, б). Уровень жидкости в модели задается порогом выключения релейной характеристики датчика SL1 параметром $a = 4,7$.

Продолжается дальнейший спад уровня смеси в баке. Когда уровень смеси в баке достигает $h = 2,8$ м датчик SL2 выключается, т.е. $s_2 = 0$. При дальнейшем спаде уровня смеси в баке до $h = 0,05$ м датчик SL3 выключается ($s_3 = 0$).

Представленные на рис. 4, а и б кривые отображают динамический процесс «притока-стока» жидкости в смесителе с тремя датчиками уровня жидкости. Из анализа приведенных кривых видно, что разработанная модель смесительной установки с датчиками достоверно отображает динамические процессы объекта управления.

Программный код цифровой модели представлен на рис. 4, в. Программа разработана в среде Control Lab Design and Simulation LabVIEW.

При использовании в АСУТП контроллеров других фирм возникает необходимость иметь имитационные модели объектов управления, разработанные в среде Matlab Simulink. Поэтому далее рассмотрим имитационную модель смесительной установки в среде Matlab Simulink.

Разработка имитационной модели смесительной установки на Matlab Simulink

В некоторых случаях при проектировании систем требуется имитационная модель, разработанная в среде Matlab Simulink. Разработанная имитационная модель смесительной установки на Matlab Simulink [6] представлена на рис. 5. Параметры модели Matlab Simulink соответствуют параметрам, принятым в модели LabVIEW.

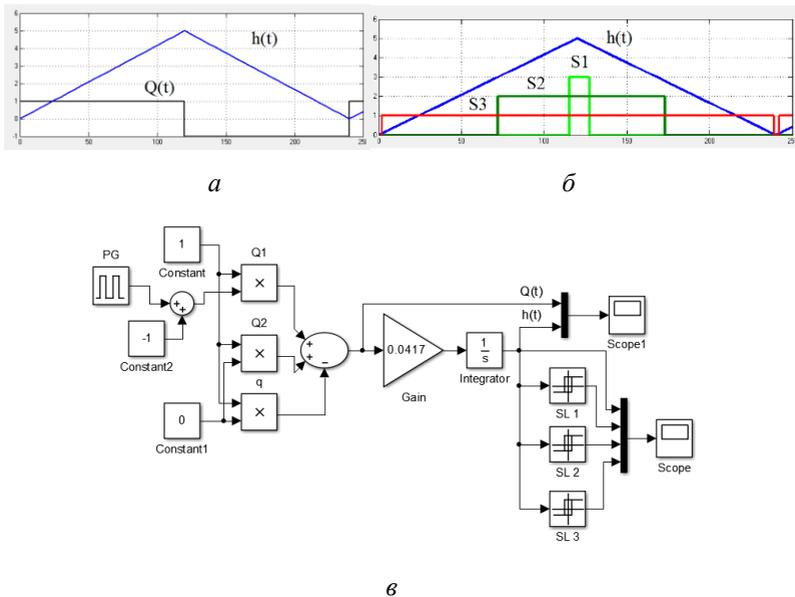


Рис. 5. Имитационная модель на Matlab Simulink

Кривые, приведенные на рис. 5, а и б полностью соответствуют кривым, представленным на рис. 4, а и б. Этими кривыми подтверждается достоверность разработанной модели.

Программный код модели представлен на рис. 5, в. Структурная схема программы аналогична схеме, приведенной на рис. 4, в.

Выводы

1. Разработаны математические и имитационные модели смесительной установки с датчиками уровня жидкости.

2. Достоверность работы модели подтверждается соответствием скорости изменения кривой $h(t)$ (5 м за 120 с, рис. 4, а и 5, а) заданному в модели интегратора значению $Q/S = 0,0417$ м/с и порогов переключения датчиков уровня жидкости (рис. 4, б и 5, б) заданным значениям параметров a и b .

3. Имитационные модели в дальнейшем будут использоваться для тестирования программ управления АСУТП, когда отсутствует доступ к реальному объекту управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Охоткин Г.П., Романова Е.С.* Синтез логического устройства и распределителя импульсов САР тока // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. 2013. – С. 194–203.

2. *Охоткин Г.П.* Разработка методики синтеза релейных регуляторов САР тока при симметричной и диагональной коммутациях транзисторов ВП // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. – С. 66–74.

3. *Охоткин Г.П.* Динамические модели контура тока ИППН с ПИ-регулятором // В сборнике: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. 2000. – С. 140–148.

