

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

**Материалы
XII Всероссийской научно-технической
конференции**

ИТЭЭ–2020

Чебоксары
2020

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

И74

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*,

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*,

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Информационные технологии в электротехнике и электро-
И74 энергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф.
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. 534 с.

ISBN 978-5-7677-3103-9

Обсуждаются вопросы информатизации в электротехнике и электроэнергетике, построения систем управления электротехническими объектами, проблемы математического моделирования процессов в электротехнических системах, цифровой обработки сигналов электротехники и радиоэлектроники, информационной безопасности в электроэнергетике, применения информационных технологий в высшем электротехническом и электроэнергетическом образовании.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

ISBN 978-5-7677-3103-9

Чувашского университета, 2020

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

А.П. Корнеев
(Могилёв, Белорусско-Российский университет)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Представлен способ построения замкнутой системы управления системой с распределёнными параметрами с помощью корректирующего устройства, которое действует на основании восстановленных данных и находится в обратной связи [1].

Построение замкнутой системы управления электроприводом (ЭП) системы с распределёнными параметрами, механическая часть которой обладает протяженными размерами, возможно при использовании корректирующего устройства, действующего на основании восстановления данных [2]. Использование в системе дополнительной обратной связи, снимаемой в точке x , дает принципиальную возможность построения системы с расширенной полосой пропускания [3]. На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемого способа.

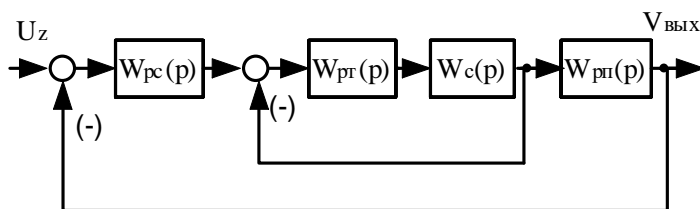


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого способа

На рис. 1 приняты обозначения: U_z – сигнал задания (задающее воздействие); $W_{рс}$ – регулятор скорости; $W_{рт}$ – регулятор тока; W_c – часть ЭП с постоянными параметрами; $W_{мп}$ – механическая часть ЭП с переменными параметрами.

Измерение скорости рабочей массы (груза) в системе с распределёнными параметрами возможно при применении корректирующего устройства, действующего на основании восстановления данных [4].

На рис. 2 тонкой линией представлена ЛАЧХ системы с распределёнными параметрами без дополнительного контура по пространственной координате, а сплошной – ЛАЧХ системы с дополнительным контуром по пространственной координате.

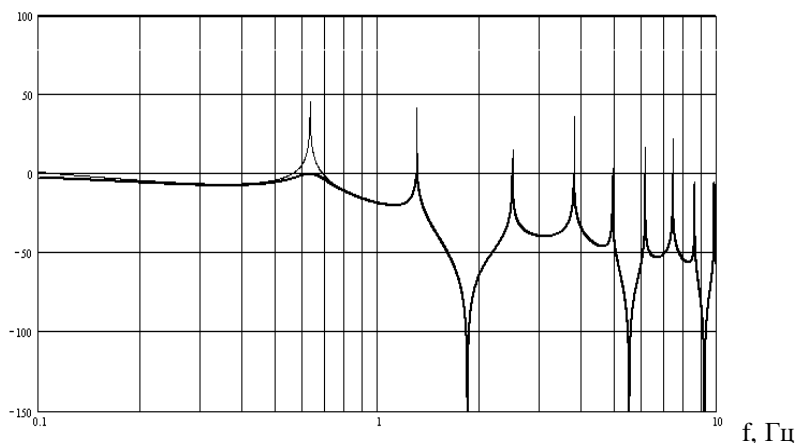


Рис. 2. ЛАЧХ системы с распределёнными параметрами

В исследуемой системе без дополнительного контура частота первого резонанса равна 0,63 Гц, с дополнительным контуром – 1,31 Гц. Т.е. полоса пропускания системы расширена более чем в 2 раза. Т.е. при введении дополнительного контура, имитирующего корректирующее устройство, первый резонанс (наиболее опасный) сглаживается.

Литература

1. *Рассудов Л.Н.* Электроприводы с распределёнными параметрами электромеханических элементов / Л.Н. Рассудов, В.Н. Мязель. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1987. – 144 с.
2. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
3. *Толочко О.І.* Анализ та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану / О.І. Толочко. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 298 с.
4. *Корнеев А.П.* Метод косвенного вычисления скорости в системах с распределёнными параметрами / А.П. Корнеев, В.Н. Ситников // Вестник МГТУ. – 2006. – № 2. – С. 93–98.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПЛОЩАДЕЙ

Для определения законов регулирования и оптимальных параметров настройки регуляторов необходимо знать статические и динамические характеристики объектов управления, образующих совместно с регуляторами системы автоматического управления.

Структурная и параметрическая идентификация является обязательным и важным этапом построения математической модели объекта управления, для осуществления которой разработано и применяется множество методов. К их числу относится, в частности, метод площадей, предложенный Симою М.П. [1], который позволяет по нормированной кривой разгона $y(t)$ объекта управления с самовывравниванием определять структуру и коэффициенты передаточной функции его линеаризованной модели вида

$$\overline{W}_m(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad n \geq m. \quad (1)$$

Числитель и знаменатель искомой передаточной функции (1) содержат $(n + m)$ неизвестных коэффициентов $a_i, b_j, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$, и для их нахождения необходимо, чтобы система

$$a_k - b_k - \sum_{i=1}^{k-1} b_i S_{k-i} = S_k, \quad k = 1, 2, \dots, n + m, \quad (2)$$

содержала такое же количество уравнений.

Входящие в систему уравнений (2) коэффициенты $S_k, k = 1, 2, \dots, n + m$, являются коэффициентами разложения в степенной ряд Тейлора в окрестности точки $s_0 = 0$ обратной передаточной функции $\overline{W}_m^{-1}(s)$.

Коэффициенты разложения S_k обратной передаточной функции $\overline{W}_m^{-1}(s)$ определяются из рекуррентных соотношений

$$S_k = \sum_{i=0}^{k-1} \mu_i S_{k-1-i}, \quad S_0 = 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

в которых коэффициенты μ_k являются моментами вспомогательной функции $\varphi(t) = 1 - y(t)$ и связаны с ней соотношениями

$$m_k = \frac{1}{k!} \overset{\times}{\underset{0}{\dot{\alpha}}}(-t)^k j(t) dt, k = 0, 1, 2, K. \quad (3)$$

Интегралы (3) являются несобственными, и их нахождение по известной вычислительной схеме [2], реализующей численный метод трапеций, бесконечный предел заменяется конечным

$$m_k \approx \frac{1}{k!} \overset{\times}{\underset{0}{\dot{\alpha}}}(-t)^k j(t) dt.$$

При этом вносятся погрешности, обусловленные конечностью интервала интегрирования и выбранным численным методом интегрирования, которые растут с ростом индекса k . В силу рекуррентной связи коэффициентов разложения S_i обратной передаточной функции модели с моментами μ_k их вычисление происходит с ещё большей погрешностью, приводящей в ряде случаев к не только количественно, но качественно неправильному результату. Для повышения точности определения параметров передаточной функции модели объекта управления в [3] и [4] предложено использовать аналитические представления приближения функции $\varphi(t)$ на интервале $[T_n; \infty)$.

Структура передаточной функции объекта управления может быть определена по виду кривой разгона. Как показывает практика, удовлетворительная точность аппроксимации динамических свойств энергетических и электротехнических объектов управления достигается при использовании моделей, для которых порядок полинома знаменателя передаточной функции $n = 1, 2, 3$. В табл. 1 приведены выражения передаточных функций и формулы для определения их коэффициентов по методу площадей для различных значений n и m .

При отсутствии в кривой разгона точки перегиба величина m выбирается из условия $n - m = 1$ или $n = m$, а при её наличии – из условия $n - m \geq 2$ [2]. Если $y(t) \neq 0$, $y'(t) \neq 0$ при $t = 0$ и кривая разгона не имеет точки перегиба (кривая выпукла или вогнута), то $n = m = 1$. Если $y(t) = 0$, $y'(t) \neq 0$ при $t = 0$ и кривая разгона не имеет точки перегиба (кривая выпукла или вогнута), то $n = 1$, $m = 0$. Если присутствует точка перегиба и $y(t) = 0$, $y'(t) \neq 0$ при $t = 0$, то идентификацию осуществляют при $n = 2$, $m = 1$ или при $n = 3$, $m = 2$.

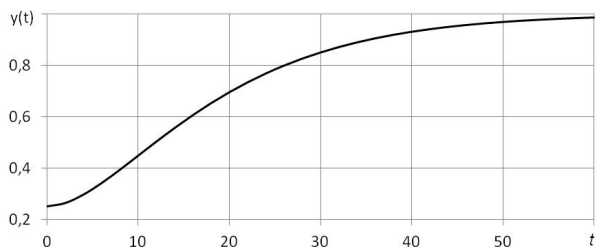
Если присутствует точка перегиба и $y(t) \neq 0$, $y(t)' \neq 0$ при $t = 0$, то идентификацию осуществляют при $n = 2$, $m = 2$ или $n = 3$, $m = 3$.

Таблица 1

Передаточная функция	Расчётные формулы параметров передаточной функции
$\frac{b_1 s + 1}{a_1 s + 1}$	$b_1 = -\frac{S_2}{S_1} \quad a_1 = S_1 - \frac{S_2}{S_1}$
$\frac{b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}$	$b_1 = -\frac{S_3}{S_2} \quad a_1 = S_1 + b_1 \quad a_2 = S_2 + b_1 S_1$
$\frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}$	$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} S_1 & -S_3 \\ S_2 & -S_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \end{vmatrix}} \quad b_2 = \frac{\begin{vmatrix} -S_3 & S_2 \\ -S_4 & S_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \end{vmatrix}} \\ a_1 = S_1 + b_1 \quad a_2 = S_2 + b_1 S_1 + b_2$
$\frac{b_1 s + 1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}$	$b_1 = -\frac{S_4}{S_3} \quad a_1 = S_1 + b_1 \quad a_2 = S_2 + b_1 S_1 \quad a_3 = S_3 + b_1 S_2$
$\frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}$	$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} S_2 & -S_4 \\ S_3 & -S_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_2 & S_3 \\ S_3 & S_4 \end{vmatrix}} \quad b_2 = \frac{\begin{vmatrix} -S_4 & S_3 \\ -S_5 & S_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_2 & S_3 \\ S_3 & S_4 \end{vmatrix}} \quad a_1 = S_1 + b_1 \\ a_2 = S_2 + b_1 S_1 + b_2 \quad a_3 = S_3 + b_1 S_2 + b_2 S_1$
$\frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}$	$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 & -S_4 \\ S_2 & S_3 & -S_5 \\ S_3 & S_4 & -S_6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \\ S_3 & S_4 & S_5 \end{vmatrix}} \quad b_2 = \frac{\begin{vmatrix} S_1 & -S_4 & S_3 \\ S_2 & -S_5 & S_4 \\ S_3 & -S_6 & S_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \\ S_3 & S_4 & S_5 \end{vmatrix}} \quad b_3 = \frac{\begin{vmatrix} -S_4 & S_2 & S_3 \\ -S_5 & S_3 & S_4 \\ -S_6 & S_4 & S_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \\ S_3 & S_4 & S_5 \end{vmatrix}} \\ a_1 = S_1 + b_1 \quad a_2 = S_2 + b_1 S_1 + b_2 \quad a_3 = S_3 + b_3 + b_1 S_2 + b_2 S_1$

Проиллюстрируем эффективность одной из предлагаемых вычислительных схем для объекта управления с нормированной разгонной характеристикой, представленной на рисунке. Так как $y(t) \neq 0$, $y(t)' \neq 0$ и имеется точка перегиба, то передаточную функцию будем искать в виде

$$W(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}.$$



Разгонная кривая

В табл. 2 даны точные значения и результаты расчёта моментов $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3$, коэффициентов разложения обратной передаточной функции S_1, S_2, S_3, S_4 , параметров b_1, b_2, a_1, a_2 передаточной функции по известной [2] и предлагаемой [3] вычислительным схемам.

Таблица 2

Параметр	Точное значение	По вычислительной схеме [2]		По вычислительной схеме [3]	
		Значение	Ошибка, %	Значение	Ошибка, %
μ_0	15	14,86	-0,93	14,99	-0,67
μ_1	-225	-214,92	4,51	-224,1	0,09
μ_2	3000	2636,33	-12,12	2974,77	-0,84
μ_3	-43125	-28277,20	34,43	-36852,96	14,54
S_1	15	14,86	-0,93	14,99	-0,67
S_2	0	6,03	—	0,66	—
S_3	-375	-468,67	-24,98	-375,35	0,09
S_4	1875	2648,78	41,27	1971,29	5,13
b_1	5	6,03	20,60	5,30	6,00
b_2	25	29,09	16,36	24,81	-0,76
a_1	20	20,89	4,45	20,29	1,45
a_2	100	41,57	-58,43	104,85	4,85

Анализ данных показывает, что с ростом индекса моментов μ_k вычисление их значений по вычислительной схеме [2] сопровождается ощутимым возрастанием погрешностей по абсолютному значению. В силу рекуррентной связи между коэффициентами S_i и моментами μ_k , погрешности вычисления коэффициентов разложения S_1, S_2, S_3, S_4 , а значит и коэффициентов передаточной функции, возрастают ещё в большей степени. Предлагаемая в [3] схема вычисления коэффициентов передаточной функции модели объекта управления по методу площадей позволяет значительно повысить точность расчёта по сравнению с известной схемой.

Литература

1. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования / М.П. Симою // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514–527.

2. Яковлев Ю.С. Системы локальной автоматики: конспект лекций / Ю.С. Яковлев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1993. – 176 с.

3. Ильгачёв А.Н. Вычислительные аспекты метода площадей для параметрической идентификации объектов управления / А.Н. Ильгачёв // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 227–235.

4. Ильгачёв А.Н. Реализация метода параметрической идентификации объектов управления с выраженными колебательными свойствами / А.Н. Ильгачёв // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 8. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 220–230.

А.А. Афанасьев, В.С. Генин
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕДУКТОРА С ТРЁХФАЗНОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА

Помимо магнитоэлектрических магнитных редукторов с фиксированным коэффициентом трансмиссии [1, 2] вызывают интерес и регулируемые магнитные редукторы с обмотками статора, питаемыми от преобразователей частоты [3], которые могут быть использованы, например, для стабилизации скорости вращения ветрогенератора при изменении скорости вращения ветроколеса.

Электромагнитные моменты роторов магнитного редуктора с трёхфазной обмоткой статора, питаемой синусоидальным током, являются следствием наличия электромагнитного момента статора. Магнитный редуктор с обмоткой статора, питаемой синусоидальным током, который находится в фазе или в противофазе с ЭДС холостого хода обмотки, будет иметь максимальные значения электромагнитных моментов валов, пропорциональные току статора.

Математическая модель в виде уравнений состояния регулируемого магнитного редуктора с трёхфазной обмоткой статора, ориентированная на функциональный режим ветростанции, когда тихоходный вал принимает внешний момент от ветроколеса, а быстроходный вал передаёт момент электродвигателю, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dW_1}{dt} = A_{13}I_m + A_{14}, \\ \frac{dw}{dt} = A_{23}I_m + A_{24}, \\ \frac{dI_m}{dt} = \frac{2E}{pL_c} \sqrt{\frac{2E}{\epsilon p L_c} \ddot{\alpha}^2 - (I_m w)^2} + A_{32}w + A_{33}I_m + A_{34}, \end{cases}$$

где Ω_1 – скорость входного вала; I_m – вектор тока статора; w – угловая частота тока статора; E – входное напряжение преобразователя частоты; L_c – индуктивность обмотки статора; A_{13} , A_{14} , A_{23} , A_{24} , A_{32} , A_{33} , A_{34} – коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами магнитного редуктора.

Скорость выходного вала с постоянными магнитами Ω_2 связана со скоростью входного вала – мультипликатора Ω_1 соотношением

$$W_2 = \frac{zW_1 + w}{z - p_1},$$

где z – число стержней модулятора; p_1 – число пар полюсов статора.

При отсутствии активного тока статора электромагнитные моменты статора и роторов равны нулю. У такого редуктора будет отсутствовать «опрокидывание» до тех пор, пока источник питания обмотки статора способен наращивать свой ток при росте нагрузки на выходном валу.

Анализ представленной математической модели в MathCAD и замкнутой системы управления на её основе в Matlab показал, что скорости вращения валов редуктора можно регулировать, изменяя частоту тока статора и входное напряжение преобразователя частоты.

Вывод. Представлена нелинейная математическая модель в виде уравнений состояния регулируемого магнитного редуктора, скорости вращения валов которого можно регулировать, изменяя частоту тока статора и входное напряжение преобразователя частоты.

Литература

1. Wang J. A Magnetic Continuously Variable Transmission Device / J. Wang, K. Atallah, S.D. Carvley // IEEE Transactions on magnetic. – 2011. – Vol. 47, No. 10. – PP. 2815–2818.

2. Афанасьев А.А. Электромагнитные моменты магнитного редуктора / А.А. Афанасьев // Электричество. – 2019. – № 2. – С. 54–59.

3. Афанасьев А.А. Регулируемый магнитный редуктор / А.А. Афанасьев, В.С. Генин, И.И. Исломов и др. // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 55–59.

И.С. Дымов, Д.А. Котин
(Новосибирск, НГТУ)

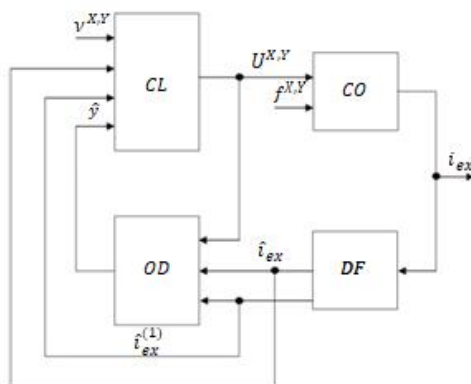
РАСЧЁТ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ТОКА СИСТЕМЫ УСТРАНЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ РОТОРА

Тенденции современных разработок в области совершенствования способов стабилизации осевых и радиальных отклонений при эксплуатации высокоточного оборудования направлены на исследования принципиально новых видов опор, в которых для создания соответствующих реакций используются магнитные и электрические поля. Наиболее важной проблемой при создании нового оборудования является отклонение радиального положения вращающейся части электродвигателя во время работы технологического оборудования.

Исследование посвящено расчёту эквивалентной передаточной функции сигнально-адаптивного регулятора тока (САРТ) возбуждения катушки электромагнита, который является внутренним контуром в системе подчиненного регулирования автоматической коррекции радиального положения ротора микроэлектродвижателя прецизионной установки (рисунок) [1].

Для описания разработанной функциональной схемы приведены следующие обозначения: $U_{ref}^{x_1, x_2, y_1, y_2}$ – сигналы задания на тре-

буемое радиальное отклонение в плоскости X и Y соответственно, В; РС – регуляторы пространственного положения; Соп – управляемый преобразователь (УП); U_{ref}^u – сигнал задания напряжения УП, В; U_{ex} – выходное напряжение УП (напряжение возбуждения электромагнита), В; ЕМ – электромагнит (ОУ); PS – датчики пространственного положения ротора, фиксирующие его радиальное отклонение в плоскости X и Y ; K_{pf} – коэффициенты обратных связей по радиальному отклонению в плоскости X и Y .



Общая структурная схема метода САРТ

В качестве датчиков пространственного положения ротора, фиксирующих его радиальное отклонение в плоскости X и Y предполагается использовать фотоэлектрические преобразователи комбинированного типа, у которых информационная часть способна обеспечить высокую точность измерений осевых смещений за счёт самокоррекции угловой погрешности измерительного раstra [2].

Литература

1. Дымов И.С. Подход к реализации процесса активной стабилизации пространственного положения ротора устройств мехатроники / И.С. Дымов, Д.А. Котин, Е.С. Кучер, Ю.В. Панкрац // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – № 1. – С. 62–68.
2. Дымов И.С. Синтез системы автоматической коррекции осевых смещений вращающегося ротора мехатронного модуля / И.С. Дымов, Д.А. Котин, В.Н. Аносов, Е.С. Кучер // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 157–166.

Н.И. Дементьев, А.И. Андриянов
(Брянск, БГТУ)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКОЙ

С каждым днём требования к стоимости, качеству и срокам строительных работ неуклонно повышаются. При этом применение традиционных инструментов при выполнении строительных работ полностью зависит от правильности принимаемых решений и квалификации персонала. Альтернативой являются передовые технологии, связанные с применением систем управления строительными машинами. Такие системы позволяют в автоматическом (или ручном) режиме контролировать положение рабочего органа строительной машины [1]. В результате этого достигается высокая скорость работы, и сокращаются вынужденные простои техники. В итоге организации, применяющие системы автоматизации, существенно снижают себестоимость работ, получая при этом более высокое качество и производительность [2].

Предлагаемое цифровое устройство обеспечивает подключение датчиков скорости, уровня, температуры и дополнительного оборудования эксплуатируемой техники, что позволит своевременно обеспечивать информацией оператора техники и в последующем предотвращать нештатные ситуации.

Устройство удовлетворяет следующим техническим требованиям: имеет широкий диапазон входного напряжения питания, защиту от неправильного подключения входного напряжения. Устройство имеет необходимый минимум дискретных и аналоговых входов с различным диапазоном входного напряжения, несколько аналоговых входов для подключения резистивных датчиков. Устройство обеспечивает подключение к интерфейсу связи Controller Area Network (CAN) 2.0B.

Предлагаемое устройство содержит цифро-аналоговые и силовые выходы, выходы для питания внешних датчиков, выходы с широтно-импульсной модуляцией и дискретные выходы.

В рассматриваемой системе предусмотрена возможность записи аварийных состояний машины с указанием моточасов и вариантов устранения аварий.

В качестве аналогов предлагаемого устройства можно рассматривать разработки зарубежных производителей фирмы Vector устройство VC121 Controller и фирмы Bosch Rexroth, серию контроллеров BODAS controllers RC, имеющие в своей линейке несколько устройств, обладающих схожим функционалом.

Преимущества предлагаемого устройства заключается в увеличенном количестве дискретных и аналоговых выходов и бесперебойная работа устройства при замыкании на массу внешних источников питания. Конечными потребителями данного устройства могут являться производители строительной, дорожной и автомобильной техники. Предполагаемая оценочная стоимость отечественного экспериментального комплекта системы будет составлять порядка 350 тыс. руб.

Особенность данного устройства заключается в том, что проектирование произведено с помощью технологий, освоенных на отечественных предприятиях, что позволит избежать потенциальных аппаратных закладок в импортных деталях.

Литература

1. *Белецкий Б.Ф.* Строительные машины и оборудование: учеб. пособие / Б.Ф. Белецкий, И.Г. Булгакова. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2012. – 608 с.

2. *Строительные машины и оборудование: справочник / С.С. Добронравов, М.С. Добронравов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 445 с.

М.В. Ильин, А.В. Алямкин
(Саранск, Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

При производстве силовых полупроводниковых приборов и различных преобразовательных и выпрямительных устройств на их основе актуальной является задача определения значений параметров и характеристик приборов. Определять параметры силовых

полупроводниковых приборов можно, используя специализированное испытательное оборудование для измерения и контроля параметров. Серийно подобная аппаратура не выпускается в виду того, что потребителям часто требуется аппаратура со специфическим набором испытательных функций. Специфический набор функций зачастую требует уникальных схемотехнических решений, который требуют дополнительных временных затрат при изготовлении нового образца испытательного оборудования. Повышение универсальности узлов испытательного оборудования позволило бы сократить время разработки нового оборудования.

Основным узлом большей части испытательного оборудования является источник тока, который создаёт требуемый электрический режим испытания. Как правило, при испытании силовых полупроводниковых приборов предъявляются определённые требования к форме и длительности испытательных импульсов тока. Одним из путей повышения универсальности источника тока является применение компьютеризированных управляющих технических средств, с помощью которых формируются управляющие импульсы с требуемыми параметрами, которые, в свою очередь, преобразовываются в импульсы тока универсальным мощным управляемым источником тока. Структура источника тока на основе данного подхода приведена на рис. 1.

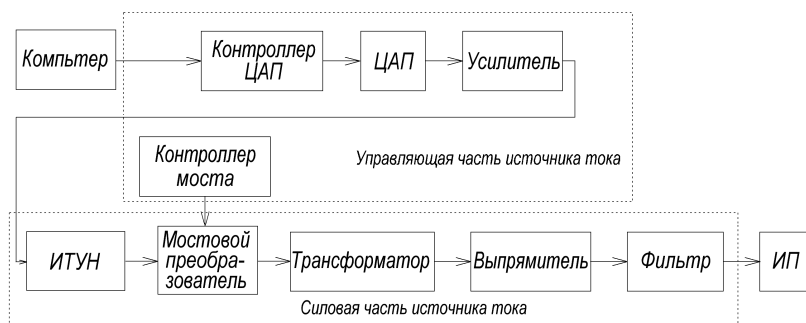


Рис. 1. Функциональная схема источника тока

Источник тока состоит из следующих блоков: контроллера цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), который принимает массив временных точек, сгенерированный на компьютере, и периодически выдаёт код на ЦАП; ЦАП, который генерирует напряже-

ние; усилителя, согласующего уровень выходного напряжения ЦАП с уровнем входного напряжения источника тока управляемого напряжением (ИТУН); ИТУН, генерирующего ток; преобразователя, позволяющего сократить габариты трансформатора с помощью преобразования на высокой частоте и избежать насыщения сердечника трансформатора вследствие того, что ИТУН генерирует однополярный ток; контроллера моста, управляющего преобразовательным мостом; трансформатора, увеличивающего амплитуду тока; выпрямителя, который используется потому, что для испытания силовых полупроводниковых приборов используются однополярные импульсы; фильтра, сглаживающего высокочастотные составляющие спектра выходного тока. Генерируемый ток подаётся испытываемый прибор.

Источник тока осуществляет подачу на испытываемый полупроводниковый прибор последовательности импульсов тока с заданными формой и параметрами. Форма импульсов, их длительность и амплитуда задаётся с компьютера массивом временных точек. Приём, хранение и последующая выдача кодовых комбинаций на ЦАП осуществляется контроллером ЦАП. Преобразование массива временных точек в управляющее напряжение осуществляется с помощью ЦАП.

В качестве контроллера ЦАП, в виду доступности, достаточной вычислительной мощности, наличия большого числа плат расширения, используется плата Arduino Uno. Arduino – это платформа с открытым исходным кодом, которая может использоваться при проектировании простых измерительных устройств, а также управления различными исполнительными устройствами [1]. Устройства на базе Arduino, могут работать самостоятельно, либо совместно с компьютером.

Для разработки программного обеспечения для компьютера была использована среда программирования LabVIEW. LabVIEW – это среда разработки виртуальных приборов (ВП), в которой используется особый язык графического программирования, существенно упрощающий проектирование систем любой степени сложности для промышленности, образования и научных лабораторий [2]. Задание формы импульсов, их частоты и амплитуды, генерация массива временных точек, описывающих импульсы, происходит в управляющем ВП, который выполняется на компьютере.

Массив временных точек передаётся с помощью сети Ethernet. Для того чтобы была возможность подключить плату Arduino Uno к сети Ethernet, используется плата расширения Ethernet Shield W5100 на основе микросхемы W5100. Эта плата имеет достаточные для этой задачи буфер в 16 кбит и скорость подключения 100 Мбит/с.

Преобразование принятого массива временных точек в напряжение для подачи на ИТУН происходит с помощью модуля ЦАП МСР4725. Это двенадцатиразрядный одноканальный ЦАП. Данный модуль ЦАП выбран по тому, что принимает данные по шине I2C, аппаратная поддержка которого есть у микроконтроллера Arduino.

Алгоритм программы, которая формирует массив временных точек и отправляет его контроллеру ЦАП, показан на рис. 2.

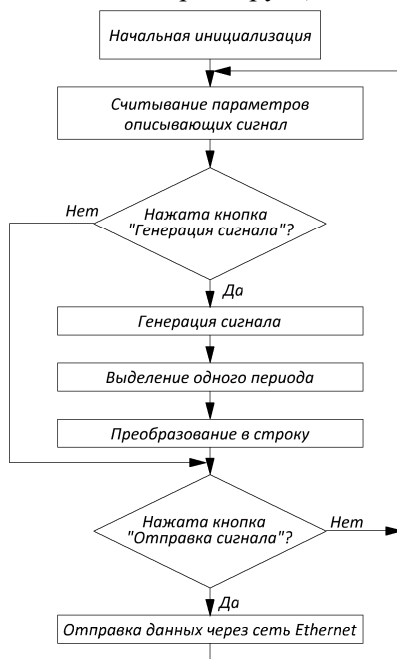


Рис. 2. Схема алгоритма программы для компьютера

Работа программы начинается с начальной инициализации. После этого происходит цикличное считывание параметров, которые описывают генерируемый сигнал. Сигнал описывают та-

кие параметры, как тип сигнала, амплитуда, частота и коэффициент заполнения. Генерировать с помощью разработанной программы можно полусинусоидальный, прямоугольный, трапециoidalный и пилообразный сигналы. Считывание вышеуказанных параметров происходит до тех пор, пока на лицевой панели ВП не нажата одна из двух управляющих кнопок.

При нажатии кнопки «Генерация сигнала» в соответствии с заданными параметрами с помощью ВП функционального генератора генерируется массив временных точек, описывающий сигнал. В виду того, что для генерации сигнала достаточно циклически повторять один период сигнала, и из-за ограниченности памяти Arduino, из массива временных точек выделяется один период сигнала. Затем происходит преобразование массива временных точек, элементами которого являются десятичные числа, в текстовую строку. Это нужно из-за того, что через сеть Ethernet данные передаются в виде текстовой строки. На этом часть алгоритма, исполняемая при нажатии кнопки «Генерация сигнала» заканчивается.

При нажатии кнопки «Отправка сигнала» происходит отправка массива временных точек на контроллер ЦАП по сети Ethernet. После этого рабочий цикл программы заканчивается.

Алгоритм работы контроллера ЦАП, который принимает массив временных точек и генерирует сигнал, показан на рис. 3.

Работа программы начинается с подключения к сети Ethernet. После начальной инициализации контроллера происходит переход к ожиданию входящих сообщений от компьютера по сети Ethernet. При поступлении нового сообщения происходит его приём. Данные по сети Ethernet передаются в виде чисел, соответствующих кодам символов в таблице кодировки ASCII. Такое представление данных не подходит для передачи цифроаналоговому преобразователю. Полученные по сети Ethernet данные преобразуются в числовой массив. После преобразования массива данных, происходит расчёт времени задержки. Время задержки – это время между двумя последовательными выдачами кода на ЦАП. Время задержки является обратной величиной от произведения частоты и числа точек, выдаваемых за период. Величины частоты и числа точек так же принимаются с компьютера одновременно с массивом временных точек.

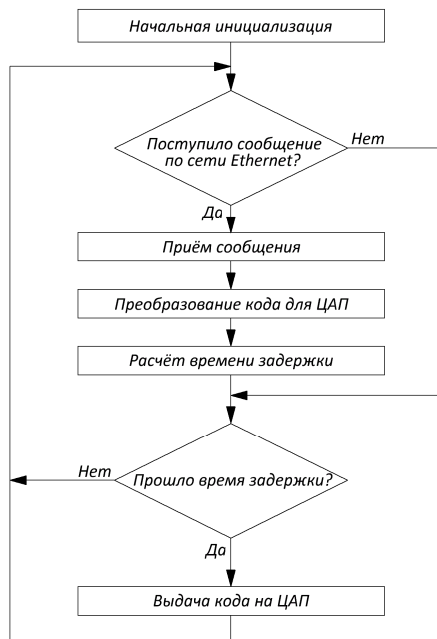


Рис. 3. Схема алгоритма программы контроллера ЦАП

Если по сети Ethernet не поступает новое сообщение, то приём сообщения, преобразование массива данных и расчёт времени задержки пропускаются. Это нужно для того, чтобы вышеописанная часть алгоритма не выполнялась каждый цикл, а лишь только при поступлении нового массива данных.

Затем происходит проверка времени, прошедшего с последней выдачи кода на ЦАП. Если с последней выдачи кода на ЦАП прошло время равное или больше времени задержки, то происходит выдача кода на ЦАП. На этом цикл контроллера заканчивается.

Следующей задачей, которая должна решаться с помощью микроконтроллера, является управление преобразовательным мостом. Для управления транзисторным мостом требуется пара последовательностей прямоугольных импульсов, сдвинутых друг относительно друга на 180° . Так же необходимо сделать коэффициент заполнения чуть меньшим 0,5 для гарантии закрытия транзисторов диагонали перед открытием транзисторов другой диагонали. Генерирование такого сигнала осуществляет-

ся с помощью внутреннего модуля широтно-импульсной модуляции (ШИМ) контроллера Arduino.

Контроллер генерирует сигнал, используя счётчики/таймеры. В контроллере присутствует три таймера. Таймер T0 управляет дискретными выводами D5 и D6, таймер T1 управляет выводами D9 и D10, а таймер T2 – выводами D3 и D11. Использование таймера T0 для генерации ШИМ сигнала нежелательно потому, что ресурсы этого таймера используются для различных функций временных задержек.

В виду того, что плата расширения Ethernet Shield W5100 обменивается данными с Arduino с помощью SPI шины и дискретных выводов, которые также предназначены для генерации ШИМ сигнала, то использование платы расширения одновременно для генерации ШИМ сигнала и обмена данными по сети с помощью одной платой Arduino невозможно. В связи с этим для управления преобразовательным мостом используется дополнительная плата Arduino.

Задавать параметры ШИМ можно с помощью регистров таймера TCCRxA и TCCRxB. Для генерации ШИМ сигнала используется таймер T2. Настроенные регистры TCCR2A и TCCR2B показаны в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Структура регистра TCCR2A

COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	–	–	WGM21	WGM20
1	1	1	0	0	0	0	1

Таблица 2

Структура регистра TCCR2B

ICNC2	ICES2	–	WGM23	WGM22	CS22	CS21	CS20
0	0	0	0	0	0	0	1

Биты WGM23, WGM22, WGM21, WGM20 устанавливают режим работы таймера/счётчика T2. Комбинация «0001» переключает таймер в режим коррекции фазы ШИМ с разрядностью 8 бит, в котором таймер считает от 0 до 255 и затем от 255 до 0.

При установленных битах COM2B1 и COM2B0 в состояние «10», вывод Arduino D3 сбрасывается в 0 при совпадении счётчика с регистром сравнения OC2B во время увеличения значения счётчика, и устанавливается в 1 при совпадении счётчика с

OC2B во время уменьшения значения счётчика. В регистре OC2B задаётся коэффициент заполнения импульсов. В виду того, что управлять преобразовательным мостом было решено импульсами с коэффициентом заполнения чуть меньше 0,5, в регистр OC2B было записано число 120.

При установленных битах COM2A1 и COM2A0 в состояние «11», вывод Arduino D11 устанавливается в 1 при совпадении счётчика с регистром сравнения OC2A во время увеличения значения счётчика, и сбрасывается в 0 при совпадении счётчика с OC2A во время уменьшения значения счётчика. Получается, что режим работы вывода D11 является инверсным в сравнении с режимом работы вывода D3. Значит, для того, чтобы длительность импульсов на выводах D11 и D3 были равны, в регистр сравнения OC2A заносится разница между двумястами пятидесятью пятью и числом, записанным в OC2B. В данном случае в регистр OC2A заносится число 135.

Биты CS22, CS21, CS20 регистра TCCR2B устанавливают режим тактирования и предделителя тактовой частоты таймера/счётчика T2. При установке этих битов в состояние «001» частота тактирования считается без предделителя. Поскольку в режиме коррекции фазы ШИМ с разрядностью 8 бит, таймер считает от 0 до 255 и затем от 255 до 0, то есть таймер отсчитывает 512 значений. Значит, при частоте тактового генератора в 16 МГц частота ШИМ сигнала будет равна 31250 Гц.

Сброшенный бит ICNC2 отключает схему подавления помех блока захвата. Бит ICES2 выбирает активный фронт регистра захвата (0 – по спадающему фронту сигнала, 1 – по нарастающему фронту сигнала).

Получается, установив регистры TCCR2A, TCCR2B, OC2A и OC2B так, как описано выше, на выводы Arduino D3 и D11 контроллера преобразовательного моста будут подаваться последовательности прямоугольных импульсов, сдвинутых друг относительно друга по фазе на 180°, с коэффициентом заполнения 0,47 и частотой 31250 Гц.

Заключение. Таким образом, было разработано программное обеспечение для системы управления программно-определяемого функционального источника тока для испытания силовых полупроводниковых приборов, которое позволяет фор-

мировать импульсы с формой традиционно применяемой при испытании силовых полупроводниковых приборов. Дополнительно данный подход позволяет формировать импульсы с другими параметрами и формами без необходимости существенного изменения программных или аппаратных ресурсов.

Литература

1. *Петин В.А.* Проекты с использованием контроллера Arduino / В.А. Петин. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 464 с.
2. *Трэвис Дж.* LabVIEW для всех / Дж. Трэвис, Дж. Кринг. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.

Е.С. Павлов^{1,2}, Д.И. Калинин¹, Д.Е. Петрушин^{1,2,3}
(Петрозаводск, ¹ПетрГУ, ²Карельское РДУ;
Санкт-Петербург, ³СПбПУ Петра Великого)

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ*

Для эффективного и безопасного управления энергосистемой системный оператор осуществляет расчёты допустимых электроэнергетических режимов ЕЭС России и её составных частей, т.е. проводит расчёт установившихся режимов работы, статистической и динамической устойчивости. От точности этих расчётов зависит устойчивая и надёжная работа электроэнергетического оборудования. Одной из наиболее важных задач становится определение максимально допустимых и аварийно-допустимых перетоков в контролируемых сечениях.

До 2015 года определение значений допустимых перетоков велось только по результатам расчётов специалистов служб электрических режимов в специализированном ПО. При этом при расчётах специалисты были вынуждены рассматривать наиболее тяжелые схемно-балансовые ситуации, так как в ручном режиме отсутствует возможность ежедневной или хотя бы ежемесячной актуализации значений допустимых перетоков.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90123.

Система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) позволяет определять эти значения в режиме реального времени, вследствие чего величины допустимых перетоков (ДП СМЗУ) в 75–85 % времени оказываются выше значений, определённых на основании Приложения 6 к Положению по управлению режимами работы энергосистемы (ДП ПУР). Фактически система позволяет увеличить пропускную способность сети при соблюдении всех нормативных требований без сетевого строительства.

СМЗУ обеспечивает диспетчерский персонал результатами автоматического расчёта максимально допустимого перетока и аварийно-допустимого перетока для текущих схемно-режимных условий в заданных сечениях и является информационно-управляющей системой 2 категории. Режим работы СМЗУ – круглосуточный [2].

Расчётный цикл ПАК СМЗУ с динамикой состоит из следующих этапов: считывание телеизмерений, телесигнализации и специальных параметров из оперативно-информационного комплекса ОИК «СК-2007»; оценивание состояния расчётной схемы; расчёт установившегося режима; расчёт максимально допустимого перетока и аварийно-допустимого перетока; запись этих значений и оцененного перетока в ОИК; предоставление пользовательского интерфейса клиентскими приложениями, входящими в состав СМЗУ [1].

СМЗУ состоит из виртуальных серверов со специализированным ПО, включающих в себя планировщик задач и систему оповещения. А также клиентского ПО (конструктор, консоль и имитатор), установленного на серверах СМЗУ.

СМЗУ размещается на виртуальной платформе VMware модуля ЕТРК ЦОД ОДУ Северо-Запада [2].

ИУС/ИТ-активы, необходимые для работы СМЗУ: сетевые сервисы; локальная вычислительная сеть (ЛВС); мультисервисная сеть связи/система защиты периметра (МСС/СЗП); единый территориально-распределённый корпоративный центр обработки данных (ЕТРК ЦОД); основной оперативно-информационный комплекс СК-2007 (ОИК СК-2007); терминальный сервер (для доступа пользователей РДУ ОЗ ОДУ Северо-Запада к клиентскому ПО, установленному на серверах СМЗУ) [2].

Значения МДП, АДП СМЗУ отображаются в КПОС (задача «Контроль перетоков и ограничений в сечениях» в ОИК «СК-2007») и в формах ОИК (рис. 1) [1].

Мониторинг 1 (09.07.2019 12:10:19) Контроль перетоков и ограничений в сечениях ОДУ Северо-Запада СК7_ск07_ОИК1								—	□	×
Сечение	ПА	Тек	!	МДП	НК	МДП+НК	Авар			
Кола - Карелия (СМЗУ)	P	→ 192		542	30	572	730			
Онда - Кондопога (СМЗУ)	P	→ 294		320	45	365	505			
Карелия - Ленинград (СМЗУ)	P	→ 44		200	50	250	715			
Свирское-1 (СМЗУ)	P	← 119								
Свирское-2 (СМЗУ)	P	← 175								
Ленинград - Карелия (СМЗУ)	P	← 44								
Кола - Карелия	P	0 *		600	30	630	730			
Онда - Кондопога	P	0		320	45	365	505			
Карелия - Ленинград	P	0		200	50	250	715			
Свирское-1	P	0								
Свирское-2	P	0								
Ленинград - Карелия	P	0		210	80	290	830			

Рис. 1. Отображение МДП, АДП СМЗУ в КПОС

Строки, в наименовании которых дополнительно указано «СМЗУ», служат для управления электроэнергетическим режимом и отображения значений МДП, АДП СМЗУ, а также дополнительного ограничения значениями МДП, определёнными по дополнительному частотному критерию.

Форма ОИК «Таблица 400. Параметры настройки функций автоконтроля ПАК СМЗУ с динамикой (СЭР)» служит для задания, оперативного изменения и отображения параметров настройки функций автоконтроля ПАК СМЗУ с динамикой, реализованных в ОИК (рис. 2) [1].

Параметры настройки функций автоконтроля ПАК СМЗУ с динамикой										
№	Параметр	Кола-Карелия	Онда-Кондопога	Карелия-Ленинград	Свирское-1	Свирское-2	Ленинград-Карелия	Кондопога-Петрозаводск	Карелия-Сясь	Петрозаводск-Кондопога
1	Допустимое отклонение МДП СМЗУ от МДП ППР (при МДП СМЗУ < МДП ППР), МВт	50p	70p	50p	50p	50p	50p	50p	100p	50p
2	Допустимое отклонение МДП СМЗУ от МДП ППР (при МДП СМЗУ > МДП ППР), МВт	50p	70p	50p	50p	50p	50p	70p	200p	50p
3	Допустимое изменение МДП СМЗУ на течение расчетного цикла относительно МДП СМЗУ на предыдущем расчетном цикле, %	10p	10p	10p	10p	10p	10p	10p	10p	10p
4	Количество циклов блокировки значений МДП СМЗУ при изменении МДП СМЗУ на течение расчетного цикла относительно МДП СМЗУ на предыдущем расчетном цикле	1p	1p	1p	1p	1p	1p	1p	1p	1p
5	Допустимое изменение объемов УВ ПА, МВт	15p	15p	15p	15p	15p	15p	15p	15p	15p
6	Количество циклов блокировки значений МДП СМЗУ при фиксации изменения сумм или объемов УВ ПА	2p	2p	2p	2p	2p	2p	2p	2p	2p
7	Допустимое время отсутствия обновления расчетного цикла ПАК СМЗУ с динамикой, сек	720p								
8	Допустимое время отсутствия обновления ТМ в ПАК СМЗУ с динамикой, мин	12								

Рис. 2. Вид формы ОИК «Таблица 400. Параметры настройки функций автоконтроля ПАК СМЗУ с динамикой (СЭР)»

Формы ОИК «Таблица 403», «Таблица 404» и «Таблица 405» служат для отображения значений МДП, АДП СМЗУ, ограничения значений МДП СМЗУ по дополнительному частотному критерию определения допустимых перетоков и выявления недостоверных результатов расчёта ПАК СМЗУ с динамикой (рис. 3) [1].

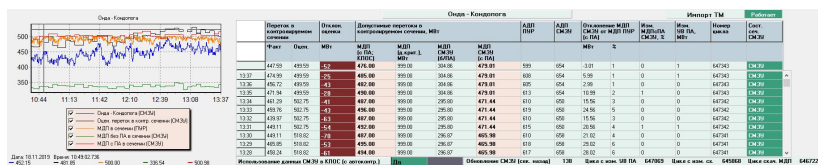


Рис. 3. Отображение значений МДП, АДП СМЗУ на форме ОИК «Таблица 403. Результаты работы СМЗУ с динамикой: направление Кол-Кар-Лен»

Выводы

В ходе работы была проанализированы отклонения расчёта ДП СМЗУ от ДП ПУР по шести контролируемым сечениям в операционной зоне филиала АО «СО ЕЭС» Карельское РДУ, которая в 75–85 % оказывается выше значений, приведённых в Положении по управлению режимами работы энергосистемы.

Благодаря СМЗУ в заданных сечениях определение величин максимально допустимого перетока и аварийно-допустимого перетока производится автоматически и в режиме реального времени. Система позволяет наиболее полно использовать пропускную способность сети. При этом обеспечивается устойчивая и надёжная работа электроэнергетического оборудования, а также эффективное и безопасное управление энергосистемой.

Литература

1. Инструкция по использованию программно-аппаратного комплекса «Система мониторинга запасов устойчивости», утв. распоряжением Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада от 14.01.2020 № 1. – СПб., 2020. – 25 с.
2. Инструкция для Службы оперативной эксплуатации автоматизированных систем управления Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада. – 24 с.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Т.П. Никишин, Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов
(Казань, КНИТУ-КАИ)

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РЕЛАКСАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В настоящее время во всём мире остро стоит вопрос о поиске новых, более эффективных источников электроэнергии. Одним из наиболее перспективных является водородный топливный элемент, основными преимуществами которых являются высокая плотность тока и КПД.

К сожалению, водородные топливные элементы имеют существенные недостатки: ненадёжность и низкое время безотказной работы. Для снижения влияния этих недостатков был предложен метод диагностики технического состояния водородного топливного элемента посредством анализа его релаксационных режимов работы, вызванных изменениями тока нагрузки [1–3].

Для реализации данного метода была разработана микропроцессорная система на основе Raspberry Pi 3, в которой программно реализованы следующие элементы: интерфейсный модуль, блок приема измерительной информации, блок управления и устройство обработки. Используемый в системе АЦП ADS 1262 имеет эффективную разрядность $m = 24$ бит. В качестве датчиков расхода газа на аноде и катоде используются датчики с пропускной способностью до 2 л/ч, обеспечивающие точность измерений ± 3 %. Давление газов на выходе анодных и катодных газотранспортных каналов измеряется датчиками давления, имеющими диапазон измерения 1700 кПа и погрешность $\pm 0,5$ %. Для измерения температуры выбран термоэлектрический преобразователь типа L (термопара хромель-копель). В качестве измерителя тока выбран датчик CSNK500M от компании Honeywell, номинальный измеряемый ток которого ± 500 А, погрешность датчика $\pm 0,5$ %. Выходной сигнал

датчиков через ФНЧ, необходимый для устранения сигналов на частотах выше половины частоты дискретизации, подается на вход многоканального АЦП. Сигнал с выхода АЦП в цифровом виде подается на вход блока приема измерительной информации, реализованный в микроконтроллере.

Система измерения электрических параметров топливного элемента функционирует следующим образом. При изменении тока нагрузки измеряются временные характеристики релаксации тока и напряжения, по результатам которых определяются три параметра экспоненциальной математической модели:

$$U(t) = U_L + U_1 e^{-at}.$$

По значениям определённых параметров обнаруживаются аномалии в поведении водородного топливного элемента и проводится оценка его технического состояния. При этом для повышения достоверности диагностики может использоваться дополнительная информация о давлении питающих газов, температуры и режимов увлажнения.

Предложенная система позволяет реализовать метод диагностики водородных топливных элементов на основе анализа их релаксационных процессов в процессе их эксплуатации.

Литература

1. *Никишин Т.П.* Исследование релаксационных режимов работы водородного топливного элемента / Т.П. Никишин, Г.В. Тимергалина, Е.С. Денисов // XXIII Туполевские чтения (школа молодых учёных): материалы Междунар. молод. науч. конф. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – С. 698–702.