4. *Рыбалев А.Н.* Имитационное моделирование АСУТП / А.Н. Рыбалев. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. – 408 с.

5. *Трэвис Дж.* LabVIEW для всех. / Дж. Трэвис, Дж. Кринг. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.

6. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Авторы:

Охоткин Григорий Петрович, доктор технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и автоматики, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 1982 году окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2007 году получил ученую степень доктора технических наук по теме «Развитие теории динамических процессов и разработка быстродейст-

вующих полупроводниковых преобразователей для электропривода», специальность 05.09.12 – Силовая электроника. E-mail: elius@list.ru.

Павлова Анжелика Владимировна, магистр 1 курса факультета радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». В 2022 году окончила ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» факультет радиоэлектроники и автоматики с квалификацией бакалавр, специальность 27.03.04 – Управление в технических системах. E-mail: lika-pavlova-00@mail.ru.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. В 2000 году окончила математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. Кандидатская диссертация по теме: «Методика формирования профессионально-математической компетентности студентов технических направлений на основе интеграции математики и информатики», 2015 год. E-mail: oln2404@mail.ru.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СРЕДЕ TIA PORTAL

Васильев Н.С., Васильева Л.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы по программированию промышленного логического контроллера SIMATIC S7-1200 на примере модели электродвигателя. Визуализация работы модели создается в интегрированной среде автоматизации TIA PORTAL.

Ключевые слова: программирование, промышленный логический контроллер, TIA PORTAL, система управления.

Отрасль энергетики в современном мире играет огромную роль. Все объекты городской инфраструктуры так или иначе имеют прямую зависимость от электроэнергии. В одном помещении может располагаться как система освещения, так и сложная многофункциональная система «Умный дом». Электроэнергия необходима для освещения улиц, работы жизненно важных органов города, предприятий и т.д. Поставкой электроэнергии в городские сооружения занимаются электроэнергетические ком-

пании, которые не только производят магистраль подачи электричества в дома, но и занимаются строительством станций и подстанций, а также настройкой АСУ ТП, двигателей и других элементов управления.

Одной из таких компаний является Siemens Energy. Помимо оборудования электроэнергетики, компания производит информационные технологии АСУ ТП для своей продукции. TIA PORTAL, WinCC RT, PLCSIM – это продукты немецкого бренда, а также сферы программирования, необходимые для разработки проекта. Данные программы помогают заранее промоделировать и визуализировать проект.

Сложно представить жизнь предприятия, подстанции или еще какого-либо субъекта энергетики без генераторов и двигателей [1]. Для разработки проекта был выбран контроллер SIMATIC S7-1200 с ЦП модели 1215C DC/DC/DC (рис 1.). Дан-

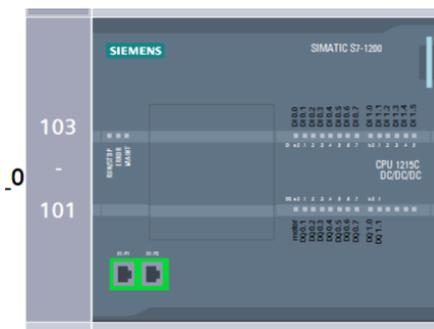


Рис. 1. Контроллер S7-1200

ная модель способна работать в реальном масштабе времени, ее можно использовать для построения относительно простых узлов локальной автоматки; имеет рабочую память до 50 Кбайт, встроенные аппаратные часы с запасом хода до 240 часов, счетчики опроса системы и поддержку функций регулирования.

После выбора контроллера, в папке PLC tags необходимо прописать все необходимые тэги с указанием типов данных тэгов и их адресов на контроллере (рис. 2). Тэги: Start, stop, up, down необходимы для визуального управления двигателем. Motor – тэг, отвечающий за режим работы самого двигателя. Он показывает, в каком состоянии в режиме реального времени находится двигатель (выключен или включен). Consigne_variator – тэг, отвечающий за количество оборотов двигателя. Именно поэтому к нему был выбран тип данных, отличающийся от остальных – int.

Name	Data type	Address	Retain	Visibl...	Ac
1 start	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2 stop	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3 up	Bool	%M0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4 down	Bool	%M0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5 motor	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6 consigne_veritor	Int	%QW64	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7 -Add new-				<input checked="" type="checkbox"/>	

Рис. 2. PLC tags

В рабочей области блока Main прописывается алгоритм действий программы. Для написания программы был выбран язык LAD. В рабочих областях Network 1...7 при помощи инструментов (вход, выход и т.д.) составлена структура алгоритма, элементы которой именуются при помощи ранее прописанных тэгов (рис. 3–4).