2. *Nikishin T.P.* Relaxation processes in fuel cells / T.P. Nikishin, E.S. Denisov // 2018 International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE 2018. – PP. 83–88.

3. *Никишин Т.П.* Автоматизированная установка для исследования релаксационных режимов работы водородного топливного элемента / Т.П. Никишин, Г.В. Тимергалина, Е.С. Денисов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 422–424.

ПРЕИМУЩЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ КИХ-ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ В ОСТАТОЧНЫХ КЛАССАХ

Целью данной работы является исследование возможностей и преимуществ применения системы остаточных классов (СОК) для реализации цифровой обработки сигналов (ЦОС).

В последние годы были представлены работы, показывающие преимущества СОК в ЦОС [1–4]. Основными достоинствами СОК являются: разветвление сложных арифметических операций на несколько параллельных, приводящее к возрастанию быстродействия системы в целом; уменьшение сложности арифметических операций вследствие сокращения разрядности чисел в отдельном канале; возможность снижения энергопотребления непозиционных устройств. К основным недостаткам СОК можно отнести сложность реализации входных и выходных преобразователей из позиционной системы счисления (ПСС) в СОК и обратно; трудность выполнения некоторых немодульных операций.

Входные и выходные преобразователи оказывают значительное влияние на сложность реализации спецпроцессора СОК, поддержку и потребляемую мощность. Однако в случае большого количества вычислений эти недостатки могут быть скомпенсированы преимуществами применения СОК. По этим причинам СОК может использоваться в криптографии, которая требует умножения очень больших чисел, и в системах передачи с множественным доступом и кодовым разделением (CDMA). Основным критическим аспектом данных систем является уменьшение энергопотребления. Схема нерекурсивного непозиционного фильтра представлена на рис. 1.

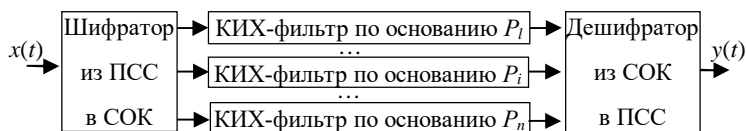


Рис. 1. КИХ-фильтр в СОК

В рамках исследования проводились измерения для различных тактовых частот реализаций КИХ-фильтров 8-го и 16-го

порядков с динамическим диапазоном 20 бит в СОК и в ПСС на ПЛИС XILINX. Усреднённые результаты потребления за цикл представлены на графике (рис. 2).

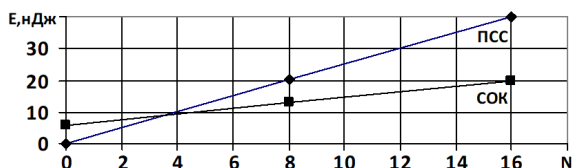


Рис. 2. Потребляемая энергия в зависимости от порядка КИХ-фильтра

Было установлено, что КИХ-фильтр в СОК показывает более низкое энергопотребление по сравнению с его реализацией в традиционном двоичном представлении при увеличении сложности вычислений. При этом, например, КИХ-фильтр 16-го порядка в СОК использует на 2 % меньше ресурсов ПЛИС по сравнению с ПСС. Это указывает на целесообразность дальнейшего исследования применения СОК для данного рода задач.

Литература

1. Галанина Н.А. Вопросы реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов на программируемой логике с использованием модулярной арифметики / Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова, Д.Д. Дмитриев // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 135–140.
2. Галанина Н.А. Разработка КИХ-фильтров с использованием модульных и немодульных операций системы остаточных классов / Н.А. Галанина, В.А. Песошин, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 193–198.
3. Чумычкин В.А. Системы цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС в системе остаточных классов / В.А. Чумычкин, Н.А. Галанина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 26-я Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп. – М.: Изд-во НИУ МЭИ, 2020. – С. 48.
4. Cardarilli G.C. RNS Implementation of High Performance Filters for Satellite / G.C. Cardarilli, A. Del Re, R. Lojacono, A. Nannarelli // 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings. – 2003. – Vol. 3. – PP. 3_1365–3_1379.

В.И. Семенов, С.И. Чучкалов, А.К. Шурбин
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

МНОГОКРАТНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОБРАТНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ УВЕЛИЧЕНИИ ТОЧНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ СИГНАЛА

Для разложения сигналов в настоящее время используются преобразования Фурье, Прони и вейвлет-преобразование. Для анализа сигналов с применением ЭВМ используются дискретные аналоги этих преобразований. Каждое из этих преобразований имеет свои недостатки и достоинства. Например, преобразование Фурье очень хорошо подходит для стационарных сигналов, но плохо подходит для изучения нестационарных сигналов, потому что базисные функции преобразования Фурье синус и косинус покрывают всю временную ось. Они хорошо позволяют определить частоту сигнала, а время изменения частоты сигнала совсем не определяется. Для определения времени изменения частоты сигнала используется оконное преобразование Фурье. Для получения высокочастотной информации необходимы узкие окна, а для низкочастотной – широкие окна, то есть надо использовать очень много окон.

Часто откликом линейной системы на импульсное воздействие является набор затухающих синусоид. Например, короткие сейсмические сигналы, отраженные от разных горизонтов, подобны затухающим синусоидам. Для обработки и интерпретации таких данных хорошо подходит преобразование Прони, так как преобразование Фурье при анализе коротких сигналов не обеспечивает высокую разрешающую способность в спектральной области. В методе Прони используется разложение сигнала на затухающие синусы или косинусы вида

$$l = Ae^{-dt} \cos(2\pi ft + j) \quad (1)$$

и определяются амплитуда, коэффициент затухания, частота и фаза (A, d, f, j) .

Аппроксимация дискретных отсчётов сигнала y_n базовой функцией (1) имеет вид:

$$x_n = \sum_{k=1}^m A_k \exp(j2\pi f_k D t_n + j j_k) \exp(-d D t_n), \quad n = 1, N,$$

где n – номер отсчёта, N – число отсчётов, m – глубина разложения, Dt – период дискретизации. Реальный сигнал моделируется комплексно-сопряженными экспонентами. Определяется минимум среднеквадратической ошибки аппроксимации исходной функции y_n в N точках наблюдения

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i - x_i)^2$$

для нахождения амплитуды, коэффициента затухания, частоты и начальной фазы каждого уровня разложения, используя метод наименьших квадратов. Общее количество параметров

$$(A_k, d_k, f_k, j_k)_{k=1}^{k=m}$$

является дискретным спектром Прони по аналогии с дискретным спектром Фурье. Этот спектр позволяет с высокой степенью достоверности аппроксимировать исходный нестационарный сигнал.

Очень хорошим инструментом для определения частоты и времени появления является вейвлет-преобразование. Базисные функции, называемые вейвлетами, обладают свойством частотно-временной локализации и сам анализ называется частотно-временным. Вейвлет-преобразование автоматически обладает подвижным частотно-временным окном, узким на малых масштабах и широким на больших масштабах. Аналогом частоты для вейвлет-преобразования является обратная величина масштабного коэффициента. Чтобы перекрыть базисными функциями все возможные временные положения сигнала, необходимо базисные функции сдвигать по оси времени, то есть вычислить корреляцию сигнала с вейвлетом, при этом требуется много времени. Для исследования реальных нестационарных сигналов используются дискретное и непрерывное вейвлет-преобразования (ВП). Дискретное ВП не является дискретизированной версией непрерывного вейвлет-преобразования. Если при непрерывном ВП используются сдвиги вейвлетов с любым сколь угодно малым шагом, то дискретное ВП основано на использовании целочисленных сдвигов и задании масштабов степенью двойки. Из широкого класса вейвлетов используются те, которые подчиняются свойству кратномасштабного анализа (КМА). Такие вейвлеты позволяют осуществлять быстрые алгоритмы декомпозиции за счёт того что используется децимация, то есть выборка сигнала уменьшается в 2 раза на каждом уровне

разложении (пирамидальный алгоритм вычислений). В настоящее время широко применяются дискретное ВП для декомпозиции (разложения) и композиции (реконструкции) сигналов. В научной литературе отмечается, что при непрерывном ВП реконструировать сигнал невозможно, так как вейвлеты не ортогональные, число вейвлет-коэффициентов избыточно, алгоритм вычисления медленный и поэтому нет теории и практического применения КМА с использованием вейвлетов на основе производных функции Гаусса и других. Непрерывное вейвлет-преобразование одномерного сигнала $S(t)$ – это его представление в виде интеграла Фурье по системе базисных функций $\psi(t)$:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2)$$

Подобно обратному ПФ существует обратное непрерывное ВП, которое используется для реконструкции и при КМА сигналов:

$$S(t) = C_{\psi}^{-1} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(a, b) \frac{da db}{a^{3+k}}, \quad (3)$$

где C_{ψ} – нормализующий коэффициент; $F_{\psi}(\omega)$ – Фурье-спектр базисной функции; k – показатель степени масштабного множителя.

Чтобы перекрыть базисными функциями все возможные временные положения сигнала, необходимо базисные функции сдвигать по оси времени, то есть вычислить корреляцию сигнала с вейвлетом, при этом требуется много времени. Для обработки сигналов в реальном масштабе времени необходимы алгоритмы быстрого численного вычисления прямого и обратного непрерывного ВП, поэтому актуальной является разработка таких алгоритмов. Авторами разработаны алгоритмы декомпозиции и реконструкции одномерных и двумерных сигналов с использованием непрерывного ВП. Алгоритмы представлены в работах [1, 2]. Профилировка программы численного вычисления непрерывного вейвлет-преобразования в частотной области показывает, что использование быстрого преобразования Фурье позволяет уменьшить время вычисления на четыре порядка для выборки сигнала из 32768 отсчётов по сравнению с прямым численным интегрированием по формулам (2) и (3). Использовались вейвлеты на основе производных функции Гаусса. Профилировка проводилась с процессором

Celeron® 2,54 GHz, ОЗУ 256 Mb. С течением времени авторы научились конструировать вейвлеты в частотной области, которые позволили уменьшить время преобразования более, чем в 2 раза по сравнению с использованием вейвлетов на основе производных функции Гаусса в частотной области. При обратном непрерывном ВП – в 260 раз для 32768 отсчётов и 5000 раз для 262144 отсчётов по сравнению с временем вычисления с применением БПФ. По сравнению с прямым численным интегрированием более 1000000 раз для 32768 отсчётов, а для 262144 отсчётов не сравнивалось, так как время вычисления обратного непрерывного ВП достигает десятков минут. Профилировка производилась для процессора *Celeron*® 2,54 GHz, ОЗУ 1 Gb.

Из теории обобщенного преобразования Фурье известно, что вейвлеты ортогональны, если скалярное преобразование этих вейвлетов равно нулю. В частотной области это утверждение соответствует тому, что произведение спектров этих векторов равно нулю, то есть спектры не должны налагаться друг на друга, как показано на рис. 1, а).

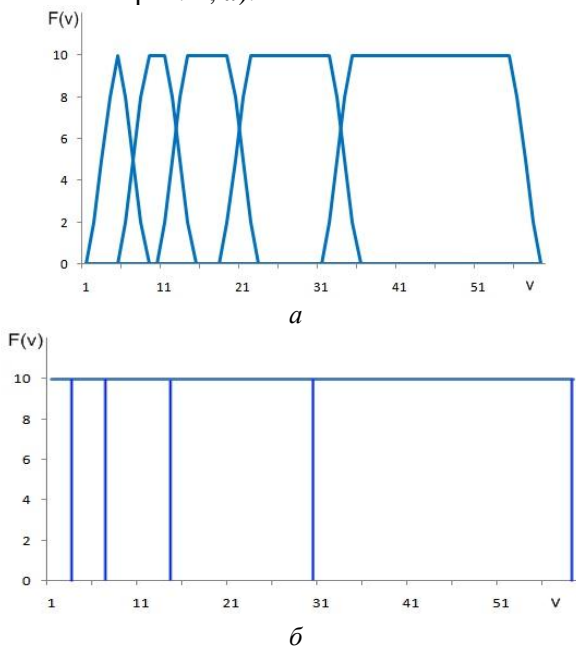


Рис. 1. Спектры вейвлетов разного масштабного коэффициента

Спектры должны быть расположены так, как на рис. 1, б. Если назвать спектры вейвлетов «окнами», то эти «окна» должны быть прямоугольными, имеющими одинаковую высоту, но разную ширину. Все другие «окна» другой формы, образуют в наборе (сумме) неравномерную амплитудно-частотную характеристику.

Для примера на рис. 2 представлена частотная характеристика набора *МНАТ*-вейвлетов, то есть вейвлетов, полученных на основе второй производной функции Гаусса. Так как при каждом значении масштабного коэффициента вейвлет представляет собой полосовой фильтр, набор (сумма) вейвлетов представляет собой блок фильтров с неравномерной частотной характеристикой, определяемой константами *A* и *B* (рис. 2).

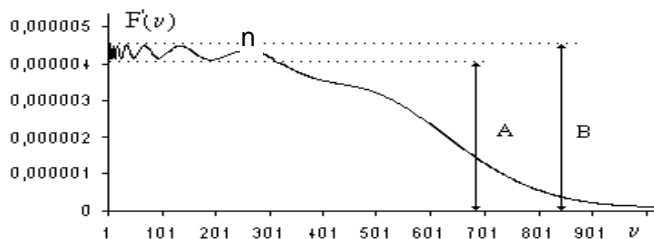


Рис. 2. Частотная характеристика набора *МНАТ*-вейвлетов

Ошибка восстановления тем меньше, чем меньше разница между *A* и *B*. Разницу можно уменьшить, используя дуальный вейвлет. С этой точки зрения даже ортогональные вейвлеты для дискретного ВП не совсем ортогональны, так как спектры их имеют наложения, потому что у них неидеальные амплитудно-частотные характеристики, как показано на рис. 1, а). Они также не симметричны или антисимметричны.

При преобразовании Прони функции, описываемые уравнением (1), не дают идеальные амплитудно-частотные характеристики. Спектры их имеют наложения и потому ошибка восстановления больше, чем при использовании ортогональных вейвлетов, сконструированных в частотной области. Конструируя вейвлет или любую функцию во временной области нельзя получить идеальную амплитудно-частотную характеристику для такой функции. Рассмотрим симметричный вейвлет, сконструированный во временной области. Уравнение такого вейвлета имеет вид:

$$y(t, a, b) = \frac{\sin[(t - b)/a]}{(t - b)/a} \cos \omega t.$$

На рис. 3 представлены частотные характеристики этого вейвлета и ортогонального вейвлета, сконструированного в частотной области, на одном и том же графике в децибелах. В диапазоне частот до 260 представлена частотная характеристика вейвлета, сконструированного во временной области, а от 260 до 512 – вейвлета, сконструированного в частотной области. На рис. 3 отчётливо видно, как сильно отличаются частотные характеристики этих вейвлетов при сопоставлении их в одинаковом масштабе. С помощью ортогональных вейвлетов возможно определить средний размер объектов на изображении [3, 4, 5].

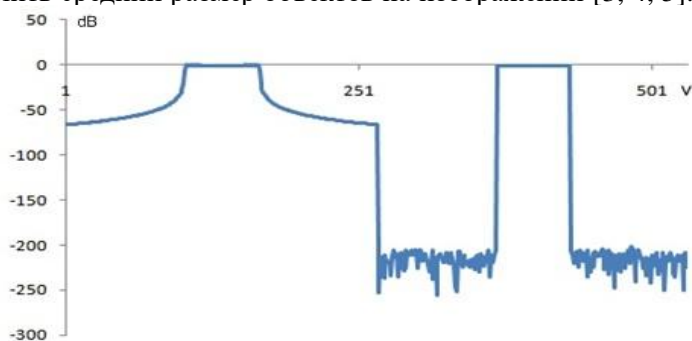


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики вейвлетов, сконструированных во временной и частотной области

Литература

1. Семенов В.И. Фильтрация изображений, полученных с помощью оптического микроскопа, с применением кратномасштабного анализа / В.И. Семенов, К.Г. Михеев, А.К. Шурбин, Г.М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – Т. 16, № 3. – С. 399–404.
2. Семенов В.И. Конструирование ортогональных вейвлетов в частотной области для кратномасштабного анализа сигналов / В.И. Семенов, А.К. Шурбин, К.Г. Михеев, Г.М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 230–238.
3. Семенов В.И. Конструирование вейвлетов в частотной области / В.И. Семенов, С.И. Чучкалов, О.В. Христофоров // Journal of

Advanced Research in Technical Science, North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. – Is. 7-2. – PP. 26–29.

4. Семенов В.И. Определение среднеквадратичного отклонения размера объектов на изображении / В.И. Семенов, Г.М. Сорокин, А.К. Шурбин, Н.И. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 96–99.

5. *Semenov V.I. Calculating the standard deviation of the size of objects in an image / V.I. Semenov, O.V. Khristoforov, S.I. Chuchkalov // Journal of Advanced Research in Technical Science, North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. – PP. 62–64.*

А.А. Лебедев, Д.В. Завьялов, Е.М. Казина, А.С. Журавлева
(Ярославль, ЯрГУ им. П.Г. Демидова)

АУГМЕНТАЦИЯ БАЗЫ ЭНДОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КОЛОНОСКОПИИ

Колоректальный рак – распространенное онкологическое заболевание. Эффективный метод повышения показателей выживаемости от колоректального рака – ранняя диагностика, включая эндоскопию [1].

Размер базы изображений важен для обучения свёрточных нейронных сетей. При этом сбор изображений затруднен сложностью их получения, необходимостью привлечения специалистов для разметки. Так возникает необходимость в этапе алгоритмического расширения базы эндоскопических изображений (аугментации).

В данной работе были рассмотрены два варианта аугментации: стандартная аугментация, предложенная в работе [2], а также собственный алгоритм. При стандартной аугментации, для того чтобы сделать модель более устойчивой к различным размерам и формам входных объектов, к каждому изображению обучающей выборки случайным образом применяются некоторые преобразования [2]: используется все исходное входное изображение; из изображения вырезается фрагмент (патч), для которого минимальное пересече-

ние с объектом согласно мере Жаккара составляет 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 или 0,9. Размер каждого патча составляет от 10 до 100 % от размера исходного изображения, и соотношение сторон находится в диапазоне от 12 до 2 к 1.

После выполнения этого этапа производится изменение размеров каждого патча до некоторого фиксированного значения и осуществляется зеркальное преобразование части патчей по горизонтали, а также выбирается с вероятностью 0,5 одна из двух последовательностей фотометрических преобразований, аналогичных описанным в [3].

При использовании собственного алгоритма аугментации дополнительно используются преобразования, при которых учитывается тот факт, что рассматриваемые в исследовании изображения не имеют «верха» и «низа». В отличие от стандартной аугментации, в данном варианте рассматривается также зеркальное отображение изображений по вертикали.

При использовании разработанного варианта аугментации выполняется преобразование изображения из цветового пространства RGB в HSV, рандомизация яркости, контрастности, насыщенности и оттенка в заданных пределах, осуществляется случайный поворот изображения на 90, 180 и 270 градусов с вероятностью 0,5, зеркальное отображение по горизонтали и вертикали, вырезание из изображения патчей случайным образом и изменение их размера с выбором различного соотношения сторон.

Для выбора оптимального варианта аугментации было проведено исследование с использованием модели свёрточной нейронной сети SSD-300. Для сравнения результатов, полученных при использовании стандартного и разработанного типов аугментации, использовались следующие метрики [4]: Precision (P) (точность); Recall (R) (полнота или чувствительность); F1 мера; AP (Average Precision); mAP (mean Average Precision). В данном исследовании рассматривался только один класс, а следовательно значение метрик AP и mAP совпадают.

Были построены кривые зависимости значений функции потерь (loss-функции) от числа эпох для обучающей и валидационной выборок (рис. 1). Как видно из приведенных кривых, значения функции потерь на обучающей выборке приблизи-

тельно одинаковы при использовании обоих типов аугментации, в то время как на валидационной выборке алгоритм оптимизации сходится быстрее при использовании разработанного типа аугментации, что также подтверждается более низким минимальным значением loss-функции, полученным в ходе обучения.

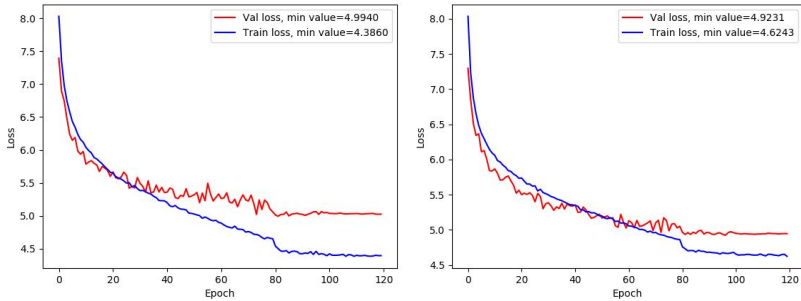


Рис. 1. Кривые зависимости значений loss-функции от числа эпох для валидационной (Val loss) и обучающей (Train loss) выборок: при использовании стандартной аугментации (а); при использовании собственного алгоритма аугментации (б)

На рис. 2 приведены кривые зависимости значений метрик mAP и F1 от числа эпох обучения, а на рис. 3 – кривые зависимости точности от полноты. В обоих случаях кривые строились на валидационной выборке.

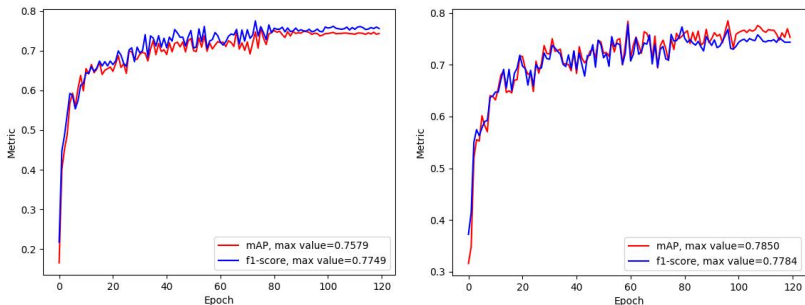


Рис. 2. Кривые зависимости значений метрик mAP и F1 от числа эпох обучения, построенные для валидационной выборки: при использовании стандартной аугментации (а); при использовании собственного алгоритма аугментации (б)

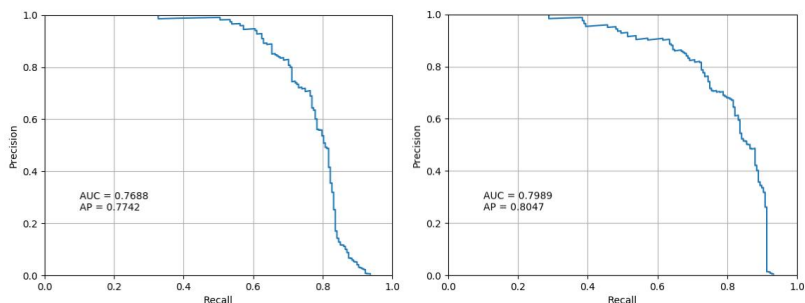


Рис. 3. Кривые зависимости значений точности от полноты, построенные для валидационной выборки: при использовании стандартной аугментации (а); при использовании собственного алгоритма аугментации (б)

Как следует из рис. 2, при использовании обоих типов аугментации наблюдаются достаточно высокие значения метрик F1 и mAP. Однако максимальные значения были получены именно при использовании собственного варианта аугментации (mAP=0,785, F1=0,778). Согласно результатам, представленным на рис. 3, предпочтительным вариантом также является собственный алгоритм аугментации, о чем говорит большее значение площади под графиком кривой зависимости точности от полноты (AUC=0,79).

Таким образом, согласно проведенному исследованию, лучшие результаты работы нейронной сети SSD-300 были получены при использовании собственного алгоритма аугментации, что говорит о целесообразности его использования для построения системы поддержки принятия решений в колоноскопии.

Литература

1. *Levin B.* Screening and Surveillance for the Early Detection of Colorectal Cancer and Adenomatous Polyps / B. Levin, D. Lieberman, B. McFarland, K. Andrews, D. Brooks, J. Bond, et al. // *Gastroenterology*. – 2008. – No. 134(5). – PP. 1570–1595.
2. *Liu W.* SSD: Single Shot Multibox Detector / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, et al. – CoRR, abs/1512.02325. – 2015. – PP. 1–17.
3. *Howard A.G.* Some improvements on deep convolutional neural network based image classification / A.G. Howard // *arXiv preprint arXiv:1312.5402*. – 2013. – PP. 1–6.
4. *Бринк Х.* Машинное обучение / Х. Бринк, Д. Ричардс, М. Феверолф. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.

АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В современных инфокоммуникационных системах и технологиях важное место занимают методы и средства обработки, хранения и передачи изображений [1].

Поскольку изображения представляют собой данные относительно больших объемов, то для повышения скорости их передачи применяются различные методы сокращения избыточности, в том числе методы сжатия на основе вейвлет-преобразования [2].

Обычно для сжатия изображений применяют дискретные кратно-масштабные ортогональные вейвлет-преобразования, например, преобразование Хаара [3]. В результате выполнения такого преобразования полутоновое изображение с размерами $N \times N$ пикселей (N – степень числа 2) представляется в виде наборов аппроксимирующих коэффициентов уровня j_0

$$\left\{ a_{j_0, m, n} \mid j_0 \in [0, J - 1]; m, n \in [0, 2^{j_0} - 1] \right\}$$

и горизонтальных, вертикальных и диагональных детализирующих коэффициентов уровней $j_0 + 1, \dots, J - 1$

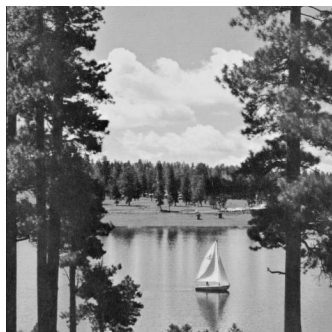
$$\left\{ d_{j, m, n}^H, d_{j, m, n}^V, d_{j, m, n}^D \mid j \in [j_0, J - 1]; m, n \in [0, 2^{j-1} - 1] \right\},$$

где $J = \log_2 N$.

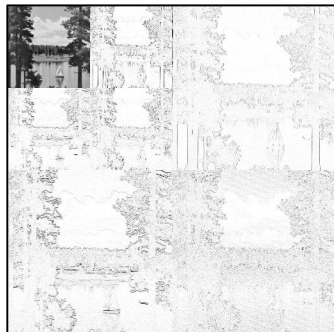
Пример выполнения двухуровневого вейвлет-преобразования Хаара для стандартного изображения lake из коллекции USC-SIPI [4] приведен на рисунке, где аппроксимирующие коэффициенты показаны в виде точек копии изображения начального уровня, а большие по абсолютному значению детализирующие коэффициенты отмечены более темными точками.

Детализирующие коэффициенты вейвлет-преобразования отражают изменения яркости изображения в точках на разных уровнях. Их значимость с точки зрения вклада в представление изображения можно определить с помощью значений

$$e_{j, m, n} = \left(d_{j, m, n}^H \right)^2 + \left(d_{j, m, n}^V \right)^2 + \left(d_{j, m, n}^D \right)^2.$$



a



б

Пример вейвлет-преобразования изображения lake:
стандартное изображение (*a*); результат преобразования (*б*)

Изображение можно представить в виде наборов аппроксимирующих коэффициентов уровня j_0 и значимых детализирующих коэффициентов уровней $j_0, \dots, J - 1$, для которых выполняется условие

$$e_{j,m,n} \geq D_j,$$

где D_j – пороговое значение для уровня j .

Данное представление позволяет сократить объем информации для стандартных полутоновых изображений размера 512×512 пикселей более, чем в два раза, что сравнимо с их представлением в форматах JPEG, PNG и TIFF.

Литература

1. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
3. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
4. The USC-SIPI Image Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sipi.usc.edu/database/database.php> (дата обращения: 16.03.2020).

СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХААРА И АДАПТИВНОГО МЕТОДА ХАФФМЕНА

В настоящее время применяется большое количество методов сжатия изображений, основанных на вейвлет-преобразовании [1]. Эти методы, как правило, являются методами сжатия с потерями и определяют выполнение следующих шагов: 1) снижение корреляции между элементами изображения; 2) квантование элементов изображения; 3) кодирование элементов изображения. Первый шаг позволяет снизить избыточность информации, содержащейся в отдельных элементах изображения. Второй шаг позволяет выделить наиболее значимую информацию об изображении и улучшить статистические характеристики данных. Третий шаг позволяет сократить избыточность информации за счёт оптимального представления элементов изображения в виде кодов.

К одним из наиболее быстрых и простых вейвлет-преобразований относится преобразование Хаара [2]:

$$\begin{aligned}a_{j,m,n} &= \frac{a_{j+1,2m,2n} + a_{j+1,2m+1,2n} + a_{j+1,2m,2n+1} + a_{j+1,2m+1,2n+1}}{4}, \\d_{j,m,n}^H &= \frac{a_{j+1,2m,2n} + a_{j+1,2m+1,2n} - a_{j+1,2m,2n+1} - a_{j+1,2m+1,2n+1}}{4}, \\d_{j,m,n}^V &= \frac{a_{j+1,2m,2n} - a_{j+1,2m+1,2n} + a_{j+1,2m,2n+1} - a_{j+1,2m+1,2n+1}}{4}, \\d_{j,m,n}^D &= \frac{a_{j+1,2m,2n} - a_{j+1,2m+1,2n} - a_{j+1,2m,2n+1} + a_{j+1,2m+1,2n+1}}{4},\end{aligned}$$

где $a_{j,m,n}$ – аппроксимирующие коэффициенты уровня j в позиции (m, n) ; $d_{j,m,n}^H$, $d_{j,m,n}^V$, $d_{j,m,n}^D$ – горизонтальные, вертикальные и диагональные детализирующие коэффициенты уровня j в позиции (m, n) ; $a_{j+1,2m,2n}$, $a_{j+1,2m+1,2n}$, $a_{j+1,2m,2n+1}$, $a_{j+1,2m+1,2n+1}$ – ап-

проксимирующие коэффициенты уровня $j + 1$ в позициях $(2m, 2n)$, $(2m + 1, 2n)$, $(2m, 2n + 1)$ и $(2m + 1, 2n + 1)$.

Детализирующие коэффициенты обладают различной значимостью с точки зрения вклада в восприятие изображения. Значимые коэффициенты можно определить с помощью условия

$$e_{j,m,n} \geq D_j,$$

где $e_{j,m,n} = (d_{j,m,n}^H)^2 + (d_{j,m,n}^V)^2 + (d_{j,m,n}^D)^2$; j – уровень коэффициента; m, n – координаты коэффициента на уровне j ; D_j – пороговое значение на уровне j .

Тогда изображение можно представить с помощью аппроксимирующих коэффициентов и значимых детализирующих коэффициентов. Для его восстановления также необходимо передать размер, начальный уровень и признаки значимости коэффициентов. Для улучшения качества сжатия значимые коэффициенты можно дополнительно нормализовать – привести к заданному диапазону значений.

Выполнение указанных действий уже позволяет добиться сжатия изображения более, чем в два раза. Ещё больший эффект получается, если добавить ещё один шаг – кодирование признаков значимости и значимых детализирующих коэффициентов с помощью адаптивного метода Хааффмена. В этом случае объем изображений сокращается не менее, чем в четыре раза (эксперименты проводились на стандартных изображениях из коллекции [3]).

Литература

1. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
2. *Ватолин Д.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
3. The USC-SIPI Image Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sipi.usc.edu/database/database.php> (дата обращения: 16.03.2020).

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D СИГНАЛОВ МНОГОЛЕПЕСТКОВОЙ СИСТЕМЫ ПО СХЕМЕ JERK

Применение генерации 3D сигналов на основе динамического хаоса является перспективным направлением развития конфиденциальных систем цифровой передачи информации [1]. Для формирования псевдослучайных сигналов эффективно применение многолепестковых систем с хаотической динамикой.

Цель работы – исследование статистических характеристик 3D сигналов многолепестковой системы с хаотической динамикой по схеме Jerk.

Один из широко используемых вариантов реализации схемы Jerk описывается системой уравнений [2]:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = z, \quad \dot{z} = -x - y - az + f(x),$$

где x , y , z – переменные системы; a – параметр; кусочно-нелинейная функция $f(x)$ определяет количество мультиспиралей в фазовом пространстве системы.

Численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику схемы Jerk, проводилось методом Эйлера. Относительный шаг временной дискретизации, нормированный к периоду квазирезонансных колебаний в моделируемой системе, выбран равным 0,09.

Исследовано влияние вариации параметра многолепестковой системы по схеме Jerk на фазовые портреты системы. В результате проведенного моделирования установлено, что хаотический режим наблюдается при значениях a в диапазоне от 0,3 до 1,1.

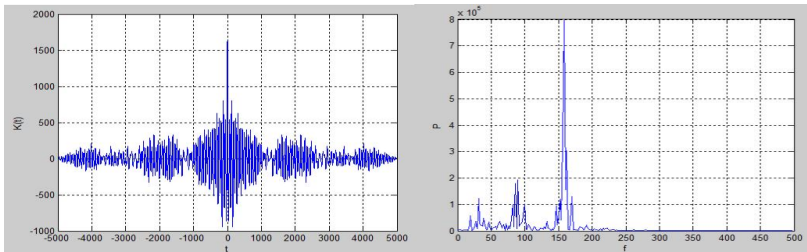
В работе исследованы статистические характеристики 3D сигналов, формируемых на основе многолепестковой системы по схеме Jerk. Полученные оценки значений математического ожидания m , дисперсии D и СКО σ сигналов x , y , z при различных значениях a приведены в таблице.

Полученные типовые формы корреляционной функции и спектральной плотности сигнала y при $a = 0,7$ представлены на рисунке. По полученным оценкам статистических характеристик 3D псевдослучайных сигналов, формируемых многолепестковой

системой, обоснованы инженерные рекомендации по выбору параметров базовой системы с динамическим хаосом по схеме Jerk.

Статистические характеристики 3D сигналов
многопестковой системы по схеме Jerk

Сигнал	$a = 0,3$	$a = 0,7$	$a = 1,1$
x	$m = -0,156$ $D = 3,348$ $s = 1,83$	$m = -0,309$ $D = 3,367$ $s = 1,835$	$m = -0,288$ $D = 2,554$ $s = 1,598$
y	$m = -1,188 \times 10^{-3}$ $D = 0,909$ $s = 0,954$	$m = -5,317 \times 10^{-3}$ $D = 0,325$ $s = 0,57$	$m = -6,602 \times 10^{-3}$ $D = 0,333$ $s = 0,577$
z	$m = -1,998 \times 10^{-3}$ $D = 0,894$ $s = 0,946$	$m = -1,791 \times 10^{-3}$ $D = 0,308$ $s = 0,555$	$m = -1,881 \times 10^{-3}$ $D = 0,304$ $s = 0,552$



Корреляционная функция и спектральная плотность
сигнала y при $a = 0,7$

Литература

1. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний / Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина и др. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.
2. Chunxia L. Research on the multi-scroll chaos generation based on Jerk Mode / L. Chunxia, Y. Jie, X. Xianchun, et al. // Procedia Engineering. – 2012. – No. 29. – PP. 957–961.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДВУХЛУЧЕВОМ КОНТРОЛЕ: ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Многочувствительные системы ультразвукового (УЗ) контроля основаны на пространственно-распределённом приеме звуковых импульсов [1, 2]. Результирующий сигнал в приемном тракте системы является интерференцией сигналов, дошедших до приёмника различными путями в течение различного времени [3]. Для определения временного положения сигналов друг относительно друга может использоваться корреляционный прием, являющийся своего рода их фильтрацией во времени.

При двухлучевом контроле, как частном случае многочувствительного контроля, во взаимной корреляционной функции (ВКФ) сдвоенного и эталонного сигналов проявляются два пика, разность во временном положении которых соответствует задержке сигналов друг относительно друга (рис. 1, в).

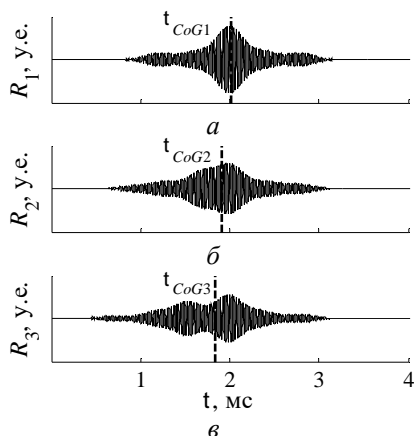


Рис. 1. Изменение формы ВКФ сдвоенного сигнала в приёмнике при росте относительной задержки между сигналами

Определение относительной задержки сигналов по положению пиков ВКФ является высокоточным методом, но затрачива-

ет дополнительные вычислительные ресурсы, т.к. требует вычисления производной огибающей ВКФ и оценки радиуса кривизны пиков [4]. К тому же такой подход не применим при малых относительных задержках, когда пики становятся неразличимы (рис. 1, б) и, соответственно, имеет нижнюю границу разрешения относительного положения импульсов.

На рис. 2 сплошной линией показано различие измеренной относительной задержки $\Delta T_{D_{\text{изм}}}$ по пикам ВКФ от заданной (ожидаемой) задержки $\Delta T_{D_{\text{ожид}}}$ на основе модельных расчётов, где в качестве излучаемого сигнала использован импульс длительностью 1 мс, заполненный несущей частотой 40 кГц, с фазовой модуляцией согласно последовательности Баркера 5 порядка. В этом случае разрешение относительного положения импульсов по временному расстоянию между пиками ВКФ составляет порядка 0,25 мс. Это соответствует 10-и периодам сигнала.

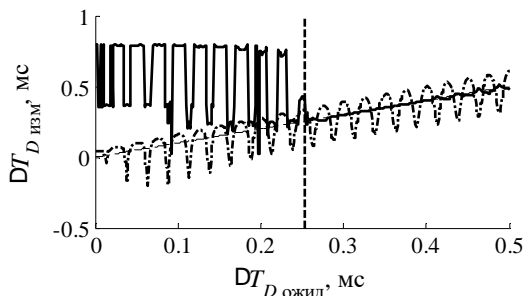


Рис. 2. Измеренная относительная задержка по положению пиков ВКФ (сплошная) и по средневзвешенному положению ВКФ (штрих-пунктирная) в зависимости от заданной задержки при моделировании; вертикальной линией обозначен нижний предел возможности определения относительной задержки по пикам ВКФ

Измерение малых относительных задержек между сигналами в приёмнике (рис. 1, б) возможно по анализу асимметрии ВКФ [1], т.е. по её средневзвешенному положению (обозначено вертикальным пунктиром на рис. 1)

$$\tau_{CoG} = \frac{\dot{\tau} R(\tau) d\tau}{\dot{R}(\tau) d\tau}.$$

При этом симметричной ВКФ считается при нулевом значении задержки (рис. 1, *a*). Такой подход не ограничивает её измеряемую величину, т.е. не имеет нижней границы разрешения относительного положения импульсов. Разрешение определяется только частотой дискретизации сигналов.

На рис. 2 штрих-пунктирной линией показано различие измеренной задержки $DT_{D \text{ изм}}$ по средневзвешенному положению ВКФ от заданной (ожидаемой) задержки $DT_{D \text{ ожид}}$. Зависимость $DT_D(\tau_{CoG})$ изменяется по линейному закону с наложением значительных квазирегулярных колебаний [1], частота которых соответствует несущей частоте ультразвука. При реальных экспериментальных измерениях колебания сглаживаются при длительном усреднении в связи с фазовыми флуктуациями сигналов.

Таким образом, корреляционный анализ на основе оценки асимметрии ВКФ повышает временное разрешение измерений при двухлучевом контроле неоднородной среды.

Литература

1. *Бычкова И.Ю.* Цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка ультразвуковых сигналов для импульсных измерений в неоднородной среде / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Приборы и техника эксперимента, 2018. – № 3. – С. 114–119.

2. *Бычкова И.Ю.* Импульсный ультразвуковой контроль стратификации воздуха над нагретой поверхностью / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета, 2016. – № 1. – С. 39–46.

3. *Костюков А.С.* Изменчивость случайной погрешности ультразвуковых импульсных и доплеровских измерений в неоднородной среде / А.С. Костюков, М.В. Никандров, Л.А. Славутский // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 9. – С. 700–705.

4. *Криницкий Г.В.* Методы снижения влияния многолучевости на качество спутниковой навигации для обеспечения точного захода на посадку / Г.В. Криницкий, М.Д. Леонова, Е.Н. Юрасова // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 222. – С. 98–102.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ ДМИТРИЕВА–КИСЛОВА

Хаотические сигналы могут быть применены в системах передачи информации. Для корреляционной обработки хаотических сигналов применяются различные методы [1].

Целью работы является исследование влияния шумов на корреляционную обработку сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева–Кислова. Проведена оценка эффективности обработки при различных параметрах системы и интервалах корреляционного накопления.

Моделирование системы проведено в среде MathCAD, для моделирования применены стандартные встроенные средства. Выбор параметров моделирования системы Дмитриева–Кислова проводился по рекомендациям, полученным в [2].

Оценка влияния шумов проведена по отношению результатов текущего корреляционного накопления аддитивной смеси шума с хаотическим сигналом и без хаотического сигнала. Для сравнения эффективности применяемой корреляционной обработки при различных режимах полученные временные зависимости нормированы к периоду усреднённой квазирезонансной частоты системы (коэффициент Q). Выполнено сравнение результатов корреляционной обработки сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева–Кислова при изменении нормированного шага интегрирования и вариации нормированного окна сглаживания.

Полученные в работе зависимости минимально требуемых интервалов корреляционного накопления от изменения отношения сигнал/шум (С/Ш) приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Нормированное окно сглаживания 16 (шаг 0,1)

Отношение С/Ш	–5 дБ	–8 дБ	–10 дБ
Мин. интервал корреляции (НЧ фильтрация)	10,7 Q	34,2 Q	43,8 Q
Мин. интервал корреляции (без фильтрации)	10,3 Q	34,2 Q	49,1 Q

Таблица 2

Нормированное окно сглаживания 8 (шаг 0,2)

Отношение С/Ш	–5 дБ	–10 дБ	–11 дБ
Мин. интервал корреляции (НЧ фильтрация)	13,3 \underline{Q}	40,4 \underline{Q}	41,2 \underline{Q}
Мин. интервал корреляции (без фильтрации)	6,1 \underline{Q}	40,7 \underline{Q}	61,1 \underline{Q}

Таблица 3

Нормированное окно сглаживания 6 (шаг 0,3)

Отношение С/Ш	–5 дБ	–8 дБ	–10 дБ
Мин. интервал корреляции (НЧ фильтрация)	8,7 \underline{Q}	49,2 \underline{Q}	57,6 \underline{Q}

Проведена оценка эффективности применения предварительной цифровой НЧ фильтрации сигналов системы Дмитриева–Кислова. Установлено, что введение фильтрации позволяет уменьшить требуемый интервал накопления сигнала (разница до 19,9 \underline{Q} при шаге 0,2 и отношении С/Ш = –11 дБ).

Для снижения вычислительных затрат на корреляционную обработку сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева–Кислова, необходимо увеличивать шаг численного интегрирования системы, в работе обоснован рекомендуемый диапазон для выбора допустимых значений нормированного шага в интервале $0,1 \div 0,3$.

Таким образом, при цифровой корреляционной обработке сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева–Кислова, применение НЧ фильтрации позволяет сократить минимально требуемую длительность корреляционного накопления. Для увеличения быстродействия допускается увеличение шага численного интегрирования до 0,3, при сохранении характеристик и спектров генерируемых хаотических сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева–Кислова.

Литература

1. *Дмитриев А.С.* Генерация хаоса / А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас. – М.: Техносфера, 2012. – 424 с.
2. *Давыдов В.Г.* Средства MathCAD в моделировании генератора псевдослучайных сигналов Дмитриева–Кислова / В.Г. Давыдов // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (школы-семинара) молод. учёных. – Тольятти: ИПЦ «Гарт», ИП Качалин А.В., 2019. – С. 509–514.

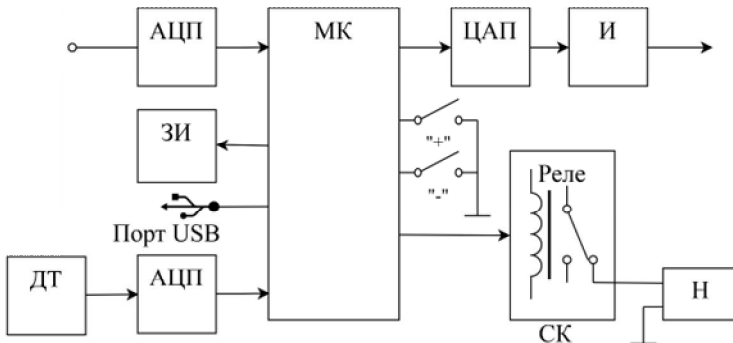
ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Цифровой модуль контроля и управления – это модуль на основе микроконтроллера, который предназначен для измерения и выдачи сигналов управления различными электронными устройствами. Данный цифровой модуль имеет аналоговый вход, на который поступает сигнал с датчика физической величины. Данные с аналогового входа оцифровываются и выводятся на знакосинтезирующий индикатор.

Модуль имеет аналоговый выход (токовый выход 0–20 мА), который может обеспечивать работу различных промышленных систем автоматики.

Модуль может также выполнять измерение температуры путём оцифровки сигнала с датчика и поддержания положительной температуры путём подачи дискретного сигнала с микропроцессора на реле, при замыкании которого подаётся напряжение на нагревательный элемент при 5 °С, так как коммерческая версия используемого микропроцессора имеет диапазон рабочих температур от 0 до 70 °С. Модуль имеет USB-порт для программирования параметров модуля пользователем.

Структурная схема модуля представлена на рисунке.



Структурная схема цифрового модуля контроля и управления

На рисунке использованы следующие обозначения: АЦП – это аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – это цифро-аналоговый преобразователь, МК – микроконтроллер, ЗИ – знакосинтезирующий индикатор, ДТ – датчик температуры, СК – сухой контакт, И – управляемый напряжением источник тока на операционных усилителях и Н – нагреватель.

Для реализации данного цифрового модуля будет использован микроконтроллер КМ1816ВЕ51. Оцифровку сигналов выполняют два 8-битных аналого-цифровых преобразователя с параллельным интерфейсом модели 1523ПВ2. Цифро-аналоговый преобразователь выбран 8-битным с параллельным входом *AD7302BNZ*. Операционный усилитель LM324 работает в режиме источника тока (с токовым выходом). В качестве нагревательного элемента будет использован нагревательный кабель, а в качестве термодатчика – микросхема 1019ЧТ4У.

Оцифровываемый аналоговый сигнал должен находиться в диапазоне от 0 до 5 В.

Для того чтобы отобразить значение измеряемой физической величины, полученные данные преобразуются с помощью уравнения $y = kx + b$, где y – это значение, выводимое на индикаторе, x – код полученный после аналого-цифрового преобразования, k и b – коэффициенты, программируемые пользователем через порт USB. Кроме того через порт *USB* выбираются отображаемые на индикаторе данные.

Управление токовым выходом осуществляется путём преобразования цифрового сигнала в аналоговый, установки значения выхода с помощью кнопок «+» и «–» и подачи этого сигнала на генератор тока. Значение тока регулируется от 0 до 100 %, соответствующим току от 0 до 20 мА на токовом выходе.

Литература

1. *Предко М.* Руководство по микроконтроллерам / М. Предко. – Т. I. – М: Постмаркет, 2001. – 488 с.

2. Источники тока на операционных усилителях, схемы и расчёты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vprayaem.ru/inf_curr1.html (дата обращения: 16.03.2020).

Д.Н. Белов, Н.А. Галанина
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВНИМАНИЯ ВОДИТЕЛЯ

Одной из частых причин дорожно-транспортных происшествий является потеря контроля над транспортным средством, вызванная усталостью и отвлечением внимания водителя. Устройство, способное определить уровень концентрации внимания водителя, является востребованным не только в системе безопасности, которая контролирует состояние водителя и предупреждает его о потере концентрации или возникновении опасного уровня усталости, но также в системах автоматического управления автомобилем. В данных случаях потребность в анализе состояния водителя возникает в момент начала движения или передачи управления. Традиционное решение данной задачи основано на анализе показаний датчиков внутри автомобиля, например, датчиков сжатия рулевого колеса. Современным методом является анализ направления взгляда и частоты моргания.