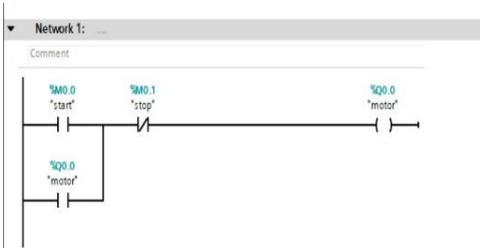


Рис. 3. Рабочая область Network 1

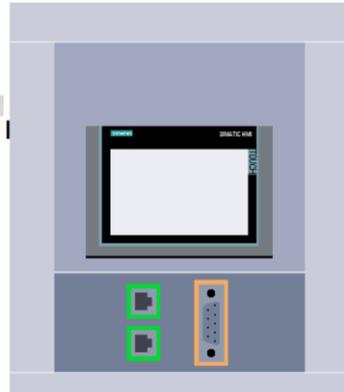


Рис. 4. HMI TP900 Comfort

Для визуализации выберем HMI экран TP900 Comfort, имеющий необходимые для нас характеристики и дисплей размером 9 дюймов (рис. 5).

В процессе программирования TP900 используем библиотеки моделей кнопок, тахометров и двигателей, которые уже имеются в TIA PORTAL (рис. 6). После расположения необходимых элементов на панели, начинаем настройку каждого из них индивидуально. Настройка элемента подразумевает установку тэга за каждым элементом, настройку анимации при симуля-

ции, цвета при симуляции, настройку текста. При желании пользователь может настроить и остальные параметры каждого элемента (рис. 7).

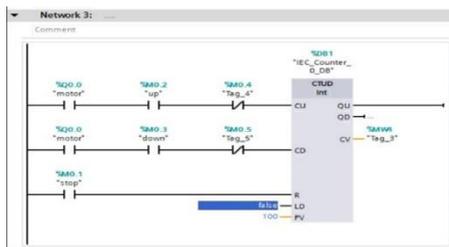


Рис. 5. Рабочая область Network 3

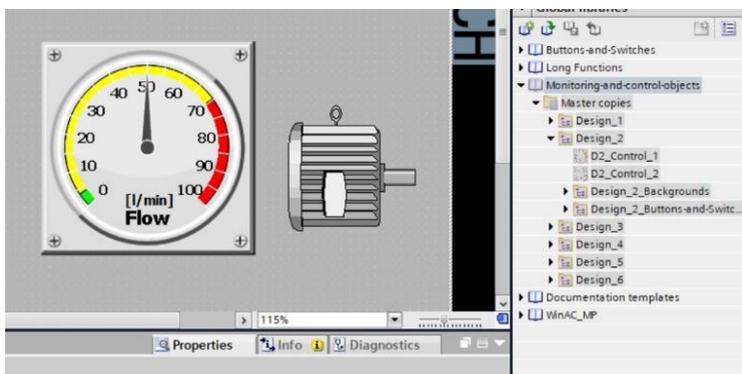


Рис. 6. Элементы визуализации и их библиотеки

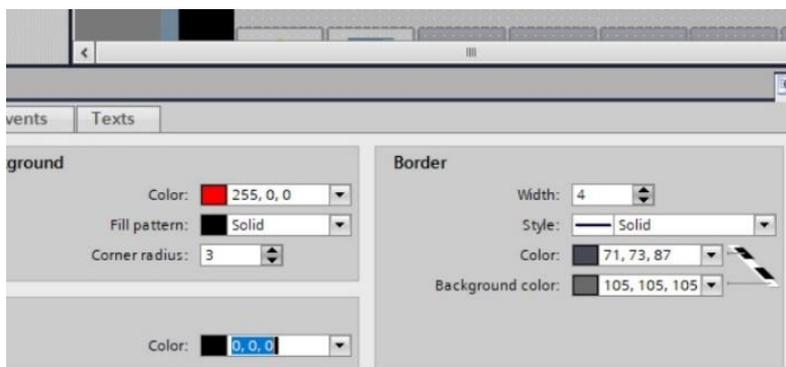


Рис. 7. Настройка параметров элемента

В заключении необходимо перекомпилировать отдельно программу в PLC и HMI, чтобы убедиться в правильности составления программы и загрузить программу на устройство (рис. 8). Позже при помощи PLCSIM провести соединение устройства с областью визуализации, где в дальнейшем нужно будет прописать все тэги и запустить симуляцию в Scada-системе WinCC RT [2, 3].

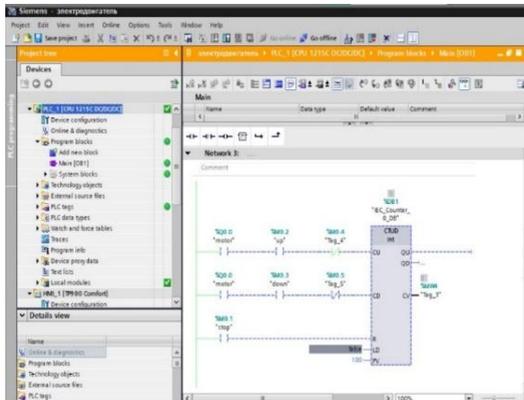


Рис. 8. Режим компиляции

В итоге, получим следующую визуализацию. Кнопки Start/Stop отвечают за режим работы двигателя. В случае запуска двигатель начинает моргать зеленым цветом. Кнопки up и down отвечают за количество оборотов двигателя, о чем информирует тахометр. В случае выключения двигателя тахометр сохраняет свое последнее значение и при дальнейшем запуске автоматически настраивается (рис. 9).



Рис. 9. Симуляция электродвигателя

В данной статье был рассмотрен процесс программирования электротехнического оборудования в среде TIA PORTAL, при поддержке WinCC RT, PLCSIM. Полученная система автоматического управления работает согласно технологическому заданию, без ошибок и проверена на симуляторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Шарафутдинов Н.Р. Функциональная схема компонента SCADA-системы для диагностики вентильного двигателя В сборнике: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 2022. С. 103–104.

2. Генин В.С., Васильева Л.Н., Шарафутдинов Н.Р., Артыкаева Э.М. Использование SCADA-системы TRACE MODE для контроля СКН по ваттметрограмме В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары, 2021. С. 252–262.

3. Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Спиридонова А.С., Шарафутдинов Н.Р. Решение задач диагностики электрических машин с использованием SCADA-системы В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары, 2021. С. 311–319.

Авторы:

Васильев Никита Сергеевич, студент 4 курса факультета радиозлектроники и автоматики. E-mail: Nik.vasilev.20@inbox.ru.

Васильева Лидия Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. Математический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, 2000 год. Специальность 13.00.02 Теория и методика обучения и воспитания, 2015 год. E-mail: oln2404@mail.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА	3
<i>Шалимов А.С.</i> Особенности тестирования динамической характеристики цифровой дистанционной защиты.....	3
<i>Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я.</i> Локальный режим трансформатора и генератора как индикатор их повреждённого состояния.....	7
<i>Егоров Г.В., Картузова Т.В., Машанов Ф.А.</i> Применение преобразований Фурье и Хартли для анализа цифровых каналов связи РЗА.....	14
<i>Лыков Ю.Ф.</i> Компьютерная модель автоматического регулирования мощности конденсаторной батареи.....	20
<i>Картузов А.В., Картузова Т.В., Кочетов А.Д.</i> Применение разностных уравнений для расчета переходных процессов в электрических цепях.....	26
<i>Степанова Д.А., Иванов Н.Г., Солдатов А.В., Золотов А.А., Воробьев Е.С.</i> Характеристики точности трансформаторов тока в установившемся и переходном режимах.....	31
<i>Мироненко Я.В.</i> Обзор существующих систем обработки данных диагностического мониторинга электрооборудования.....	38
<i>Димитриев А.А., Михеев Г.М.</i> Алгоритм диагностирования состояния трансформатора в режиме «онлайн» по результатам анализа растворённых газов.....	44
<i>Галанина Н.А., Петров С.В.</i> Требования к атрибутам и свойства атрибутов объектных моделей, спроектированных с применением объектно-ориентированного подхода.....	51
<i>Алюнов Д.Ю.</i> Изменение ширины спектра случайного сигнала: возможности нейросетевого контроля.....	56
<i>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.</i> Моделирование динамических режимов работы интеллектуальной энергосетью и ее компонентами.....	61
<i>Кочетов А.Д., Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я.</i> Итерационная обработка величин релейной защиты в условиях неопределённости их спектрального состава.....	68