Целью данной работы является разработка и исследование методов обработки видеоизображений с определением дополнительного набора признаков потери концентрации внимания, проявляемых водителем по мере развития усталости, которые позволили бы определять уровень концентрации внимания с большей точностью, чем традиционные методы анализа. Определение дополнительных признаков происходит во время проведения экспериментов с использованием методов выявления зависимостей от времени, проведенного за рулем, и от показания датчиков, достоверно указывающих об усталости водителя [1].

Были проведены эксперименты – сессии видеозаписи процесса вождения двух водителей продолжительностью около 100 ч с последующим анализом. Видеокамера была закреплена на приборной панели автомобиля с захватом лица и руля. Съемка производилась в течение двух недель в разное время суток и с различным уровнем освещения [2].

В качестве базового алгоритма анализа видеоизображений был использован метод Каземи–Салливан [3] для обнаружения лица. В качестве дополнительных признаков были использованы показания датчика пульса [4] и электроэнцефалографа [5] потребительского класса. К возможным признакам был добавлен характер управления рулевым колесом, для изучения которого был разработан алгоритм определения вращения колеса, основанный на распознаваемых метках.

Возможными вариантами использования разрабатываемых методов обработки видеоизображения являются как использование их в системах адаптивного круиз-контроля, так и применение в отдельном устройстве, определяющем степень усталости водителя и предупреждающем об её опасном уровне.

Литература

1. Белов Д.Н. Анализ видеоизображения и датчиков в реальном времени для определения состояния водителя / Д.Н. Белов, В.В. Ржавин // Информатика и вычислит. техника: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 47–51.
2. Белов Д.Н. Разработка и исследование методов обработки видеоизображений для определения уровня концентрации внимания водителя / Д.Н. Белов, Н.А. Галанина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докл. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп. (12–13 марта 2020 г., г. Москва). – С. 268.
3. One millisecond face alignment with an ensemble of Regression Trees [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/One-millisecond-face-alignment-with-an-ensemble-of-KazemiSullivan/1824b1ccace464ba275ccc86619feaa89018c0ad> (дата обращения: 20.04.2020).
4. Датчик сердечного ритма Wavgat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dvrobot.ru/238/2142.html> (дата обращения: 20.04.2020).
5. EEG: TGAM Module [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://store.neurosky.com/products/eeg-tgam> (дата обращения: 20.04.2020).

О.С. Антонова, Д.В. Матвеев, А.Г. Седов, А.А. Тихомиров
(Ярославль, ЯрГУ им. П.Г. Демидова)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

С распространением алгоритмов, детектирующих различные объекты на изображении, возникает задача предварительной оценки качества изображений, цель которой отсеивать изображения с большим уровнем искажений, на которых невозможно установить, есть ли в кадре объект или нет.

Существует большое количество алгоритмов оценки качества, но их поиск продолжается [1–3]. В данной статье рассматривается один такой алгоритм. Используемая в данном алгоритме база 1440 чёрно-белых изображений с разрешением 512×512 пикселей была получена из базы ImageNET с различным содержанием. Эти изображения включают в себя фотографии техники, природы и зданий. Данные изображения с помощью экспертной оценки были разделены на два класса «видно объект» и «не видно объект».

Для разделения изображений на классы «видно объект» и «не видно объект» используется следующий алгоритм. Входное изображение измеряется с помощью метрики оценки изображений [4], на выходе которой изображению выдается некоторый коэффициент качества. Полученный коэффициент сравнивается с порогом, соответствующим данной метрике. Изображения с лучшим коэффициентом качества принадлежат классу «видно объект», с худшим – «не видно объект».

Для определения порога и оценки точности классификатора были использованы следующие метрики: Precision (точность), Recall (полнота) и F-мера.

Для алгоритма классификации с использованием метрик оценки качества были разработаны метрики оценки уровня искажений на основе карты контуров и на основе кумулятивной функции распределения.

Метрика на основе карты контуров представляет собой среднюю интенсивность контура, деленную на максимально возможное значение контура, обычно 255. Этот окончательный показатель шума лежит в интервале $[0, 1]$. Чем больше значение

метрики, тем больше уровень искажений. Для построения карты контуров в данной работе используются следующие алгоритмы: операторы Лапласа, Собеля, Шарра и Робертса.

Кроме метрики на основе карты контуров, предлагается алгоритм с использованием машинного обучения. Для алгоритма в качестве признаков выступают значения кумулятивной функции распределения.

Для алгоритма на основе значения кумулятивной функции распределения для вычисления признаков у входного изображения вычисляется спектр. Затем, начиная с внешних границ спектра, ряд concentрических окружностей накладывается на спектр, вычисляются индивидуальные суммы значений коэффициентов Фурье для каждого кольца. Далее для каждого кольца вычисляется отношение его полной суммы к общей сумме всех колец. Полученные отношения выступают в качестве признаков для регрессора на основе сильно рандомизированных деревьев.

Был проведен анализ алгоритмов классификации. В табл. 1 и 2 представлены полученные результаты исследования.

Таблица 1

Значения Precision, Recall и F-меры для метрики на основе карты контуров для различных операторов

Оператор	Порог	Значение порога	Precision	Recall	F-мера
Лаплас	Верхний	1,3	0,71	0,91	0,8
	Нижний	$7,2 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,94	0,66
	Общее значение	—	0,62	0,92	0,74
Собель	Верхний	0,35	0,71	0,91	0,8
	Нижний	0,01	0,64	0,8	0,71
	Общее значение	—	0,68	0,87	0,769
Шарр	Верхний	0,37	0,71	0,91	0,8
	Нижний	0,01	0,58	0,91	0,71
	Общее значение	—	0,66	0,92	0,766
Робертс	Верхний	0,45	0,71	0,91	0,8
	Нижний	$7 \cdot 10^{-3}$	0,55	0,92	0,69
	Общее значение	—	0,64	0,91	0,76

Таблица 2

Значения Precision, Recall и F-меры для различных метрик

Алгоритм	Метрика	Precision	Recall	F-мера
С использованием порога	ПОСШ	0,58	0,94	0,721
	КСП	0,61	0,95	0,748
	ПСНС	0,67	0,83	0,742
	НОКЛБШ	0,67	0,76	0,71
	На основе карты контуров	0,69	0,88	0,769
	На основе анализа спектра Фурье	0,65	0,94	0,769
С использованием машинного обучения	На основе ЛБШ	0,77	0,72	0,744
	На основе кумулятивной ф-и распределения	0,81	0,78	0,794

1. Классификация с помощью метрик на основе карты контуров. Порог выбирался по максимальному значению F-меры. Самое лучшее значение F-меры показывает метрика на основе карты контуров с использованием оператора Собеля (табл. 1).

2. Классификация с помощью метрик на основе машинного обучения. Алгоритм на основе ЛБШ показывает следующие результаты: Precision = 0,77, Recall = 0,72, F-мера = 0,74, что лучше, чем алгоритм НОКЛБШ, обученный на базе LIVE. Алгоритм на основе кумулятивной функции распределения показывает следующие результаты: Precision = 0,8, Recall = 0,78, F-мера = 0,79.

Алгоритм на основе ЛБШ показывает лучшие результаты, чем схожий с ним алгоритм НОКЛБШ. Метрики, использующие анализ спектра, работают лучше, чем остальные метрики.

Среди алгоритмов с использованием порога лучшие результаты показывают алгоритмы на основе карты контуров и на основе анализа спектра Фурье, у которых F-мера равна 0,769. Среди алгоритмов с использованием машинного обучения лучший результат показывает метрика на основе кумулятивной функции распределения, у которой F-мера равна 0,794.

Метрика на основе анализа спектра Фурье лучше всех остальных оценивает зашумленные изображения, F-мера только по зашумленным изображениям равна 0,88. Лучшей метрикой,

оценивающей размытые изображения является алгоритм на основе карты контуров, F-мера равна 0,71.

Литература

1. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.

2. Wang Z. Modern Image Quality Assessment / Z. Wang, A. Bovik. – Morgan and Claypool Publishing Company, 2006. – 156 p.

3. Wang Z. Mean squared error: Love it or leave it? – A new look at signal fidelity measures / Z. Wang, A. Bovik // IEEE Signal Processing Magazine. – 2009. – Vol. 26, No. 1. – PP. 98–117.

4. Amirshahi S.A. Image Quality Assessment by Comparing CNN Features Between Images / S.A. Amirshahi, M. Pedersen, Yu S.X. // Image Quality and System Performance XIV. – 2017. – PP. 42–51.

А.В. Григорьев
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЯРКОСТЕЙ ТОЧЕК ГРУППОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Сканирование яркостей точек групповых точечных объектов (ГТО) в определённом порядке формирует сигнальную последовательность. Оценка значений яркостей точечных отметок позволяет решать различные задачи, возникающие при обработке ГТО [1].

Рассматриваемый далее фильтр Винера позволяет строить оптимальные оценки для моделей последовательностей точек ГТО. В процессе работы адаптивного алгоритма осуществляется поиск вектора весовых коэффициентов, при которых значение заданной целевой функции является минимальным. Целевой функцией, используемой в алгоритмах оптимальной фильтрации, является среднеквадратическая ошибка (MSE)

$$F = E\{|e(k)|^2\},$$

где $e(k)$ – разность между входной и модельной последовательностями.

Учитывая обратимость корреляционной матрицы \mathbf{R}_N , вектор оптимальных весовых коэффициентов определяется выражением [2] $\mathbf{h}_{N,o} = \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{r}_N$.

Представление последовательности яркостей ГТО, как авторегрессионного процесса, например второго порядка $j(k) = f_1 j(k-1) + f_2 j(k-2) + x(k)$, приводит к схеме устройства линейного предсказания, представленной на рисунке.

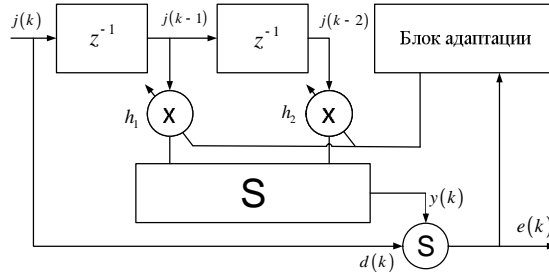


Схема устройства линейного предсказания

В приведённом авторегрессионном уравнении $x(k)$ – белый шум с нулевым средним значением и дисперсией, равной s_0^2 , а коэффициенты f_1, f_2 связаны с компонентами \mathbf{R}_N уравнениями Юла–Уоккера. При $N = 2$, $s_0^2 = 1$, $f_1 = 0,5$, $f_2 = 0,25$ получаем

$$s_j^2 = \frac{s_0^2}{1 + f_2(1 - f_1)^2 - f_1^2} = 1,92,$$

$$\mathbf{R}_N = s_j^2 \begin{bmatrix} 1 & 0,67 \\ 0,67 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,92 & 1,29 \\ 1,29 & 1,92 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_N = \begin{bmatrix} 1,29 \\ 1,05 \end{bmatrix}.$$

Полученные значения позволят записать выражение для среднеквадратической ошибки как функции от вектора весовых коэффициентов [2]:

$$\begin{aligned} a &= s_j^2 - 2\mathbf{h}_N^T \mathbf{r}_N + \mathbf{h}_N^T \mathbf{R}_N \mathbf{h}_N = \\ &= 1,92 - 2[h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} 1,29 \\ 1,05 \end{bmatrix} + [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} 1,92 & 1,29 \\ 1,29 & 1,92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Вектор оптимальных весовых коэффициентов в этом случае равен

$$\mathbf{h}_{N,0} = \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{r}_N = \begin{bmatrix} 1,92 & 1,29 \\ 1,29 & 1,92 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1,29 \\ 1,05 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,55 \\ 0,17 \end{bmatrix}.$$

Минимальное значение среднеквадратического отклонения для оптимальных значений весовых коэффициентов находится следующим образом:

$$a_{\min} = s_j^2 + r_N^T h_{N,o} = 1,92 + [1,29 \quad 1,05] \begin{pmatrix} 0,55 \\ 0,17 \end{pmatrix} \approx 0,89.$$

Литература

1. Григорьев А.В. Распознавание изображений групповых точечных объектов на основе векторно-полевой модели / А.В. Григорьев // Вестник Чувашского университета. – 2007. – № 2. – С. 216–225.
2. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.

Д.Б. Фарфоровский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЁРТОЧНЫХ И ТУРБО-КОДОВ В MATLAB

На данный момент быстрым темпом идет развитие цифровых систем связи [1, 2], примерами которых является спутниковая и мобильная. Данные виды связи для передачи данных используют беспроводные каналы, но в них на передаваемую информацию воздействуют разного рода помехи, вызывающие искажения. Всё это приводит к тому, что принятые данные будут содержать в себе ряд ошибок, что нежелательно, так же как и в оптических волокнах [3, 4], требуется широкополосный канал. В MATLAB собраны каналы связи со свёрточным кодированием (рис. 1), для турбо-кодирования схема будет аналогичная.

Для задания входного сигнала был выбран блок Bernoulli Binary Generator, и в его настройках задавалась частота дискретизации и вероятность появления нулей и единиц.

В ходе анализа были получены энергетические характеристики сравниваемых кодов: на рис. 2 представлены энергетические характеристики свёрточного кода, а на рис. 3 – турбо кода.

Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что преимущество в помехоустойчивости принадлежит турбо-

коду. При моделировании канала связи в него были целенаправленно добавлены помехи, которые должны были вызвать потерю либо искажение данных на выходе.

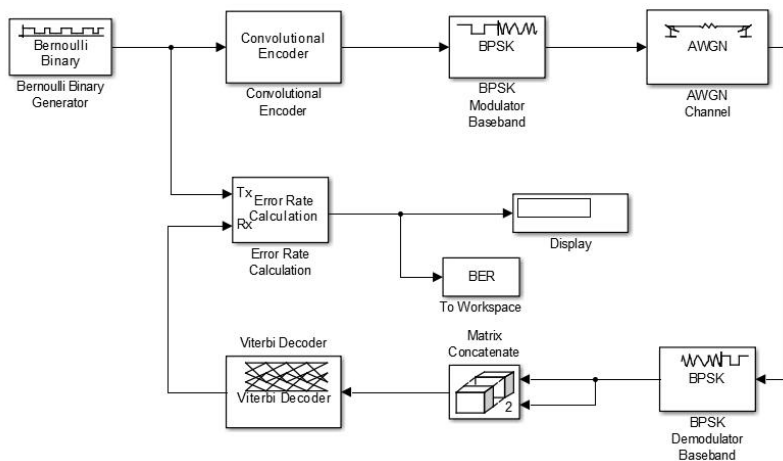


Рис. 1. Канал связи со свёрточным кодированием

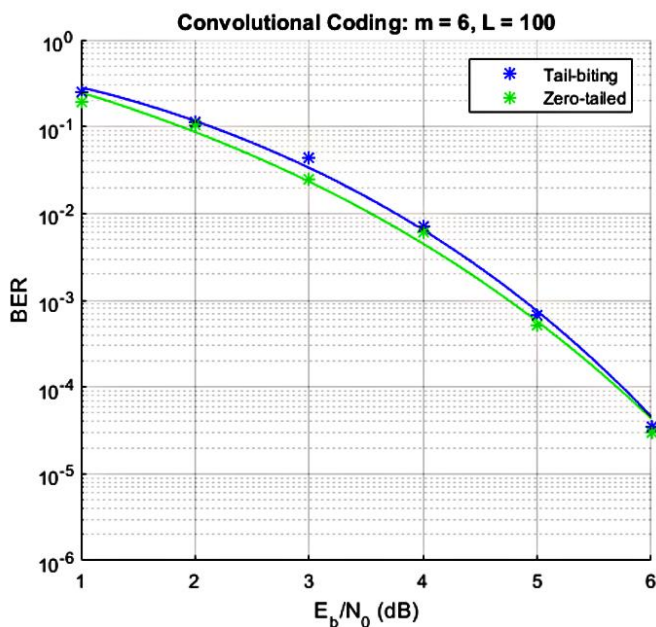


Рис. 2. Свёрточный код

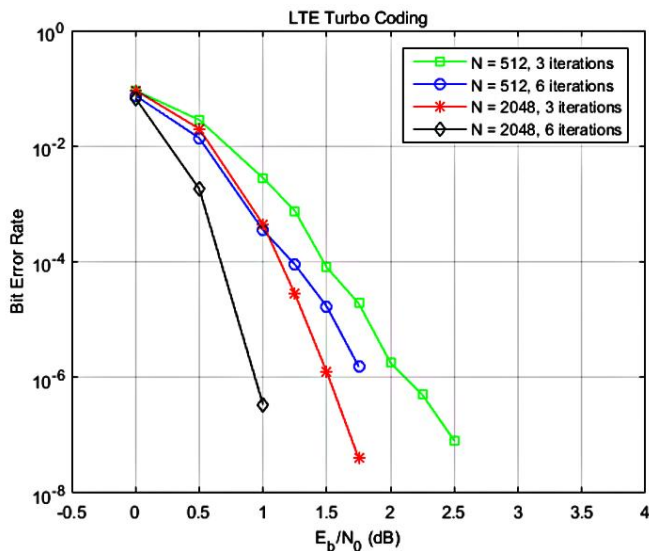


Рис. 3. Турбо-код

Литература

1. *Магнитский В.А.* Реализация технологии ММО в сетях нового поколения 5G / В.А. Магнитский, С.Г. Чумаров // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 226–231.

2. *Чумаров С.Г.* Особенности реализации и применения программно-определяемых радиосистем / С.Г. Чумаров, Ю.С. Милкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 442–443.

3. *Фарфоровский Д.Б.*, Пропускная способность оптоволоконных линий связи / Д.Б. Фарфоровский, С.Г. Чумаров // Сб. науч. тр. молод. учёных и специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 83–87.

4. *Чумаров С.Г.* Пропускная способность волоконно-оптических информационно-измерительных систем / С.Г. Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 201–202.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛА НА ТОЧНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ

С развитием микропроцессорных и цифровых технологий применение цифровой фильтрации для измерения параметров энергосистемы получило новые возможности [1]. В работе [2] цифровой алгоритм фильтрации, в том числе и преобразование Фурье, синтезируется при неизменной периодической составляющей на всем промежутке измерений. Однако отклонение частоты может происходить как и в нормальных режимах работы энергосистемы, так и в аварийных, что приводит к ошибкам фильтрации, а следовательно, и к ошибкам вычислений электрических параметров. Погрешность вычислений при традиционной цифровой фильтрации может достигать недопустимых значений [3]. Для повышения точности измерений и уменьшения ошибок при расчётах параметров известно применение адаптивной фильтрации [4, 5].

Одна из идей адаптивной фильтрации – это изменение частотных характеристик ортогональных фильтров при изменении частоты сигнала [6, 7].

Для сравнения точности различных фильтров, описанных в [3, 6, 7, 8] в среде Matlab были промоделированы заранее заданные переходные процессы, реализованные как сложение двух синусоид, у которых задавались частоты, зависящие от времени по линейному закону

$$U_{a1} = A \sin[(2\pi F_c - k_1)t],$$

$$U_{a2} = A \sin[(2\pi F_c - k_2)t],$$

$$U_a = U_{a1} + U_{a2},$$

где A – амплитуда сигнала, F_c – промышленная частота сети 50 Гц, k_1, k_2 – коэффициенты изменения частоты.

Результаты моделирования исходного сигнала U_a с изменением частот двух гармоник по линейному закону и фильтрации по [3, 6, 7, 8] представлены на рис. 1.

Значения погрешностей вычисления амплитуды сигнала в зависимости от скорости изменения амплитудного значения и линейного закона изменения частоты показаны на рис. 2.

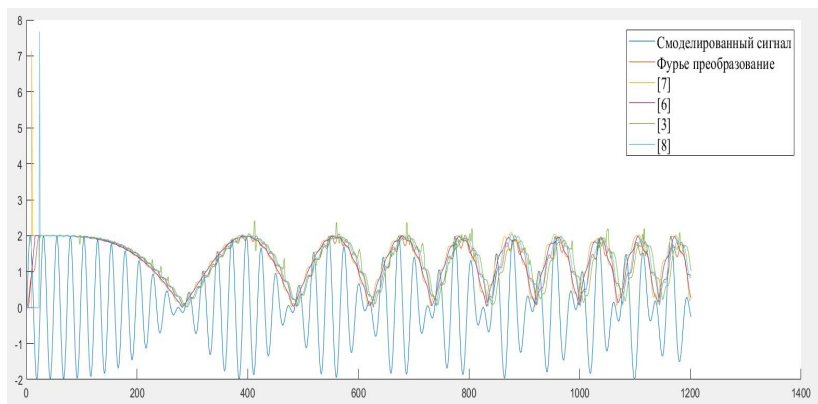


Рис. 1. Смоделированный сигнал при линейном изменении частоты

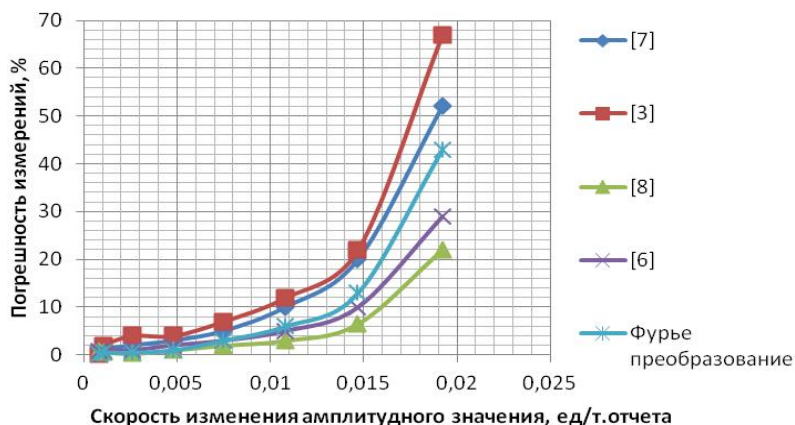


Рис. 2. Зависимость погрешности измерений от скорости изменения амплитудного значения при линейном изменении частоты

Полученные результаты моделирования показали возможности рассмотренных методов цифровой адаптивной фильтрации при заданных скоростях изменения амплитудных значений сигнала.

Литература

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

2. *Фальшина В.А.* Алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации электрических сигналов промышленной частоты / В.А. Фальшина, А.Л. Куликов // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 39–46.

3. *Фальшина В.А.* Упрощенная адаптивная фильтрация цифровых сигналов в условиях изменения частоты / В.А. Фальшина, А.Л. Куликов // Проблемы энергетики. – 2013. – № 1-2. – С. 57–68.

4. *Rebizant W.* Digital signal processing in power system protection and control / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski. – N.Y.: Springer, 2011. – 316 p.

5. *Rebizant W.* Adaptive estimation of wide range frequency changes for power generator protection and control purposes / W. Rebizant, J. Szafran, M. Michalik // IEEE Proc. – Generation, Transmission and Distribution. – 1999. – No. 1. – PP. 31–36.

6. *Антонов В.И.* Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов и др. // Релейная защита и автоматика. – 2016. – № 1. – С. 16–25.

7. *Фальшина В.А.* Цифровая упрощенная фильтрация электрических сигналов промышленной частоты в переменном окне данных / В.А. Фальшина, А.Л. Куликов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 1–8.

8. *Куликов А.Л.* Разработка цифровых фильтров электрических сигналов в условиях изменения частоты / А.Л. Куликов, В.А. Фальшина // Электроэнергетика глазами молодежи. – 2013. – № 2. – С. 107–114.

Р.В. Ларионов, В.А. Павлов, Е.С. Ронзина
(Ярославль, ЯрГУ им. П.Г. Демидова)

СЕГМЕНТАЦИЯ ВЫРУБОК ЛЕСНЫХ МАССИВОВ НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Процесс дистанционного зондирования не может полностью заменить наземный сбор данных, но может помочь в мониторинге больших площадей труднодоступных регионов. В настоящий момент активно применяются методы машинного обучения для решения задачи обнаружения различных объектов на спутниковых

изображениях [1]. На сегодняшний день наилучшие результаты показывают алгоритмы на основе методов глубокого обучения с использованием свёрточных нейронных сетей [2].

В данной работе представлена разработанная свёрточная нейронная сеть, которую можно использовать для сегментации вырубок лесных массивов на спутниковых изображениях. Описаны процесс обучения, использованные методы размножения обучающей выборки, оценка полученных результатов.

В нашем исследовании использована база спутниковых изображений Planet. Она содержит 16-ти битные трёхканальные изображения с пространственным разрешением 3 м/пиксель. Некоторые спутниковые снимки содержат небольшие шумы, такие как облака или блики от крыш зданий. Для выравнивания яркости изображений проведена эквализация гистограммы.

Для детектирования объектов классов «вырубки» выбрана архитектура свёрточной нейронной сети U-ResNet34 [3]. Она представляет из себя архитектуру U-Net с кодировщиком в виде сети ResNet34, которая была предварительно обучена на базе изображений Imagenet, содержащей 1 281 167 изображений 1000 различных классов. Всего нейронная сеть имеет 47 свёрточных слоев.

Разработанная U-ResNet34 принимает на вход изображения размером 256×256 пикселей. Соответственно, все большие изображения из базы Planet были поделены на патчи размером 256×256 пикселей методом скользящего окна с шагом 128. Таким образом, соседние патчи пересекаются наполовину. Данный тип разбиения позволяет решить проблему артефактов на граничных пикселях. Полученное количество изображений представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество патчей в базе Planet

	Обучающий набор	Тестовый набор
Общее количество	5194	2599
С объектами	846	263
Без объектов	4348	2336

Полученного количества изображений недостаточно для обучения нейронной сети. В связи с этим, проведена аугментация данных, состоящая из трёх этапов [4].

Flips. Повороты изображений на 90, 180 и 270 градусов и их зеркальные отображения. За счёт этих операций обучающая выборка увеличилась в 8 раз.

SSR. Сдвиги, растяжения и повороты фрагментов на небольшие углы.

HSV. Изображения переводились из цветовой модели в пространство HSV. Затем в базисе HSV добавлялись случайные значения, после чего произведен обратный перевод в пространство RGB.

Все алгоритмы разработаны с использованием языка программирования Python и фреймворка глубокого обучения Tensorflow. В качестве алгоритма оптимизации выбран Adam. В качестве функции потерь использована бинарная кросс-энтропия минус коэффициент Серенсена. Коэффициент обучения равен 0,001. Из табл. 1 следует, что набор данных не сбалансирован: изображений с объектами значительно меньше, чем изображений без объектов, поэтому для обучения сформированы сбалансированные батчи из 16 изображений, состоящие из 8 изображений с вырубками и 8 изображений без вырубков. Обучение продолжалось на протяжении 100 эпох.

Для оценки качества разработанных алгоритмов использованы коэффициент Серенсена (Dice), индекс Жаккарда для правильно обнаруженных вырубков (TP_IoU), метрика F1. Объект считается правильно детектированным, если его пересечение с объектом на эталонной маске превосходит значение 0,5 по метрике IoU, иначе объект считается ложно детектированным [4].

Полученные результаты обучения нейронной сети U-ResNet34 представлены в табл. 2, графически результат сегментации представлен на рисунке.

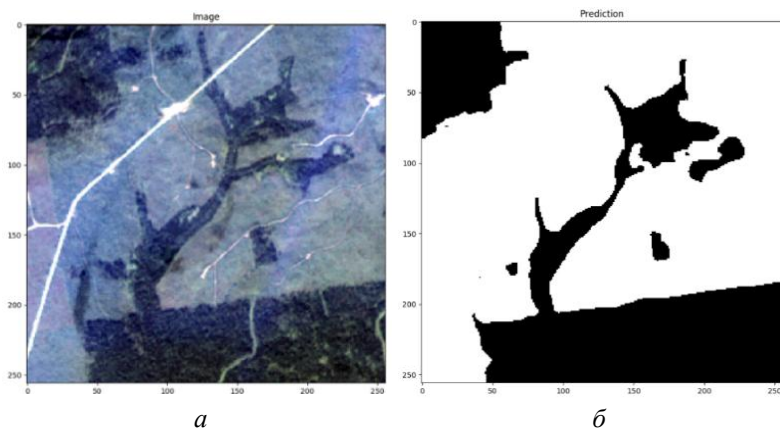
Таблица 2

Результаты обучения нейронной сети U-ResNet34
на базе изображений Planet

Тип аугментации	Метрики				
	F1	Precision	Recall	TP_IoU	Dice
Flips	0,467	0,433	0,508	0,839	0,446
Flips, SSR	0,501	0,516	0,486	0,850	0,430
Flips, SSR, HSV	0,523	0,569	0,484	0,853	0,463

Согласно результатам в табл. 2 использование одних лишь поворотов изображений при формировании обучающей выборки недостаточно. Добавление случайных сдвигов, изменений масштабов

и поворотов на небольшие углы немного ухудшает значение метрики Dice, но повышает значение F1 с 0,467 до 0,501, то есть повышает детектирующую способность алгоритма.



а *б*
Результаты сегментации UResNet34:
исходный патч (*а*); результат сегментации (*б*)

Обучение со всеми тремя видами аугментации позволило получить значение F1 и TP_IoU, равные 0,523 и 0,853 соответственно. Это наилучшие показатели, которые удалось получить в данной работе в условиях малого количества обучающих изображений. Тем не менее данные результаты показывают возможность использования предложенного алгоритма для детектирования вырубок лесных массивов на спутниковых изображениях.

Таким образом, в работе предложен и протестирован алгоритм сегментации вырубок лесных массивов на спутниковых изображениях на основе свёрточной нейронной сети U-ResNet34. Процессы обучения и тестирования проведены на базе изображений Planet. Набор изображений был дополнительно расширен с использованием трёх типов аугментации. В результате обучения достигнуты значения метрик F1 и индекса Жаккарда, равные 0,523 и 0,853 соответственно, что говорит об удовлетворительных результатах разработанного алгоритма. Одной из задач дальнейших исследований является расширение набора изображений путём добавления рассчитанных спектральных индексов в качестве дополнительных каналов.

Литература

1. *Ghorbanzadeh O.* Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection / O. Ghorbanzadeh, T. Blaschke, K. Gholamnia, D. Tiede // *Remote Sensing*. – 2019. – No. 2(11). – PP. 1–21.
2. *Zhu X.X.* Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources / X.X. Zhu // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2017. – No. 4(5). – PP. 8–36.
3. *Khryashchev V., Larionov R.* Wildfire Segmentation on Satellite Images using Deep Learning / V. Khryashchev, R. Larionov // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia. – 2020. – PP. 1–5.
4. *Khryashchev V.* Forest Areas Segmentation on Aerial Images by Deep Learning / V. Khryashchev, V. Pavlov, A. Ostrovskaya, R. Larionov // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2019. – PP. 1–5.

А.В. Бычков, В.Г. Григорьев
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ВИБРАЦИИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ: ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Большое распространение в настоящее время получили методы диагностики и оценки состояния машин и агрегатов основанные на анализе их вибраций [1–3]. Предлагаемая в данной работе методика на основе ультразвукового (УЗ) излучения позволяет быстро проводить активный дистанционный контроль оборудования в различных диапазонах частот без вывода его из работы [4, 5].

Структурная схема УЗ системы виброконтроля показана на рис. 1. В генераторе (Г) формируются пакеты УЗ импульсов с несущей частотой 40 кГц. Излучаемый УЗ преобразователем (УЗП) сиг-

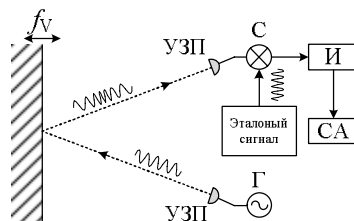


Рис. 1. Схема измерений и обработки сигналов

нал отражается от вибрирующей (f_v) поверхности и принимается другим УЗП. В интеграторе (И) после прохождения сигнала через смеситель (С) вычисляется взаимная корреляционная функция (ВКФ) двух сигналов. Спектральная обработка производится в спектральном анализаторе (СА). Соответствующие программно-аппаратные средства апробированы ранее [6, 7].

Частоту вибраций предлагается оценивать по искажению формы ВКФ, определяя её средневзвешенное временное положение – «центр тяжести» (ЦТ) [7]. На рис. 2 приведены две ВКФ для частоты вибрации 100 Гц. Одна из функций симметрична, другая асимметрична. Так, оценка положения ЦТ во времени может дать информацию о вибрационной картине волнового поля.

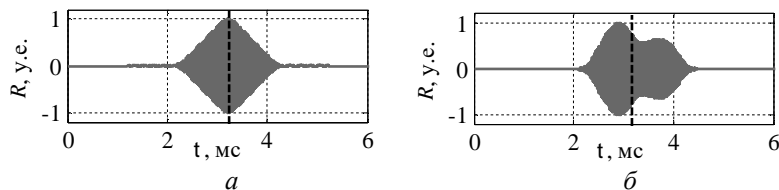


Рис. 2. Различия в положении ЦТ ВКФ

На практике вибрации оборудования различны, как по частоте, так и по амплитуде. Примерный диапазон изменения вибраций основного спектра оборудования промышленности составляет от долей герца до 1 кГц по частоте и от единиц микрометров до 0,5 мм по амплитуде (ГОСТ Р ИСО 7919-1-2002, ГОСТ Р ИСО 10816-1-97).

Рис. 3 иллюстрирует два расчёта частоты вибраций стенки по положению ЦТ ВКФ: на рис. 3, *а* частота вибрации стенки составляет 100 Гц, амплитуда 1 мм; на рис. 3, *б* частота вибрации 500 Гц, амплитуда 0,1 мм.

При помощи дистанционного активного УЗ контроля, основанного на анализе положения ЦТ ВКФ, возможно чёткое выделение основной частоты вибраций. При разных соотношениях частоты и амплитуды в сигнале могут проявляться высшие гармоники (рис. 3, *б*), но основная гармоника всё равно хорошо выявляема. Поскольку сигналы УЗ зондирования имеют высокую несущую частоту относительно частоты вибраций, данный подход позволяет осуществлять эффективную частотную отстройку и фильтрацию паразитных сигналов в УЗ регистрирующей аппаратуре.

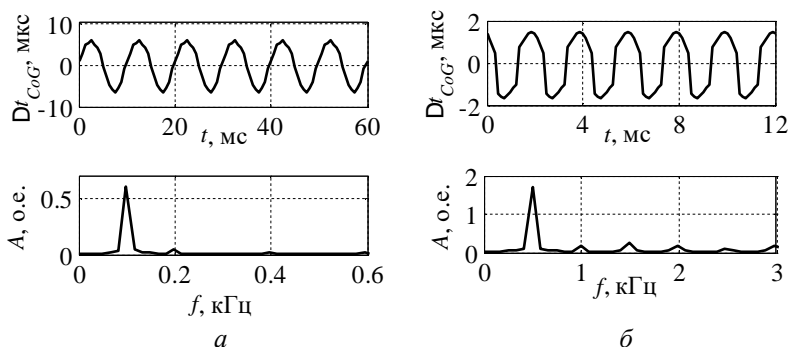


Рис. 3. Функция положения ЦТ и её спектр:
частоты 100 Гц (а) и 500 Гц (б)

Таким образом, предлагаемая методика вибрационного контроля основана на корреляционной и спектральной обработке импульсных УЗ сигналов. Дистанционный принцип измерения позволяет проводить диагностику оборудования в процессе эксплуатации, без вывода её из работы.

Литература

1. Матюшкова О.Ю. Современные методы виброакустического диагностирования / О.Ю. Матюшкова, В.Ю. Тэттер // Радиотехника и связь. – 2013. – № 3 (123). – С. 294–299.
2. Bartoletti C. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers / C. Bartoletti, M. Desiderio, D.Di. Carlo, et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – No. 19. – PP. 221–229.
3. Tavner P.J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines / P.J. Tavner // IET Electric Power Applications. – 2008. – No. 2. – PP. 215–247.
4. Бычков А.В. Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики / А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашиского университета. – 2018. – № 3. – С. 24–32.
5. Бычков А.В. Нейроалгоритм для оценки частоты вибраций электрооборудования при дистанционном ультразвуковом контроле / А.В. Бычков, П.Н. Федорова, Л.А. Славутский // Вестник Чувашиского университета. – 2020. – № 1. – С. 67–77.

6. *Славутский Л.А.* Дистанционный контроль ультразвуковых магнитострикционных преобразователей противонакипных устройств / Л.А. Славутский, А.А. Николаев // Вестник Чувашского университета. – 2008. – № 2. – С. 228–232.

7. *Bychkova I.Yu.* Digital phase modulation and correlation processing of ultrasound signals for pulsed measurements in an inhomogeneous medium / I.Yu. Bychkova, A.V. Bychkov, L.A. Slavutskii // Instruments and Experimental Techniques. – 2018. – Vol. 61. – PP. 421–426.

И.И. Иркагалиева, И.Л. Кузьмин, Р.Г. Хузяшев
(Казань, КГЭУ)

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУЩЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

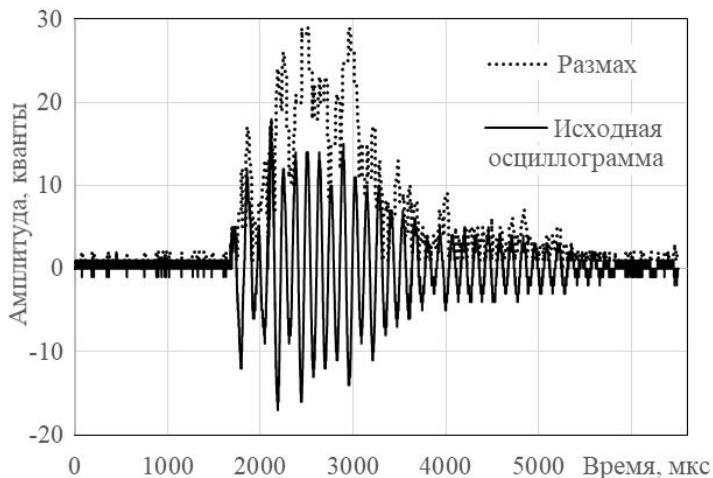
Определение мест повреждений в высоковольтных линиях является одной из наиболее важных задач для систем защиты.

Волновой метод определения мест повреждений подразумевает измерение времени начала и других существенных параметров сигналов переходного процесса, регистрируемых на обоих концах наблюдаемой линии в глобальной шкале времени. Это эквивалентно созданию виртуального источника напряжения в точке повреждения [1].

Определение существенных признаков сигналов переходного процесса, таких как максимальная амплитуда, длительность, период свободных колебаний, количество импульсов, позволяет увеличить надёжность определения места повреждения в линии электропередачи.

С целью определения одного из существенных признаков сигнала переходного процесса разработана программа на языке программирования Python [2], со следующим алгоритмом (рисунок):

1. Центрируем мгновенные амплитуды сигнала на среднее значение мгновенных амплитуд на интервале $0 \div 1500$ отсчётов.
2. Строим верхнюю и нижнюю огибающие.
3. Находим размах как разность положительной огибающей и отрицательной огибающей.



Пример обработанной осциллограммы

4. Определяем порог как минимальное значение размаха на интервале $0 \div 1500$ отсчётов.

5. Находим индекс максимального размаха.

6. Определяем время начала сигнала переходного процесса.

Таким образом, разработан алгоритм для определения одного существенного признака сигнала переходного процесса – времени его начала.

При обработке сигналов мы сталкиваемся с такими явлениями как шум, частичные разряды, эффект дисперсии. Эти явления затрудняют поиск начала сигнала переходного процесса, так как могут сливаться с ним.

Литература

1. An Improved Traveling-Wave-Based Fault Location Method with Compensating the Dispersion Effect of Traveling Wave in Wavelet Domain [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2017/1019591/> (дата обращения: 30.04.2020).

2. Язык программирования Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.python.org/> (дата обращения: 25.04.2020).

ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯТОР СИГНАЛОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДУФФИНГА–ХОЛМСА С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Одним из перспективных способов конфиденциальной передачи сообщений с шифрованием является применение новых носителей информации на основе динамического хаоса [1]. Для выделения полезных сигналов из шумов часто используют корреляторы. Воздействие шумов и помех на эффективность корреляторов в цифровых системах связи с сигналами динамических систем Дуффинга–Холмса с динамическим хаосом изучено недостаточно подробно.

Цель работы – оценка эффективности работы цифрового коррелятора сигналов динамических систем Дуффинга–Холмса с хаотической динамикой при вариации параметров шумов и изменении шага временной дискретизации сигналов.

Разработаны средства моделирования системы Дуффинга–Холмса в математической среде MathCAD с помощью функции «rkfixed», реализующей численное решение систем нелинейных дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты 4-го порядка.

В качестве критерия возможности приёма хаотического сигнала моделируемой системы Дуффинга–Холмса при действии шума применена оценка изменения отношения корреляционного накопления в зависимости от продолжительности интервала корреляционной обработки (p):

$$\frac{\sum_{n=0}^p [S_x(n) + N_{\text{ш}}(n)] \times S_x(n)}{\sum_{n=0}^p N_{\text{ш}}(n) \times S_x(n)} = R,$$

где $S_x(n)$ – исходный хаотический сигнал, $N_{\text{ш}}(n)$ – шум.

Результаты оценки изменения значения p_{\min} , определяющего эффективность цифрового коррелятора сигналов систем Дуффинга–Холмса при разных значениях R для смеси сигналов с НЧ и ВЧ шумами, когда интервал корреляционного накопления нормирован к периоду хаотических колебаний сигналов систе-

мы, представлены в табл. 1 и 2 при изменении D_t – нормированного шага временной дискретизации сигналов.

Таблица 1

Зависимость p_{\min} от R при $D_t = 0,5$

R	–1 дБ	–2дБ	–3дБ	–4дБ	–5дБ	–6дБ	–7дБ
p_{\min} , ВЧ шумы	7,5	7,7	9,8	10,1	11,8	13,5	17,2
p_{\min} , НЧ шумы	0,067	0,07	0,085	0,091	0,103	0,12	0,168

Таблица 2

Зависимость p_{\min} от R при $D_t = 0,25$

R	–1 дБ	–2дБ	–3дБ	–4дБ	–5дБ	–6дБ	–7дБ
p_{\min} , ВЧ шумы	6,5	6,8	8,6	9,2	10,4	12,3	15,8
p_{\min} , НЧ шумы	0,046	0,056	0,075	0,084	0,093	0,10	0,146

В результате проведенного моделирования установлено, что эффективность работы цифрового коррелятора сигналов динамических систем Дуффинга–Холмса с хаотической динамикой падает при уменьшении отношения сигнал/шум, при этом возрастает минимально требуемая продолжительность интервала корреляционного накопления, что увеличивает время обработки сигнала и снижает быстродействие систем связи.

Таким образом, цифровой коррелятор хаотических сигналов системы Дуффинга–Холмса эффективен до отношения сигнал/шум (–5 ÷ –4) дБ, при котором обеспечиваются приемлемые время обработки сигналов и быстродействие системы. Возможным путем повышения эффективности коррелятора служит предварительная низкочастотная фильтрация зашумленных сигналов системы Дуффинга–Холмса.

Литература

1. *Дмитриев А.С.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002. – 252 с.
2. *Буткевич Ю.Р.* Математическое моделирование управляемой дискретно-нелинейной системы Ван-дер-Поля / Ю.Р. Буткевич, В.В. Афанасьев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 37–39.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов, В.В. Тарасова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Энергетический кризис в 70-х годах XX века способствовал разработке и ускоренному внедрению энергоэффективных и энергосберегающих технологий во всех отраслях экономики в развитых странах, что привело к снижению энергоёмкости экономики в 2–2,5 раза. Энергосбережение остается приоритетной задачей и в настоящее время, особенно на отопление зданий и сооружений, на которые приходится до 20 % энергии в общем балансе мирового потребления энергии. Проблема энергосбережения в данной сфере особенно актуальна для России: в силу её климатических условий, низкого класса энергетической эффективности большинства эксплуатируемых зданий и сооружений и отсутствия в большинстве случаев индивидуальных тепловых пунктов с автоматическим управлением.

Основным видом теплоснабжения в России являются системы централизованного теплоснабжения (до 80 %), при котором регулирование осуществляется централизованно от источников теплоты по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха без учета индивидуальных отопительных характеристик зданий, влияния инсоляции и ветра, что в конечном счёте приводит к перерасходу тепловой энергии, особенно весенне-осеннее время. Данная система не позволяет оперативно управлять температурным режимом отдельного объекта и организовать прогнозное и дежурное отопление.

В работе исследуются методы уменьшения затрат тепловой энергии на отопление за счёт применения систем автоматизированного управления отоплением [1, 2]. Математическим моделированием создана методика расчёта режимов погодозависимого прогнозного и дежурного отопления и алгоритм адаптивного управле-

ния системой отопления. Предложенная математическая модель позволяет осуществлять по алгоритму адаптивного управления прогнозное и дежурное отопление с учетом изменения температуры наружного воздуха по данным гидрометцентра без использования параметров температурного графика сетевой воды.

Алгоритм обеспечивает равенство мощности тепловых потерь через ограждающие конструкции и мощности системы отопления, позволяет поддерживать температуру воздуха в помещении на заданном уровне при изменении реальной и прогнозной температуры наружного воздуха, а также при дежурном отоплении. В отличие от распространенных методов выход на режим компенсации тепловых потерь обеспечивается без использования пропорционально-интегрально-дифференциальных законов автоматического регулирования, которые применяются в известных системах автоматического управления отоплением. Математическая модель позволяет при заданных начальных и конечных температурах внутреннего и наружного воздуха при расчёте режимов прогнозного и дежурного отопления воздуха определить значения мощности отопления, обеспечивающий желаемый температурный режим. Алгоритм адаптивного управления позволяет задать в качестве уставок требуемую температуру внутреннего воздуха и расчётную температуру наружного воздуха, которая определяется с учетом тепловой инерции ограждающих конструкций [2].

Разработанные математические модели и алгоритм адаптивного управления позволяют определить значения мощности системы прогнозного и дежурного отопления, создать энергоэффективную погодозависимую систему отопления, обеспечивающие при минимальном расходе тепловой энергии заданную температуру в помещениях.

Литература

1. *Тарасова В.В.* Автоматическое управление режимом тепло-снабжения здания с помощью автоматизированного теплового-пункта / В.В. Тарасова, В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев и др. // Вестник Чувашиского университета. – 2016. – № 3. – С. 21–25.

2. *Tarasov V.A.* Mathematical modeling of the forecast and standby modes / V.A. Tarasov, V.V. Tarasova, V.V. Afanasyev, et al. // Power engineering: research, equipment, technology. – 2019. – No. 21 (3). – PP. 73–85.

И.А. Табаков, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
ООО «Юнител Инжиниринг»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Волновой метод [1] определения места повреждения (ОМП) в энергосистеме основан на точном определении момента начала переходного процесса [2, 3]. Задача требует численного моделирования [4] и цифровой обработки сигналов в измерительных органах [5]. Поскольку решение чаще всего проводится в «отложенном времени», могут использоваться методы машинного обучения и искусственного интеллекта [2, 6]. В настоящей работе производится качественное моделирование переходных процессов в линии электропередач (ЛЭП) для оценки возможности использования для ОМП элементарного персептрона, как простейшей искусственной нейронной сети (ИНС) [7, 8].

На рис. 1 показана эквивалентная схема П-секции для моделирования переходных процессов в ЛЭП. Использовался качественный упрощенный подход: вместо разбиения ЛЭП на множество таких секций, удельные сопротивление, индуктивность и ёмкость ЛЭП в одной секции считались переменными в зависимости от места короткого замыкания (КЗ) с переходным сопротивлением R_f .

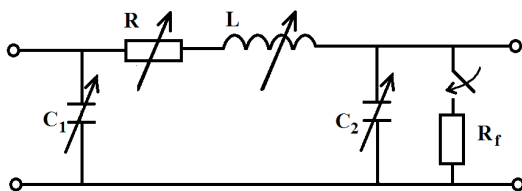


Рис. 1. Схема П-секции ЛЭП для моделирования

Таким образом, параметры переходного процесса определяются двумя случайными величинами – моментом возникновения КЗ t_a (фазой напряжения и тока) и местом замыкания, которым определяются параметры схемы рис. 1.