<i>Пестряев Д.А.</i> Программно-аппаратная конфигурация цифровых подстанций	74
<i>Шварнуков А.В.</i> Перспективы развития цифровых подстанций	77
<i>Павлов О.П., Андреев В.В.</i> Подходы к моделированию цифровой системы управления преобразователем частоты для интеллектуального электропривода	81
<i>Кокшев П.А., Галанина Н.А.</i> Сетевой анализатор данных и особенности защиты информации в энергетике	85
<i>Тарасов В.А., Ковалев В.Г., Афанасьев В.В., Тарасова В.В.</i> Цифровые двойники периодических тепловых процессов в ограждающих конструкциях	92

**II. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ**

<i>Баженова Е.С., Кесель Л.Г., Кесель Б.А.</i> Повышение тепловой эффективности противообледенительных систем энергетических газотурбинных установок	100
<i>Морозов Д.С., Золин М.В., Пазушкина О.В.</i> Способ регулирования подачи пара в атмосферный деаэратор	105
<i>Михайлов Д.М.</i> Разработка контроллера дистанционного управления с беспроводным доступом	108
<i>Абдуллина А.А., Зинуров В.Э.</i> Качество сеточных элементов при численных расчетах энергетических аппаратов	111
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А.</i> <i>Туманов Ю.А.</i> Теплоснабжение тепловым насосом от обратной тепловой сети ТЭЦ	114
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Краснов Е.В., Тарасов В.А.</i> <i>Туманов Ю.А.</i> К вопросу повышения эффективности работы ТЭЦ за счет снижения температуры обратной сетевой воды	120

**III. АППАРАТЫ И КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ,
НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**

<i>Иванов И.П., Петров О.А., Самуилов Д.В.</i> Рекомендации по уточнению расчетного контактного нажатия силовых коммутационных аппаратов	128
--	-----

<i>Быков К.В., Павлов Ю.В., Лазарева Н.М.</i> Передаточная функция трехуровневого конвертора	135
<i>Андреев В.А., Андреева Т.В., Ильин С.А., Семенов Л.А., Калинин А.Г.</i> Испытательный стенд тяговых электродвигателей на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель»	140
<i>Яковлев Д.В., Сорокин Н.Н., Якимов Е.А., Котик В.Ю.</i> Исследование и анализ конструкции тепловых реле ведущих производителей	146
<i>Матвеев Е.К., Славутский А.Л.</i> Моделирование режимов насыщения трансформатора тока в разные моменты начала короткого замыкания.....	153
<i>Медведев В.Г.</i> Особенности расчетов реакторов дугогашения с немагнитными зазорами в сердечнике магнитопровода	158
<i>Садькова Л.А.</i> Проблемы Западно-Казахстанской электросетевой компании	168
<i>Емельянов Б.В., Емельянов В.А.</i> Влияние модуляции на амплитудно-фазовую нестабильность СВЧ усилителей мощности... ..	175
<i>Павлова А.В., Васильева Л.Н., Охоткин Г.П., Григорьев А.Т.</i> Разработка технологии взаимодействия Matlab и CoDeSys для прототипирования АСУТП в режиме реального времени	184
<i>Кравченко Г.А., Львова Э.Л.</i> Современное защитное электрооборудование жилых домов.....	189
<i>Петров А.Р., Грачева Е.И.</i> Исследование функциональных характеристик автоматического выключателя.....	196
<i>Петрова Р.М., Грачева Е.И.</i> Исследование характеристик надежности силовых трансформаторов.....	201
IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ	206
<i>Воробьев Е.С., Андреев В.В.</i> Предпосылки развития солнечной энергетики в ближайшей перспективе.....	206
<i>Якупов Н.М., Арсланов А.Д., Малаева Е.Д.</i> Устройство синхронизации с трехфазной сетью для системы мониторинга и устранения гололедообразования на воздушных линиях электропередачи	211

<i>Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю., Горячев М.П.</i> Анализ и перспектива развития автономных роботизированных комплексов для мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи	216
<i>Лавренов В.А., Фалеева Ю.М.</i> Исследование процесса пиролиза органических компонентов биомассы в смесях с различными пропорциями	221
<i>Ведерникова К.О., Кесель Л.Г., Кесель Б.А.</i> Особенности адаптации энергетических газотурбинных установок к работе на метановодородном топливе	228
<i>Семерин В.Г.</i> Разработка модели комбинированных источников альтернативной энергии	234
<i>Садыкова Л.А., Захаров В.П.</i> Развитие гидро- и ветро- энергетики в Казахстане	239
<i>Хамидуллин И.Н., Маслов С.Ю.</i> Система управления наружным освещением для железнодорожных платформ	244

V. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И КОММУНАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

<i>Лавриненко В.А.</i> , Исследование системы «резонансный инвертор-конденсаторный асинхронный двигатель».....	249
<i>Зиновьева Е.Г., Калинин А.Г., Михадаров Д.Г.</i> Определение удельной теплоемкости теплоносителей для алюминиево-медных конструкций	256
<i>Янкевич С.В., Малинин Г.В.</i> Способ повышения энергоэффективности ультразвукового генератора	260
<i>Мышкина Л.С., Фролова Я.А., Иванова Е.М.</i> Роль мини-ТЭЦ в коммунальной инфраструктуре	265
<i>Малинин Г.В., Арзамасов В.Л., Сергеев А.Г.</i> Экологически чистая и энергосберегающая технология депарафинизации и дегидратации нефтяных и газовых скважин	272
<i>Свешников А.Г., Михеев Г.М.</i> Возможные причины утечки жидкости в системе водоснабжения	278
<i>Кесель Л.Г., Смирнова А.С., Кесель Б.А.</i> Энергоэффективность структурной системы зарядки электромобилей в условиях распределённой энергетики	285

<i>Яковлев А.С.</i> Выбор энергоэффективной марки графитового тигля на основе численного моделирования	292
<i>Назаров М.А., Хренников А.Ю., Александров Н.М.</i> Внедрение преобразователей частоты для снижения расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций	296
<i>Юдина А.А., Хренников А.Ю., Александров Н.М.</i> Расчёт токов короткого замыкания (ТКЗ) на выводах силовых трансформаторов	300
<i>Хренников А.Ю., Александров Н.М.</i> Проверка трансформаторов тока с использование современного проверочного оборудования	308
<i>Филина О.А., Прокопенко С.С.</i> Математические модели в управлении	315
<i>Дадабаев Ш.Т.</i> Исследование пусковых переходных процессов электропривода насосной установки методом компьютерного моделирования	322
<i>Михадаров Д.Г., Васильев И.Н., Петросов Ю.М.</i> Дуговая печь постоянного тока для переплава алюминия	328
<i>Матюнин А.Н., Медуницын А.В.</i> Исследование компенсации реактивной мощности трансформатора в режиме холостого хода	333
<i>Афанасьев А.А., Генин В.С., Иванова Н.Н.</i> Использование библиотеки символьных вычислений SymPy в Python при расчете магнитоэлектрического вентильного двигателя	339
<i>Афанасьев А.А., Генин В.С., Иванова Н.Н.</i> Результаты исследования влияния не соосности ротора на характеристики магнитоэлектрического вентильного двигателя 6ДВМ300 А35.....	344
VI. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ	
<i>Афанасьева О.В., Данилов А.М., Казакова Е.Ю., Ковалев В.Г., Шестакова Л.А.</i> Управление подготовкой кадров для отраслей экономики региона	348
<i>Мясникова Т.В.</i> Оценка качества подготовки обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по опыту проведения Федерального интернет-экзамена для выпускников бакалавриата	359

<i>Димитриев Р.А., Димитриев А.А.</i> Вопрос квалификации электротехнического персонала, обслуживающего цифровые подстанции	366
<i>Петров Д.А., Позин Д.О., Музафаров А.Ю., Боровских Д.И.</i> Повышение квалификации обслуживающего персонала подстанции при помощи виртуальной реальности.....	372
<i>Малафеева А.А.</i> Человеко-машинное взаимодействие: от каждого по способностям	377
<i>Охоткин Г.П., Павлова А.В., Васильева Л.Н.</i> Разработка математической и имитационной модели смесительной установки..	383
<i>Васильев Н.С., Васильева Л.Н.</i> Разработка модели двигателя переменного тока в среде TIA PORTAL.....	392

Научное издание

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Материалы VI Международной научно-технической
конференции

Публикуется в авторской редакции

Отв. за выпуск В.Г. Ковалев

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 12.12.2022. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 23,48. Уч.-изд. л. 14,87.
Тираж 300 экз. Заказ № 1421.

Отпечатано в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15