На рис. 2 приведены примеры результатов моделирования КЗ в разные моменты времени и в разных местах ЛЭП.

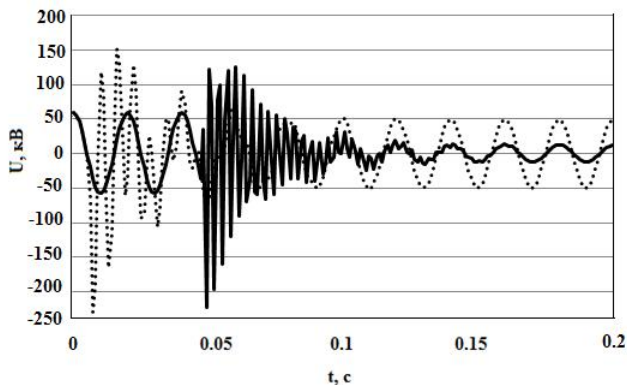


Рис. 2. Примеры переходных процессов

При стандартной частоте оцифровки сигнала 600 Гц осциллограмма напряжения в момент начала переходного процесса имеет вид, пример которого показан на рис. 3.

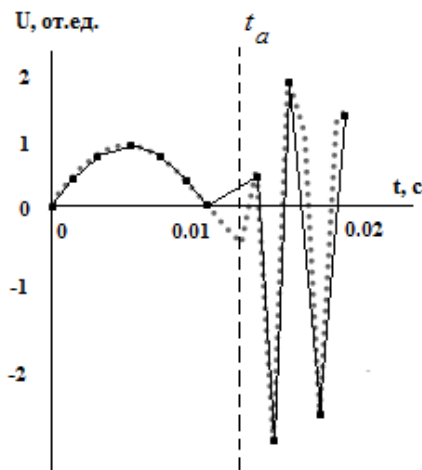


Рис. 3. Пример записи сигнала напряжения для обучения ИНС

Соответствующие 12 отсчётов напряжения в моменты времени t_i на интервале в один период промышленной частоты подавались на вход ИНС, структура которой показана на рис. 4. Обучение ИНС

проводилось на выборке от нескольких сотен до нескольких тысяч таких записей. Проанализированы качество обучения ИНС в тех случаях, когда целевой функцией на её выходе является момент начала переходного процесса или место повреждения.

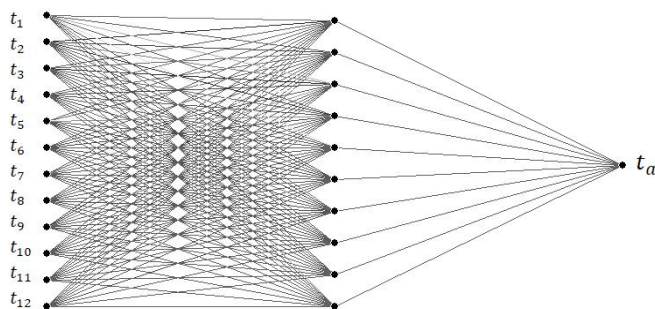


Рис. 4. Схема однослойного персептрона

Результаты обучения и тестирования ИНС рис. 4 показали, что момент начала переходного процесса может быть определен на интервале времени, существенно меньшем периода дискретизации сигнала в измерительных органах. По параметрам переходного процесса ОМП может быть реализовано приближенно, а затем точность существенно повышена с использованием предлагаемого алгоритма на основе простейшей ИНС.

Литература

1. Wang J. A New Fault Location Method for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory / J. Wang, X. Liu, Z. Pan // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1070-1072. – PP. 718–725.
2. Bhattacharya B. Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids / B. Bhattacharya, A. Sinha // IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). – Boston: IEEE, 2017. – PP. 985–990. – DOI: 10.1109/ICTAI.2017.00151.
3. Кощеев М.И. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кощеев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.
4. Славутский А.Л. Применение алгоритма Доммеля для моделирования цепи с полупроводниковыми элементами и клю-

чами с ШИМ управлением / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 57–65.

5. *Славутский А.Л.* Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики / А.Л. Славутский, А.А. Ларюхин, М.И. Кошечев // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 47–58.

6. *Laruhin A.* Anomalous modes recognizing secondary equipment in electric power industry: adaptive neuro algorithms / A. Laruhin, M. Nikandrov, L. Slavutskii // 2019 International Ural conference on electrical power engineering: Proceedings URALCON 2019. – С. 399–403.

7. *Slavutskaya E.V.* Simple neural network algorithms for evaluating latent links of younger adolescent's psychological characteristics / E.V. Slavutskaya, V.S. Abrukov, L.A. Slavutskii // Experimental Psychology (Russia). – 2019. – Vol. 12, No. 2. – PP. 131–144.

8. *Бычков А.В.* Нейроалгоритм для оценки частоты вибраций электрооборудования при дистанционном ультразвуковом контроле / А.В. Бычков, П.Н. Федорова, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 67–77.

А.Ф. Иванов, В.С. Аbruков
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

Одним из материалов, широко используемых в производстве элементов электроники, является оксид индия-олова (Indium tin oxide, ИТО). Благодаря сочетанию высокой прозрачности и проводимости, материал используется в производстве прозрачных электродов жидкокристаллических экранов, органических светодиодов (Organic Light Emitting Diode, OLED) и сенсорных экранов (Touchscreen). ИТО находит также применение в тонкослойных фотопреобразователях и для создания прозрачных электродов в полупроводниковых фотоприёмниках. Инфракрасные лучи ИТО отража-

ет подобно металлическому зеркалу, что даёт возможность использовать его в теплозащите. ИТО может использоваться для создания проводящих покрытий на других материалах для защиты от электростатических зарядов [1].

В производстве, где используется ИТО, часто требуется плановая очистка деталей оборудования и полуфабрикатов [2–3]. Это процедура необходима, чтобы поддерживать параметры оборудования в требуемых технологических пределах. При наличии излишков загрязняющих веществ и продуктов производственного процесса существует большая вероятность того, что готовое изделие не будет соответствовать требуемым параметрам. В случае превышения уровня допустимого загрязнения деталей оборудования это ведет к изменению параметров его работы, снижает качество изготавливаемого полуфабриката и, соответственно, готового изделия.

Одним из перспективных методов очистки является ультразвуковой метод. Для исследования его возможностей были проведены следующие эксперименты. В качестве очищаемого изделия были изготовлены изделия из ИТО. Каждое изделие помещалось в отдельную стеклянную ёмкость с моющим раствором. Все ёмкости помещались в ультразвуковую ванну (УЗВ), которая была наполнена деионизированной водой (DI-водой) и нагревались до $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$. Тем самым обеспечивались одинаковые условия для всех образцов. В ходе эксперимента учитывались следующие параметры: площадь поверхности изделия S , м^2 , масса M , г, концентрация моющего раствора в растворе W , %, время использования моющего раствора $T_{\text{м.р}}$, ч, объём моющего раствора $V_{\text{м.р}}$, мл, время очистки T , ч, применение мойки высокого давления, плотность тока j , А/м^2 , скорость очистки v , г/ч. Геометрические параметры и масса измерялись после споласкивания образцов под проточной DI-водой и/или очисткой струей воды высокого давления. Все полученные данные заносились в таблицу.

T , ч	M , г	W , %	$V_{\text{м.р}}$, мл	$T_{\text{м.р}}$, ч	S , м^2	j , А/м^2	Мойка высоким давлением	v , г/ч
0	59,5	13,3	200	6	0,0031	0	нет	0,4
1	20,2	12,1	250	1	0,0012	41,2	да	1,25

Всего проводились три серии эксперимента. В результате получилось 147 строк данных. Эксперимент являлся существенно многофакторным, поэтому для создания модели эксперимента и выявления закономерностей технологического процесса ультразвуковой очистки были использованы искусственные нейронные сети.

Нейросетевое моделирование проводилось на аналитической платформе Deductor Academic 5.3. Основы применения нейронных сетей и примеры работы на аналитической платформе приведены в [4–7]. Для нейросетевого моделирования необходимо вначале проверить на качество полученные в ходе эксперимента данные, при необходимости отредактировать выбросы и заполнить пропуски в данных и снова проверить на качество.

Для эффективного обучения нейросетевой модели было увеличено количество строк данных путем дублирования имеющихся. В итоге для нейросетевого моделирования использовались 294 строки данных.

Показателем эффективности УЗ очистки является скорость очистки, поэтому данный параметр являлся целевой функцией. В результате экспериментов с различными структурами нейронных сетей наилучшую точность показала следующая нейросетевая модель, представленная на рис. 1.

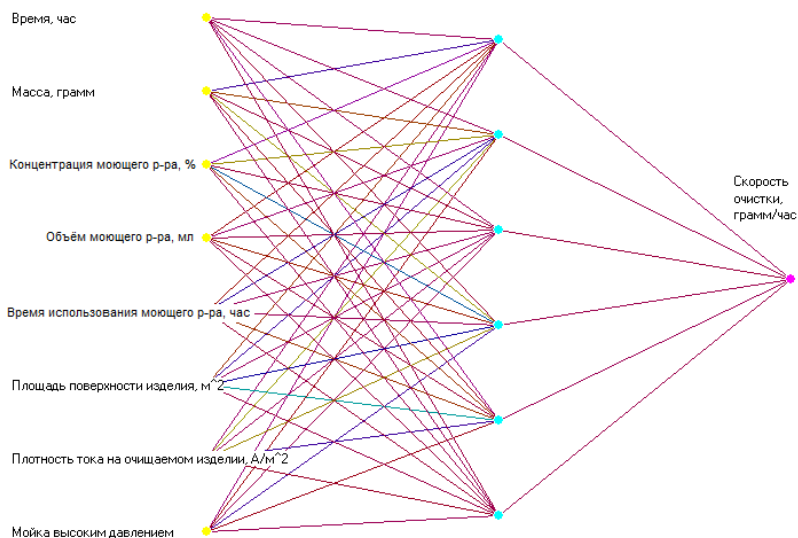


Рис. 1. Нейросетевая модель

Полученная нейросетевая модель позволяет выявить основные закономерности технологического процесса ультразвуковой очистки ИТО (рис. 2).

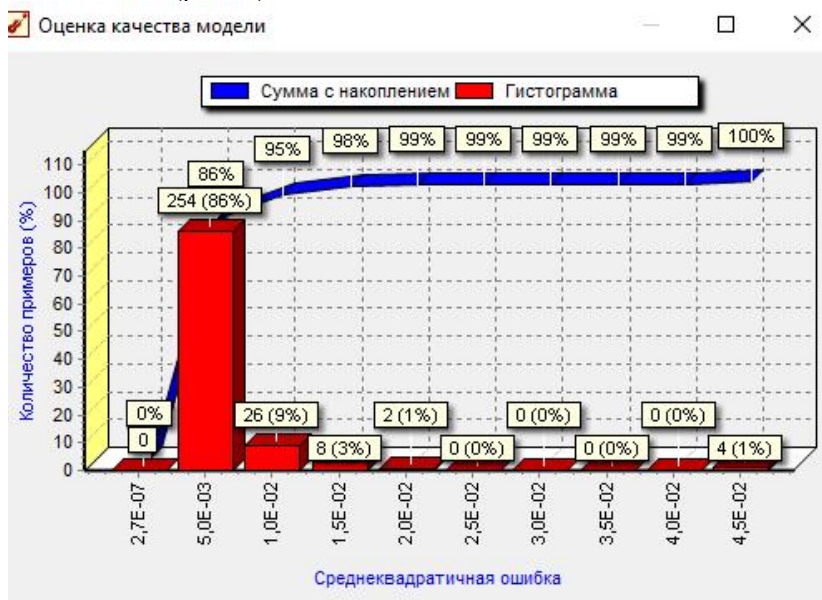


Рис. 2. Оценка качества нейросетевой модели

По данным, полученным в результате моделирования, можно сделать следующие выводы (рис. 3): скорость очистки возрастает с увеличением плотности тока; с увеличением времени использования моющего раствора скорость очистки уменьшается, предполагается, что это связано с загрязнением чистящего раствора.

Также было выявлено, что мойка высоким давлением эффективна при использовании моющего раствора не более 3 часов и при плотности тока 40-130 А/м²; при использовании моющего раствора не более 4 часов и при плотности тока 110-130 А/м². Для более точного подбора параметров технологического процесса ультразвуковой очистки ИТО необходимо провести дополнительные эксперименты, основываясь на полученных данных.

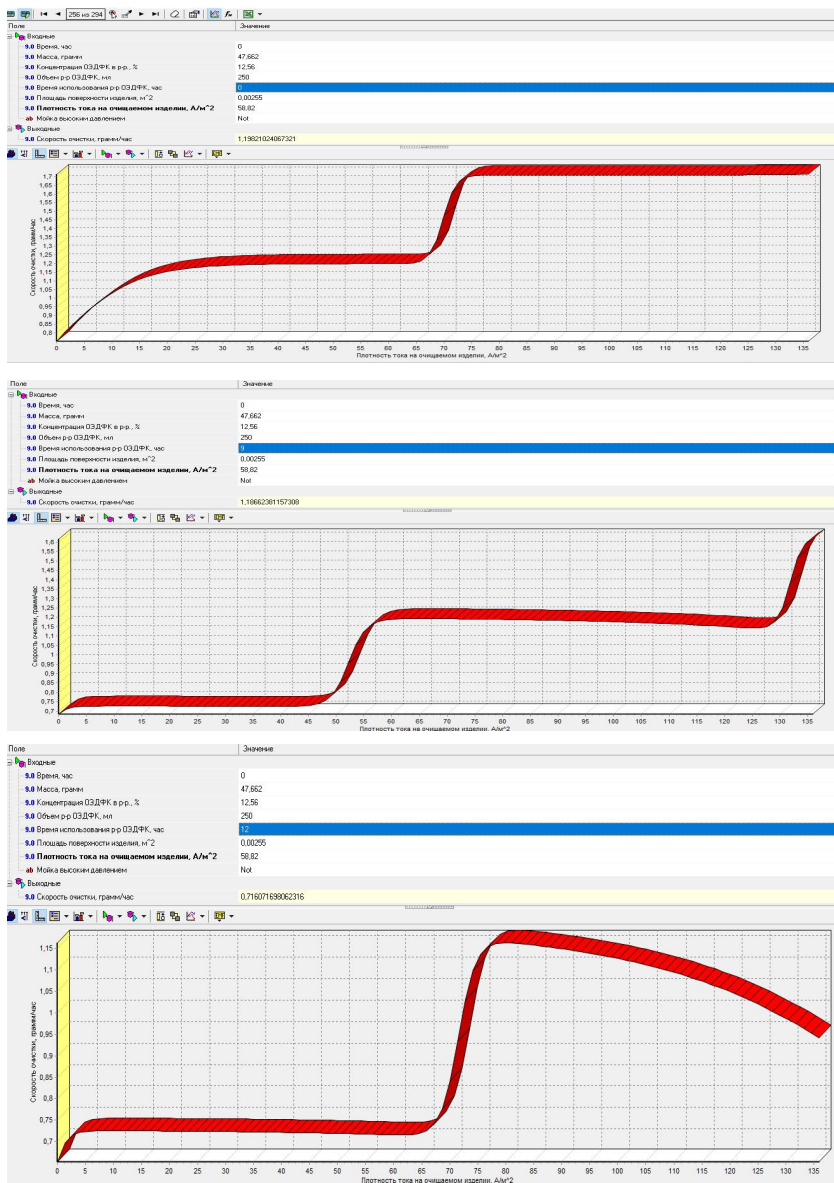


Рис. 3. Графики зависимости v , г/ч от j , А/м²
при различных значениях $T_{м,р}$, ч

Литература

1. Оксид индия-олова [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оксид_индия-олова (дата обращения: 25.04.2020).

2. Вейко В.П. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахио. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

3. *Dr-Ing N.V. Mandich*. Surface preparation of metals prior to plating / Mandich Dr-Ing N.V. // AESF SUR/FIN. – 2002. – PP. 761–828.

4. Кощев М.И. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

5. Славутская Е.В. Нейросетевой системный анализ уровневых психологических характеристик / Е.В. Славутская, В.С. Аbruков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 164–173.

6. Аbruков В.С. Методы интеллектуального анализа данных при создании баз знаний / В.С. Аbruков, С.В. Аbruков, А.В. Смирнов, Е.В. Карлович // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 140–146.

7. Ануфриева Д.А. Применение методов интеллектуального анализа данных в физических исследованиях. Многофакторные модели детонации / Д.А. Ануфриева, М.И. Кощев, В.С. Аbruков // Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение: сб. науч. тр. XII Междунар. летней научн. школы-конф., посв. 155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова. – 2018. – С. 221–226.

Д.А. Степанова, А.Ю. Федотов, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ СКОРОСТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В ясную погоду, когда фотомодули солнечной станции равномерно освещены, энергетическая характеристика станции $P(U)$ имеет только один пик, соответствующий максимуму вырабатываемой в этом режиме мощности MPP (Maximum Power Point). Известные

алгоритмы поиска точки максимальной мощности хорошо справляются с задачей поиска и поддержания режима станции вблизи MPP в этом режиме – режиме равномерной освещенности. Одним из таких методов, стандартно применяемым в режиме равномерного освещения, является метод «возмущения и наблюдения» (P&O – Perturb and Observation) [1–3]. Метод отличается наглядностью и простотой. Согласно ему рабочая точка поддерживается вблизи MPP на энергетической характеристике за счёт непрерывного сканирования положения MPP путем изменения напряжения на выходе фотомодуля в окрестности точки MPP. Если при повышении напряжения наблюдается увеличение мощности, то предполагается, что MPP расположена справа, если наоборот, то – слева. В первом случае напряжение увеличивают, а во втором – уменьшают.

В условиях облачности фотомодули в разных частях обширной площади солнечной станции находятся под разным освещением. Частичная затененность фотомодулей приводит к появлению на энергетической характеристике $P(U)$ станции множества локальных пиков LMPP (Local Maximum Power Point), среди которых только одна обеспечивает максимум вырабатываемой станцией мощности (рис. 1, а). При этой конфигурации освещенности метод P&O теряет способность выявления точки максимальной мощности и приводит режим станции в точку локального пика с существенно меньшей выработкой электроэнергии. Поскольку конфигурация освещенности может меняться относительно быстро, то для управления эффективностью солнечной станции потребуются специальные алгоритмы, обеспечивающие быстрое определение и выведения режима станции в окрестность глобального максимума мощности.

В докладе рассматривается новый алгоритм, реализующий скоростной вывод режима солнечной электростанции в окрестность точки с максимальной выработкой электроэнергии с последующей передачей управления стандартным методам поддержания рабочей точки.

Универсальный алгоритм управления режимом станции. В условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности фотомодулей станции алгоритм управления режимом солнечной станции должен обладать способностью за единицы шагов поместить рабочую точку в окрестность глобального максимума мощности на энергетической характеристике.

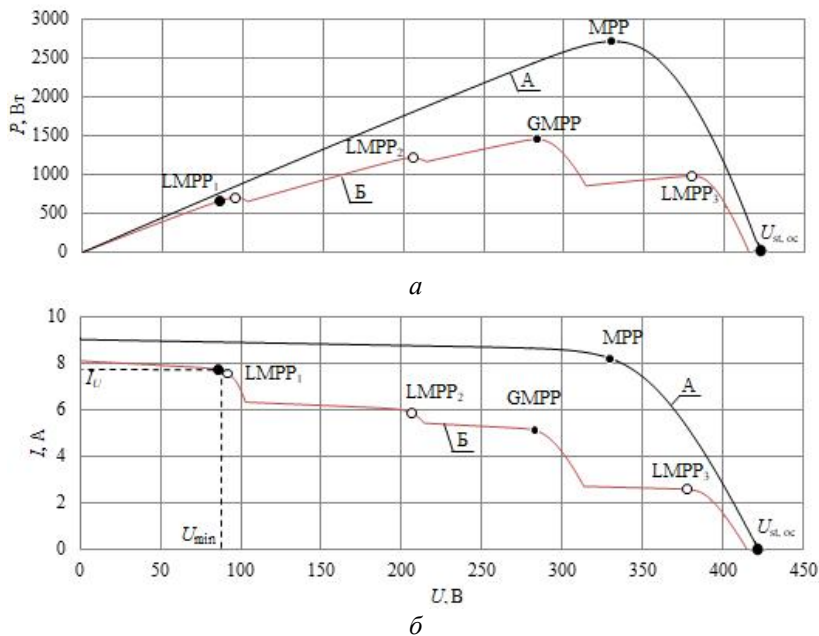


Рис. 1. Энергетическая $P(U)$ (а) и вольт-амперная $I(U)$ (б) характеристики фотомодуля при равномерной освещенности (А) и при частичном затенении (Б); темными кружочками обозначены точки GMPP (MPP), светлыми – LMPP

В то же время алгоритм должен быть универсальным и пригодным для применения в управлении солнечными станциями с различным числом и типом фотомодулей. Такого свойства алгоритма можно добиться, если энергетическую и вольтамперную характеристики солнечной электростанции представить в виде нормированных характеристик (рис. 2) [1, 4].

Приведение характеристик к унифицированному виду осуществляется, приняв в качестве базисных величин паспортное значение напряжения холостого хода $U_{st, oc}$ и значение тока I_U при минимально допустимом напряжении, гарантирующем стабильную работу инвертора, например U_{min} . Таким образом, измерения электрических величин в относительных единицах будут иметь вид:

$$U_{r.u.} = U / U_{st, oc}, \quad I_{r.u.} = I / I_U, \quad P_{r.u.} = U_{r.u.} \cdot I_{r.u.}$$

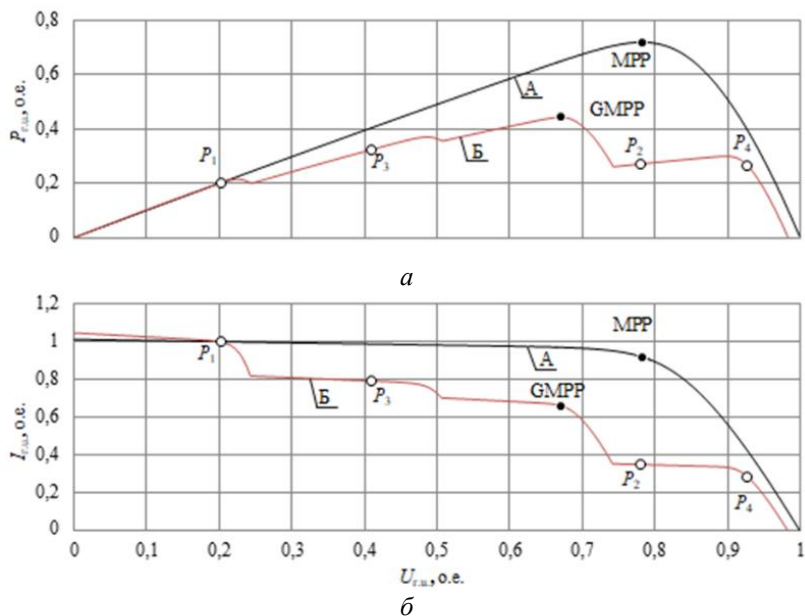


Рис. 2. Нормированные энергетическая (а) и вольт-амперная (б) характеристики солнечной электростанции при равномерном освещении (А) и в условиях частичного затенения (Б); светлыми кружочками показаны контрольные точки, используемые предлагаемым алгоритмом; остальные обозначения соответствуют обозначениям рисунка рис. 1

Для целей скоростного поиска точки глобального максимума мы используем алгоритм, основанный на измерении вырабатываемой станцией мощности в четырех контрольных точках нормированной энергетической характеристики. Значения мощностей P_1 и P_2 определяются при $U = U_{\min}$ и $U = 0,85U_{st,oc}$ соответственно, а P_3 и P_4 выбираются в зависимости от характера изменения кривой энергетической характеристики при различной конфигурации освещенности фотомодулей (рис. 2). Причем мощность $P_1 = 0,2$ во всех случаях, поскольку нормированные напряжение и ток равны $U_{1,г.м.} = 0,2$ и $I_{U,г.м.} = 1$ соответственно. Поэтому мощность P_1 непосредственно в обучении классификаторов не участвует и лишь задает положение трёхмерного пространства существенных прецедентов обучающей выборки в многомерном пространстве.

Другими словами, обучение нейронной сети проводится в трёхмерном пространстве с координатами (P_2, P_3, P_4) (рис. 3).

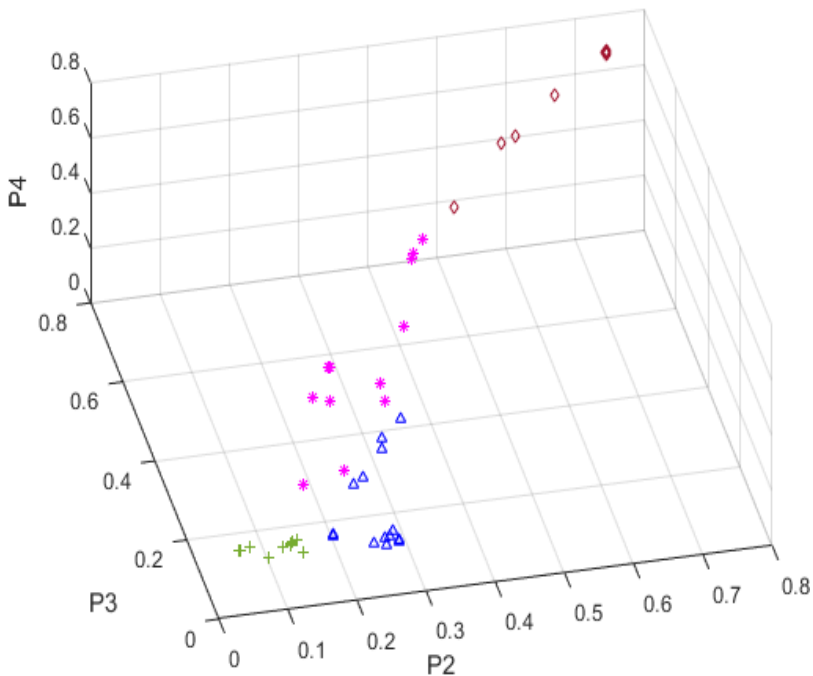


Рис. 3. Пространство прецедентов обучающей выборки; выбранный на рисунке ракурс показывает, что прецеденты различных классов могут быть строго разделены; приняты следующие обозначения прецедентов: «+» – первого, «Δ» – второго, «*» – третьего, «◊» – четвертого классов

Поиск и отслеживание точки глобального максимума мощности (Global Maximum Power Point – GMPP) происходит одновременно с изменением режима работы станции, что в условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности потребует скоростного вывода режима солнечной электрической станции в окрестность одной из рассматриваемых контрольных точек, близкой к GMPP. Номер контрольной точки, определяющий стартовую позицию при передаче управления стандартному методу поддержания точки максимальной мощности, например, методу P&O, будет задан настроенной нейронной сетью путем отнесения текущего вектора измерений x_j к одному из классов (рис. 4).

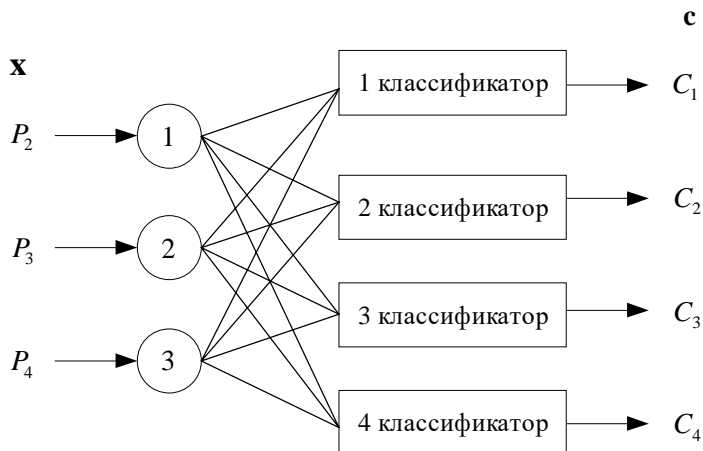


Рис. 4. Нейронная сеть для интеллектуального алгоритма быстрого поиска GMPP

Хотя в обучении участвуют только три точки, настройка нейронной сети потребует последовательного обучения четырех классификаторов, каждый из которых будет отделять один класс от всех остальных по принципу «один против всех» [5, 6]. На рис. 5 показан ход настройки нейронной сети. Взаимное расположение разделяющих поверхностей классификаторов показано на рис. 6. В работе используется один из известных методов машинного обучения, так называемый метод опорных векторов – Support Vector Machine (SVM), основы применения которого в задачах электроэнергетики исчерпывающе рассмотрены в работах [7, 8].

Выводы. Нейросетевой алгоритм поиска точки реального максимума мощности для текущей конфигурации освещенности солнечной фотоэлектрической станции за четыре шага обеспечивает скоростной вывод режима станции к окрестности глобального максимума вырабатываемой мощности в любых условиях частичного затенения с последующей передачей управления стандартным методом поддержания рабочей точки. Благодаря использованию нормированных энергетической и вольтамперной характеристик алгоритм поиска точки глобального максимума приобретает универсальность, а прецедентное пространство обучающей выборки сокращает свою размерность на единицу.

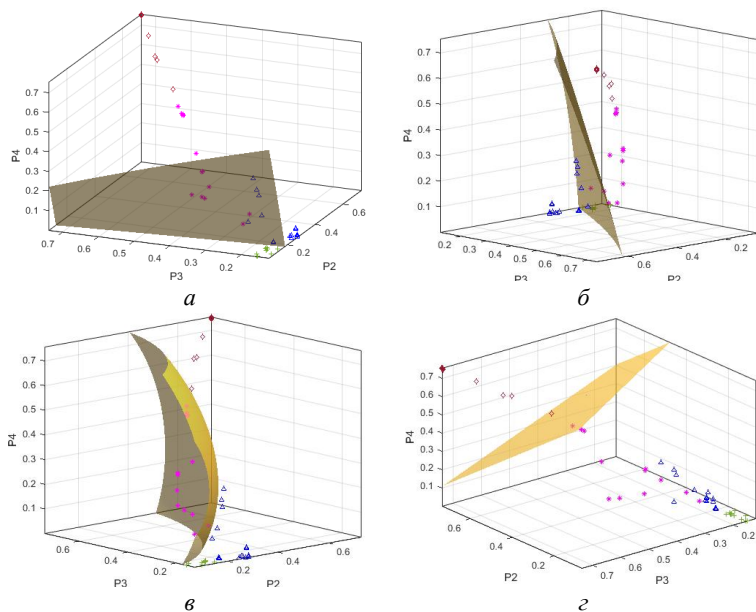


Рис. 5. Разделяющие поверхности первого (*а*), второго (*б*), третьего (*в*) и четвёртого (*г*) классификаторов нейронной сети; обозначения соответствуют обозначениям рис. 3

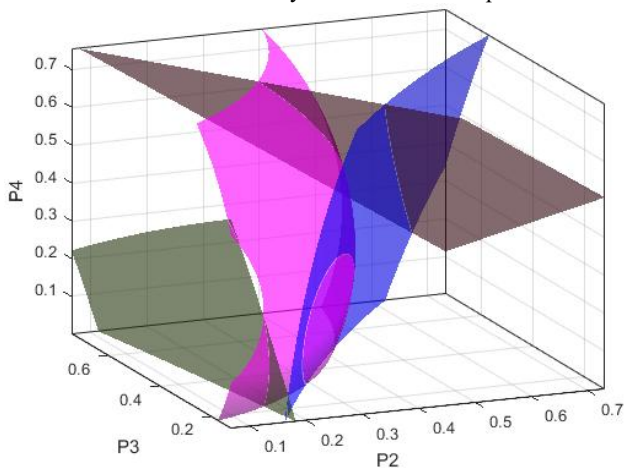


Рис. 6. Расположение разделяющих поверхностей интеллектуального алгоритма поиска точки GMPP в пространстве прецедентов

Литература

1. *Федотов А.Ю.* Обеспечение эффективности солнечной фотоэлектрической станции в условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности / А.Ю. Федотов, Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 1. – С. 42–47.
2. *Hohm D.P.* Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms / D.P. Hohm, M.E. Ropp // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2003. – No. 11. – PP. 47–62.
3. *Esram T.* Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques / T. Esram, P.L. Chapman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – PP. 439–449.
4. *Федотов А.Ю.* Задачи и методы поддержания эффективности солнечных электрических станций / А.Ю. Федотов, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: сб. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 224–231.
5. *Stepanova D.A.* Deep Learning in Relay Protection of Digital Power Industry / D.A. Stepanova, V.A. Naumov, V.I. Antonov // 2nd Int. Youth Scientific and Technical Conf. on Relay Protection and Automation. – 2019. – PP. 299–315. – DOI: 10.1109/RPA.47751.2019.8958378.
6. *Степанова Д.А.* К теории глубокого обучения релейной защиты / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319–327.
7. *Степанова Д.А.* Задачи классификации и глубокого обучения в релейной защите цифровой электроэнергетики / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сб. докл. научно-техн. конф. молодых специалистов (Чебоксары, 23–26 апреля 2019 г.). – С. 116–122.
8. *Степанова Д.А.* Фундаментальные основы глубокого обучения релейной защиты / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319–327.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Измерение и оценка параметров переходных процессов представляет интерес для широкого круга задач электротехники и энергетики. Прежде всего – для контроля коммутаций и аварийных режимов в электроэнергетических системах [1–3]. При стандартной частоте оцифровки сигналов в измерительных органах $0,6 \div 2,4$ кГц для анализа динамических изменений частоты и амплитуды напряжения и тока применяется широкий набор методов обработки сигналов [4]. С учетом нелинейности [5], апериодических составляющих и затухания точное измерение амплитуды и частоты сигнала за короткий промежуток времени иногда представляет собой достаточно сложную задачу [4, 6]. Для её решения могут использоваться методы машинного обучения и искусственного интеллекта, в частности, аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [6, 7]. В настоящей работе для оценки параметров переходного процесса предлагается использование простейших нейросетевых алгоритмов на основе ИНС прямого распространения [7–10].

Рассмотрим нейросетевую идентификацию затухающего гармонического сигнала со случайной амплитудой, частотой и затуханием

$$S(t) = A_{rand} e^{-d_{rand} t} \cos(2\pi f_{rand} t),$$

где A_{rand} , d_{rand} , f_{rand} – независимые случайные величины, распределённые равномерно в различных диапазонах: d_{rand} – от 0 до 100 (постоянная времени $\tau = 1/d_{rand}$ от 0,01с); f_{rand} – от 40 до 60 Гц; приведённая амплитуда A_{rand} варьировалась по следующему принципу: максимальное значение неизменно и равно 1, а нижняя граница диапазона менялась от 0,1 до 0,8 с шагом 0,1 (т.е. всего 8 диапазонов).

Для каждого диапазона A_{rand} было проведено обучение ИНС на выборке из 5000 строк. В каждой строке – 12 значений $S(t)$ для 12 отсчётов t_i с частотой дискретизации 600 Гц (один период промышленной частоты). Примеры $S(t)$ показаны на рис. 1.

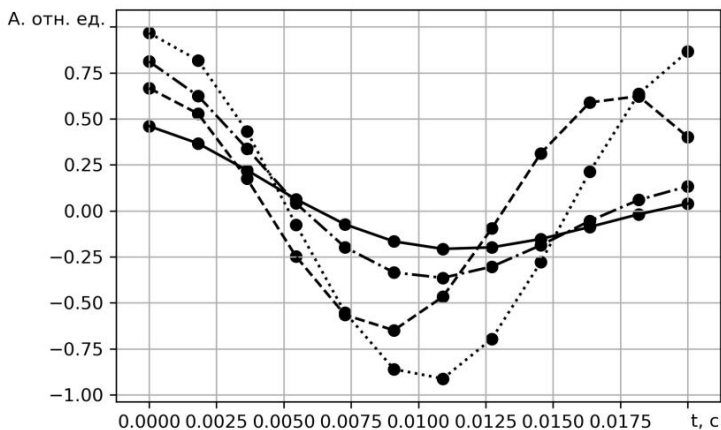


Рис. 1. Примеры сигналов со случайными параметрами

Обучение ИНС проводилось с помощью алгоритма RProp (<https://basegroup.ru/community/articles/rprop>), условие завершения обучения – достижение 1000-й эпохи. Структура сети представляет собой однослойный персептрон (рис. 2, а) с 12-ю входными нейронами, одним скрытым слоем с 15-ю нейронами и 3-мя выходными нейронами – A_{rand} , d_{rand} , f_{rand} . Тестовое множество составляют 10 % случайно выбранных строк из исходной выборки, обучающее множество составляют все остальные строки выборки.

Обнаружено, что при одновременном случайном варьировании параметров переходного процесса A_{rand} , d_{rand} , f_{rand} среднеквадратичные ошибки при обучении и тестировании ИНС не превышают единиц процентов (см. рис. 2, б).

Для 90 % выборки ошибка не превышает 0,5 %. Наибольшее влияние на качество обучения ИНС и, соответственно, точность определения параметров оказывает диапазон варьирования амплитуды сигнала. При этом сама амплитуда определяется с точностью не хуже 0,6 %, а погрешность в определении постоянной времени достигает 6 % при изменении амплитуды в 10 раз (см. рис. 3). При варьировании амплитуды в пределах 20 % точность определения всех параметров составляет доли процента.

Таким образом, параметры переходного процесса при адекватном численном моделировании и обучении нейронной сети могут быть установлены с высокой точностью при стандартной частоте

оцифровки сигналов измерительными органами по записи на коротком временном интервале, не превышающем одного периода промышленной частоты. По сути, ИНС позволяет эффективно решать задачи «структурного анализа» сигналов [4].

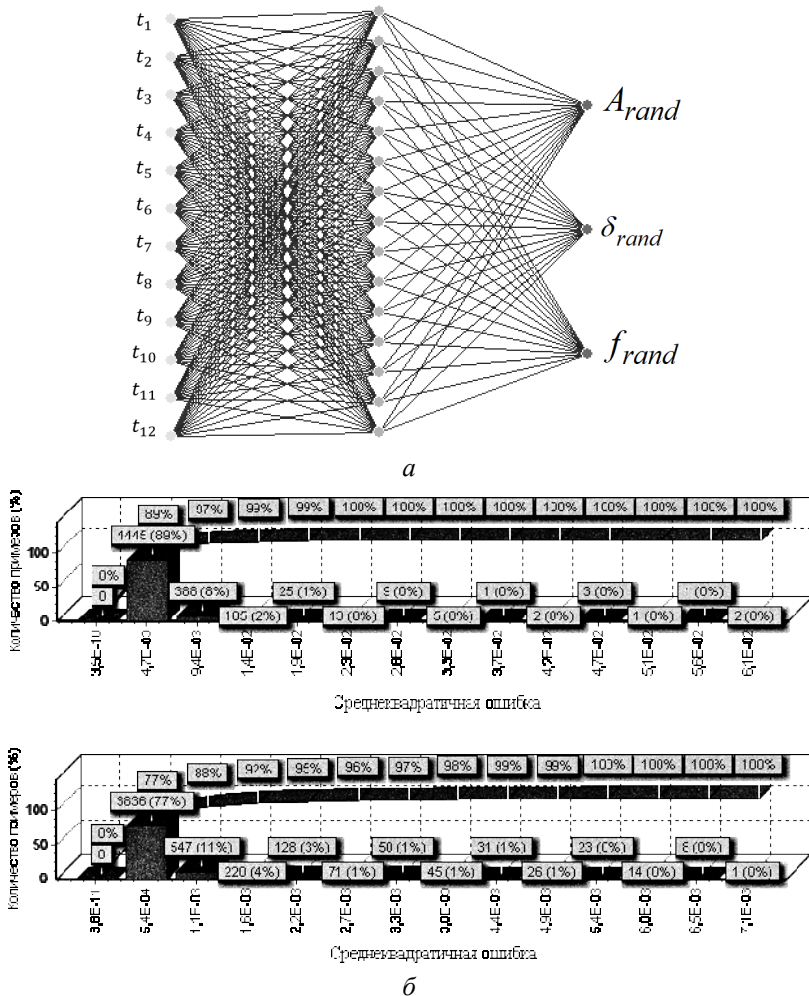


Рис. 2. Структура нейронной сети (*a*) и гистограммы распределения среднеквадратической ошибки при обучении ИНС с наибольшей максимальной ошибкой (сверху) и наименьшей максимальной ошибкой (снизу) (*б*); сплошная кривая – сумма с накоплением

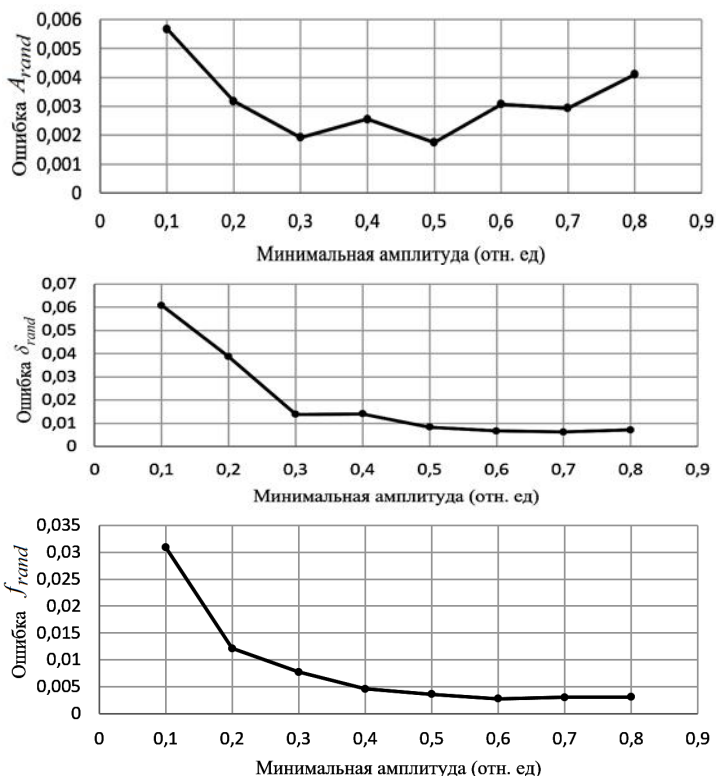


Рис. 3. Зависимости максимальной среднеквадратичной ошибки параметров $S(t)$ от минимальной амплитуды

Литература

1. *Artsishevskii Ya.L.* The method of improving the accuracy of determining the locations of damage to the electrical network elements by clarifying its parameters / Ya.L. Artsishevskii, Zhamsran Arslan // Bulletin of the Moscow Energy Institute. – 2007. – No. 1. – PP. 67–71.
2. *Swagata D.* Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application / D. Swagata, S. Surya, G. Anish, P. Mahendra // IEEE Access. – 2009. – No. 2. – PP. 537–557.
3. *Lyamets Yu.Ya.* Analysis of transients in a long line in the basis of discrete and continuous time / Yu.Ya. Lyamets, A.A. Belyanin, P.I. Voronov // Proceedings of universities. Electromechanics. – 2012. – No. 4. – PP. 11–16.

4. *Antonov V.I.* Adaptive Structural Models of Digital Electrical Signals with Local Irregularity / V.I. Antonov, A.A. Il'in, N.M. Lazareva // Russian Electrical Engineering. – 2012. – No. 4. – PP. 187–189.

5. *Славутский А.Л.* Применение алгоритма Доммеля для моделирования цепи с полупроводниковыми элементами и ключами с ШИМ управлением / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 57–65.

6. *Bhattacharya B.* Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids / B. Bhattacharya, A. Sinha // IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). – Boston: IEEE, 2017. – PP. 985–990. – DOI: 10.1109/ICTAI.2017.00151.

7. *Кощеев М.И.* Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кошеев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

8. *Славутская Е.В.* Нейросетевой системный анализ уровневых психологических характеристик / Е.В. Славутская, В.С. Аbruков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 164–173.

9. *Slavutskaya E.V.* Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models / E.V. Slavutskaya, L.A. Slavutskii // Society. Integration. Education. Proceedings of the Scientific Conference. – 2018. – PP. 455–464.

10. *Slavutskaya E.V.* Simple neural network algorithms for evaluating latent links of younger adolescent's psychological characteristics / E.V. Slavutskaya, V.S. Abruков, L.A. Slavutskii // Experimental Psychology (Russia). – 2019. – Vol. 12, No. 2. – PP. 131–144. – DOI: 10.17770/sie2018vol1.3348.

М.Е. Мамонычев, Н.П. Митяшин, Е.Е. Миргородская
(Саратов, СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

БЕЗОПАСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СБОРОК

В настоящее время всё большее распространение получает лазерная продукция. Среди нее можно выделить особую катего-

рию – лазерные линейки и модули, которые широко применяются в системах накачки волоконных и твёрдотельных лазеров. Данный вид излучателей работает в квазинепрерывном режиме (QCW – Quasi continuous wave), поскольку подобный режим работы позволяет повысить пиковую мощность излучения за счёт уменьшения средней мощности.

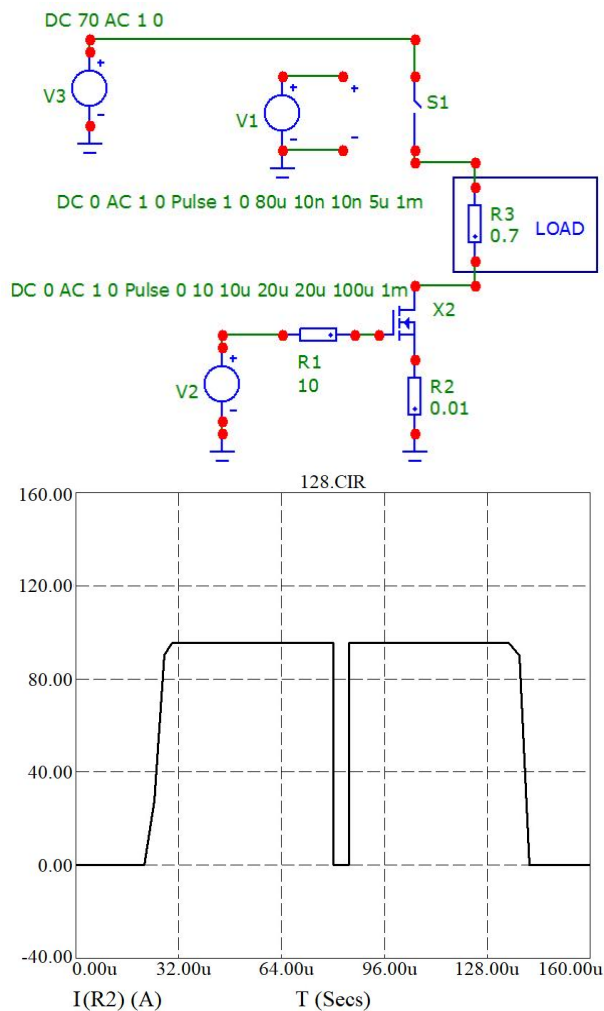
Следует отметить, что полупроводниковый лазер чувствителен к перегреву и превышению номинального тока [1]. Даже кратковременное превышение рабочего тока приводит к деградации лазерного диода. Поэтому требуется решение, учитывающее данный риск при включении излучателя в лабораторных условиях или технологическом процессе.

В данной статье предложено техническое решение, позволяющее защитить лазерные диоды, исключив возникновение бросков тока при внештатных ситуациях.

В классическом методе получения импульсов тока с применением транзистора, работающего в линейном режиме и с обратной связью по току [2, 3], при потере и восстановлении контакта с нагрузкой происходит выброс тока, что критично для лазерного диода. Данный недостаток можно устранить с помощью метода получения импульсов тока с применением транзистора, работающего в линейном режиме без обратной связи.

Ток, протекающий через канал MOSFET, зависит от количества носителей заряда, находящихся в нём, которое в свою очередь определяется потенциалом, приложенным к затвору транзистора [4]. Таким образом, изменяя потенциал на затворе, можно управлять амплитудой тока, протекающего через транзистор, и ограничивать её. Чтобы получить импульс тока через канал, требуется сформировать импульс напряжения на затворе. На рисунке показана модель описанной системы, реализованная в Micro-Cap 11.

В результате моделирования выявлено, что при кратковременной потере и восстановлении контакта в процессе работы полупроводникового лазера амплитуда тока восстанавливается до прежнего уровня. Таким образом, данная система позволяет эффективно ограничивать ток нагрузки, исключая нежелательные перегрузки.



Формирование импульса тока без применения обратной связи

Литература

1. *Hempel M.* Defect evolution during catastrophic optical damage of diode lasers / M. Hempel, F. La Mattina, J.W. Tomm, et al. // *Semiconductor Science and Technology*, 2011. – Vol. 26. – P. 075020.

2. *Хоровиц П.* Искусство схемотехники / П. Хоровиц., У. Хилл; пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.

3. *Картер Б.* Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини; пер. с англ. А.Н. Рабодзея. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 544 с.

4. *Титце У.* Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. – 12-е изд. – Т. II. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.

М.П. Лыкова
(Новосибирск, Сибирский государственный
университет путей сообщения)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИММУННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ В ОАО «РЖД»

Иммунная интеллектуальная система является адаптивной вычислительной системой. Она использует механизмы, модели, функции и принципы из теоретической иммунологии, её применяют для решения прикладных задач. Также она оптимизирует имеющиеся алгоритмы защиты информации, делает их проще и дешевле в обслуживании, что хорошо для экономики. В этой системе для описания взаимодействия компонентов системы (антител) используются меры аффинности, а в качестве механизмов адаптации – иммунные алгоритмы [1].

Иммунная система представляет собой пример децентрализованной обработки информации и интересна специалистам в области программирования, экономики и информатики. С её помощью можно параллельно выполнять большое количество действий (вычислений). Ещё она является примером биологической системы с прекрасными адаптивными механизмами на локальном уровне и эмерджентных механизмов поведения на глобальном уровне. Сейчас идет разработка таких алгоритмов, которые можно было бы использовать для решения задач в области оптимизации, защиты информации и распознавания образов. На данный момент есть три алгоритма для работы интеллектуальных иммунных систем: клональный, негативный и иммунный сетевой. В их основе лежат теории о природных иммунных системах.

Существует такая система, как IDS, используемая для обнаружения вторжений в компьютеры, сеть и т.д. Она выявляет факт не-

авторизованного доступа в систему или несанкционированного управления сетью или компьютером и обеспечивает дополнительную защиту компьютерных систем. В этой области использование искусственных иммунных систем будет очень выгодно потому, что система может запоминать разные виды вирусов, является самообучающейся и не требует дополнительных настроек. Это будет очень хорошим способом для обнаружения вторжений [2].

Пока иммунные интеллектуальные системы активно на железной дороге не используются. Но есть несколько направлений, в которых подобные системы показали хороший результат. Один из примеров – это модель оптической локализации железнодорожных подвижных единиц на основе искусственной иммунной системы отрицательного отбора. Это новый подход к локализации подвижных единиц, основанный на распознавании автосцепки вагона на графических изображениях, получаемых с помощью видеокамер универсальной системы автоматического распознавания номеров вагонов. Была разработана модель распознавания автосцепки, основанная на алгоритме отрицательного отбора с детекторами переменного размера, показавшая хорошие результаты при испытаниях.

Искусственные иммунные системы могут решать задачи, связанные с данными различных форматов. Можно находить аномалии и устранять их, распознавать образы и сигналы, моделировать системы оптимизации и поиска, обрабатывать большие объёмы неструктурированных данных, извлекать и сжимать информацию в области машинного обучения, компьютерной безопасности и адаптивного контроля. Всё это приносит определённую прибыль и экономии ресурсов, но при этом рассматриваемые системы ещё не являются полностью самообучающимися и универсальными.

Литература

1. Искусственная иммунная система [Электронный ресурс] // Info-Farm.ru, 2018. – Режим доступа: https://info-farm.ru/alphabet_index/i/iskusstvennaya-immunnaya-sistema.html (дата обращения: 25.04.2020).
2. AITSO: A Tool for Spatial Optimization Based on Artificial Immune Systems [Электронный ресурс] // Comput Intell Neurosci, 2015. – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4307625> (дата обращения: 25.04.2020).

Ю.В. Бебихов, Н.Н. Кугушева
(Мирный, Политехнический институт (филиал)
СВФУ им. М.К. Аммосова)

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В MATLAB/SIMULINK

В настоящее время на рынке программного обеспечения существует множество программ для структурного моделирования технических систем. Некоторые из них появились не так давно, а какие-то – хорошо знакомы пользователям и являются очень популярными. Среди программ для структурного моделирования есть программы, которые могут использоваться для моделирования любых технических систем, но есть и программы, имеющие узкую специализацию в какой-либо предметной области. Благодаря своей универсальности, пакет программ MatLab получил наибольшее распространение в области моделирования технических систем [1].

Большой вклад в структурное моделирование систем электроприводов технологических установок горных предприятий внесен авторами в работах [2, 3]. Предложены модели насосных и вентиляторных агрегатов в среде MatLab с использованием средств визуального моделирования Simulink для исследования электромеханических процессов, происходящих в центробежных машинах. Изложены принципы построения систем регулируемого электропривода машин и установок горного производства с циклическим характером действия (крановое хозяйство, экскаваторы). Приведены методики расчёта элементов силовой цепи и систем управления. В работе [4] авторами разработана структурная модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя рентгенолюминесцентного сепаратора обогатительной фабрики. В недавней работе [5] авторами рассмотрены особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий. Исследованы главная вентиляторная установка подземного рудника и пульпонасосная установка обогатительной фабрики. Разработаны структурные

модели в MatLab/Simulink, подтверждающие эффективность внедрения систем частотно-регулируемого электропривода.

Из анализа литературы видно, что исследованиям режимов работы двигателей постоянного тока (ДПТ) в системах электропривода подъемных установок шахт и рудников методом структурного моделирования уделяется мало внимания. Чаще всего имеет место либо математическое моделирование, как в работах [6, 7], либо физическое моделирование, как в [8]. Именно этим обусловлен выбор объекта исследования и метода моделирования в настоящей работе.

Структурная модель в построении проще физической. Основные принципы вывода уравнений статических электромеханической и механической характеристик ДПТ подробно представлены в [9]. Здесь приведем описание основных блоков структурной модели и представим результаты моделирования.

Все блоки находятся в библиотеке блоков Simulink в подкаталогах Continuous, Math Operations, Sinks и Sources. Основным блоком, имитирующим каждую из трёх частей двигателя постоянного тока (часть якоря, часть обмотки возбуждения, механическая часть), является Transfer Fcn – передаточная функция. Также используются блоки: Step – задатчик входного шагового сигнала; Sum – сумматор сигналов; Product – произведение сигналов; Gain – усилитель сигнала; Scope – осциллограф для отображения выходного сигнала.

Блоки соединяются между собой и в них подставляются рассчитанные данные двигателя согласно методикам в [10, 11]. Основными расчётными данными для моделирования являются: сопротивление и индуктивность обмоток якоря и возбуждения; взаимоиндукция цепей; момент инерции двигателя; постоянные времени и конструктивные константы ДПТ. Готовая структурная модель ДПТ приведена на рис. 1.

На рис. 2 представлены результаты структурного моделирования в виде временной зависимости угловой скорости вращения двигателя. На графике показана характеристика переходного процесса угловой скорости вращения, для которой присущи некоторые показатели качества линейных непрерывных систем, обуславливающие динамику переходного процесса и точность системы, а именно время переходного процесса, перерегулирование и число колебаний. Проанализируем эти данные.

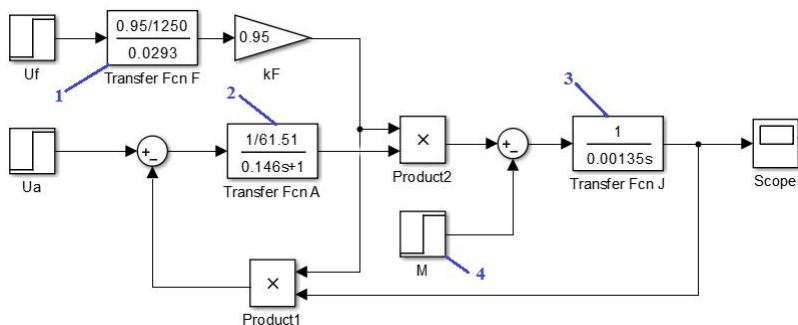


Рис. 1. Структурная модель двигателя постоянного тока:
1 – передаточная функция обмотки возбуждения; 2 – передаточная функция обмотки якоря; 3 – передаточная функция механической части; 4 – момент статического сопротивления

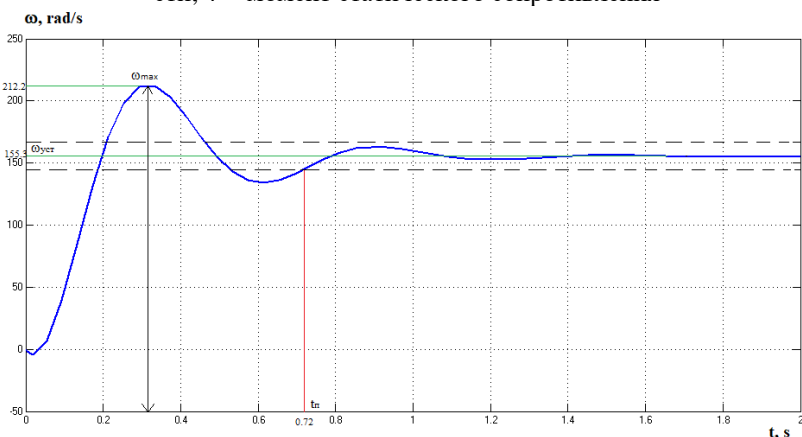


Рис. 2. Результаты структурного моделирования

В результате структурного моделирования получаем угловую скорость вращения в установившемся режиме работы, равную 155,3 рад/с. Продолжительность переходного процесса составляет 0,72 с. В переходном процессе присутствует перерегулирование, которое составляет 36 %. Характер переходного процесса колебательный, число колебаний за время переходного процесса – 2.

В заключении отметим, что в результате структурного моделирования получили рабочую модель, имеющую хорошие параметры быстродействия и точности. Недостатком является наличие перерегулирования в переходном процессе, превышающем установившееся

ся значение на 30 %. Структурная модель в построении проще физической, но требует дополнительных расчётов постоянных времени и конструктивных констант двигателя для адекватного моделирования. Преимущество структурной модели заключается в том, что блок измерителя (осциллограф) может быть подключен к любой точки модели, в отличие от физической модели, где измерители подключаются только к специальным блокам [12].

Литература

1. Семёнов А.С. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.

2. Фащиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий / В.Н. Фащиленко. – М.: Горная книга, 2011. – 84 с.

3. Ляхомский А.В. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Часть 1. Автоматизированный электропривод механизмов циклического действия / А.В. Ляхомский, В.Н. Фащиленко. – М.: Горная книга, 2014. – 477 с.

4. Семёнов А.С. Разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя / А.С. Семёнов, Я.С. Харитонов, А.Н. Егоров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 123–131.

5. Семёнов А.С. Особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий / А.С. Семёнов, А.Н. Егоров // Каротажник. – 2018. – № 11 (293). – С. 85–99.

6. Семёнов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523–528.

7. Кугушева Н.Н. Математическое моделирование сложных электрических цепей в среде MATLAB / Н.Н. Кугушева, А.С. Семёнов, И.А. Якушев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 409–411.

8. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования: монография / А.С. Семёнов, Н.Н. Кугушева, В.М. Хубиева. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 112 с.

9. *Semenov A.S. Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB* / A.S. Semenov, V.M. Khubieva, Y.S. Kharitonov // Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon), IEEE. – 2018. – No. 8501666. – PP. 1–5.

10. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода / А.С. Семёнов. – М.: Спутник+, 2012. – 60 с.

11. Семёнов А.С. Программа MATLAB / А.С. Семёнов. – М.: Спутник+, 2012. – 40 с.

12. Бебихов Ю.В. Анализ методов моделирования технических систем в среде MATLAB / Ю.В. Бебихов, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 3 (26). – С. 12.

А.А. Тяпин, Е.С. Кинев
(Красноярск, ООО «Тепловые электрические системы»)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

Электропитание мощных индукционных установок (ИУ) нередко выполняют однофазным. Токи в линейных проводах могут достигать килоампер. Подключение мощной однофазной нагрузки к трёхфазной сети создаёт длительный несимметричный режим. Несимметрия резко ухудшает условия работы электрических машин и иного цехового оборудования, вплоть до аварий, вызывает дополнительные потери, снижает пропускную способность проводов, поэтому необходимо выравнивать токи фаз, применяя симметрирующие устройства (СУ) [1].

Общий вид однофазного индуктора ОКБ, предназначенного для экструзии алюминия, и схема его подключения показаны на рис. 1.

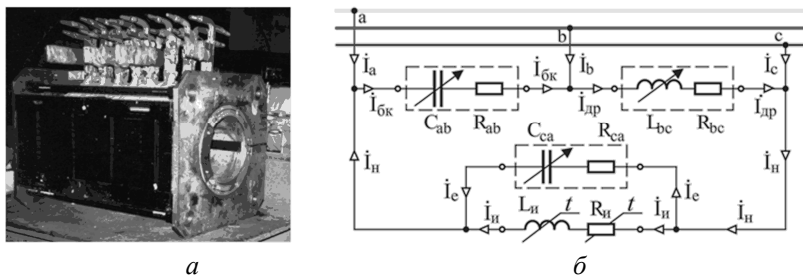


Рис. 1. Общий вид однофазного индуктора и схема симметрирования

В инженерной практике оценку несимметричных режимов ИУ в трёхфазной сети проводят с применением коэффициента несимметрии токов $k_{\text{нн}}$, учитывая глубину изменения нагрузки и другие факторы. В качестве симметрирующих элементов ИУ (рис. 1, б) применяют батареи конденсаторов (БК) $C_{\text{аб}}$ и регулируемый дроссель Др. Для достижения режима резонанса токов используют другую БК – ёмкость $C_{\text{са}}$.

Для исследования несимметричных режимов трёхфазных устройств применяют метод симметричных составляющих (МСС) [1, 2]. Однако при необходимости количественной оценки совокупности дискретных режимов ИУ, расчёт в символических изображениях или по мгновенным значениям более предпочтителен. При этом численное схемотехническое моделирование позволяет перебирать большое число вариантов и контролировать состояние ИУ в динамике [2].

В проекте ОКБ моделирование проведено с применением авторского программного обеспечения (ПО). Решение задачи симметрирования однофазного индуктора мощностью 180 кВт, при токах 2-3 кА выполнено численным моделированием в специализированной программной среде [2]. Вычислительная среда имеет библиотеки схемных моделей ИУ, которые содержат двухполюсники и четырехполюсники, управляемые источники напряжения и тока (ЕУ, ЕІ, ЈУ, ЈІ). Для сложных конструкций предусмотрена генерация макромоделей.

Параметры ИУ в ходе нагрева существенно меняются [3]. Поэтому макромоделли реализованы как параметрические многополюсники. В структуре матричного описания предусмотрены звенья-ключи, управляемые напряжением, и звенья, управляе-

мые во времени. Процедура подбора шага переключения оптимизирована по условиям сходимости итераций. В среде моделирования запрограммирован модифицированный узловый анализ по гибридным уравнениям, а также алгоритмы и методы численных итерационных расчётов нелинейных систем [4].

Исследование установившихся и переходных режимов ИУ по модели (рис. 2) выполняют как многовариантный вычислительный проект. Помимо файла с описанием макромодели в директории группируют необходимые подпрограммы, базы данных, библиотеки, командные и вспомогательные модули. Внутри файла задачи обеспечивают наличие упорядоченных ссылок на подключаемые модели и библиотеки, соблюдая языковый синтаксис.

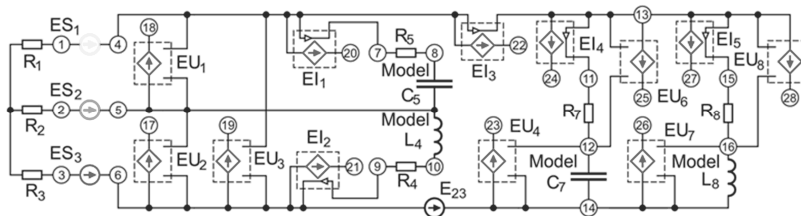


Рис. 2. Модель однофазной ИУ при симметрировании режима

Численный эксперимент изначально программируется на заданное число этапов расчёта и вычислительных операций. Результаты вычислений отгружаются в табличные файлы и контролируются в ходе счёта. При использовании процедур оптимизации вычислительный проект может завершаться досрочно, после получения требуемого результата.

Результаты моделирования представлены на векторных диаграммах (ВД) как совокупность режимов ИУ при симметрировании индуктора двумя способами (рис. 3). Симметрированию с помощью БК соответствует векторная диаграмма, показанная на рис. 3, а. Режимы симметрирования дросселем представлены на рис. 3, б.

При построении ВД использованы результаты моделирования режимов для изменения глубины регулирования индукционной нагрузки (рис. 1, б) в 15 %. Результаты моделирования можно применить для настройки автоматизированной системы управления (АСУ) на базе промышленного микроконтроллера. Многочисленные первичные измерительные средства настраи-

вают на динамику фазовых сдвигов параметров режима. Программно-алгоритмическое оснащение АСУ можно реализовать, ориентируясь на настроечные характеристики.

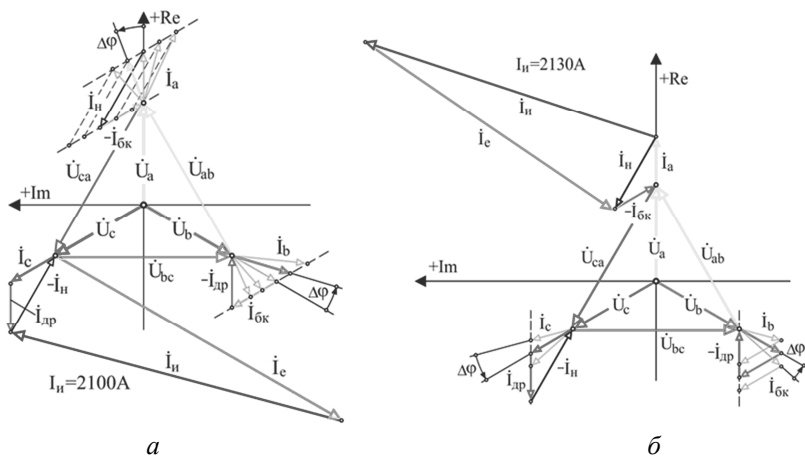


Рис. 3. ВД режима ИУ при симметрировании БК (а) и дросселем (б)

В результате моделирования режима и автоматизированного управления состоянием моделей СУ получают семейства векторных диаграмм и характеристик. Уточняются диапазоны регулирования, а также корректирующие воздействия на границах настройки алгоритмов управления. Моделированием легко оценить степень искажения режима электропитания при неудачном симметрировании. Пример семейства характеристик коэффициента несимметрии токов индукционной установки показан на рис. 4. Во всех экспериментах длительность нагрева сохраняется неизменной, около 80 с.

Характерное увеличение коэффициента несимметрии токов в ходе нагрева от начала до конца процесса получено для четырех случаев настройки регуляторов. Ключевой причиной чрезмерного повышения коэффициента несимметрии здесь является рассогласование СУ. Для кривых 1, 2, 3, 4 границы диапазона изменения параметров обоих СУ, регулируемых одновременно, заданы значениями 3, 6, 9, 12 % соответственно. Полученный результат показывает, что точность настройки симметрирующего устройства должна быть выше. Причем регулировать следует лишь одно симметрирующее устройство.

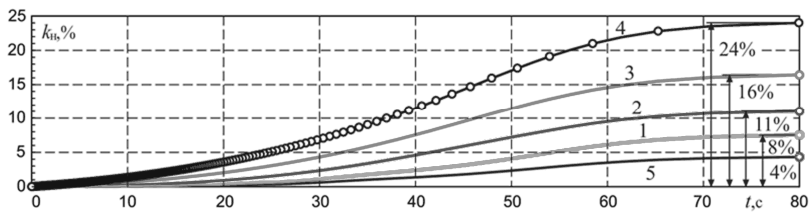


Рис. 4. Кривые дрейфа коэффициента несимметрии при нагреве

Только характеристика 5 на рис. 4 удовлетворяет требованию ГОСТ. Она получена при точности настройки параметрической модели симметрирующей БК около 2 % при неизменном состоянии дросселя. Можно заметить, что для других параметров ИУ, других систем моделирования и иных настроек режимов СУ результаты могут несколько отличаться. Представленные результаты моделирования электромагнитных режимов индукционного оборудования в совокупности с системами электропитания показывают широкие возможности анализа и настройки несимметричных индукционных комплексов с применением описанных средств.

Литература

1. Гитгарц Д.А. Симметрирующие устройства для однофазных электротермических установок / Д.А. Гитгарц, Л.А. Мнухин. – М.: Энергия, 1974. – 120 с.
2. Тяпин А.А. Двухфазная индукционная нагрузка в трёхфазной распределительной сети / А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 1. – С. 42–51.
3. Базаров А.А., Павлова О.Е. Электротехнический комплекс для нагрева слитков с равномерным энергопотреблением / А.А. Базаров, О.Е. Павлова // Современное российское оборудование для повышения надёжности экономичности и безопасности энергетического комплекса России: сб. науч. тр. – Самара: СамГТУ, 2019. – С. 6–9.
4. Kinev E. Improving the quality of electricity of a metallurgical enterprise by balancing the induction load / E. Kinev, A. Tyapin // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2020. – Vol. 1, No. 40. – PP. 33–40.

Н.В. Голышев, С.В. Моторин, Д.Н. Голышев, С.Ф. Клименко
(Новосибирск, Сибирский государственный
университет водного транспорта)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, НЕ ТРЕБУЮЩАЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

При проектировании высокочувствительных приборов (МРТ томографы, сверхпроводниковые биомагнитные системы и др.) достижение предельного порога чувствительности является важнейшей задачей. В томографах в борьбе за чувствительность значение индукции постоянного поля достигает 6 Тл. Его последствие обнаруживается в течении многих месяцев. Разумно максимально использовать оптимизацию шумовых параметров самих преобразователей при их согласовании цепями передачи. Такая оптимизация особенно сложна при применении глубокого охлаждения входных цепей с целью увеличения соотношения сигнал/шум. Последнее объясняется тем, что входные цепи, находятся в областях с градиентами температуры (300 К – 4,2, 77 К). Теоретические предсказания и экспериментальные результаты количественно отличаются до 3–5 раз [1–3]. В случае внесения изменений в схему цепи весь вывод и исследование аналитических выражений нужно проводить заново. Любое упрощение и идеализация ограничивает применимость получаемых результатов и их точность.

Нами предложена математическая модель, позволяющая проводить оптимизацию без введения упрощающих предположений. При этом не требуется получение результирующих аналитических выражений для всей цепи. Модель основана на описании сложной цепи в виде линейной шумящей системы, представленной в виде каскадного соединения источника сигнала с эквивалентными источниками шумовых э.д.с. e_n и тока i_n и автономного четырехполюсника [4]. Источники сигнала и шума являются статистически независимыми, поэтому порождаемые ими во внешних цепях токи и напряжения подчиняются принципу суперпозиции, что позволяет проводить анализ преобразования сигнала и шума по отдельности. Схема четырехполюсника с учётом шумовых параметров цепи изображена на рис. 1, где e_s , z_r – э.д.с. и внутреннее сопротивление источника сигнала, e_{nr} – шумовая э.д.с. источника сигнала.

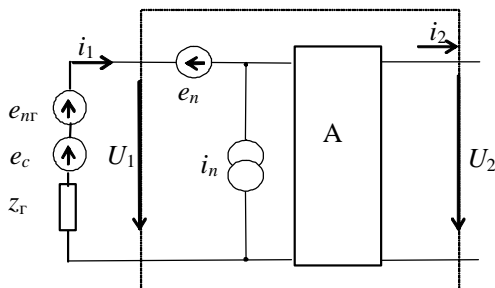


Рис. 1

В матричной форме связь входных/выходных \mathbf{U} и \mathbf{I} шумящего четырехполусника примет вид:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}U_1 \\ \hat{e}I_1 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \hat{e}U_2 \\ \hat{e}I_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{e}e_n \\ \hat{e}i_n \end{pmatrix},$$

где \mathbf{A} – квадратная матрица размером 2×2 , $\mathbf{r} = [\mathbf{e}_n \mathbf{i}_n]^T$ – вектор шумовых параметров, представляющий собой случайные величины.

Если корреляционная матрица шумящего четырехполусника известна

$$\mathbf{R} = \langle \mathbf{r} \mathbf{r}^H \rangle = \begin{pmatrix} \langle \hat{e}e_n \hat{e}e_n^* \rangle \\ \langle \hat{e}e_n \hat{e}i_n^* \rangle \\ \langle \hat{e}i_n \hat{e}e_n^* \rangle \\ \langle \hat{e}i_n \hat{e}i_n^* \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle e_n^2 \rangle \\ \langle e_n i_n^* \rangle \\ \langle e_n^* i_n \rangle \\ \langle i_n^2 \rangle \end{pmatrix},$$

то отношение шум/сигнал на выходе шумящей системы можно получать усреднением выражения

$$\frac{U_{n2}}{U_{c2}} = \frac{e_{n2} - (e_n + i_n z_r)}{e_c},$$

где U_{n2} , U_{c2} – напряжения на выходе, обусловленные сигналом и шумом, H – знак эрмитового сопряжения. Описание шумовых источников в рамках корреляционной теории является полным, если известны их корреляционные функции. В результате получим:

$$NS = \frac{1}{e_c^2} \left[\langle e_r^2 \rangle + \langle e_n^2 \rangle + \langle i_n^2 \rangle |z_r|^2 + 2 \operatorname{Re} [z_r \langle i_n e_n^* \rangle] \right]. \quad (1)$$

Выражение (1) является исходным при оптимизации шумовых параметров. Из формулы для расчёта NS видно, что необходимо определить моменты вектора шума цепи, что проделать для простых цепей сравнительно несложно. При увеличении числа элементов системы выражение становится громоздким.

В процессе оптимизации обычно производится сравнительный анализ различных схем построения согласующих цепей и исследуется влияние различных параметров составляющих их элементов на отношение шум/сигнал. Этот процесс, как правило, повторяется многократно, т.к. наилучшая структура согласующей цепи обычно не является очевидной. При каждом изменении структуры приходится проводить вывод аналитических выражений для e_n и i_n . Трудности проведения оптимизации резко возрастают при усложнении структуры цепей.

Наша математическая модель, ориентирована на применение компьютера, при этом необходимо знать лишь аналитические выражения матрицы простых элементов. Схема цепи разбивается на $(N-1)$ шумящих четырехполюсников с сигнальными матрицами A_k и статистически независимыми шумовыми векторами $\mathbf{r}_k = [e_{nk} \ i_{nk}]^T$, где $k = 1, \dots, N$ (рис. 2) [4].

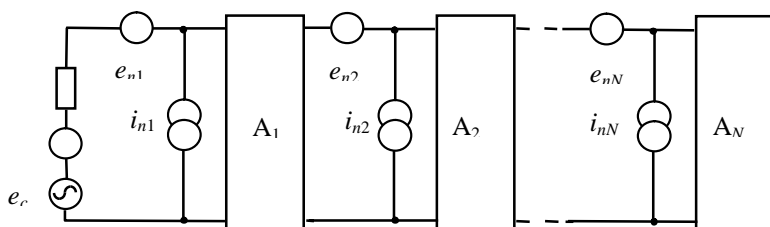


Рис. 2

Матрица сигнала цепи в этом случае представляется в виде $\mathbf{A} = \bigcirc_{i=1}^N \mathbf{A}_i$. Из рис. 2 видно, что шумовой вектор системы выражается через шумовые векторы каскадно включенных четырехполюсников как $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 + \mathbf{A}_2 \mathbf{r}_2 + \dots + \bigcirc_{k=1}^N \mathbf{A}_k \mathbf{r}_N$, или более краткое выражение для вектор шума: $\mathbf{r} = \bigcirc_{i=1}^N \mathbf{C}_i \mathbf{r}_i$, где $\mathbf{C}_i = \bigcirc_{k=0}^{i-1} \mathbf{A}_k$, $\mathbf{C}_1 = \mathbf{I}$ – единичная матрица. Так как шумовые векторы разных четырехполюсников статистически независимы, то корреляционную матрицу всей цепи можно получить в виде:

$$\mathbf{R} = \langle \mathbf{r} \mathbf{r}^H \rangle = \sum_{i=1}^N \mathbf{C}_i \mathbf{R}_i \mathbf{C}_i^H = \sum_{i=1}^{N-1} \begin{pmatrix} \hat{e}_i \\ \hat{e}_0 \end{pmatrix} \mathbf{A}_k \begin{pmatrix} \hat{e}_i \\ \hat{e}_0 \end{pmatrix}^H \mathbf{R}_i \begin{pmatrix} \hat{e}_i \\ \hat{e}_0 \end{pmatrix} \mathbf{A}_k \begin{pmatrix} \hat{e}_i \\ \hat{e}_0 \end{pmatrix}^H. \quad (2)$$

Здесь при усреднении учтено, что при $i \neq j$ $\langle r_i r_j^H \rangle = 0$, \mathbf{R}_i – матрица i -го четырехполосника. Элементами матрицы \mathbf{R} являются необходимые для записи выражения сигнал/шум моменты $\hat{a}_n^2 \tilde{n}$, $\hat{a}_n^2 \tilde{n}$, и $\hat{a}_n \hat{a}_n^* \tilde{n}$. Выражение (2) устанавливает правило нахождения численных значений средних квадратов и корреляционных моментов результирующих шумовых э.д.с. и тока через матрицы составляющих цепь элементов. Сигнальные, шумовые и корреляционные матрицы простейших электрических цепей приведены в таблице.

Сигнальные, шумовые и корреляционные матрицы простейших электрических цепей

Элемент	A	r	R
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & 0 \\ \hat{e}_0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 e_n \\ \hat{e}_0 0 \end{pmatrix}$	0
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & 0 \\ \hat{e}_0 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 e_n \\ \hat{e}_0 0 \end{pmatrix}$	0
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & z \\ \hat{e}_0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 e_n \\ \hat{e}_0 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{a}_n^2 \tilde{n} & 0 \\ \hat{e}_0 0 & 0 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & 0 \\ \hat{e}_0 & 1/z \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 0 \\ \hat{e}_0 e_n \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \hat{e}_0 \frac{1}{ z ^2} \langle e_n^2 \rangle & 0 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & 0 \\ \hat{e}_0 & n \end{pmatrix}$	0	0
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & L_1 & j\omega(L_1 L_2 - M^2) \\ \hat{e}_2 & M & M \\ \hat{e}_0 & 1 & L_2 \\ & j\omega M & M \end{pmatrix}$	0	0
	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 & ch \\ \hat{e}_0 & z_0 sh \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 e_n \\ \hat{e}_0 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \hat{e}_1 \langle e_n^2 \rangle & \langle i_n e_n^* \rangle \\ \hat{e}_0 \langle e_n^2 \rangle & \langle i_n^2 \rangle \end{pmatrix}$

Предложенная модель была использована нами для оптимизации входных цепей пт-сквидов. При расчётах шумового магнитного потока получено удовлетворительное с погрешностью 10–25 % совпадение с экспериментом [5–6]. Полученный уровень собственного шума пт-сквида $(1,1, 1,6) \times 10^{-6} \Phi_0/\Gamma\text{ц}^{1/2}$ близок к теоретически предельному.

Данная модель устраняет несоответствие расчётных и экспериментальных данных, позволяет проводить расчёт оперативно, минуя стадию вывода аналитических выражений, упрощает анализ схемных решений, оптимизировать согласование исходя из реальных возможностей.

Литература

1. Гольшев Н.В. Оценка шумового магнитного потока реальных высокочастотных сквидов / Н.В. Гольшев, Б.М. Рогачевский // Изв. вузов. Приборостроение. – 1987. – № 5. – С. 56–63.
2. Бароне А. Эффект Джозефсона. Физика и применения / А. Бароне, Дж. Паттерно. – М.: Мир, 1984. – 639 с.
3. Гольшев Н.В. Шум Найквиста неравномерно нагретой длинной линии / Н.В. Гольшев, Я.С. Гринберг // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57, Вып. 6. – С. 1129–1131.
4. Суходоев И.А. Шумы электрических цепей / И.А. Суходоев. – М.: Связь, 1975. – 351 с.
5. Гольшев Н.В. Сверхпроводниковые магнитокардиографы / Н.В. Гольшев // Автометрия. 1995. – № 1. – С. 63–76.
6. Golyshv N.V. The Choice of the Optimum Bandwidth of a Superconducting Magnetocardiograph / N.V. Golyshv, Ya.S. Greenberg, S.V. Motorin // 6th Int. Superconductive Electronics Conference: ISEC'97-Berlin (Germany), 1997. – PP. 324–326.

Д.А. Черемухин

(Владивосток, Дальневосточный федеральный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Передача электромагнитной энергии от источника к потребителю может осуществляться через свободное пространство

или с помощью направляющих систем (линий передачи). Регулярные линии, у которых в продольном направлении неизменны поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющей среды, можно разделить на две группы – открытые линии и волноводы. В открытых линиях поле направляемой волны не экранировано снаружи и существует в окружающем линию пространстве. К закрытым линиям (волноводам), поперечное сечение которых имеет замкнутый проводящий контур, ограничивающий поперечное распределение поля, относятся коаксиальная линия, прямоугольный и круглый волноводы [1].

При выборе того или иного типа линии передачи в каждом конкретном случае необходимо исходить из следующих требований:

- 1) диапазон длин волн (частот), передаваемых линией;
- 2) минимальные потери энергии для данной структуры поля;
- 3) минимальные амплитудные и фазочастотные искажения;
- 4) высокая электрическая прочность;
- 5) большая широкополосность, что необходимо для увеличения объема передаваемой информации;
- 6) высокая механическая прочность при, возможно, малых массе и габаритах;
- 7) простота конструкции и высокая технологичность при изготовлении.

Очевидно, что не существует универсальной линии передачи, удовлетворяющей всем этим требованиям, поэтому каждый из типов линий находит свое конкретное применение. Например, симметричную двухпроводную линию целесообразно применять на метровых и более длинных волнах, коаксиальный круглый волновод – на дециметровых волнах, прямоугольный, круглый и эллиптический волноводы – на сантиметровых и миллиметровых волнах, диэлектрические линии – на миллиметровых и более коротких волнах.

Техническое задание гласит о том, что имеется прямоугольный волновод, который на основной волне в согласованную нагрузку передает мощность ($P = 200$ кВт). Волновод заполнен воздухом ($\epsilon = \mu = 1$). Длина волны генератора, возбуждающего волновод, $\lambda = 0,02$ м.

Сначала напомним и объясним условие существования в волноводе основной (низшей волны). Выберем размеры стандартного волновода.

Только волна H_{10} может одна существовать в волноводе, если правильно подобрать размеры волновода для заданной λ генератора. Чтобы она возбудилась необходимо условие $\lambda < \lambda_{крH10}$ ($\lambda < 2a$). Таким образом, чтобы волна H_{10} существовала, должны быть выполнены условия:

$$\frac{l}{2} < a < l; \quad 0 < b < \frac{l}{2}.$$

Размеры выбранного волновода: ширина $a = 1,295$ см; высота $b = 0,648$ см; площадь $S = 0,102$ мм; затухание $\alpha = 0,238$ дБ/м; частота $\nu = c/\lambda = 300000000/0,02 = 15$ ГГц.

Найдем значения $\lambda_{кр}$ и Λ :

$$l_{крH_{10}} = \frac{2\sqrt{em}}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}} = \frac{2}{\sqrt{0,59}} = 2,59 \text{ см};$$

$$L = \frac{l}{\sqrt{em} \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2} \frac{1}{em}} = \frac{2}{0,64} = 3,125 \text{ см}.$$

Теперь требуется нарисовать эскизы электрического и магнитного полей (рис. 1), токов проводимости и токов смещения (рис. 2) для основной волны.

Теперь найдём значения фазовой и групповой скоростей, характеристического сопротивления волновода:

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{em} \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2} \frac{1}{em}} = \frac{300000000}{0,65} = 46815380000 \text{ см/с};$$

$$V_{гр} = \frac{c \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2} \frac{1}{em}}{\sqrt{em}} = \frac{192000000}{1} = 19530000000 \text{ см/с};$$

$$z_c^H = \frac{376,7 \sqrt{m/e}}{\sqrt{1 - (l/l_{кр})^2} \frac{1}{em}} = \frac{376,7}{0,65} = 579,54 \text{ Ом}.$$

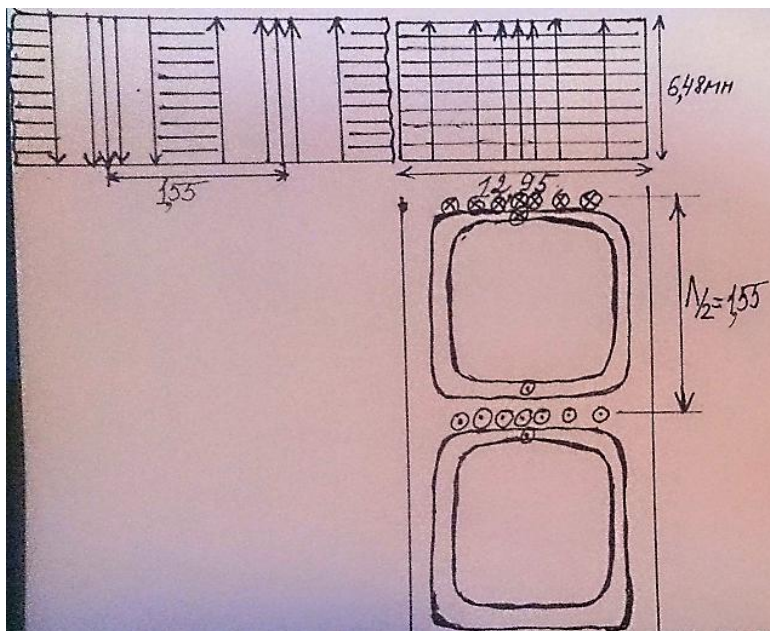


Рис. 1. Эскиз электромагнитного поля волны H_{10}

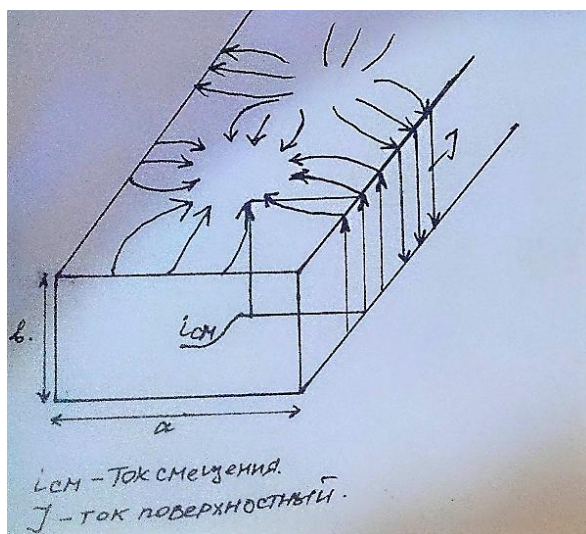


Рис. 2. Эскиз токов проводимости и токов смещения волны H_{10}

Далее рассчитаем амплитуду напряженности электрического поля, амплитуды поверхностных продольного и поперечных токов, токов смещения:

$$E_{ym} = \frac{2\sqrt{\frac{Z_0 P}{ab}}}{\sqrt[4]{1 - (l/l_{кр})^2}} = \frac{23607}{0,89} = 27,525 \frac{\text{кВ}}{\text{см}};$$

$$J_{zm}^a = 2\sqrt{\frac{P}{Z_0 ab}} \sqrt[4]{1 - (l/l_{кр})^2} = 40,25 \times 0,89 = 35,8 \text{ А/см};$$

$$J_{xm}^a = J_{zm}^b = 2\sqrt{\frac{P}{Z_0 ab} \frac{l/l_{кр}}{\sqrt[4]{1 - (l/l_{кр})^2}}} = 37,6 \text{ А/см};$$

$$i_{смm} = \omega \epsilon_0 E_{пр} = 2\pi \frac{c}{l} \epsilon_0 E = 2,59 \text{ А/см}^2.$$

Определим предельную для данного волновода мощность:

$$P_{пр} = \frac{E_{пр}^2 ab}{4Z_0} \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2} = 0,16 \text{ кВт}.$$

Требуется также определить глубину скин-слоя и потери мощности на единицу длины волновода для материала стенок – меди и серебра.

Для меди: глубина скин-слоя

$$d = \sqrt{\frac{2}{\epsilon \mu_a \omega \mu_0 s_{ст}}} = \frac{2}{668228} = 1,7 \text{ мкм}; \quad w = 9,4 \times 10^{10} \text{ Гц};$$

затухание

$$\alpha = \frac{8,68 \sqrt{\frac{w \epsilon}{2s}}}{b \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2}} \frac{e}{e} + 2 \frac{b}{a} (l/l_{кр})^2 \frac{1}{e} = \frac{7,15 \times 10^{-9}}{0,006 \times 0,64} 1,53 = 0,237 \frac{\text{дБ}}{\text{м}};$$

потери мощности

$$P_{п} = P_{вх} (1 - e^{-2\alpha}) = 200000 (1 - 0,632) = 75600 \text{ Вт} = 74 \text{ кВт}.$$

Для серебра: глубина скин-слоя

$$d = \sqrt{\frac{2}{\epsilon \mu_a \omega \mu_0 s_{ст}}} = \frac{2}{668228} = 1,3 \text{ мкм}; \quad w = 9,4 \times 10^{10} \text{ Гц};$$

затухание

$$a = \frac{8,68 \sqrt{\frac{we}{2s}}}{b \sqrt{1 - (l/l_{кр})^2}} \frac{e}{e} + 2 \frac{b}{a} (l/l_{кр})^2 \frac{\dot{u}}{u} = \frac{9,3 \times 10^{-9}}{0,006 \times 0,64} 1,53 = 0,23 \frac{\text{дБ}}{\text{м}};$$

потери мощности

$$P_{\Pi} = P_{\text{вх}} (1 - e^{-2a}) = 200000 (1 - 0,637) = 75600 \text{ Вт} = 72 \text{ кВт}.$$

Литература

Антенны и устройства СВЧ / под ред. Воскресенского Д.И. – М: Сов. радио, 1972. – 367 с.

Н.В. Голышев, С.В. Моторин, Д.Н. Голышев, С.Ф. Клименко
(Новосибирск, Сибирский государственный
университет водного транспорта)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЁТА ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Одним из высокочувствительных преобразователей, требующих тщательного согласования входных цепей, является сверхпроводниковый квантовый интерференционный датчик (сквид), являющийся основой сверхпроводниковых биоманнитных систем [1]. Нами в соответствии с предложенной математической моделью, не требующей аналитических выражений для расчёта шумовых параметров первичных преобразователей, получено представление сквида в виде каскадного соединения шумящих четырехполюсников, пригодное для высокочастотных (ВЧ) и постоянного тока (ПТ) сквидов [2].

На основе статистических характеристик всех составляющих шума выражение для полного шумового магнитного потока $\dot{\Phi}_n^2(\omega)\tilde{n}$ представляется в виде суммы избыточного $\dot{\Phi}_{ni}^2(\omega)\tilde{n}$ и собственного $\dot{\Phi}_{ns}^2(\omega)\tilde{n}$: $\dot{\Phi}_n^2(\omega)\tilde{n} = \dot{\Phi}_{ni}^2(\omega)\tilde{n} + \dot{\Phi}_{ns}^2(\omega)\tilde{n}$,

$$\text{или } \dot{\Phi}_{ni}^2(\omega)\tilde{n} = \frac{e}{e} \langle e_n^2 \rangle + \langle i_n^2 \rangle \times Z_d^2 + 2 \operatorname{Re} \langle e_n^* \times i_n \rangle \times Z_d \times \frac{\partial V}{\partial \Phi} \frac{\ddot{\Phi}}{\dot{\Phi}},$$

$Z_d, \sqrt{V/\sqrt{F}}$ – динамический импеданс и коэффициент преобразования сквида соответственно.

Разработано программное обеспечение “ELECTRIC EDIT”, предназначенное для расчёта шумов сквидов.

При входе в программный продукт (eled.exe) на экране дисплея высвечивается основное меню (рис. 1). Здесь имеются следующие режимы: File, Insert, Tools, Window. Возможности отражены на рис. 2, а, б, в, г соответственно.

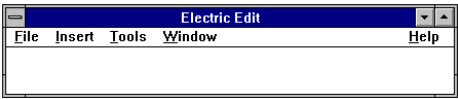


Рис. 1

New	создать новый файл
Open	открыть файл
Close	закрыть файл
Save	записать открытый (созданный) файл
Save as	записать файл под новым именем
Exit	закончить работу в “ELECTRIC EDIT”

а

Vertical resistance	резистор вертикально
Horisotal resistance	резистор горизонтально
Vertical capacity	емкость вертикально
Horisotal capacity	емкость горизонтально
Vertical inductance	индуктивность вертикально
Horisotal inductance	индуктивность горизонтально
Transformer	трансформатор
Amplifier	усилитель

б

Noise performance	вывести графики зависимости шумовой ЭДС, шумового тока, собственного шума сквида и суммарного шума от частоты (в единицах $\Phi_0/\Gamma_{\Pi} F^{1/2}$)
Voltage transfer function	вывести график зависимости коэффициента передачи сквида от частоты (привязка к коэффициенту трансформации)
Recalculate	произвести расчет цепи вновь
Delet element	удалить элемент схемы

в

Tile	параллельное изображение всех открытых окон;
Cascad	каскадное изображение окон: “Noise performance” и “Voltage transfer function”

г

Рис. 2

После вхождения в главное меню и открытия нового файла на экране рисуется окно (рис. 3). Здесь изображена принципиальная схема одного из вариантов построения входной цепи пт-сквида.

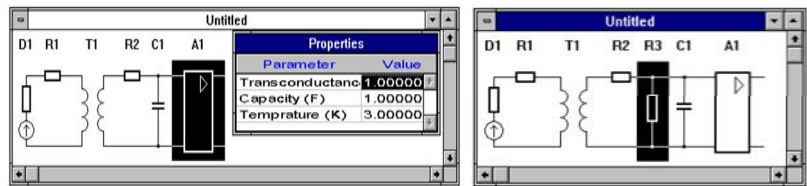


Рис. 3

Путём перемещения мышью маркера. маркером отмечен предыдущий элемент цепи, при этом можно ввести новый элемент (R3) (рис. 3) или удалить имеющийся.

Одновременно с перемещением маркера в окне “Properties” появляются параметры помеченного элемента (сопротивление, индуктивность, ёмкость, коэффициент передачи, температура, крутизна преобразования) (рис. 3), которые могут быть изменены в зависимости от желания исследователя.

В окнах “Noise performance” и “Voltage transfer function” графически отображаются результаты вычислений параметров цепи, при этом в окне “Properties” можно изменить “начало” и “конец” диапазона просматриваемых частот (рис. 4).

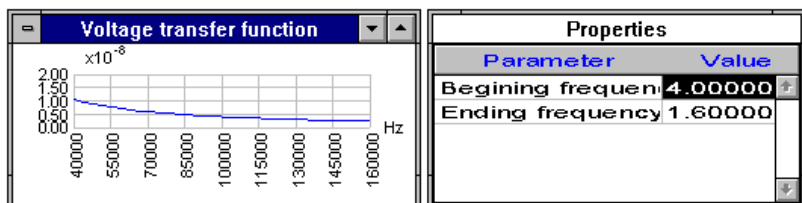


Рис. 4

После окончания проектирования входной цепи и её расчёта файлу с оптимизированной схемой присваивается “имя”, которое замещает в окне принципиальной схемы название “Untitled”.

По результатам расчёта в окнах “Noise performance” и “Voltage transfer function” можно оперативно вносить соответствующие изменения либо непосредственно в принципиальную схему цепи, либо в параметры соответствующих элементов, входящих в её состав. Процедура пересчёта схемы, содержащей 10–20 элементов занимает 2–3 с.

На рис. 5 приведены результаты расчёта двух схем п.т.сквида: с контуром и трансформатором. Здесь: динамическое сопротивление $R_d = 5$ Ом, собственная индуктивность сквида 10^{-10} Гн, отношение числа витков вторичной и первичной обмоток трансформатора $T1\ N = 30$. Из рис. 5 хорошо видны недостатки схемы с контуром: более высокий уровень шума и узкая полоса пропускания.

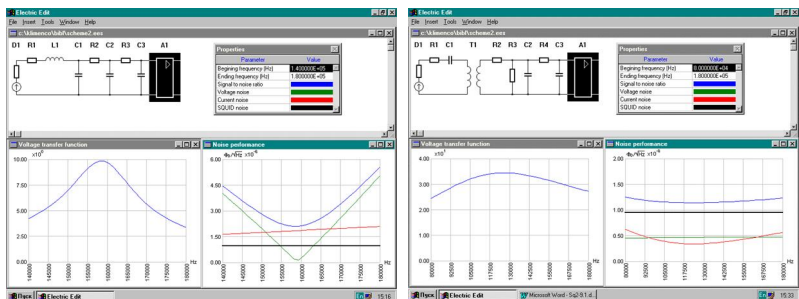


Рис. 5

Разработанное программное обеспечение позволяет оперативно в интерактивном режиме проектировать входную цепь сквида и проводить её расчёт минуя стадию вывода аналитических выражений, что существенно упрощает анализ различных схемных решений и поиск оптимального согласования исходя из реальных возможностей: технологических, конструкционных, схемотехнических и т.д. При анализе выявлены также возможности минимизации шумов скидков путем выбора оптимальных значений параметров. Оказалось, что при некотором значении частоты $\omega_{\text{опт}}$ достигается минимум шумов, что позволяет оптимизировать скидк по частоте накачки и частоте модуляции.

При расчётах шумового магнитного потока получено удовлетворительное (в пределах 10–25 %) совпадение с экспериментальными данными для скидков [3], имеющих различные значения технических и конструктивных параметров (длину и технические параметры фидера, индуктивность, коэффициент трансформации и индуктивности обмоток трансформатора, шумовые параметры предварительного усилителя и т.д.).

Применение разработанного программного обеспечения позволяет проводить оптимизацию параметров любых аналоговых преобразователей, например МРТ-томографов, где одной из задач является переход на «малые» значения индукции постоянного магнитного поля $B_{\text{п}}$, т.к. очевидно, что увеличение $B_{\text{п}}$ дальше уже невозможно, а методы накопления и обработки тоже уже практически исчерпаны. Настает время возврата борьбы за параметры самого преобразователя.

Литература

1. Голышев Н.В. Оценка шумового магнитного потока реальных высокочастотных сквидов / Н.В. Голышев, Б.М. Рогачевский // Изв. вузов. Приборостроение. – 1987. – № 5. – С. 56–63.
2. Голышев Н.В. Шум Найквиста неравномерно нагретой длинной линии / Н.В. Голышев, Я.С. Гринберг // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57, Вып. 6. – С. 1129–1131.
3. Golyshev N.V. The Choice of the Optimum Bandwidth of a Superconducting Magnetocardiograph / N.V. Golyshev, Ya.S. Greenberg, S.V. Motorin // 6th Int. Superconductive Electronics Conference: ISEC'97-Berlin (Germany), 1997. – PP. 324–326.

А.В. Макаров, Т.В. Макарова, В.Г. Макаров, Е.М. Степанов
(Казань, КНИТУ-КАИ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Работа дуговой сталеплавильной печи (ДСП) характеризуется значительными колебаниями напряжения и потреблением несинусоидального тока вследствие резких изменений потребления активной и реактивной мощности.

Для разработки эквивалентной цифровой модели дуговой сталеплавильной печи использовались оцифрованные данные комплексных измерений показателей качества электроэнергии. Работа ДСП характеризуется потребляемым током. На рис. 1 приведены оцифрованные данные потребляемого тока ДСП [Лит.].

Форма тока, потребляемого ДСП, не синусоидальна. Модель активного фильтра высших гармоник тока представляет собой многоуровневый инвертор напряжения, который формирует соответствующие гармоники тока в противофазе к высшим гармоникам тока, потребляемым ДСП.

На рис. 2 приведены результаты моделирования работы ДСП при включении активного фильтра высших гармоник тока, линейного напряжения. Активный фильтр высших гармоник тока в точке подключения, снижает уровень содержания высших гармоник тока в системе электроснабжения промышленного предприятия.

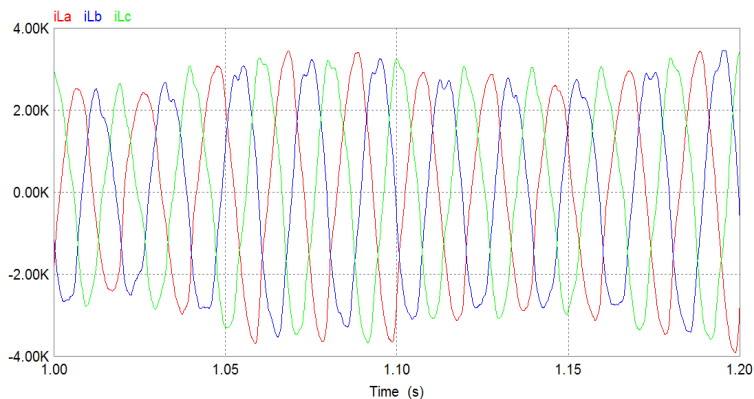


Рис. 1. Форма фазных токов, потребляемых ДСП

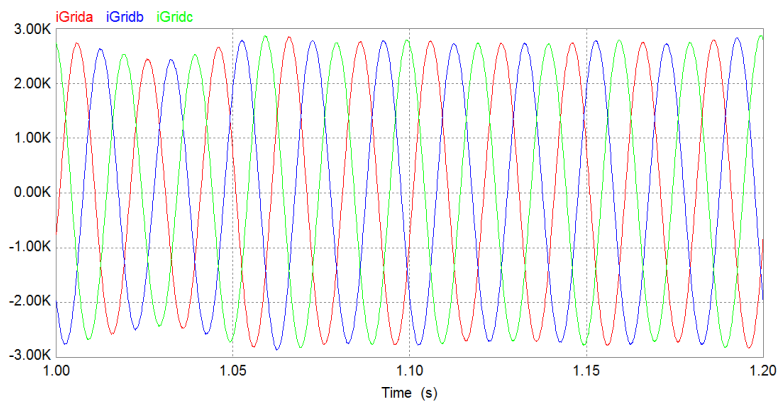


Рис. 2. Форма фазных токов, потребляемых ДСП,
после включения активного фильтра высших гармоник тока

Результаты моделирования в среде PSIM подтверждают эффективность применения многоуровневого инвертора напряжения в качестве активного фильтра высших гармоник тока для снижения негативного влияния работы ДСП на систему электроснабжения предприятия.

Литература

Makarov A. Simulation 35 kV 35 MVar STATCOM in EMTDC PSCAD / A.Makarov, A. Ferenets, I. Metelev // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1415, 2019 International Conference on Innovation Energy 2–3 October 2019, Perm, Russian Federation. – PP. 1–8.

Н.К. Полуянович, Н.В. Азаров, А.В. Огреничев
(Таганрог, Южный федеральный университет)

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Введение. Нагрузочная способность кабельных систем зависит от теплового режима работы [1], поэтому важной задачей является мониторинг температуры поверхности кабеля в динамическом режиме. Разработка нейросети продиктована следующими обстоятельствами: возможностью мониторинга и расчёта процесса передачи тепла через изоляционные слои при сложном изменении температуры жилы; сбором, анализом температурных данных в зависимости от изменений токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода.

Синтез нейросети. В ходе решения поставленной задачи были проанализированы основные типы искусственных нейронных сетей (НС). Эффективность работы нейросети определялась по среднеквадратичной ошибке. Результаты сравнение типов НС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения НС

Тип нейронной сети	Ошибка прогноза	
	ε , °C	ε , %
Многослойный персептрон	0,9	2,3
Рекуррентная нейронная сеть	1,2	2,5
Каскадная сеть прямого распространения	1,63	4,2
Сеть Эльмана	2,14	5,3
Сеть с запаздыванием и обратным распространением ошибки	2,75	7,4

Анализ результатов сравнения НС показал, что наименьшую ошибку прогноза имеет многослойный персептрон.

Синтез структуры нейронной сети. Входными параметрами НС являются члены временного ряда $X(n)$, такие как: температура защитной оболочки $\theta_{з.о}(1...n)$, температура окружающей среды $\theta_{о.с}(1...n)$, ток в жиле СКЛ $I_{ж}(1...n)$ [2–4]. Проведен сравнительный анализ точности обучения при различных алгоритмах обучения

(табл. 2). Из рассмотренных алгоритмов обучения НС самую высокую точность имеет алгоритм Ливенберга-Марквардта.

Таблица 2

Результаты сравнения алгоритмов обучения

Алгоритм обучения НС	Средняя ошибка	
	ε , °C	ε , %
Ливенберга-Марквардта	0,87	2,2
Байесова регуляризация	1,6	4,21
Градиентного спуска	2,13	5,6

Выводы. Анализ полученных данных показал, что максимальная ошибка составила менее 2,5 %, что является вполне приемлемым результатом.

Литература

1. *Дубяго М.Н.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.

2. *Азаров Н.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием искусственных нейронных сетей / Н.Н. Азаров, А.В. Огреничев, Н.К. Полуянович // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении: материалы Всерос. науч-техн. конф. с Междунар. участием. – Ростов-на-Дону; Таганрог, 2019. – С. 377–383.

3. *Полуянович Н.К.* Оценка прогнозирования ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей / Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго, А.В. Огреничев, Н.В. Азаров // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 164–170.

4. *Полуянович Н.К.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей / Н.К. Полуянович, Н.В. Азаров, А.В. Огреничев и др. // Проблемы современной системотехники: сб. науч. статей. – Таганрог: Изд-ль ИП Ступин С.А., 2019. – С. 131–137.

Б.Ф. Симонов¹, В.Ю. Нейман², Л.А. Нейман², А.О. Кордубайло¹
(Новосибирск, ¹ИГД СО РАН, ²НГТУ)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВИБРОИСТОЧНИКА

Экспериментальные исследования выявили недостатки существующего физического метода оптимизации рабочего процесса электропривода виброисточника, созданного на основе линейной электромагнитной машины двойного действия [1, 2]. Одним из главных недостатков данного метода являются существующие ограничения в использовании системы питания и управления. Данные ограничения связаны с техническими возможностями формирования желаемых диаграмм токов и напряжений, а также точностью времени коммутации токовых цепей электромагнитных катушек. Для расширения технических возможностей и повышения качественного уровня исследований предлагается воспользоваться методами моделирования с применением современной технологии программирования базовой системы Matrix Laboratory и её главного расширения Simulink, основанной на применении численных методов [3–5].

Целью исследований является создание точной модели подсистемы питания и управления электроприводом имитационной модели виброисточника, обеспечивающей широкие возможности для выполнения параметрического анализа методами компьютерного моделирования с применением имитационной среды Matlab Simulink.

При построении имитационной модели принимаем, что подсистема питания и управления рассматривается как реальная цепь питания, обладающая внутренним сопротивлением. Полагаем, что источник обеспечивает постоянное напряжения только при отсутствии тока в цепи питания нагрузки. Также полагаем, что процесс управления подачей импульсов напряжения на катушки и их длительность определяются координатой положения бойка.

Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность созданной подсистемы питания и управления имитационной модели методами структурного моделирования в Simulink. Отличительной особенностью модели источника питания является зависимость напряжения на катушках электромагнитной машины от тока нагрузки. Показано, что отсутствие установленной зависимости напряжения от тока в нагрузке приводит к завышенной оценке расчётных величин получаемых на выходе имитационной модели виброисточника. По результатам моделирования показано, что при отношениях сопротивлений вторичных цепей источника питания к сопротивлениям в нагрузке $r_s/r = 0,385 \div 0,47$ диапазон существующих различий для расчётных мгновенных значений токов, протекающих по электромагнитным катушкам электропривода, может составлять соответственно 1,1–1,34 раза.

Литература

1. *Симонов Б.Ф.* Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
2. *Симонов Б.Ф.* Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов / Б.Ф. Симонов, А.И. Кадышев, В.Ю. Нейман / Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – № 12. – С. 30–32.
3. *Нейман Л.А.* Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
4. *Нейман Л.А.* Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
5. *Нейман Л.А.* Расчёт динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Топливные элементы с твёрдым полимерным электролитом являются перспективными источниками электрической энергии. Они имеют высокие энергетические удельные и эксплуатационные характеристики, однако остается не решенным вопрос обеспечения их достаточной надёжности для широкого практического применения [1–3]. Поэтому актуальной является задача разработки надёжного средства моделирования поведения таких систем при разных, в том числе динамических, режимах работы, позволяющие оценивать эффективность работы и степень близости технического состояния к оптимальному. В работе рассматривается вопрос использования рекуррентных нейронных сетей для прогнозирования напряжения батареи водородных топливных элементов при изменениях нагрузки.

Обучающая выборка включала в себя данные о рабочих режимах батареи водородных топливных элементов: токе нагрузки, влажности, температуре и массовом расходе подводимых газов (водорода и воздуха), давлении с анодной и катодной газотранспортной системе, напряжении на ячейках батареи водородных топливных элементов и других (более 60) параметров. Измерения параметров проводились с частотой дискретизации 5 Гц.

В первых экспериментах использовались модели, имеющие 22 сигнала на входном слое и 8 на выходном. Задачей экспериментов было не только получение модели способной прогнозировать будущие значения, но и минимизация самой установки путём уменьшения количества датчиков. Как известно первоочередная задача при обучении нейронных сетей – это подготовка данных. Так как малый объём данных не предоставит нам достаточной выборки для полноценного обучения сети, а наличие большого объёма не структурированных данных, не оказывающих влияние на интересующие нас значения приводит к преждевременному переобучению нейронной сети и не позволяет получить максимально достоверных прогнозов. В связи с этим были применены 2 методики для выяв-

ления наиболее важных сигналов. Функция корреляции между входными и выходными сигналами позволило визуально отсеять наименее значимые сигналы. Помимо этого, были вычислены энтропии многомерного гауссовского распределения для входных и выходных сигналов, что позволило, имея числовые значения выбрать наиболее важные входные сигнал. В конечном этапе удалось снизить количество входных сигналов до 13 (8 из которых являются также и выходными сигналами) увеличив эффективное количество эпох обучение, что позволило получить результаты высокой точности более 93 %.

Важным результатом является то, что наилучшее качество прогнозирования обеспечивается при уменьшении количества признаков в обучающей выборке до тринадцати. Результаты работы позволят реализовать новые модели топливных элементов и энергетических систем на их основе. Такие модели могут применяться в системах контроля батарей топливных элементов, когда сигнал возможной неисправности генерируется при существенных различиях в поведении систем и её модели.

Литература

1. *Евдокимов Ю.К.* Электрический шум водородного топливного элемента и исследование его диагностических свойств / Ю.К. Евдокимов, С.А. Мартемьянов, Е.С. Денисов // *Нелинейный мир.* – 2009. – Т. 7, № 9. – С. 706–712.
2. *Jinfeng W.* A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies / W. Jinfeng, Z.Y. Xiao, J.M. Jonathan, et al. // *Journal of Power Sources.* – 2008.
3. *Nigmatullin R.R.* New approach for PEMFC diagnostics based on quantitative description of quasi-periodic oscillations, *International Journal of Hydrogen Energy* / R.R. Nigmatullin, et al. – 2016.

Е.Е. Корытченкова
(Донецк, ДонНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОГРИД С ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

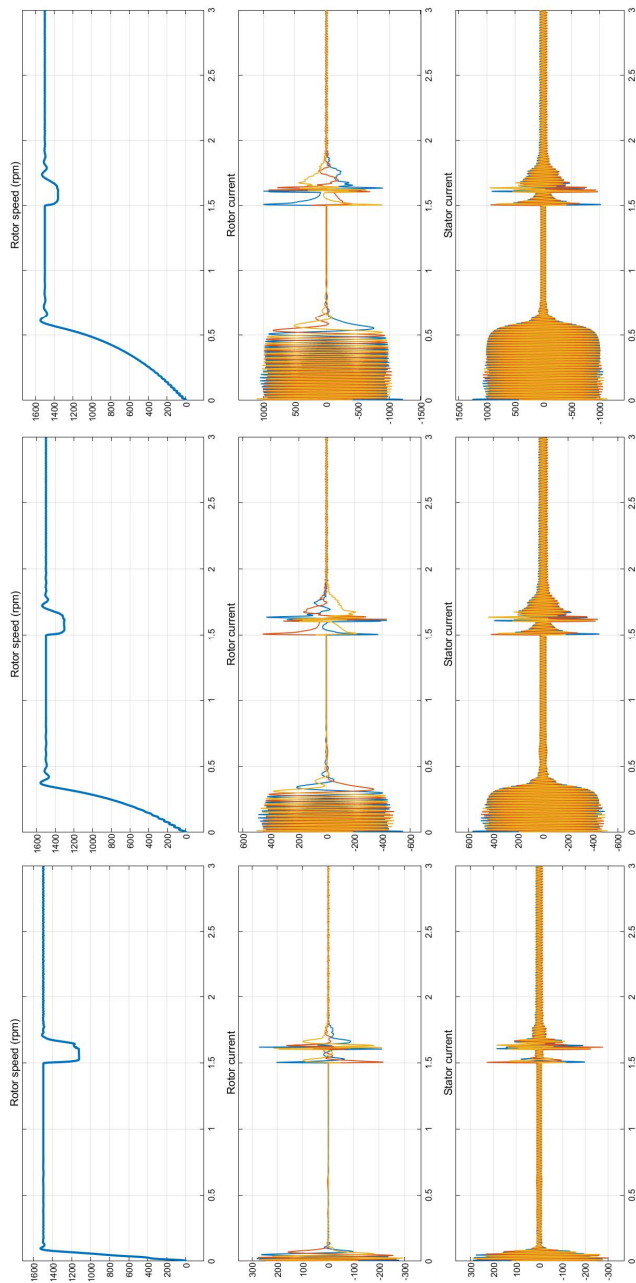
С целью оптимизации работы энергосистем (ЭС) с большой долей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) существует

концепция интеллектуальной ЭС «Smart grid» с использованием принципов децентрализации, цифровых систем управления и микрогрид-систем. Многие исследования посвящены вопросам анализа различных режимов работы микрогрид, однако в них в недостаточной степени рассмотрены системы, использующие водородные топливные элементы (ВТЭ) в качестве основных накопителей энергии. Поэтому детальный анализ режимов микрогрид-систем с ВИЭ и ВТЭ является актуальной задачей [1].

Для проведения необходимых исследований в среде Matlab/Simulink была реализована математическая модель микрогрид с ВИЭ и ВТЭ, которая позволила пронаблюдать поведение ответственной нагрузки (трёх электродвигателей, входящих в состав микрогрид, в режимах короткого замыкания, пуска и самозапуска при питании от источника ограниченной мощности). Стоит отметить, что накопителями служат не сами ВТЭ, а водород, на производство которого затрачивается избыточная энергия от ВИЭ. Возможность детального моделирования преобразователей напряжения, инверторов и сглаживающих фильтров, предоставляемая библиотекой Simulink, положительно сказывается на точности результатов моделирования.

На данном этапе исследования в модели не учитывается насыщение в стали трансформаторов, также используется упрощенная модель топливного элемента с протонообменной мембраной ($P_{\text{макс}} = 120$ кВт), доступного в SimPowerSystem, работающего при неизменных параметрах давления, температуры и расхода топлива [2]. На рисунке представлен один из режимов микрогрид, когда пуск двигателей происходит от ЭС до момента трёхфазного короткого замыкания, после чего микрогрид отключается от ЭС и нагрузку питают ВТЭ. Можно наблюдать, как после выбега двигателя успешно самозапускаются.

Исследование вышеупомянутых режимов позволило заключить, что моделируемых мощностей ВТЭ с протонообменной мембранной достаточно для покрытия нужд потребителей при долгосрочном перебое питания от энергосистемы, а применение повышающих преобразователей напряжения обеспечивает надёжность работы системы и стабилизацию напряжения на её шинах. Ещё одним из вариантов повышения надёжности работы системы является увеличение объемов водородного хранилища.



Угловая частота вращения и фазные токи асинхронных электродвигателей (15, 37, 75 кВт)

Проведенный анализ может быть полезен при создании более точной модели реальной микрогрид-системы с ВИЭ и ВТЭ.

Литература

1. *Buchholz B.M.* Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks / B.M. Buchholz. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – 396 p.

2. *Motapon S.N.* Design and simulation of a fuel cell hybrid emergency power system for a more electric aircraft: evaluation of energy management schemes / S.N. Motapon. – 2013. – PP. 30–36.

Е.М. Степанов, А.В. Макаров, Т.В. Макарова, В.Г. Макаров
(Казань, КНИТУ-КАИ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ФУНКЦИЕЙ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Работа выпрямительных устройств системы электроснабжения летательного аппарата (ЛА) характеризуется значительным содержанием гармоник тока, отличных от номинальной частоты бортовой системы электроснабжения 400 Гц от возникающих вследствие переходных процессов при выпрямлении напряжения [Лит.].

Была разработана эквивалентная цифровая модель выпрямительного устройства системы электроснабжения ЛА в среде Matlab/Simulink. Работа выпрямительных устройств характеризуется несинусоидальным потребляемым током. На рис. 1 приведены результаты моделирования тока, потребляемого выпрямительным устройством ВУ-6Б, выполненного по трёхфазной мостовой неуправляемой схеме выпрямления на диодах.

Форма тока, потребляемого выпрямительным устройством, несинусоидальна. Выпрямитель с функцией активной фильтрации высших гармоник тока представляет собой инвертор напряжения, выполненный по трёхфазной мостовой управляемой схеме выпрямления на IGBT-транзисторах, который формирует соответствующие гармоники тока в противофазе к высшим гармоникам тока, генерируемым при выпрямлении напряжения.

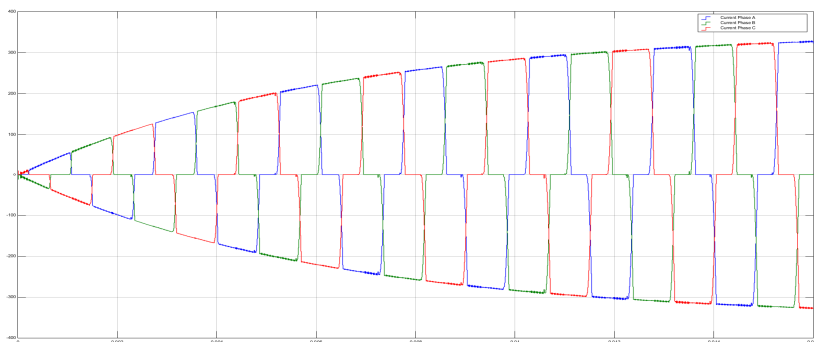


Рис. 1. Форма фазных токов системы электроснабжения ЛА

На рис. 2 приведены результаты моделирования работы выпрямительного устройства с функцией активной фильтрации высших гармоник тока.

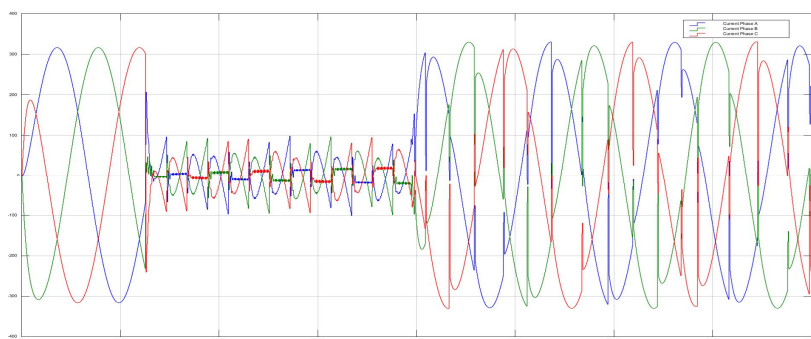


Рис. 2. Форма фазных токов системы электроснабжения ЛА при использовании выпрямителя с функцией активной фильтрации высших гармоник тока

Результаты моделирования в среде Matlab/Simulink подтверждают эффективность применения выпрямителя с функцией активной фильтрации высших гармоник тока для снижения влияния высших гармоник тока на бортовую систему электроснабжения и систему управления ЛА.

Литература

Makarov A. Simulation 35 kV 35 MVar STATCOM in EMTDC PSCAD / A. Makarov, A. Ferenets, I. Metelev // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1415, 2019 International Conference on Innovation Energy, 2–3 October 2019, Perm, Russian Federation. – PP. 1–8.

В.Д. Бердонос, Д.О. Журавлёв
(Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ)

РАЗРАБОТКА КОРПОРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БПЛА МЕЖДУ СОБОЙ

Для решения задачи предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) между собой отличным решением являются корпоративные системы предотвращения столкновений (КСПС). Они позволяют координировать действия всех БПЛА, принимающих участие в столкновении. К недостаткам можно отнести: либо наличие относительно малого радиуса взаимодействия [1, 2]; либо необходимость иметь наземную станцию для обработки информации [3, 4].

Использование в КСПС спутниковых систем навигации (таких как GPS или ГЛОНАСС) и технологий автоматического зависимо-го наблюдения-вещания (АЗН-В) позволит значительно увеличить расстояние обнаружения и взаимодействия, а использование простых алгоритмов и аналитических формул – снизить нагрузку на вычислительную бортовую сеть БПЛА, что позволит отказаться от наземной станции. Также использование технологии АЗН-В может стать инструментом для интеграции беспилотной авиации в единое воздушное пространство с пилотной авиацией [5].

Простым способом для определения изменений положений каждого БПЛА является кинематические уравнения, зависящие от скоростей аппаратов, используя направляющие конусы, кинематические уравнения в проекции на оси нормальной системы координат (рис. 1). В такой модели достаточно знать текущие и предыдущие координаты одного («своего») БПЛА (по GPS/ГЛОНАСС) и получать соответствующие координаты другого («чужого») БПЛА по АЗН-В для того, чтобы определить: точку пересечения (ТП) их траекторий, направления движения (в ТП или нет) и границы диапазона критических скоростей (ДКС) [6]. Если скорость БПЛА окажется в ДКС, то при дальнейшем движении (с текущими параметрами) произойдёт столкновение.

Предотвратить столкновение можно путём вывода скорости за границы ДКС [6, 7]:

$$\begin{aligned} A_f &> 2V_f^{\min}(V_f^{\min} - V_f)/L_{f/r}, \\ A_f &< 2V_f^{\max}(V_f^{\max} - V_f)/L_{f/r}, \end{aligned}$$

где A_f – необходимое ускорение для предотвращения столкновения; V_f^{\max} и V_f^{\min} – соответственно нижняя и верхняя границы ДКС; V_f – текущая скорость аппарата; $L_{f/r}$ – расстояние аппарата до ТП относительно суммы радиусов обоих участвующих БПЛА.

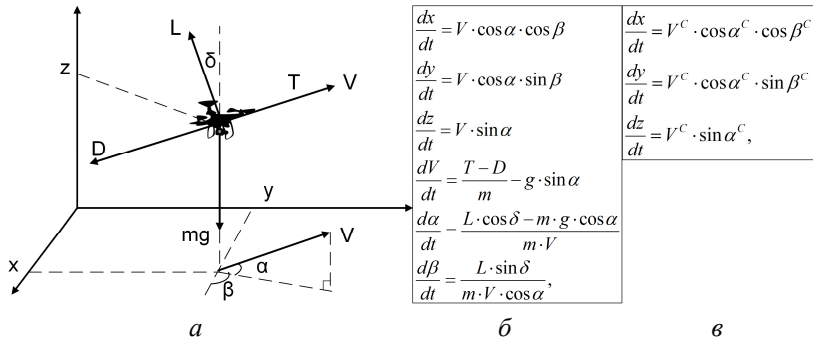


Рис. 1. Модель аэродинамической системы (а); система уравнений, описывающих движение БПЛА (б), где m – масса БПЛА, D – лобовое сопротивление, T – тяга двигателя, g – ускорение свободного падения, $(dx/dt, dy/dt, dz/dt)$ – вектор скорости БПЛА в 3D пространстве, L – подъёмная сила, α – угол тангажа, β – курсовой угол, δ – угол крена, V – проекция скорости на горизонтальную плоскость; упрощённая система уравнений, описывающая движение БПЛА (в), где V^C – проекция стабилизированной автопилотом скорости на горизонтальную плоскость, α^C – стабилизированный автопилотом угол тангажа, β^C – стабилизированный автопилотом курсовой угол

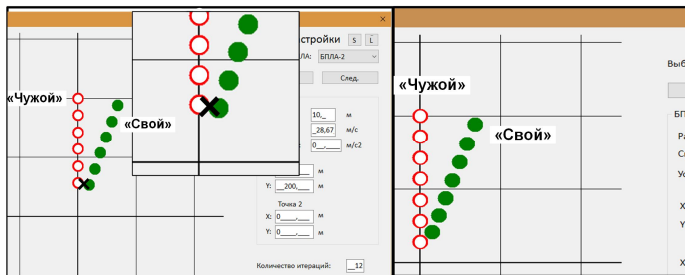


Рис. 2. Моделирование ситуации со столкновением и той же ситуации, но с применением скоростного манёвра уклонения

На основе полученных данных были разработаны программы моделирования, которые позволяют визуализировать траектории

движения от 2-х до 50-ти БПЛА, рассчитывать необходимые параметры скоростного манёвра и выполнять его. Компьютерное моделирование для широкого диапазона начальных параметров, показало адекватность полученных алгоритмов и формул для определения значения ускорения A_f и предотвращения столкновений. Пример моделирования представлен на рис. 2.

Литература

1. *Masiero A.* UAV positioning and collision avoidance based on RSS measurements / A. Masiero, F. Fissore, A. Guarnieri, et al. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W4/. – 2015. – PP. 219–225.

2. *Song X.O.* Dynamic MAC Protocol Designed for UAV Collision Avoidance System / X.O. Song // Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS 2017). – 2017. – PP. 489–498.

3. *Pasaoglu C.* Collaborative Intent Exchange Based Flight Management System with Airborne Collision Avoidance for UAS / C. Pasaoglu, N. Akcam, E. Koyuncu, A. F. Tarhan, G. Inalhan // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – December 2016. – Vol. 84. – PP. 665–690.

4. Unmanned Aerial Systems (UAS) Traffic Management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://technology.nasa.gov/patent/TOP2-237> (дата обращения: 01.04.2020).

5. *Фальков Э.Я.* Автоматическое зависимое наблюдение радиовещательного типа (АЗН-В) и примыкающие технологии – перспективы развития и внедрения в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modern-avionics.ru/Files/09-GosNIIAS-Falkov-27.08.2015.pdf> (дата обращения: 01.04.2020).

6. *Berdonosov V.D.* Speed approach for UAV collision avoidance / V.D. Berdonosov, A.A. Zivotova, Z.H. Naing, D.O. Zhuravlev // Journal of Physics: Conference Series 2018. – 2018. – PP. 1–6.

7. *Berdonosov V.D.* Implementation of the speed approach for UAV collision avoidance in dynamic environment / V.D. Berdonosov, A.A. Zivotova, D.O. Zhuravlev, Z.H. Naing // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). – 2018. – PP. 1–6.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В работах [1–3] показана возможность использования переходных характеристик, вызванных изменениями величины электрической нагрузки, для диагностики литиевых аккумуляторов. Существенным преимуществом такого метода является высокая информативность и существенно более дешевая, по сравнению с традиционными импедансными методами диагностики, аппаратная реализация. Целью работы является получение информации о состоянии литиевых аккумуляторов без прерывания процесса работы на основе микропроцессорной платформы Raspberry Pi.

В работе [1] показано, что переходная характеристика литиевого аккумулятора может описываться следующим уравнением:

$$U(t) = U_0 + U_1 e^{-\alpha t} + U_2 e^{-\beta t}, \quad (1)$$

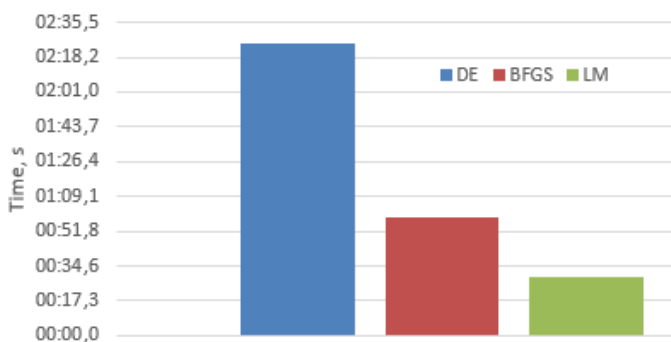
где U_0 – полное изменение напряжения после окончания переходного процесса, U_1 , U_2 – амплитуды экспонент, α , β – величины, обратные постоянным времени (коэффициенты затухания).

Для измерения переходной характеристики использовался высокоточный аналого-цифровой преобразователь с разрешением 24 бит и устройство для коммутации дополнительной нагрузки, обеспечивающее формирование переходной характеристики. Обработка данных осуществлялась посредством микропроцессорной платформы Raspberry Pi.

Литиевый аккумулятор в процессе исследований подвергался многократному циклу разряда/заряда. В процессе разряда посредством управляемой нагрузки создавался скачок тока и измерялся отклик в виде кривой изменения напряжения.

Коэффициенты переходной характеристики были получены с помощью трёх разных методов оптимизации: BFGS, дифференциальной эволюции, Левенберга-Марквардта. Процесс анализа данных и результаты были оценены по следующим критериям: точность, время обработки (рисунок), чувствительность к

шумам. Наибольшую эффективность показал метод Левенберга-Марквардта.



Время вычисления коэффициентов переходной характеристики на микропроцессорной платформе Raspberry Pi

Полученные результаты демонстрировали высокую чувствительность параметров модели (1) к степени разряда аккумуляторной батареи. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что предложенный метод может быть использован для технического контроля и диагностики состояния батареи.

Литература

1. *Denisov E.* Lithium battery transient response as a diagnostic tool / E. Denisov, R. Nigmatullin, Y. Evdokimov, G. Timergalina // *Journal of Electronic Materials*, 2018. – Vol. 47, No. 8. – PP. 4493–4501.

2. *Тимергалина Г.В.* Автоматизированная система измерения переходных характеристик литиевых аккумуляторов / Г.В. Тимергалина, Т.П. Никишин, А.М. Демидов, Е.С. Денисов // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 325–326.

3. *Denisov E.* Automated excitation signal generation system for time-domain impedance spectroscopy / E. Denisov, G. Nikishina, A. Demidov // *Proceedings of the 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, (US-BEREIT 2019)*, 2019. – PP. 328–331.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Котлы-утилизаторы – это сложные термодинамические системы, процессы, протекающие в них, имеют нелинейную динамику. Котлы-утилизаторы используют энергию отработанного газа от различных технологических установок, например, газ после газотурбинных установок (ГТУ).

Когда объектом моделирования выступает сложная система и нет необходимости структурного соответствия, хороший результат могут обеспечить адаптивные методы моделирования [1]. К адаптивным методам моделирования относятся аппарат нечёткой логики и нейронные сети. Широкий спектр решаемых задач, включая моделирование сложных систем, синтез моделей без наличия «строгого» математического описания, возможность создания динамических моделей и заложенная в архитектуру адаптивность определяет выбор рекуррентных нейронных сетей. Для синтеза нейросетевой модели необходима разработка методики.

Методика синтеза нейросетевой модели включает этапы, на которых: подготавливаются данные для обучения нейронной сети, разработчик синтезирует модель и тестируется модель.

На этапе подготовки данных были определены входы и выходы модели. Выходным параметром нейросетевой модели выступает температура сетевой воды за котлом. В качестве входных параметров используются: расход сетевой воды, температура сетевой воды на входе в котёл, давление отработанного газа на входе в котёл, температура газа на входе в котёл. После определения входных и выходных параметров нейросетевой модели дальнейшей задачей является формирование обучающей выборки. Данные обучающей выборки должны быть качественными и содержать информацию обо всех режимах работы, для которых создается модель.

Синтез неросетевой модели заключается в выборе типа нейронной сети, алгоритма обучения, количества нейронов в слое и соотношения тренировочных, валидационных и тестовых данных. Вид синтезируемой нейросетевой модели представлен на рис. 1.

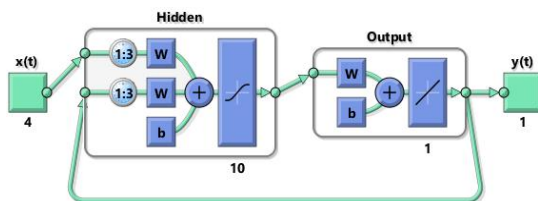


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети

Выходное значение $y(t)$ формируется на основании трёх предыдущих тактов значений вектора $x(t)$ и значений выходной координаты $y(t)$ на трёх предыдущих тактах. Лучший результат обучения на данных обучающей выборки был получен при использовании алгоритма обучения байесовская регрессия. Количество нейронов в скрытом слое равно 10. Соотношение тренировочных, валидационных и тестовых данных было равно 60 %, 20 % и 20 % соответственно.

На этапе верификации формируется методология проверки и оценки созданной модели. Самым простым способом проверки схожести созданной модели и реального объекта является тестирование модели на реальных данных. Для верификации нейросетевой модели использовались данные, которые не были включены в процесс обучения. Требование к точности моделирования были сформированы на основании экспертной оценки поведения модели объекта [2]. Были приняты следующие численные величины отклонения выходных параметров модели в сравнении с данными реального объекта. Для режима «Разгон» и «Останов» погрешность моделирования должно быть не более 15 %, для режима «номинальная нагрузка» отклонение моделируемых величин не должно превышать 10 %.

При проведении вычислительного эксперимента на вход нейросетевой модели подавались данные выборок №№ 1–3. Выборка № 1 связана с разгоном котла из холодного состояния, выборка № 2 – с режимом «Номинальная нагрузка», выборка № 3 – с последовательным переходом котла через режимы «Номинальная нагрузка», «Останов», «Холодное состояние», «Разгон». В таблице приведены данные о средней ошибке моделирования на выборках №№ 1–3. На рис. 2–4 приведены результаты моделирования, где T_{wo} – температура сетевой воды за котлом.

Средняя ошибка моделирования на данных выборок №№ 1–3

Средняя ошибка	№ 1	№ 2	№ 3
Весь диапазон, °C	0,87	0,68	0,79
Режим «Разгон», °C	1,45	–	1,71
Режим «Останов», °C	–	–	1,57

В ходе работы была синтезирована модель, учитывающая изменение четырех технологических параметров и значение выходной координаты на предыдущих тактах. Разработанная модель актуальна для трёх режимов работы котла-утилизатора: «Разгон», «Номинальная нагрузка» и «Останов».

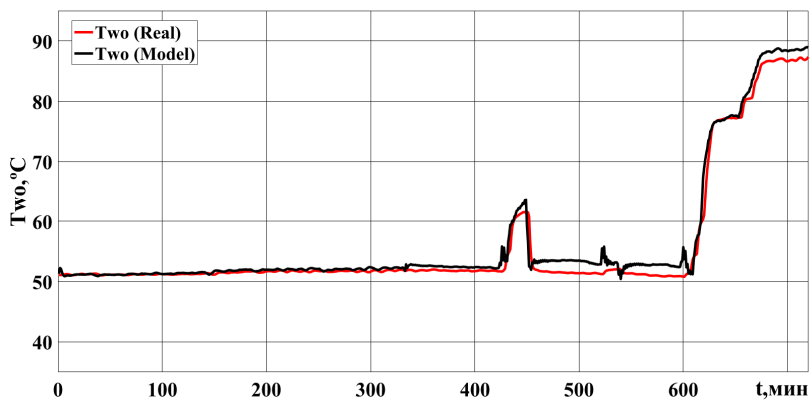


Рис. 2. Результат моделирования на данных выборки № 1

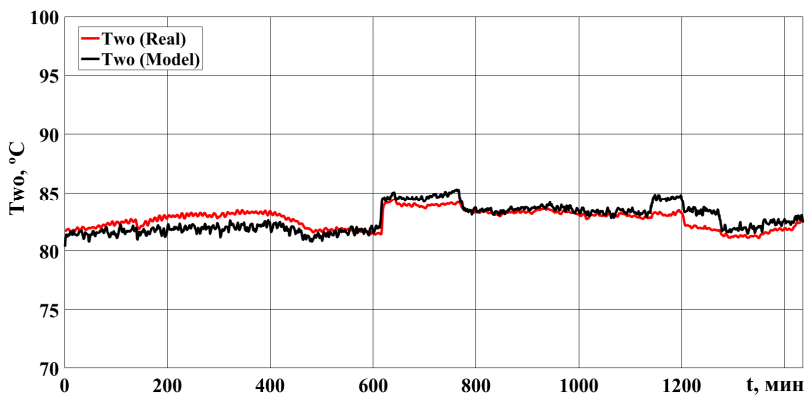


Рис. 3. Результат моделирования на данных выборки № 2

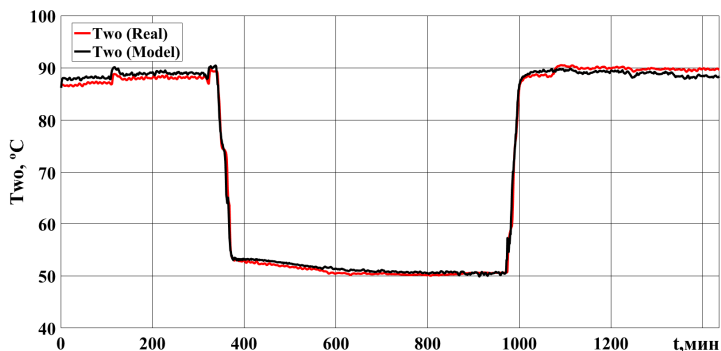


Рис. 4. Результат моделирования на данных выборки № 3

Модель корректно описывает поведение технологического параметра «Температура сетевой воды за котлом» в диапазоне $43 \div 95$ °C при изменении расхода воды через котёл в диапазоне $230 \div 710$ м³/час, температуры сетевой воды на входе в диапазоне $43 \div 54$ °C, температуры и давления газа в диапазонах $0 \div 515$ °C и $-0,2 \div 0,75$ кПа.

Литература

1. *Лысенко Д.С.* Разработка модели котла-утилизатора на базе аппарата нечёткой логики / Д.С. Лысенко, И.А. Данилушкин // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XXI Междунар. конф., Т. 2. – Самара: ООО «Офорт», 2019. – С. 268–271.
2. *Данилушкин И.А.* Моделирование водяного тракта парового котла / И.А. Данилушкин, С.А. Колпачиков // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2019. – Вып. 2 (62). – С. 20–35.

К.В. Харитонов, А.А. Федоров, Е.А. Понамарев
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ RTDS

Испытания устройств РЗА, применяемых в сетях 6-10 кВ, на цифровых динамических моделях реального времени RTDS, требует подробного и точного моделирования переходных ре-

жимов асинхронных (АД) и синхронных (СД) двигателей. Данная работа посвящена проблемам моделирования АД, как наиболее часто применяемых в промышленности двигателей.

В стандартной библиотеке элементов RTDS представлены модели АД двух типов, различающихся методом представления системы уравнений: в координатах $d-q$ с короткозамкнутым ротором (1 или 2 контура на роторе); в фазных координатах, с короткозамкнутым или фазным ротором (1 контур на роторе).

Применение двух контуров в схеме замещения АД позволяет учесть эффект вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора [1], характерный для АД с широкодиапазонным ротором или АД с двумя короткозамкнутыми обмотками ротора. В связи с этим для представления АД с короткозамкнутым ротором предпочтительным является использование модели, рассчитываемой в $d-q$ координатах. Для моделирования АД с фазным ротором должна применяться модель, рассчитываемая в фазных координатах.

Схема замещения модели АД библиотеки элементов RTDS с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 1. Пунктиром выделены элементы, присутствующие только в модели с двумя контурами ротора. На рис. 1 приняты следующие обозначения: ra , xa – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора; $xmd0$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания; rfd , xfd – активное и индуктивное сопротивления первого контура ротора; rkd , xkd – активное и индуктивное сопротивления второго контура ротора; xkf – взаимное индуктивное сопротивление контуров ротора.

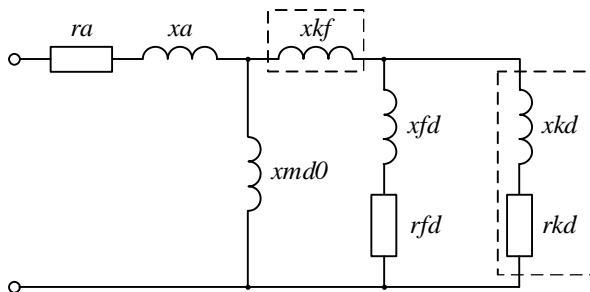


Рис. 1. Схема замещения модели АД

Определение параметров схем замещения моделей с одним контуром на роторе не вызывает особых затруднений и далее не рассматривается.

Определение параметров схем замещения моделей с двумя контурами на роторе является существенно более сложной задачей. Среди отечественных работ по определению параметров АД с двумя контурами ротора стоит отметить работу [1]. Обзор недостатков методов, представленных в зарубежных работах, приведен в [2]. Указанные методы достаточно тяжело применить на практике.

Наиболее простым и быстрым способом определить параметры схемы замещения АД является применение стандартного инструмента Parameter Estimator в ПО MatLab.

Расчёты в Parameter Estimator основываются на работе [2]. В ней выявлены следующие недостатки: не производится расчёт сопротивления взаимной индукции обмоток ротора (параметр x_{kf} на рис. 1), допущение о равенстве индуктивных сопротивлений обмотки статора и пусковой обмотки ротора принято без обоснований. Опыт использования Parameter Estimator показал, что расчётные значения сопротивлений могут не входить в диапазоны задания модели АД библиотеки RTDS.

В связи с этим был разработан собственный метод определения параметров АД. В качестве теоретической основы был использован материал из [3]. Исходными данными являются справочные и каталожные данные.

За главный критерий успешности расчёта принимается минимальная разность величин, рассчитанных по схеме замещения с использованием полученных значений сопротивлений, со справочными или каталожными данными: номинальный момент ($M_{ном}$), номинальный ток ($I_{ном}$), кратность пускового тока ($I_{п}$), кратность пускового момента ($M_{п}$), кратность максимального момента ($M_{м}$), номинальное скольжение ($s_{ном}$).

Для оценки разработанного метода расчёта (М.Р.) и инструмента Parameter Estimator (Р.Е.) был произведён расчёт параметров схемы замещения десяти АД с номинальным напряжением 6 кВ и 10 кВ. Рассчитанные параметры были заданы в модели АД и были смоделированы опыты пуска. В качестве примера в таблице приведены погрешности расчётных величин в сравнении с каталожными данными для двух двигателей. Погрешности определены по расчётным пусковым характеристикам, представленным на рис. 2 и 3.

Погрешности определения расчётных величин

Тип АД	Метод расчёта	$\Delta I_{\text{НОМ}}$	$\Delta M_{\text{НОМ}}$	$\Delta s_{\text{НОМ}}$	$\Delta M_{\text{М}}$	$\Delta I_{\text{П}}$	$\Delta M_{\text{П}}$
		%	%	%	%	%	%
А4-400Х-10УЗ	Р.Е.	3,7	-1,6	2,1	1,5	-2,4	0,2
	М.Р.	-2,8	1,4	-2,0	0,4	-19	2,0
ВАОВ4-800L-4	Р.Е.	0,3	0,0	-0,3	-2,7	0,0	1,1
	М.Р.	-1,7	1,4	-0,7	-2,6	0,0	-0,9

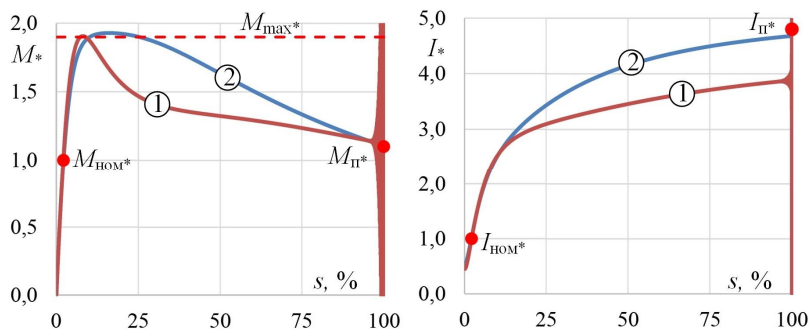


Рис. 2. Пусковые характеристики А4-400Х-10УЗ

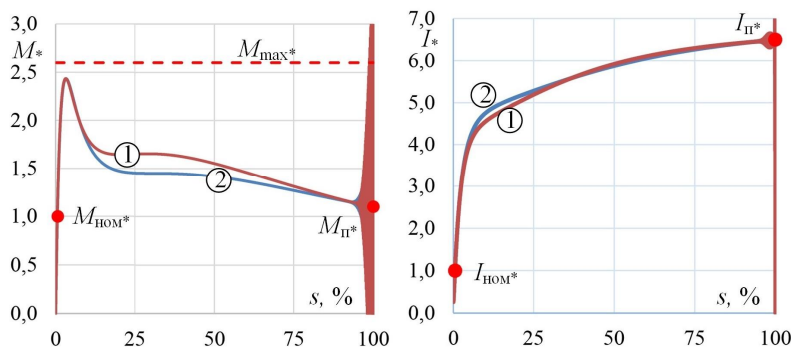


Рис. 3. Пусковые характеристики ВАОВ4-800L-4

Как показали результаты моделирования, при задании параметров в соответствии с разработанным методом расчёта (кривые 1 на рис. 2 и 3):

1) имеется тенденция к образованию значительно выраженной «двухгорбной» механической характеристики (6 случаев);

2) возможно заметное занижение кратности пускового тока (3 случая). При этом расчётное отклонение значительно превышает полученное на модели.

При задании параметров в соответствии с расчётами Parameter Estimator (кривые 2 на рис. 2 и 3):

1) имеется тенденция к образованию «двухгорбной» механической характеристики (4 случая), но менее выраженной;

2) возможно получение некорректных механических характеристик с неявной (пологой) областью максимального момента (2 случая).

Исходя из анализа результатов моделирования режимов пуска АД предпочтительным является использование инструмента Parameter Estimator.

Если получены некорректные механические характеристики с неявной (пологой) областью максимального момента, следует применять разработанный метод расчёта.

Литература

1. Сивокобыленко В.Ф. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Электричество. – 2014. – № 10. – С. 38–44.

2. Pedra J. On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs / J. Pedra // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23, No. 4. – PP. 1709–1718.

3. Костенко М.П. Электрические машины: ч. 2 / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 704 с.

А.М. Богачев, В.П. Крылов
(Владимир, Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СКАНОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Ёмкостная релаксационная спектроскопия глубоких уровней может стать эффективным методом оценки надёжности полупроводниковых приборов, так как позволяет получить представление о дефектах, созданных в процессе производства прибора, и выявить дефекты, которые могут негативно повлиять на надёжность.

Полупроводниковые приборы, такие как интегральные схемы (ИС), состоят из множества p - n -переходов и границ раздела сред, поэтому их сигнал релаксации будет носить неэкспоненциальный характер, что усложняет анализ результатов измерений [1].

Авторы получили частотные сканы ИС IN74VHC02D при разных температурах, на рис. 1 показаны результаты измерений и двухполосное включение ИС, найденное авторами.

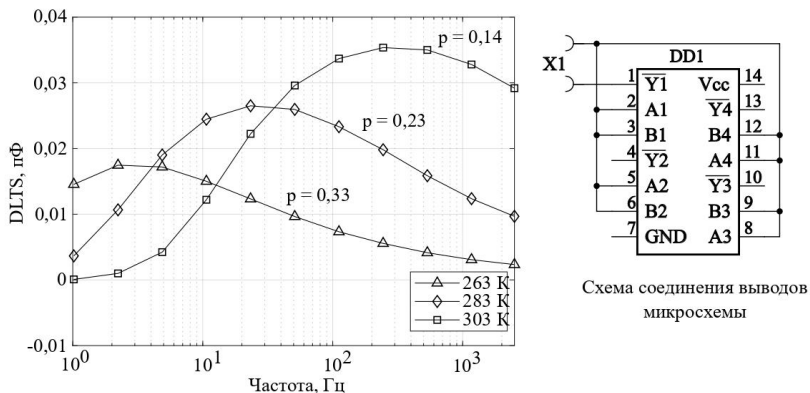


Рис. 1. Результаты измерений и схема включения ИС

В соответствии с моделями, приведёнными в публикации [2], были определены параметры процесса релаксации, в том числе параметр p , характеризующий неэкспоненциальность релаксации (для экспоненциального процесса $p = 1$) [2].

Авторы предполагают, что чем больше глубоких уровней участвует в релаксации ёмкости, тем меньше показатель p . Чтобы проверить эту гипотезу, было выполнено моделирование частотных сканов в предположении, что неэкспоненциальный переходный процесс состоит из суммы экспоненциальных, каждый из которых создаётся своим глубоким уровнем. Параметры переходных процессов выбирались таким образом, чтобы параметры смоделированного частотного скана были как можно ближе к параметрам измеренного скана.

На рис. 2, а показан пример смоделированного частотного скана, а на рис. 2, б – график Аррениуса, на котором отмечены точки, соответствующие параметрам экспоненциальных составляющих, границы полученного «коридора» соединены прямыми линиями.

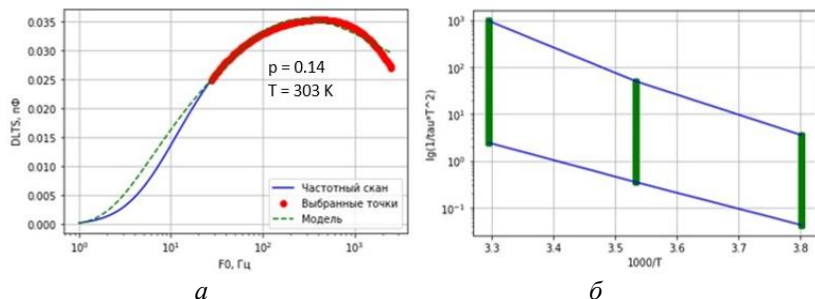


Рис. 2. Пример смоделированного частотного скана (а) и график Аррениуса (б)

На графике Аррениуса (рис. 2, б) видно, что полученный «коридор» расширяется с повышением температуры, а значит, при моделировании используется большее количество экспоненциальных составляющих.

Литература

1. *Peaker A.R.* Tutorial: Junction spectroscopy techniques and deep-level defects in semiconductors / A.R. Peaker, V.P. Markevich, J. Coutinho // J. Appl. Phys. – 2018. – Vol. 123, No. 16. – P. 161559.

2. *Крылов В.П.* Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы / В.П. Крылов, А.М. Богачев, Т.Ю. Пронин // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 35–44.

Н.Е. Пешехонов, В.В. Рыбаков, И.С. Жирков
(Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского)

ОБОСНОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СПРОСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Один из векторов развития ЭВМ в настоящее время направлен на применение малогабаритных или мобильных устройств, что приводит к появлению новых типов, обладающих отличными от ранее существующих техническими характеристиками. Анализ нормативных документов показал, что свод правил не подразумевает дифференциацию ЭВМ по каким-либо призна-

кам, что может существенно повлиять на достоверность определения электрических нагрузок.

В общем случае функциональные блоки различных компьютеров потребляют примерно одинаковую мощность в процентах от номинальной мощности компьютера. Значения удельной потребляемой мощности блоками ЭВМ [2] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения удельной потребляемой мощности блоками ЭВМ

Наименование комплектующей части	Потребляемая мощность $P_{\text{пот}}, \%$	Примечание
Процессор	16	Зависит от числа ядер
Материнская плата	7	Зависит от модели
Модуль памяти	4	На каждый из модулей
Видеокарта	35	При использовании дополнительного питания, на каждую установленную плату
Жесткий диск	9	На каждый диск
Оптический привод	4	На каждый привод
Монитор	5 + 15	Зависит от размеров и частоты воспроизведения
Мышь + клавиатура	1 + 2	Зависит от назначения и конструкции
Блок питания ($\eta = 0,75$)	10	$\approx 25 \%$ потребляемой мощности БП рассеивается в виде тепла
Итого	100	

Анализ энергопотребления ЭВМ в различных режимах функционирования показывает, что основную нагрузку определяет программное обеспечение, влияющее на работу функциональных блоков машины. Исходя из этого, в процессе работы ЭВМ можно выделить: режим пуска, холостой режим, офисный режим, профессиональный режим, специальный режим.

В процессе исследований энергопотребления различных ЭВМ было установлено, что в момент запуска компьютера потребляемая мощность выше, чем при последующей работе после запуска. Данный «скачок» связан с определёнными процессами, которые проис-

ходят при запуске компьютера, одним из которых является самотестирование после включения (BIOS POST).

Холостым режимом работы можно назвать такой режим работы ЭВМ, при котором запущены только процессы, поддерживающие его во включенном состоянии.

Офисным режимом работы называется такой режим, при котором запущены какие-либо офисные пакеты для работы в той или иной операционной системе. В рассматриваемых случаях используются операционная система Windows 7 или 10, на которых запущены табличный оператор Microsoft Excel и текстовый редактор Microsoft Word.

В профессиональном режиме используется специализированное программное обеспечение, требующее особых профессиональных навыков и имеющее определённые системные требования для его нормального функционирования.

Специальный режим работы характеризуется наличием особого программного обеспечения, связанного с большим количеством процессов и динамической картинкой, которые в большей степени нагружают все блоки ЭВМ.

В исследовании режимов энергопотребления использованы стационарные, мобильные ЭВМ и моноблоки. Рассмотрим энергопотребление машин при одинаковой нагрузке на них, которая определяется выбранным режимом работы. Результаты измерений представлены в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики зависимости потребляемой мощности от времени (рисунков), в течение которого проводились измерения с учетом последовательного перехода от режима к режиму.

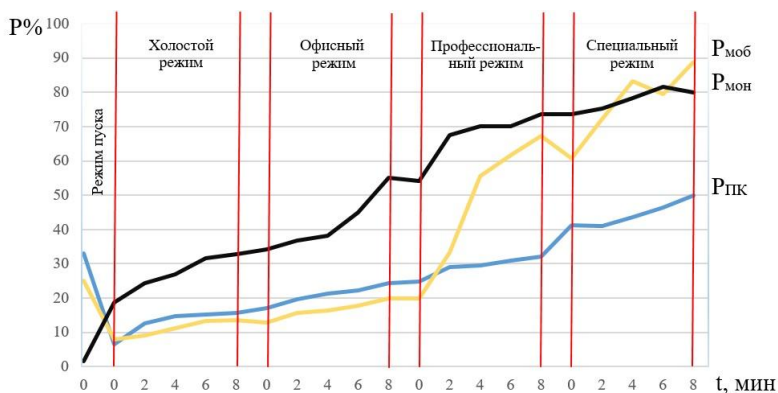
Анализ полученных графиков показывает, что формы кривых имеют одинаковые тенденции, однако по уровню потребляемой мощности они различны, а значит определение расчётной мощности ЭВМ различного типа должно происходить с разными коэффициентами спроса.

Коэффициент спроса для работы стационарного компьютера составляет 0,5. Полученное значение совпадает с данными, представленными в СП 256.1325800.2016, и может быть использовано в расчётах. Однако данный вывод справедлив только для стационарных компьютеров. Для мобильных ЭВМ коэффициент спроса составляет 0,9, для моноблоков – 0,8.

Таблица 2

Результаты измерения потребляемой мощности ЭВМ различного типа

№ п/п	Тип ЭВМ	Стационарные компьютеры								Мобильные ЭВМ (ноутбуки)								Моноблоки			
		230								180								120			
	Режим работы	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
		Время исследования, мин																			
		76								45								1,8			
		15,2	29	34	35	36	14,2	16,4	20	24	24,3	22,3	29,2	32,4	38	39,2	22,3	29,2	32,4	38	39,2
2	Холостой режим	39	45	49	51	56	23,3	28	29,3	32	35,9	41,2	44	46	54	66	41,2	44	46	54	66
3	Офисный режим	57	67	68	71	74	35,9	60	100	111	121	65	81,1	84	84,2	88,3	65	81,1	84	84,2	88,3
4	Профессиональный режим	95	94	100	107	115	95	130	150	143	160	88,3	90,2	94	98	96	88,3	90,2	94	98	96
5	Специальный режим																				
		33,0								25,0								1,5			
		6,6	12,6	14,8	15,2	15,7	7,9	9,1	11,1	13,3	13,5	18,6	24,3	27,0	31,7	32,7	18,6	24,3	27,0	31,7	32,7
2	Холостой режим	17,0	19,6	21,3	22,2	24,3	12,9	15,6	16,3	17,8	19,9	34,3	36,7	38,3	45,0	55,0	34,3	36,7	38,3	45,0	55,0
3	Офисный режим	24,8	29,1	29,6	30,9	32,2	19,9	33,3	55,6	61,7	67,2	54,2	67,6	70,0	70,2	73,6	54,2	67,6	70,0	70,2	73,6
4	Профессиональный режим	41,3	40,9	43,5	46,5	50,0	60,8	72,2	83,3	79,4	88,9	73,6	75,2	78,3	81,7	80,0	73,6	75,2	78,3	81,7	80,0
5	Специальный режим																				



Изменение потребляемой мощности ЭВМ: $P_{\text{моб}}$ – потребляемая мощность мобильной ЭВМ; $P_{\text{мон}}$ – потребляемая мощность моноблока; $P_{\text{ПК}}$ – стационарной ЭВМ

По полученным коэффициентам спроса и указанным номинальным мощностям ЭВМ можно найти расчётную мощность, которую можно использовать при дальнейшем проектировании системы электроснабжения. Расчётная мощность является основой при выборе защитной и коммутационной аппаратуры, а также при расчёте сечения токопроводящих кабелей и шин. Сам коэффициент спроса всего лишь инструмент для расчёта и определения значения расчётной мощности.

Таким образом, при определении расчётной мощности группы ЭВМ необходимо учитывать их исполнение и вносить коррективы по значениям коэффициента спроса. Для получения более достоверных значений коэффициента спроса нужно расширить выборку.

Литература

1. Свод правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

2. Максимов Н.В. Архитектуры ЭВМ и вычислительных систем / Н.В. Максимов, Т.Л. Партыка, И.И. Попов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 512 с.

3. Пешехонов Н.В. Системы электроснабжения специальных объектов / Н.В. Пешехонов, В.В. Рыбаков, Д.В. Рыбаков. – СПб.: ВКА им. Можайского, 2019. – 169 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ 5G В ПРОМЫШЛЕННЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

Для удовлетворения требованиям качественной передачи файлов посредством беспроводной сети необходим ряд усовершенствований в мобильных технологиях следующего поколения [1]. Большую популярность набирает технология «Интернет вещей» (IoT), а также развиваются системы безопасности в автомобилях, использующие связь с интернетом. Беспроводная технология 5G станет ключевым фактором обеспечения более надёжной связи для транспортных средств, что сыграет большую роль в решении проблем безопасности и автономности транспортных средств. 5G способствует сокращению задержки и повышению надёжности связи без необходимости прокладки ВОЛС [2, 3]. Это позволит обмениваться траекториями автомобилей, локальными данными о дорожной обстановке. V2X технология между транспортными средствами (рис. 1) поддерживает задержку всего в несколько миллисекунд по воздуху.

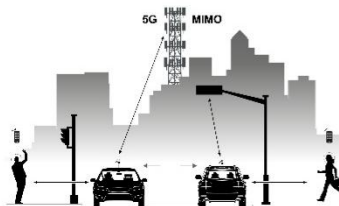


Рис. 1. Технология V2X

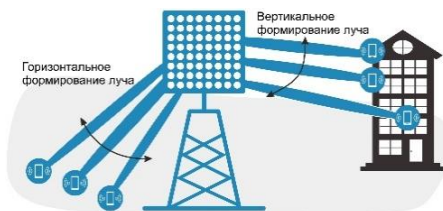


Рис. 2. Расширенные антенные системы (AAS)

Для решения таких задач телекоммуникационная отрасль в России начала запуск сетей пятого поколения сотовой связи 5G. Для ускорения процесса прототипирования и внедрения систем связи поколения 5G применяются программно-определяемые радиосистемы [4]. Основным элементом сетей станет технология MIMO, которая позволяет увеличить пропускную способность каждой соты в 4–5 раз. Технология использует несколько антенн

на сторонах передатчика и приёмника. Новое поколение – Massive MIMO – масштабируется до десятков, сотен антенн, обеспечивая улучшенные ёмкость и соединение (особенно с высокими частотами 5G).

Расширенные антенные системы (AAS) объединяют антенные элементы (Massive MIMO) и могут формировать лучи в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 2), абоненты смогут работать одновременно на одних частотных ресурсах.

Эта операция динамически направляет диаграмму направленности антенны для каждого пользователя, обеспечивая лучшую связь и более высокую пропускную способность для этого пользователя. Это приведет к увеличению совокупной ёмкости для всей соты.

Создавая новые технологии для повседневных дел, либо передвижения по городу, необходимо учитывать ресурсоёмкость таких приложений и передачу по беспроводной сети.

Литература

1. *Магнитский В.А.* Реализация технологии MIMO в сетях нового поколения 5G / В.А. Магнитский, С.Г. Чумаров // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 226–231.

2. *Чумаров С.Г.* Пропускная способность волоконно-оптических информационно-измерительных систем / С.Г. Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 201–202.

3. *Фарфоровский Д.Б.* Пропускная способность оптоволоконных линий связи / Д.Б. Фарфоровский, С.Г. Чумаров // Сб. науч. тр. молод. учёных и специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С.83–87.

4. *Чумаров С.Г.* Особенности реализации и применения программно-определяемых радиосистем / С.Г. Чумаров, Ю.С. Милкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 442–443.

А.Н. Петров, А.Л. Славутский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
ООО «Юнител Инжиниринг»)

ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПЛК В РАЗРАБОТКЕ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

С появлением первых цифровых устройств начали формироваться требования для создания цифровых подстанций. Эти требования касались надёжности, производительности и совместимости программно-аппаратных решений. Выполнение требований совместимости программно-аппаратных решений можно возложить на комбинированное применение стандартов программирования ПЛК (МЭК 61131-3) и стандартов, описывающих форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта (МЭК 61850) [1, 2].

С начала разработок в отечественной электроэнергетике проектов АСУ ТП для подстанций произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления для применения на подстанциях. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения, разрабатывается первичное и вторичное электросетевое оборудование со встроенными коммуникационными портами. Производятся микропроцессорные контроллеры, оснащенные инструментальными средствами разработки, на базе которых возможно создание надёжного программно-аппаратного комплекса ПС. Принят международный стандарт МЭК 61850, регламентирующий представление данных о ПС как объекте автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (IED) ПС, включая устройства контроля и управления, релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, счётчики электроэнергии и т.д. Всё это создаёт предпосылки для построения подстанции нового поколения – цифровой подстанции (ЦПС), в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме.

С выходом измененных норм технологического проектирования подстанций 35–750 кВ согласно позиции ПАО «ФСК ЕЭС» цифровой является подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами подстанции, а также управление работой подстанции, осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850. Другими словами, в качестве определяющего признака ЦПС используется её «тотальная» ИТ-развитость, т.е. все процессы информационного обмена между элементами программно-аппаратного комплекса подстанции осуществляются в цифровом виде и требуют многоуровневого контроля [3, 4].

Для обмена данными между различными средствами управления конфигурацией служат файлы языка SCL. В то же время содержимое каждого файла должно подчиняться правилам языка конфигурации подстанции SCL, которые определены в разделе 8 стандарта МЭК 61850.

Конфигурационные файлы, описанные на языке SCL, требуют высокого порога вхождения для чтения и понимания описанных функций в самом файле. В то время как в стандарте программирования ПЛК (МЭК 61131-3) есть графические языки, позволяющие наглядно представить функциональную схему, определяющую конфигурацию устройства. В пример можно привести графический язык программирования FBD (Functional Block Diagram). Этот язык наряду с другими языками стандарта МЭК 61131-3 использует в своей архитектуре подобие электронной схемы. Написанная на нём программа для контроллера состоит из некоего списка цепей, которые одна за другой выполняются сверху вниз. Кроме того, здесь имеется возможность присвоения отдельным цепям меток, в этом случае станет доступно использование инструкций перехода на метку, дабы изменять последовательность исполнения цепей и создавать условия и циклы. Также язык программирования FBD позволяет определить состав функциональных блоков схемы и логику их взаимодействия друг с другом и передаваемые типы данных [5].

Для комбинированного взаимодействия стандартов МЭК 61850 и МЭК 61131-3 нужно первым делом разобраться с типами данных, которыми оперируют оба стандарта. Например, протоколы, описанные в стандарте МЭК 61850 и DNP3, включают в себя как значения состояния, так и информацию о метках времени для

тегов данных. Следовательно, при правильной настройке вся структура данных, заполненная этими двумя протоколами, может считаться согласованной относительно возможностей отчётности устройства и безопасно сравниваться в логическом механизме МЭК 61131. На рис. 1 показан предлагаемый метод отображения данных DNP3 на тип данных МЭК 61850 MV (measured value) и хранение его в структурах стандарта МЭК 61131.

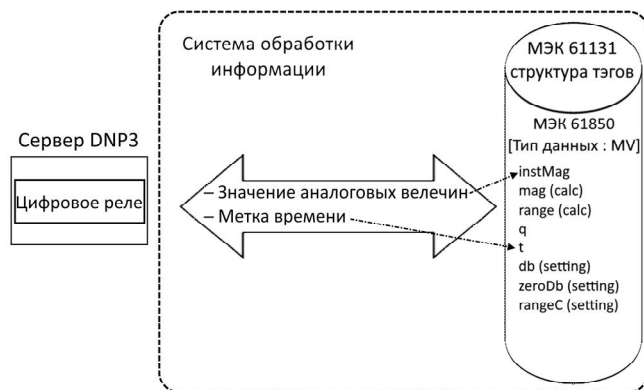


Рис. 1. Отображение данных DNP3 в структуру данных МЭК 61131

Создавая полные и стандартизированные структуры данных в системе обработки информации, каждый протокол заполняет доступное поле, как указано в устройстве. Структура данных включает в себя расширенный набор полей всех доступных протоколов, в большинстве случаев на основе стандарта МЭК 61850. Например, тип данных измеренного значения (measured value) МЭК 61850 указывает 32-разрядное значение с плавающей запятой, таким образом, почти каждое 32-разрядное значение, прочитанное из устройства, независимо от протокола сохраняется в базе данных как структура данных MV.

Преобразовывая структуру данных МЭК 61850 CMV (complex measured value) в типы данных МЭК 61131-3, система должна без всякой манипуляции записать всю информацию в тэг заданного формата, поскольку каждая структура данных МЭК 61850 несёт метку времени, качество и stVal. Пример, показанный на рис. 2, иллюстрирует передачу типа данных CMV в структурный тэг протокола МЭК 61131-3.

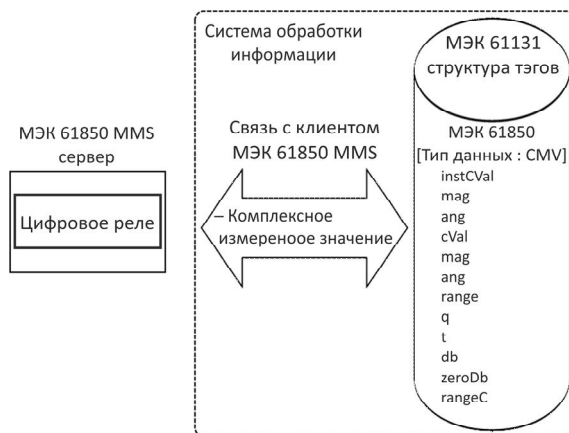


Рис. 2. Структуры данных МЭК 61850 передаются непосредственно в теги данных МЭК 61131

В заключение хочется отметить, что стандартизированное программирование МЭК 61131 упрощает проектные конфигурации для нужд автоматизации подстанции. На основании общих требований инженерные группы могут эффективно создавать стандартизированные библиотеки автоматизации МЭК 61131 и оптимизировать процедуры программирования для потенциальных повторных проектов. Выгоды от снижения временных ресурсов на проектирование, снижения затрат на обучение, повышения производительности в целом могут быть значительными.

Литература

1. Стандарт IEC 61850 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iec.ch> (дата обращения: 25.04.2020).
2. Стандарт IEC 61131 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iec.ch> (дата обращения: 25.04.2020).
3. Славутский А.Л. Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики / А.Л. Славутский, А.А. Ларюхин, М.И. Кощев // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 47–58.
4. Slavutskii L. Anomalous modes recognizing secondary equipment in electric power industry: adaptive neuro algorithms /

L. Slavutskii, A. Laruhin, M. Nikandrov // Proceedings of the 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCcon. – 2019. – PP. 399–403.

5. Weber M.S. Practical Application of IEC 61131 in Modern Electrical Substation / M.S. Weber. – 2012. – Режим доступа: <https://cdn.selinc.com> (дата обращения: 27.04.2020).

В.Г. Захаров, И.Р. Санатуллова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Кодирование информационного 8-ми разрядного кода формируется сложением амплитуд его бит с амплитудами тактовых импульсов, при этом пара нечетных и четных бит одновременно передается лазерным лучом в разных диапазонах световых волн, что повышает быстродействие передачи. Помехоустойчивость обеспечивается использованием волоконно-оптической линии связи. На выходе передатчика получаем оптический амплитудно-частотно-манипулированный (АЧМн) сигнал.

Функциональная схема передатчика оптического АЧМн-сигнала содержит: аналого-цифровой преобразователь АЦП; генератор тактовых импульсов ГТИ; распределитель импульсов РИ; мультиплексоры МХ1, МХ2; сумматоры $\Sigma 1$, $\Sigma 2$; импульсные усилители УЛ1, УЛ2 с лазерами разного оптического диапазона; логику DD1–DD3 и призму П (рис. 1). На выходе призмы П получаем фотопоток $\Phi = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$.

Распределитель импульсов РИ управляет мультиплексорами МХ1, МХ2, с которых одновременно четные и нечетные биты информационного кода последовательно поступают на сумматоры $\Sigma 1$, $\Sigma 2$, где происходит сложение их амплитуд с амплитудами импульсов тактового генератора ГТИ. Байты информационного 8-ми разрядного кода разделяются между собой строб-импульсом от РИ (вывод 5), при помощи которого логические элементы DD1–DD3 формируют на этом интервале для усилителя У1 логическую «1», а для усилителя У2 – логический «0».

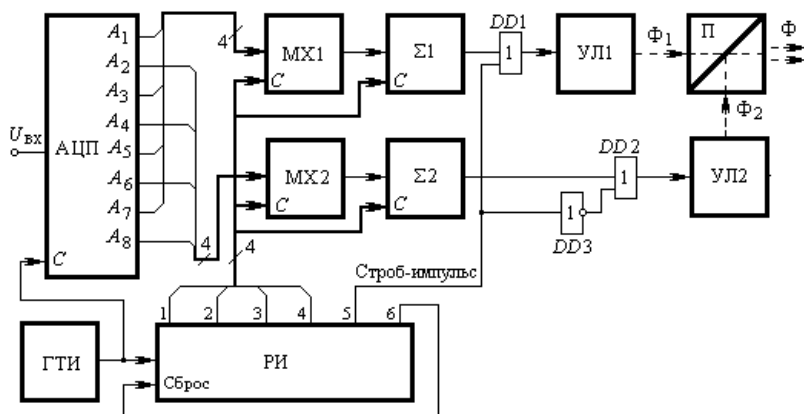
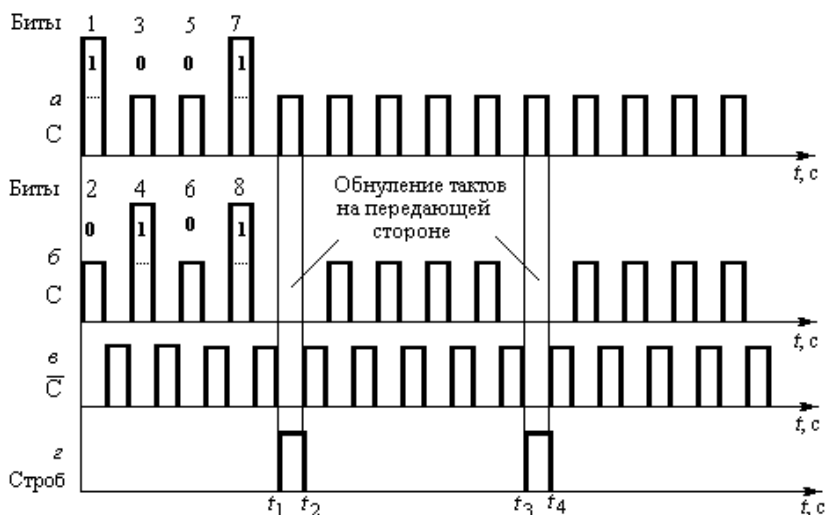


Рис. 1. Функциональная схема передатчика оптического АЧМн-сигнала

Диаграммы работы приемо-передающей системы на примере информационного кода «11001001» представлены на рис. 2.

Амплитуды логических «1» цифрового кода суммируются с амплитудами тактовых импульсов C (рис. 2, а, б). В приёмнике за счёт инвертирования синхроимпульсов формируются разделительные строб-импульсы на интервалах t_1-t_2 , t_3-t_4 . (рис. 2, в, г), а цифровой код восстанавливается при помощи ограничителей уровня.



СИСТЕМЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Г.А. Белов, Г.В. Малинин
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЗОНАНСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Известно, что исследование характеристик установившегося режима резонансных преобразователей постоянного напряжения (ППН) в режиме непрерывного тока удобно проводить с использованием метода основной гармоники в силу того, что в этом случае токи и напряжения резонансного контура близки к синусоидальным [1]. Однако метод основной гармоники не позволяет анализировать и рассчитывать переходные процессы в преобразователе, а точные методы исследования резонансных ППН оказываются сложными для практического использования. В работе предлагается методика расчёта переходных процессов в разомкнутых ППН методом припасовывания с использованием векторно-матричных соотношений и методов усреднения и разделения процессов на быстрые и медленные на примере ППН типа *LLC*.

На рис. 1 представлена схема силовой части ППН типа *LLC*.

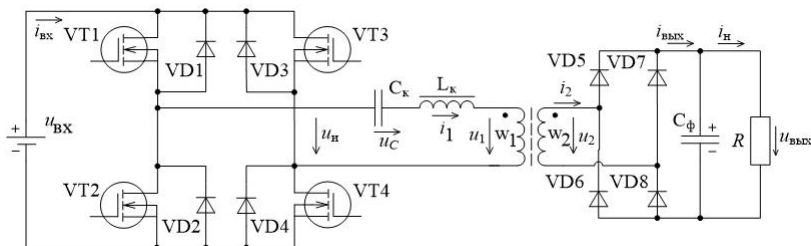


Рис. 1. Силовая часть резонансного преобразователя
постоянного напряжения *LLC* типа

С учетом *T*-образной линейной эквивалентной схемы трансформатора схема замещения колебательного *LC*-контура представляется в виде, указанном на рис. 2, *а*, где u_n – напряжение на выхо-

де инверторного моста, u_{ϕ} – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, приведенное к первичной обмотке, $L_1 = L_k + L_{s1}$, L_k – индуктивность внешнего дросселя, L_{s1} , L_{s2} – индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора и приведенная к первичной обмотке индуктивность рассеяния вторичной обмотки; r_1 , r_2 – активные сопротивления цепи первичной обмотки трансформатора и приведенное к первичной обмотке активное сопротивление цепи вторичной обмотки. В преобразователях типа *LLC* индуктивность намагничивания трансформатора L_{μ} обычно соизмерима с индуктивностью рассеяния $L_s = L_{s1} + L_{s2}$.

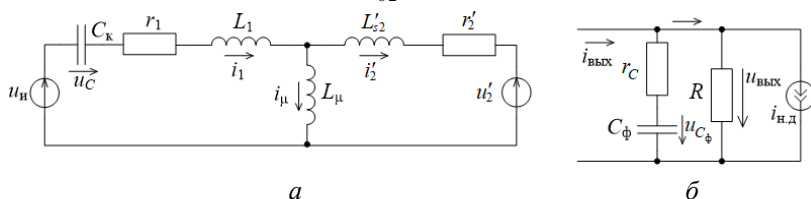


Рис. 2. Эквивалентные схемы: для колебательного *LC*-контура (а); для выходной цепи ППН (б)

Векторно-матричные уравнения ППН

Для расчётов будем использовать векторно-матричный метод припасовывания [2], решая на отдельных рабочих интервалах линейное уравнение состояния *LC*-контура

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v}, \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния *LC*-контура, \mathbf{v} – вектор внешних воздействий;

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} u_n \\ u_{\phi} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1+l_2}{L_1^*} & -\frac{1}{L_1^*} \\ \frac{1}{L_1^*} & -\frac{1+l_1}{L_1^*} \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = -\frac{(1+l_2)r_1}{L_1^*}; a_{12} = -\frac{r_2}{L_1^*}; a_{13} = -\frac{1+l_2}{L_1^*}; a_{21} = -\frac{r_1}{L_1^*};$$

$$a_{22} = -\frac{(1+l_1)r_{\Sigma}}{L_1^*}; a_{23} = -\frac{1}{L_1^*}; a_{31} = \frac{1}{C_K}; a_{32} = 0; a_{33} = 0;$$

$$l_1 = L_1/L_{\mu}, l_2 = L_{s2}/L_{\mu}, L_1^* = L_1(1+l_2+l_2/l_1).$$

В схеме на рис. 2, а $u_{и} = u_{вх}$ при открытых транзисторах VT1, VT4 (или при открытых диодах VD1, VD4) и $u_1 = -u_{вх}$ при открытых транзисторах VT2, VT3 (или при открытых диодах VD2, VD3).

$$u_{\Sigma} = \begin{cases} u_{\text{вых.ср}}/n_{\text{тр}} & \text{при } i_{\Sigma} > 0, \\ -u_{\text{вых.ср}}/n_{\text{тр}} & \text{при } i_{\Sigma} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $u_{\text{вых}} = u_{\text{вых}}/n_{\text{тр}}$ – среднее значение выходного напряжения, приведенное к первичной обмотке трансформатора; $n_{\text{тр}} = w_2/w_1$ – коэффициент трансформации трансформатора.

Здесь по умолчанию используется метод разделения процессов на быстрые и медленные, анализируемые по отдельным схемам, порядок каждой из которых меньше порядка общей схемы замещения [3]. В нашем случае процессы в схеме на рис. 2, а протекают значительно быстрее, чем в схеме на рис. 2, б. Тем не менее, необходимость решать на каждом интервале линейности уравнение третьего порядка существенно затрудняет теоретический анализ по сравнению с ППН с простым последовательным LC-контуром.

На интервалах времени постоянства вектора внешних воздействий ($\mathbf{v}=\text{const}$) решение уравнения (1) можно представить в виде

$$\mathbf{x}(t) = e^{A(t)} [\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}(\infty)] + \mathbf{x}(\infty) \quad (3)$$

где $\mathbf{x}(0)$ – начальное значение вектора $\mathbf{x}(t)$ для рассматриваемого интервала времени [4]; $\mathbf{x}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t)$ – асимптотическое значение вектора $\mathbf{x}(t)$, элементы которого можно найти непосредственно из рис. 2, а: $i_1(\infty)=0$, $i_{\Sigma}(\infty) = -u_{\Sigma}/r_{\Sigma}$, $u_C(\infty)=u_{и}$. Решение (3) представим в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_{\Sigma}(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(t) & F_{12}(t) & F_{13}(t) \\ F_{21}(t) & F_{22}(t) & F_{23}(t) \\ F_{31}(t) & F_{32}(t) & F_{33}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1(0) - i_1(\infty) \\ i_{\Sigma}(0) - i_{\Sigma}(\infty) \\ u_C(0) - u_C(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_1(\infty) \\ i_{\Sigma}(\infty) \\ u_C(\infty) \end{bmatrix},$$

откуда следуют скалярные выражения

$$\begin{aligned} i_1(t) = & F_{11}(t)[i_1(0) - i_1(\infty)] + F_{12}(t)[i_{\Sigma}(0) - i_{\Sigma}(\infty)] + \\ & + F_{13}(t)[u_C(0) - u_C(\infty)] + i_1(\infty); \end{aligned} \quad (4)$$

$$i_{\underline{2}}(t) = F_{21}(t)[i_1(0) - i_1(\infty)] + F_{22}(t)[i_{\underline{2}}(0) - i_{\underline{2}}(\infty)] + \\ + F_{23}(t)[u_C(0) - u_C(\infty)] + i_{\underline{2}}(\infty); \quad (5)$$

$$u_C(t) = F_{31}(t)[i_1(0) - i_1(\infty)] + F_{32}(t)[i_{\underline{2}}(0) - i_{\underline{2}}(\infty)] + \\ + F_{33}(t)[u_C(0) - u_C(\infty)] + u_C(\infty), \quad (6)$$

где время t отсчитывается от начала очередного интервала линейности; $\Phi_{ij}(t)$ – элементы переходной матрицы

$$\Phi(t) = e^{At} = L^{-1} \left(\frac{p\mathbf{1} - \mathbf{A}}{p} \right)^{-1} \dot{\mathbf{U}},$$

определяемые по формуле

$$\Phi_{ij}(t) = B_1^{ij} e^{p_1 t} + e^{-at} \frac{B_2^{ij}}{w_0} \cos w_0 t + \frac{B_3^{ij} - a B_2^{ij}}{w_0} \sin w_0 t, \quad \ddot{0}$$

$L^{-1}(\dots)$ – обратное преобразование Лапласа; p_1 и $p_{2,3} = -a \pm j\omega_0$ – корни полинома

$$D(p) = \det(p\mathbf{1} - \mathbf{A}) = \begin{vmatrix} p - a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{21} & p - a_{22} & -a_{23} \\ -a_{31} & 0 & p \end{vmatrix} = p^3 + ap^2 + bp + c,$$

B_1^{ij} , B_2^{ij} и B_3^{ij} – коэффициенты, определяемые по параметрам схемы замещения 2, a и корням полинома $D(p)$.

За начало очередного полупериода принимаем момент подачи импульсов отпираания пары транзисторов VT1, VT4 или VT2, VT3. При переходе через нуль тока $i_{\underline{2}}$ ранее открытая пара диодов выходного выпрямителя закрывается и открывается другая пара диодов. Полярность напряжения $u_{\underline{C}}$ меняется скачком, поскольку ёмкость трансформатора не учитывается. Длительность интервала t_1 неизменного по знаку тока $i_{\underline{2}}$ определяется из уравнения $i_{\underline{2}}(t_1) = 0$, которое с учетом (5) принимает вид

$$F_{21}(t_1)[i_1(0) - i_1(\infty)] + F_{22}(t_1)[i_{\underline{2}}(0) - i_{\underline{2}}(\infty)] + \\ + F_{23}(t_1)[u_C(0) - u_C(\infty)] + i_{\underline{2}}(\infty) = 0. \quad (7)$$

Определяется наименьший корень уравнения (7) за исключением корня $t_1 = 0$.

Определение процесса в выходной цепи

Для выходной цепи ППН имеем дифференциальные уравнения

$$C_{\phi} \frac{du_{C_{\phi}}}{dt} + \frac{u_{\text{вых}}}{R} + i_{\text{н.д}} = i_{\text{вых}}, \quad u_{\text{вых}} = u_{C_{\phi}} + r_C C_{\phi} \frac{du_{C_{\phi}}}{dt}, \quad (8)$$

где r_C – эквивалентное последовательное сопротивление выходного фильтрующего конденсатора C_{ϕ} ; выходной ток преобразователя $i_{\text{вых}}$ полагаем непрерывным, $i_{\text{вых}} = |i_2|$ (рис. 1).

Интегрируя уравнения (8) за полупериод $T_{\Pi} = T/2$, начиная с момента отпираания очередной пары диодов выходного выпрямителя, и деля их на T_{Π} , получаем

$$C_{\phi} \frac{Du_{C_{\phi}}(T_{\Pi})}{T_{\Pi}} + \frac{u_{\text{вых.ср}}}{R} + i_{\text{н.д.ср}} = i_{\text{вых.ср}}; u_{\text{вых.ср}} = u_{C_{\phi}\text{ср}} + r_C C_{\phi} \frac{Du_{C_{\phi}}(T_{\Pi})}{T_{\Pi}},$$

где $Du_{C_{\phi}}(T_{\Pi})$ – приращение мгновенного значения напряжения $u_{C_{\phi}}(t)$ за время T_{Π} ; среднее за полупериод значение выходного напряжения

$$u_{\text{вых.ср}} = \frac{1}{T_{\Pi}} \int_0^{T_{\Pi}} u_{\text{вых}} dt;$$

средние значения остальных переменных $u_{C_{\phi}\text{ср}}$, $i_{\text{вых.ср}}$, $i_{\text{н.д.ср}}$ рассчитываются аналогично $u_{\text{вых.ср}}$.

Принимая основное допущение метода усреднения

$$\frac{Du_{C_{\phi}}(T_{\Pi})}{T_{\Pi}} = \frac{du_{C_{\phi}\text{ср}}}{dt},$$

приблизённо справедливое при малых приращениях $Du_{C_{\phi}}(T_{\Pi})$, получаем усредненные уравнения

$$C_{\phi} \frac{du_{C_{\phi}\text{ср}}}{dt} + \frac{u_{\text{вых.ср}}}{R} + i_{\text{н.д.ср}} = i_{\text{вых.ср}}, \quad u_{\text{вых.ср}} = u_{C_{\phi}\text{ср}} + r_C C_{\phi} \frac{du_{C_{\phi}\text{ср}}}{dt}. \quad (9)$$

Полагая $i_{\text{н.д.ср}} = u_{\text{вых.ср}}/R_{\text{н.д.ср}}$ и исключая из уравнения (9) $u_{C_{\phi}\text{ср}}$, получим

$$T_C \frac{du_{\text{вых.ср}}}{dt} + u_{\text{вых.ср}} = R_{\text{н.ср}} \tau_C \frac{di_{\text{вых.ср}}}{dt} + R_{\text{н.ср}} i_{\text{вых.ср}}, \quad (10)$$

где $R_{\text{н.ср}} = R \| R_{\text{н.д.ср}}$ – среднее за полпериода T_{Π} значение сопротивления нагрузки; $\tau_C = r_C C_{\phi}$ и $T_C = (R_{\text{н.ср}} + r_C) C_{\phi}$ – постоянные времени конденсатора фильтра; $R_{\text{н.д.ср}} = u_{\text{вых.ср}}/i_{\text{н.д.ср}}$.

Обычно постоянная времени τ_c намного меньше T_c , поэтому первым слагаемым в правой части уравнения (10) будем пренебрегать. Тогда изменение среднего значения выходного напряжения за полпериода T_{Π} согласно (10) определяется по формуле:

$$u_{\text{вых.ср}}(t) = \dot{u}_{\text{вых.ср}}(0) - R_{\text{н.ср}} i_{\text{вых.ср}} \dot{u} e^{-t/T_c} + R_{\text{н.ср}} i_{\text{вых.ср}}. \quad (11)$$

Значение $u_{\text{вых.ср}}(T_{\Pi})$ в конце полупериода определяется подстановкой $t = T_{\Pi}$ в выражение (11) и используется при расчёте процессов в *LLC*-контуре на следующем полупериоде.

Для определения среднего значения выходного напряжения (11) необходимо знать среднее значение выходного тока $i_{\text{вых.ср}} = |i_{2\text{ср}}| / n_{\text{тр}}$. Для определения среднего значения тока $|i_{2\text{ср}}|$ необходимо проинтегрировать ток $|i_2|$ по всем интервалам на полупериоде T_{Π} , просуммировать результат интегрирования и разделить на T_{Π} . С учетом выражения (5) упомянутый интеграл для k -го интервала записывается в виде

$$\begin{aligned} \int_0^{t_k} i_2 dt = & [i_1(0) - i_1(\varphi)] \int_0^{t_k} f_{21}(t) dt + [i_2(0) - i_2(\varphi)] \int_0^{t_k} f_{22}(t) dt + \\ & + [u_c(0) - u_c(\varphi)] \int_0^{t_k} f_{23}(t) dt + i_2(\varphi) t_k, \end{aligned} \quad (12)$$

где начальные значения $i_1(0)$, $i_2(0)$, $u_c(0)$ определяются в конце предыдущего интервала по формулам (4)–(6), время отсчитывается от момента начала k -го интервала.

Интеграл элементов переходной матрицы можно определять через интеграл самой переходной матрицы

$$\int_{t_n}^{t_k} e^{A t} dt = A^{-1} (e^{A t_k} - e^{A t_n}),$$

который вычисляется просто независимо от порядка уравнения (1); здесь t_n и t_k – моменты начала и конца интегрирования.

Порядок расчёта переходных процессов

1. За начальные значения переменных для рассматриваемого полупериода $i_1(0)$, $i_2(0)$, $u_c(0)$ и $u_{\text{вых.ср}}(0)$ принимаем их значения, полученные в конце предыдущего полупериода.

2. Из уравнения (7) находим время t_1 .

3. Если решение уравнения (7) $t_1 > T_{\text{п}}$, то принимаем $t_1 = T_{\text{п}}$. По формулам (4)–(6) рассчитываем кривые изменения координат вектора состояния на интервале $t_1 = T_{\text{п}}$ и значения координат в конце интервала $i_1(T_{\text{п}})$, $i_2(T_{\text{п}})$, $u_C(T_{\text{п}})$. По формуле (12) рассчитываем интеграл $\int_0^{t_1} i_2 \phi dt$ и среднее значение $i_{\text{вых.ср}} = \left| i_2 \phi_{\text{ср}} = \frac{2f}{n_{\text{тр}}} \left| \int_0^{t_1} \ddot{\phi} dt \right| \right|$, где f – частота коммутации транзисторов.

По формуле (11) рассчитываем кривую изменения среднего значения $u_{\text{вых.ср}}$ за полупериод $T_{\text{п}}$ и его значение $u_{\text{вых.ср}}(T_{\text{п}})$.

Если решение уравнения (7) $t_1 < T_{\text{п}}$, то по формулам (4)–(6) рассчитываем кривые изменения координат вектора состояния на интервале $(0, t_1)$ и значения координат в момент t_1 . По формуле (12)

рассчитываем интеграл $\int_0^{t_1} \ddot{\phi} dt$ и переходим к расчётам на интервале

$(t_1, T_{\text{п}})$. При этом сохраняется значение $u_{\text{п}}$, которое было на интервале $(0, t_1)$, а значение u_{ϕ} берётся противоположным по знаку значению u_{ϕ} на интервале $(0, t_1)$. Приняв $i_1(0) = i_1(t_1)$, $i_2(0) = i_2(t_1)$, $u_C(0) = u_C(t_1)$ по формулам (4)–(6) рассчитываем кривые изменения координат вектора состояния на интервале $(t_1, T_{\text{п}})$ и значения координат в момент $T_{\text{п}}$. По формуле (12) рассчитываем интеграл $\int_{T_{\text{п}} - t_1}^{T_{\text{п}}} \ddot{\phi} dt$.

Определяем среднее значение выходного тока

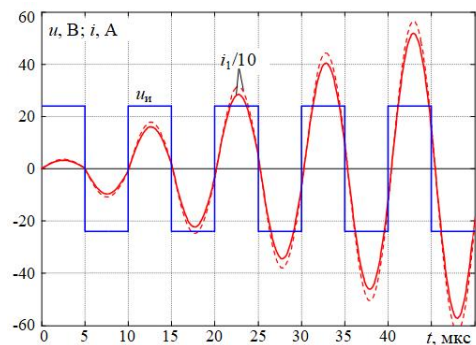
$$i_{\text{вых.ср}} = \frac{2f}{n_{\text{тр}}} \left| \int_0^{t_1} \ddot{\phi} dt \right| + \left| \int_0^{T_{\text{п}} - t_1} \ddot{\phi} dt \right| \div \frac{1}{2}$$

и по формуле (11) рассчитываем кривую изменения напряжения $u_{\text{вых.ср}}$ за полупериод и его значение в конце полупериода $u_{\text{вых.ср}}(T_{\text{п}})$.

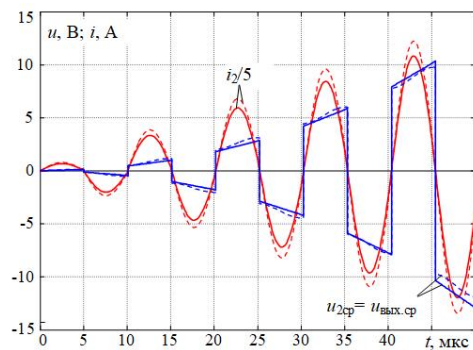
5. Рассчитываем усредненное сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н.ср}} = u_{\text{вых.ср}}(T_{\text{п}}) / i_{\text{вых.ср}}.$$

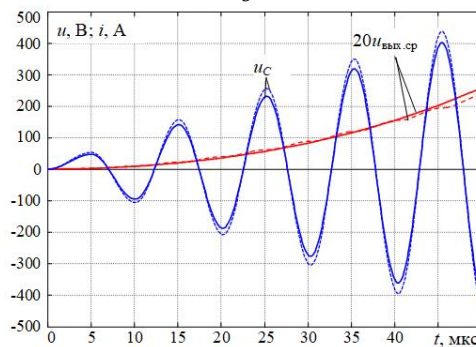
6. Выполняем расчёты для следующего полупериода, повторяя расчёты по пп. 1–5.



a



б



в

Рис. 3. Расчётные и экспериментальные временные диаграммы пуска ППН: кривые выходного напряжения инвертора и тока резонансного контура (*a*); кривые усредненного напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора (*б*); кривые напряжения на конденсаторе резонансного контура и усредненного напряжения на выходе (*в*)

Анализ ППН типа *LLC* проводился при следующих номинальных параметрах: $u_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$, $u_{\text{вых}} = 220 \text{ В}$, $i_{\text{н}} = 2,5 \text{ А}$, $L_{\text{к}} = 1 \text{ мкГн}$, $L_{\text{ц}} = 2,5 \text{ мкГн}$, $L_{\text{с}} = 0,2 \text{ мкГн}$, $C_{\text{к}} = 2,2 \text{ мкФ}$, $n_{\text{тр}} = w_2/w_1 = 38/4$, частота переключений $f = 100 \text{ кГц}$. На рис. 3 приведены временные диаграммы, полученные по предложенной методике (сплошные линии) и на имитационной модели ППН (пунктирные линии).

Сравнение результатов, полученных расчётным путем и на имитационной модели, показало хорошее совпадение на начальном участке переходного процесса, что подтверждает правильность полученной аналитической модели резонансного преобразователя. Методика расчёта, аналогичная изложенной, может использоваться и для резонансных преобразователей других типов.

Литература

1. Белов Г.А. Анализ резонансного преобразователя постоянного напряжения типа LCL-T методом основной гармоники / Г.А. Белов, Г.В. Малинин, В.И. Мелешин, Ю.М. Семенов // Электротехника. – 2019. – № 8. – С. 26–31.

2. Белов Г.А. Математическое моделирование и исследование динамики импульсных преобразователей / Г.А. Белов, Г.В. Малинин // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 40–52.

3. Геращенко Е.И. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем / Е.И. Геращенко, С.М. Геращенко. – М.: Наука, 1975. – 296 с.

4. Белов Г.А. Анализ режимов преобразователя постоянного напряжения с последовательным резонансным инвертором при прерывистом токе в контуре / Г.А. Белов // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 1 (61). – С. 29–38.

Д.А. Жигальцов
(Брянск, БГТУ)

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Безындукторный мегаомметр – это измерительный прибор для измерения сопротивления изоляции, работающий от аккумуляторов или сменных гальванических батарей. Он состоит из источника

испытательного напряжения, измерительной части, определяющей протекающий под действием приложенного напряжения ток, и микропроцессорной части, обрабатывающей полученные данные.

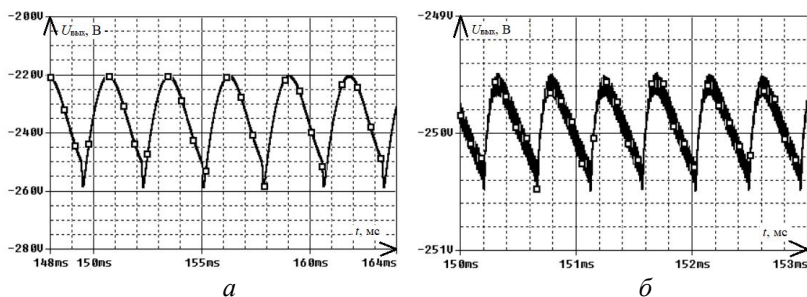
Источник испытательного напряжения мегаомметра построен на основе одноканального обратного преобразователя напряжения, обладающего высоким КПД. Разрабатываемый импульсный преобразователь при напряжении на входе, меняющемся в диапазоне 10...12 В, должен обеспечивать выходное постоянное напряжение 250 В с амплитудой пульсаций 1,25 В и выходной ток 15 мА, работая на высокоомную нагрузку.

Расчёт силовой части преобразователя произведен по стандартной методике расчёта [1]. Рассчитанные значения индуктивности и ёмкости составляют 4,5 мГн и 0,43 мкФ соответственно.

Аналоговая система управления преобразователем реализована с использованием ШИМ-контроллера MC34063 фирмы ON Semiconductor, требующего минимального количества навесных компонентов [2].

Для проверки правильности расчётов и выбора компонентов произведено моделирование обратного преобразователя в OrCAD с использованием достоверных моделей силовых полупроводниковых приборов и управляющей микросхемы.

По результатам моделирования выходное напряжение составило 240 В с амплитудой пульсаций 20 В (рисунок, а). Таким образом, можно сделать вывод, что при выбранных параметрах системы возникает неустойчивость желаемого динамического режима, что сопровождается пульсациями большой амплитуды и уменьшением среднего значения выходного напряжения.



Выходное напряжение модели преобразователя в OrCAD до (а) и после (б) параметрического синтеза

Выявленная неустойчивость желаемого динамического режима работы может быть устранена с помощью параметрического синтеза силового фильтра преобразователя. С использованием модельного проектирования были определены значения индуктивности 0,11 мГн и ёмкости 1,16 мкФ.

Результаты моделирования системы с синтезированными параметрами представлены на рисунке, б.

Как видно из рисунка, б, после параметрического синтеза выходное постоянное напряжение преобразователя составляет 250 В с амплитудой пульсаций порядка 0,5 В, что соответствует требуемым параметрам работы силовой части источника испытательного напряжения мегаомметра.

Литература

1. *Андрянов А.И.* Транзисторные преобразователи напряжения: анализ и расчёт / А.И. Андрянов. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 276 с.

2. ШИМ-контроллер MC34063. – Режим доступа: <https://www.onsemi.cn/PowerSolutions/document/MC34063A-D.pdf>.

Н.Н. Беспалов, А.Д. Ваничкин, О.Ю. Герман, Д.П. Смирнов
(Саранск, Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время основная часть регулируемого электропривода выполняется с использованием преобразователей частоты. Классическая схема преобразователя частоты представляет трёхфазный двухуровневый инвертор напряжения, питающийся от выпрямителя и звена постоянного тока. Двигатель подключается к нему через сглаживающий индуктивно-ёмкостный фильтр. Этот фильтр имеет относительно большие массу и габаритные размеры. Все эти факторы обуславливают относительно высокую стоимость преобразователя.

Повышение мощности электропривода удастся достигнуть либо увеличением токов, либо увеличением напряжения. Применение многоуровневых инверторов позволяет не только повысить максимальное рабочее напряжение, но и уменьшить габариты и массу выходного фильтра и улучшить форму выходного синусоидального напряжения преобразователя. Такие инверторы применяются не только в качестве преобразователей частоты для электропривода, но и успешно используются в бытовых и промышленных электросетях, а также потребителями, которые предъявляют высокие требования к качеству сетевого напряжения.

Целью работы было исследование зависимости пульсаций выходных сигналов от схемы инвертора при прочих равных условиях, таких как входное питание, параметры выходного фильтра и нагрузки, путём моделирования.

В качестве объектов моделирования были использованы схемы двухуровневого и четырехуровневого инверторов напряжения (рис. 1). Входное постоянное напряжение выбрано равным 540 В, что соответствует амплитудному значению выпрямленного напряжения трёхфазной промышленной сети. Питание разных уровней достигается применением конденсаторных делителей напряжения. Частота выходного сигнала равна 50 Гц, а частота ШИМ – 10 кГц.

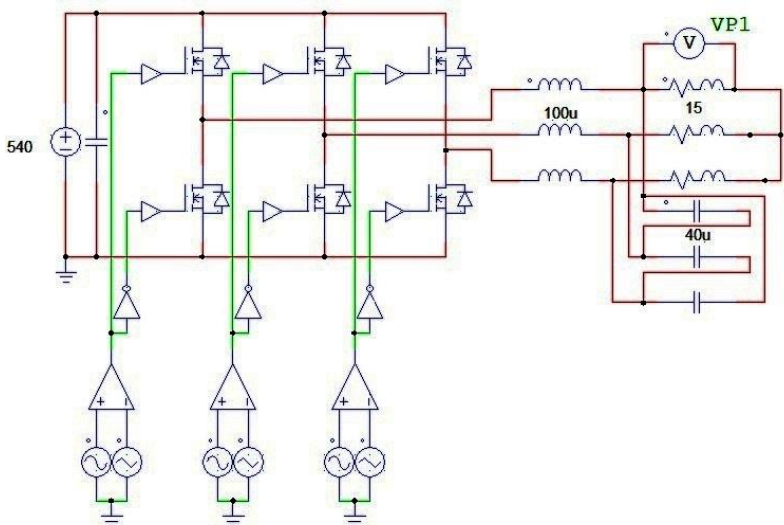


Рис. 1. Схема модели двухуровневого инвертора напряжения

Исследование схем инверторов проводилось в среде моделирования PSIM [Лит.], предназначенной для моделирования устройств силовой электроники и их систем управления. Схемы моделей изображены на рис. 1 и 2.

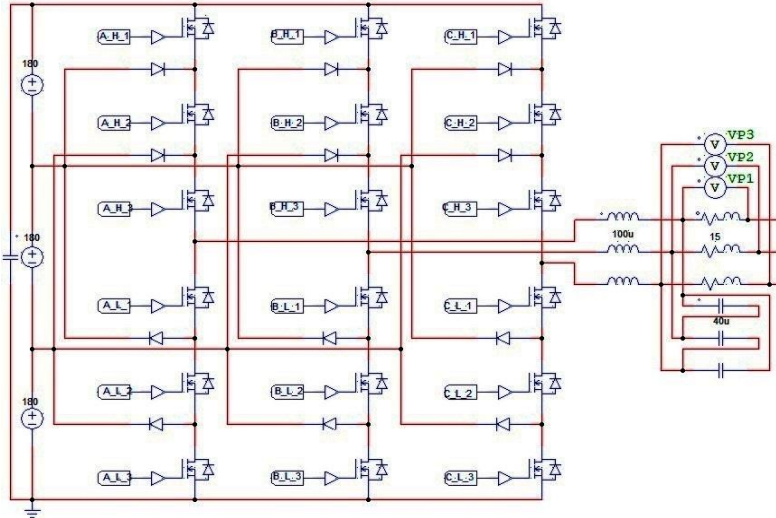


Рис. 2. Схема модели четырёхуровневого инвертора напряжения

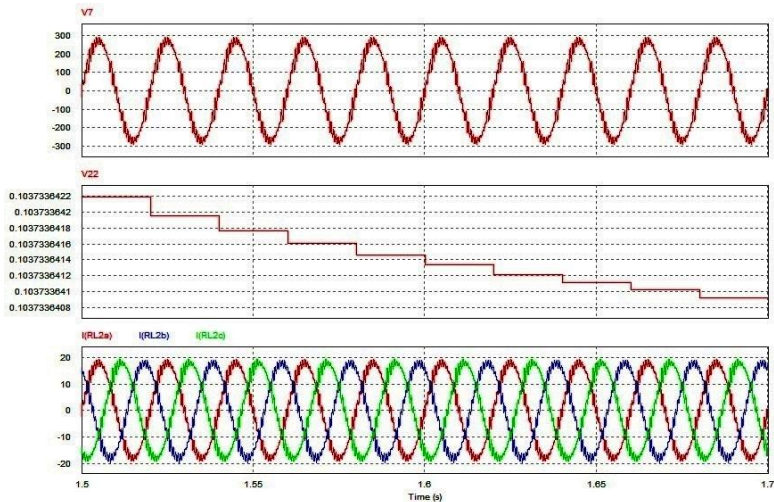


Рис. 3. Графики выходного напряжения фазы "А", значения THD и токов для двухуровневого инвертора

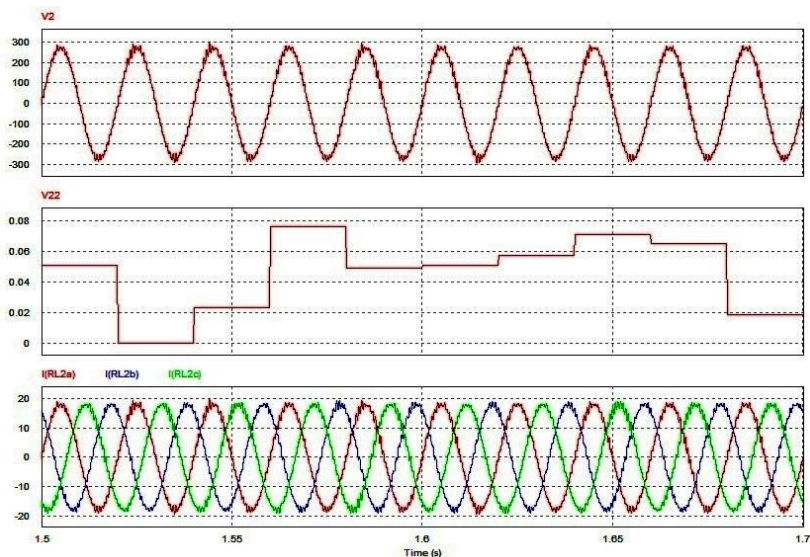


Рис. 4. Графики выходного напряжения фазы "А", значения THD и токов для четырёхуровневого инвертора

Результаты моделирования показаны на рис. 3 и 4, на которых приведены графики выходного напряжения фазы "А" после фильтра, значение THD (суммарный коэффициент гармонических искажений) и токов всех трёх фаз.

Обработка результатов моделирования инверторов показывает, что при одинаковых параметрах выходных фильтров значение THD выходного напряжения в четырёхуровневой схеме в 2,39 раз меньше, чем в двухуровневой схеме.

Полученные результаты моделирования в дальнейшем будут использованы при разработке макетного образца четырёхуровневого инвертора напряжения для определения ряда его электрических характеристик при различных нагрузках.

Литература

Система моделирования PSIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://powersimtech.com> (дата обращения: 25.04.2020).

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Нелинейная динамика импульсных преобразователей напряжения на сегодняшний день достаточно хорошо изучена, но в то же время остается открытым вопрос об разработке алгоритмов управления нелинейными динамическими процессами с целью повышения качества выходного напряжения. Повышенные пульсации напряжения, возникающие на выходе импульсных преобразователей при дрейфе параметров системы в случае неверного выбора её параметров, могут привести не только к ухудшению качества выходного напряжения, но и к распространению помех в нагрузку, а также к акустическим эффектам [1]. Поэтому разработка алгоритмов управления импульсными преобразователями напряжения, позволяющими устранять опасные колебания, не меняя ранее рассчитанные параметры системы, является актуальной задачей.

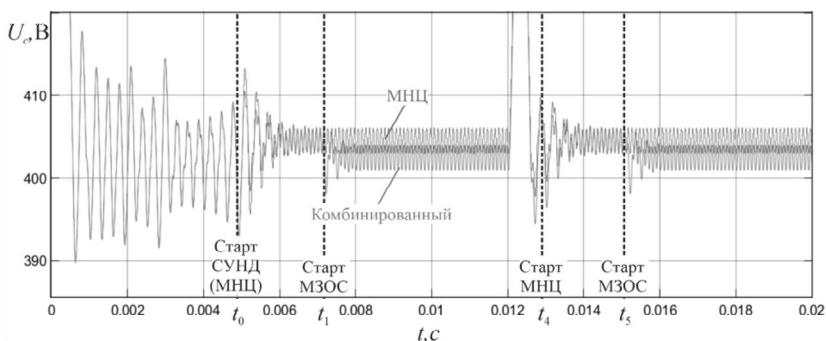
На сегодняшний день можно выделить два основных класса методов управления нелинейными динамическим процессами: методы без обратной связи и методы с обратной связью. Наиболее эффективными являются методы с обратной связью, такие как метод с запаздывающей обратной связью (МЗОС) и метод направления на цель (МНЦ), которые рассматривались автором в публикациях [2, 3] применимо к импульсным преобразователям и относящиеся к классу методов с обратной связью.

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. В частности, МЗОС позволяет обеспечить желаемый динамический режим (1-цикл) с минимальными требованиями к управляющему микроконтроллеру, но при этом не гарантирует желаемый результат в областях, когда существуют два 1-цикла и лишь один из них желаемый. МНЦ позволяет решать указанную проблему, но при этом вносит некоторую статическую ошибку в контур управления, а также предъявляет более серьезные требования к производительности управляющего микроконтроллера.

Если требуется повышенная точность импульсного преобразователя напряжения, то целесообразно использовать комбинированный алгоритм управления, когда в процессе управления в зависимости от условия участвует один из указанных методов.

В данной работе предлагается использовать комбинированный алгоритм управления импульсными преобразователями постоянного напряжения, заключающий в том, что при значительном удалении текущей рабочей точки от заданной неподвижной точки 1-цикла корректирующие воздействия системы управления нелинейными динамическими процессами (СУНДП) рассчитываются использованием МНЦ, что позволяет приблизить рабочую точку к заданной в условиях мультистабильности 1-циклов. После приближения рабочей точки к заданной расчёт корректирующих воздействий производится с использованием МЗОС, который относится к классу самосходящихся методов и не требует расчёта заданной неподвижной точки 1-цикла. Это позволяет исключить влияние погрешности расчёта заданной неподвижной точки на процесс управления и тем самым обеспечить высокую точность установки выходного напряжения.

На рисунке представлены временные диаграммы, полученные в среде MatLab/Simulink, которые демонстрируют результаты применения комбинированного алгоритма МЗОС-МНЦ, а также МНЦ.



К пояснению работы комбинированной СУНДП МЗОС-МНЦ

До момента t_0 в системе существовал хаотический режим. В момент t_0 происходит запуск алгоритма МНЦ и к моменту t_1 рабочая точка системы приближается на заданное расстояние к заданной, запускается алгоритм МЗОС и система выходит на

желаемый 1-цикл. Из рисунка видно, что в случае применения алгоритма МНЦ среднее значение выходного напряжения выше, чем при применении комбинированного алгоритма МЗОС-МНЦ, что, как упоминалось ранее, связано с появлением не-большой статической ошибки при использовании МНЦ.

В момент t_4 в систему вводится помеха, приводящая к удалению системы от заданной неподвижной точки 1-цикла и все этапы работы комбинированной системы управления повторяются.

Таким образом, предлагаемый алгоритм управления нелинейными динамическими процессами обеспечивает точность установки выходного напряжения преобразователя как алгоритм МЗОС, но при этом позволяет эффективно осуществлять переход к желаемому 1-циклу в области одновременного существования двух и более 1-циклов, что невозможно обеспечить при МНЦ.

Литература

1. *Zhusubaliyev Zh.T.* Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems / *Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde.* – Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 2003. – 376 p.

2. *Андрянов А.И.* Применение адаптивного метода с запаздывающей обратной связью для управления транзисторными преобразователями постоянного напряжения / *А.И. Андрянов* // Вестник МЭИ. – 2015. – № 5. – С. 111–117.

3. *Andriyanov A.I.* Parameters adaptation for target-oriented control of the buck converter / *A.I. Andriyanov* // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016. – 2016. – PP. 1–6.

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Ю.В. Павлов, В.М. Яров
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

СДВОЕННЫЕ ОДНОТАКТНЫЕ КОНВЕРТОРЫ

Однотактный прямоходовой мостовой конвертор (рис. 1) нашел широкое применение в качестве DC-DC источников уже после первой публикации о нем [1].

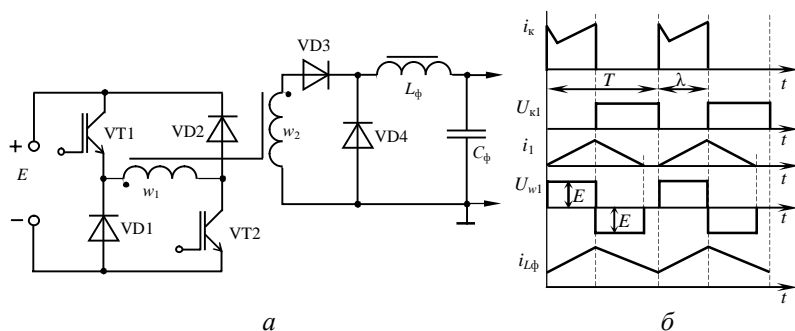


Рис. 1. Однотактный прямоходовой конвертор: схема (а); временные диаграммы работы (б)

Расширению возможностей конвертора и преодолению его недостатков посвящено много публикаций, обзор некоторых из них выполнен в [2].

Рассмотрим как последовательное или параллельное соединение однотактных конверторов может составить конкуренцию двухтактным преобразователям применительно к распределённым системам.

В распределённой системе электропитания выпрямленное и отфильтрованное напряжение первичной сети преобразуется основным DC-DC преобразователем до уровня напряжения промежуточной шины, а затем распределяется по системе. К промежуточной шине непосредственно у потребителя подключены DC-DC преобразователи, обеспечивающие требуемое напряжение. Передача энергии происходит на высоком напряжении и, соответственно, при малых токах, что позволяет минимизировать потери.

При питании конвертора от трёхфазной сети необходимо применять транзисторы с напряжением $U_{кз} > 900$ В. Если последовательно по питанию включить более низковольтные приборы, имеющие преимущество по быстродействию и напряжению насыщения, то это обеспечит более высокий КПД, несмотря на последовательное включение двух транзисторов вместо одного.

На рис. 2 представлена реализация способа последовательного включения двух однотактных конверторов [3]. Максимальное напряжение на транзисторах не превышает $0,5E$.

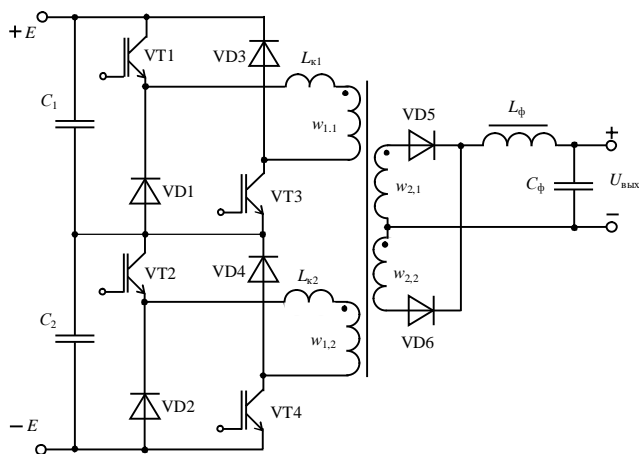


Рис. 2. Схема сдвоенного последовательно конвертора ($L_{к1}$, $L_{к2}$ – индуктивности рассеяния)

В конверторе магнитопровод трансформатора перемagnичивается аналогично трансформаторам двухтактных конверторов, но без присущих мостовым конверторам с фазоимпульсным управлением недостатков: нет необходимости в дополнительных компонентах, формирующих квазирезонансный характер коммутации, не теряется способность мягкой коммутации на малых нагрузках.

Алгоритм переключения транзисторов показан на рис. 3.

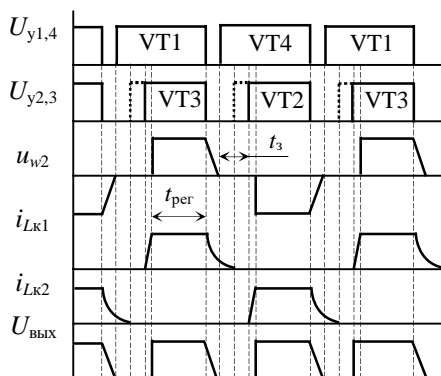


Рис. 3. Диаграммы токов и напряжений сдвоенного конвертора

Перечислим особенности алгоритма. Во-первых, транзисторы в каждом модуле выключаются одновременно, а включаются

с некоторой задержкой t_3 . Во-вторых, транзисторы VT1, VT4 (VT2, VT3) управляются парафазными импульсами. В-третьих, VT1 и VT4 переключаются с фиксированным и максимальным коэффициентом заполнения, а VT2 и VT3 – с изменяемой длительностью проводящего состояния $t_{\text{пер}}$, за счёт чего и реализуется регулирование выходного напряжения.

Расчёт параметров силовой части конвертора можно выполнить в соответствии с [4, 5] с учетом того, что к трансформатору прикладывается $U_1 = 0,5E$. Для проверки достоверности расчёта выполнено моделирование режимов работы конвертора в Simulink Matlab [6]. Результаты предварительного расчёта и поверочного моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сдвоенный последовательно конвертор

Параметр	U_n	I_n	I_d	I_k	I_{kt}	I_a	U_1	U_2	I_1	I_2	η
	В	А					В		А		%
Предварительный расчёт	48	120	11,88	23,8	32,35	1,77	255	77	29,87	108,9	95
Моделирование	48,05	120,1	12,01	15,7 13,77	37,4	2,04	255	77	24,1	109,2	94,2

Нагрузочная характеристика сдвоенного последовательно конвертора $U_n = f(I_n)$ представлена на рис. 4, а, для сравнения там же пунктирной линией показана нагрузочная характеристика двухтактного мостового конвертора с фазоимпульсным управлением, но без компонентов, обеспечивающих режим мягкого переключения транзисторов. Для сдвоенного конвертора характеристика более мягкая.

На рис. 4, б показаны зависимости КПД конверторов от тока нагрузки, а пунктирной линией – зависимость $\eta = f(I_n)$ для мостового двухтактного. КПД сдвоенного последовательно конвертора существенно выше.

При низком входном напряжении, например, напряжении промежуточной шины и больших токах однотактные конверторы включают параллельно по входу, а к выходу подключают обмотки трансформатора (рис. 5).

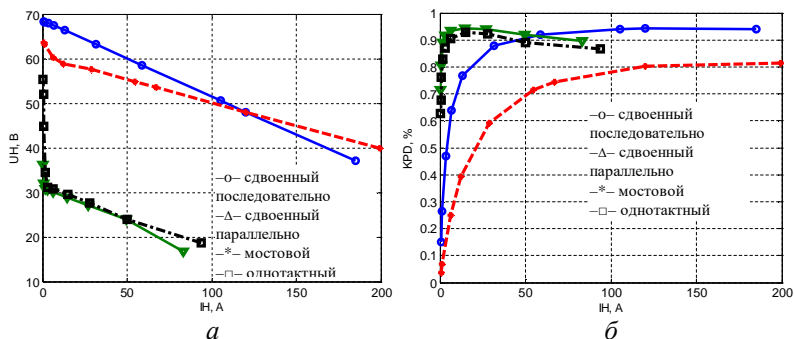


Рис. 4. Характеристики конверторов: нагрузочные (а); зависимости $\eta = f(I_n)$ конверторов (б)

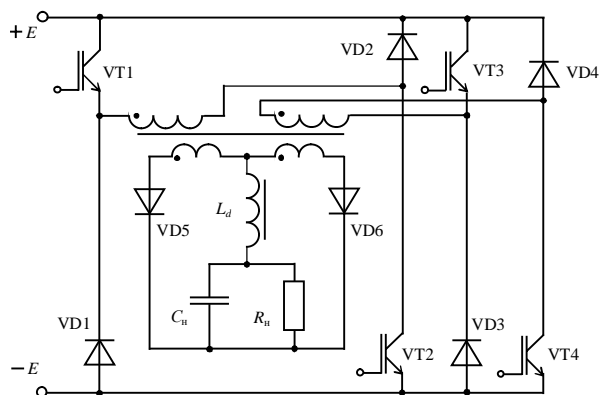


Рис. 5. Схема параллельного включения однотактных конверторов

Расчёт параметров силовой части конвертора так же можно выполнить на основе [4, 5] с учетом того, что выходной ток одного конвертора равен $0,5I_n$. Результаты предварительного расчёта и поверочного моделирования двоянного параллельно конвертора приведены в табл. 2.

Линией с отсчётами, изображенными треугольниками, на рис. 4 приведены соответствующие характеристики параллельно двоянного конвертора. Штрихпунктирной линией показаны характеристики однотактного конвертора, рассчитанного на такой же режим работы. Напряжение холостого хода у двоянного параллельно конвертора значительно меньше, а значение КПД несколько выше, чем у однотактного.

Таблица 2

Сдвоенный параллельно конвертор

Параметр	U_n	I_n	I_d	I_k	$I_{кт}$	U_1	U_2	I_1	I_2	η
	В	А				В		А		%
Предварительный расчёт	24	50	27,77	15,5	37,36	48	40	19,5	38,97	90
Моделирование	23,87	49,74	26,87	15,78	41,4	48	39	26,74	44,9	92

Вывод. Сдвоенные варианты конверторов с последовательным или параллельным соединением однотактных конверторов могут конкурировать по энергетической эффективности с мостовыми конверторами с фазовым управлением и однотактными.

Литература

1. *Wolf G.* Mains isolating switching mode power supply / G. Wolf // Philips Electronic Application Bulletin. – 1973. – Vol. 32, No. 1.
2. *Петров С.* Однотактный прямоходовой мостовой конвертор: области применения и развитие схемотехники / С. Петров // Силовая электроника. – 2009. – № 5. – С. 74–81.
3. *Ghodke D.V.* ZVZCS, dual, two transistor forward DC-DC converter with peak voltage of $V_{in}/2$, high input and high power application / D.V. Ghodke, K. Muralikrishnan // IEEE Power Electronics Specialits Conference. – 2002. – Vol. 4. – PP. 1853–1858.
4. *Эраносян С.А.* Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями / С.А. Эраносян. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 176 с.
5. *Китаев В.Е.* Расчёт источников электропитания устройств связи / В.Е. Китаев, А.А. Бокуняев, М.Ф. Колканов. – М.: Радио и связь, 1993. – 232 с.
6. *Лазарева Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА ИНВЕРТОРА

Для получения синусоидального напряжения на нагрузке вторичного источника питания используется инвертор. Реализуются инверторы с использованием различных схемотехнических решений, но в любом варианте в результате формирования кривой напряжения посредством переключения силовых вентиля напряжение на выходе источника не является идеальной синусоидой. Наличие высших гармонических составляющих в напряжении нагрузки, искажающих его форму – неизбежное зло, влияние которого нужно и можно снижать.

В соответствии с ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», регламентирующим качество питающей сети в России, значение коэффициента гармоник не должно превышать 2 % [1]. Как следствие, возникает необходимость устанавливать на выходе преобразователя фильтры для подавления высокочастотных гармонических составляющих, так как многие потребители рассчитаны на синусоидальное питающее напряжение. В доступной литературе не приводятся аналитические выражения для расчёта параметров выходных фильтров инверторов, обеспечивающих заданное значение коэффициента гармоник (в соответствующем европейском стандарте коэффициент гармоник принято обозначать как *THD* – Total Harmonic Distortion), поэтому оценку выполняют экспериментально, как правило, с использованием технологий компьютерного моделирования [2–6].

Коэффициент гармоник напряжения на выходе однофазного *LC*-фильтра можно определить по соотношению [2]

$$K_r = \sqrt{\frac{p^2 \frac{1}{C} - \frac{1}{wLC} \frac{U_q^2}{\omega^2}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{wLC} \frac{U_q^2}{\omega^2}} - \frac{1}{wLC} \frac{U_q^2}{\omega^2}}, \quad (1)$$

$$(N+1)^2 \sin^2 \frac{\pi}{N+1}$$

где U_q – амплитуда q -й гармоники напряжения; N – номер первой учитываемой низшей из высших гармоник (для вычисления показателей качества электрической энергии, в соответствии с ГОСТ 13109-97 учитываются гармоники вплоть до 21-й); $g = t_n/T$ – глубина регулирования (коэффициент заполнения).

По формуле (1) можно построить график зависимости $K_r = f(\omega^2 LC)$. Задаваясь коэффициентом гармоник и глубиной регулирования для заданной частоты выходного напряжения, можно определить значение произведения LC и решить, как вычислить L или C .

При известном значении LC в [5] предлагается задаться начальными параметрами фильтра, например, индуктивностью дросселя, а ёмкость конденсатора найти из условия равенства волнового сопротивления фильтра сопротивлению нагрузки для исключения резонансных явлений на одной из высокочастотных гармонических составляющих

$$C = L/R_n^2. \quad (2)$$

В качестве рабочего инструмента использовалась система компьютерной математики MathCAD [7]. Намного комфортнее применять Matlab и пакет его расширения Simulink [8]. В этом случае технология решения задачи может быть, например, такой. Из блоков компонентов силовой электроники библиотеки SimPowerSystems собирается виртуальная модель инвертора (рис. 1).

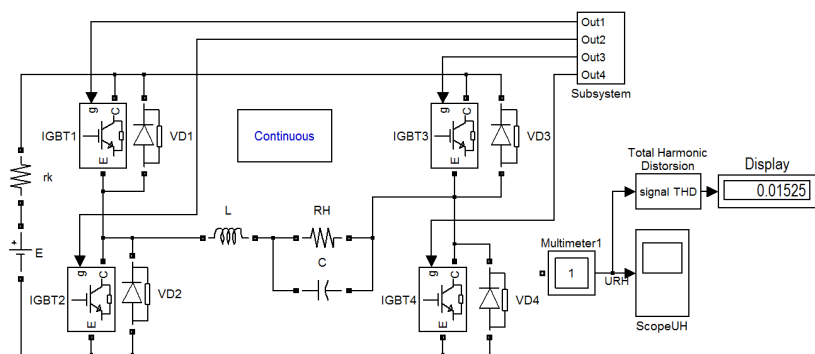


Рис. 1. Simulink-модель инвертора с синусоидальной ШИМ

Задается начальное значение индуктивности фильтра, ёмкость конденсатора рассчитывается по соотношению (2). Выполняется имитационное моделирование, по результатам которого с помощью специального *SPS*-измерителя *THD*, в блоке настроек которого указана частота напряжения потребителя 50 Гц, для заданных C и L определяется значение коэффициента гармоник. На рис. 1 в экране дисплея Display отображено значение $K_r = 1,525\%$. В данном эксперименте частота инвертирования установлена равной 5 кГц, $L = 900$ мкГн. Поскольку при моделировании режимов работы инвертора сопротивление нагрузки было принято $R_n = 10$ Ом, то в соответствии с (2) для каждого значения L ёмкость конденсатора фильтра определялась как $C = 0,01L$.

Последовательность значений K_r получают, изменяя L с некоторым шагом, например, 0,25 мГн, и одновременно пересчитывая по (2) значение C . По окончании серии экспериментов, имитирующих работу инвертора, в Matlab строится график зависимости $K_r = f(L)$ (рис. 2), по которому определяются значения индуктивности дросселя и ёмкости конденсатора, обеспечивающие требуемое значение коэффициента гармоник.

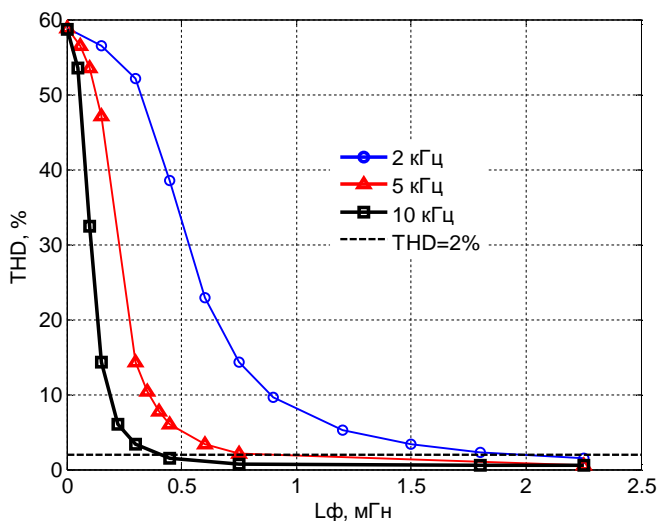


Рис. 2. Зависимость коэффициента гармоник от индуктивности фильтра

На рис. 2 зависимость значения коэффициента гармоник от параметров LC -фильтра показана для трёх значений частоты инвертирования. Совокупность представленных кривых демонстрирует известное положение о том, что с увеличением частоты параметры компонентов фильтра, а значит и его габариты, уменьшаются.

Фрагменты осциллограмм напряжения нагрузки, полученные в результате моделирования для разных параметров LC -фильтра, представлены на рис. 3.

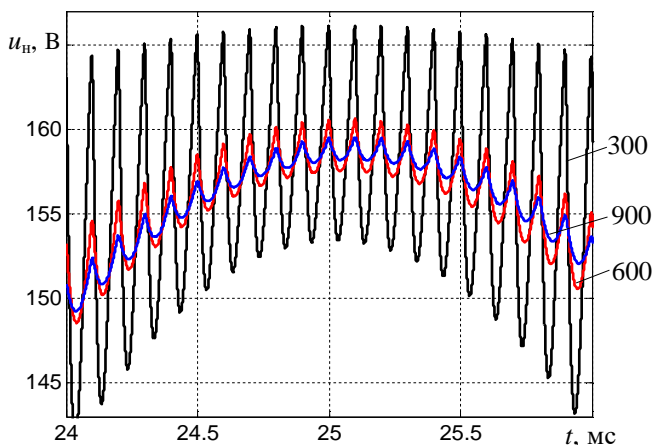


Рис. 3. Фрагмент временных диаграмм напряжения нагрузки для трёх значений индуктивности фильтра

Предложенный подход к решению задачи не требует, как это необходимо в методике, рассмотренной в [5], отдельного вычисления спектра амплитуд гармонических составляющих на основе ДПФ, вычисления функции коэффициента передачи фильтра в зависимости от номера гармоники, перемножения каждой гармонической составляющей выходного напряжения инвертора на коэффициент передачи фильтра и вычисления кривой напряжения нагрузки.

Литература

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия, совместимость технических средств, электромагнитные нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения // Портал ГАРАНТ.РУ (Garant.ru).

2. Букреев С.С. Источники вторичного электропитания / С.С. Букреев, В.А. Головацкий, Г.И. Гулякович и др.: под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.

3. Малышков Г.М. Расчёт однозвенного фильтра инверторов / Г.М. Малышков // Электронная техника в автоматике: сб. статей / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1984. – Вып. 15. – С. 130–137.

4. Барегамян Г. Выбор параметров LC-фильтра инвертора с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением / Г. Барегамян // Силовая электроника. – 2011. – Т. 1, № 29. – С. 50–56.

5. Захаров А. Расчёт выходного фильтра ШИМ-инвертора на заданный коэффициент гармоник напряжения нагрузки / А. Захаров // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 46–49.

6. Быков К.В. Транзисторный инвертор с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией / К.В. Быков, Н.М. Лазарва, Д.Г. Малышев и др. // Информационные технологии в электро-технике и электроэнергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 390–392.

7. Лазарева Н.М. Пакеты математического моделирования. MathCAD / Н.М. Лазарева. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 184 с.

8. Лазарева Н.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Ю.В. Павлов, В.М. Яров
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

КОМБИНИРОВАННЫЕ ОДНОТАКТНЫЕ КОНВЕРТОРЫ

В однотоктных прямо- и обратногоходоном конвекторех с гальванической развязкой энергия от первичного источника потребляется один раз за период, что требует увеличения входного и выходного фильтров, а напряжение нагрузки в режиме, близком к холостому ходу, выше, чем с двухтактными конвекторехми. Поэтому в работе [1] было предложено объединить в одном преобразователе оба режима: на одном полупериоде конвектор работает как прямо-

ходовой, а в другом – как обратноходовой, обеспечивая таким образом двухразовое подключение нагрузки к источнику. Однако при переходе от одного режима к другому возникают существенные перенапряжения на транзисторе, поэтому параллельно первичной обмотке подключают демпфирующую цепь VT2, C, VD3 [1].

Транзисторы отпираются противофазно: когда VT1 открыт, VT2 закрыт, и наоборот.

При включенном транзисторе VT1 (интервал $t_{\text{и}} = gT$ на рис. 1, б) диоды VD2 и VD3 закрыты, и преобразователь является аналогом прямоходового конвертора. Энергия от источника входного напряжения через трансформатор по обмотке w_2 и диод VD1 передается в нагрузку и накапливается в индуктивностях дросселя фильтра L и трансформатора TV.

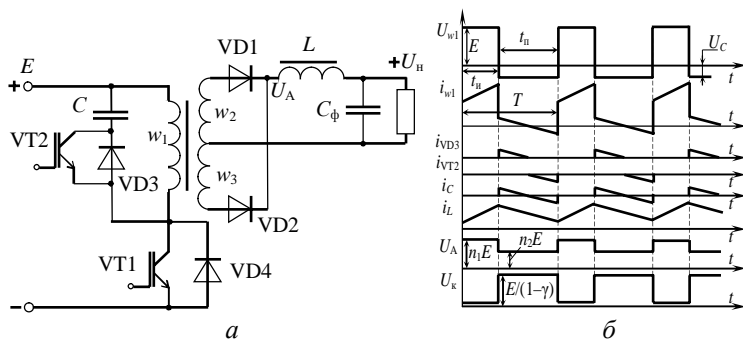


Рис. 1. Однотактный конвертор с передачей энергии в импульсе: схема (а); временные диаграммы работы (б)

После запираания транзистора VT1 и отпираания VT2 закрывается диод VD1, преобразователь становится подобным обратноходовому конвертору. Компоненты C, VD3, VT2 совместно с обмоткой w_1 трансформатора обеспечивают это подобие. Энергия, накопленная в магнитном поле сердечника трансформатора, в виде импульса тока передается через диод VD2 в нагрузку.

Для уменьшения выбросов напряжения рекомендуется для обмоток трансформатора выполнять равенство $w_2 = w_3$ и осуществлять бифилярную намотку. В этом случае $n_1 = w_2/w_1$ и $n_2 = w_3/w_1$ равны. Обратный диод VD4 устраняет режим прерывистого тока в индуктивности дросселя, переводя преобразова-

тель в обратимый режим, обеспечивающий работоспособность конвертора при холостом ходе.

Анализ процессов в схеме выполнен в [1], а более подробно в [2], однако не рассмотрены статические характеристики преобразователя. Для построения характеристик было выполнено имитационное моделирование режимов работы конвертора в Simulink Matlab [4], результаты которого приведены в таблице в первой строке.

Результаты моделирования

Параметр	U_n	I_n	I_d	I_k	I_{km}	U_1	U_2	I_1	I_2	η
	В	А				В		А		%
Схема рис. 1	23,95	49,89	31,72	31,72	74,6	48	35	43,01	39,53	78,48
Схема рис. 3	24,15	50,27	28,14	39	106	24	50	67	32,05	89,88

Нагрузочная характеристика $U_n=f(I_n)$ конвертора показана на рис. 2, а, там же пунктирной линией показана зависимость максимального напряжения $U_{к.мах}$ от тока нагрузки. Увеличение тока нагрузки приводит к росту напряжения на транзисторе. На рис. 2, б показана зависимость КПД конвертора от тока нагрузки.

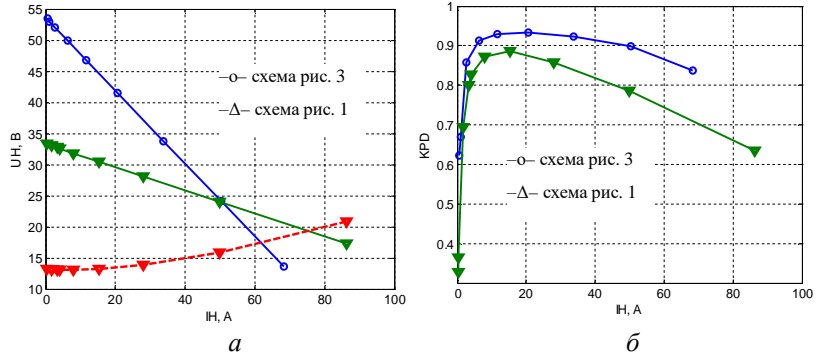


Рис. 2. Характеристики конверторов:
нагрузочные (а) (пунктиром показана зависимость $0,1U_{к.мах}=f(I_n)$;
зависимости $\eta=f(I_n)$ (б)

Разделение силового трансформатора на два в двухтактных конверторах известно давно [2, 5]. В первый полупериод один трансформатор передает энергию в нагрузку, а другой выполня-

ет функцию дросселя. Во второй полупериод наоборот – второй трансформатор передает энергию в нагрузку, а первый выполняет функцию дросселя. В [3] предложен одноктактный конвертор с двумя трансформаторами, реализующими комбинацию прямо- и обратногоходовых конверторов (рис. 3).

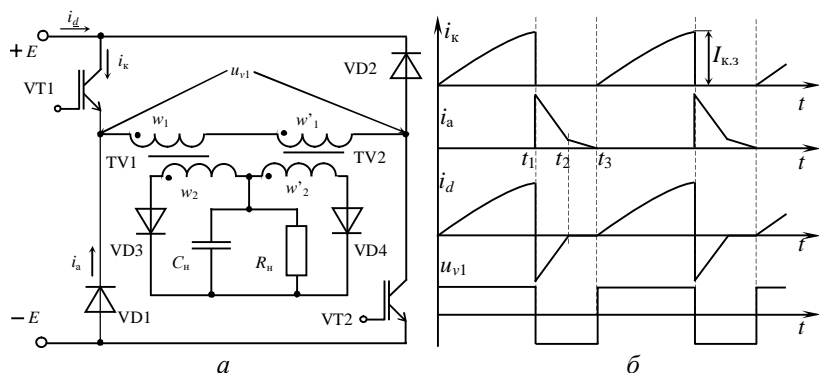


Рис. 3. Одноктактный конвертор с двумя трансформаторами: схема (а); временные диаграммы работы (б)

Трансформатор TV1 играет роль прямоходового, а TV2 – обратногоходового.

В [3] использован граничный режим управления, заключающийся в том, что включение транзисторов происходит в моменты времени, когда ток в первичной обмотке равен нулю, а выключаются они, когда ток транзисторов достигает заданного значения $I_{к.з}$ (рис. 3, б).

При зарядке аккумуляторов такой режим управления позволяет обеспечить постоянство тока зарядки без введения обратной связи по току. Регулирование тока нагрузки осуществляется изменением частоты, при этом трансформаторы необходимо рассчитывать на минимально возможную частоту. Так для изменения тока нагрузки в пять раз, частоту управления необходимо изменить в пять раз.

Для уменьшения влияния конвертора на питающую сеть расчёт входного фильтра необходимо выполнять с учетом изменения частоты управления. Поэтому при изменяющейся в широких пределах нагрузке используют управление с постоянной частотой. Временные диаграммы токов и напряжений конвертора для управления с постоянной частотой приведены на рис. 4.

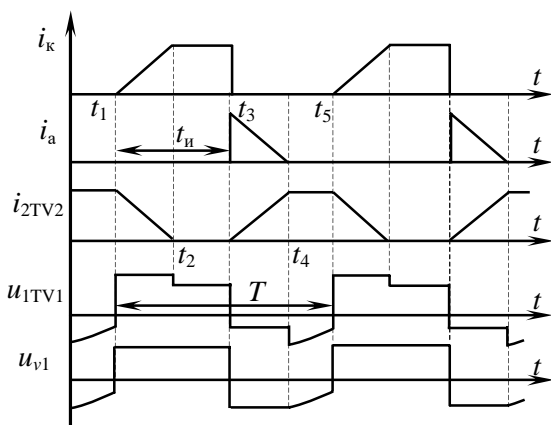


Рис. 4. Временные диаграммы токов и напряжений

В момент t_1 отпираются транзисторы VT1, VT2. Ток в первичной обмотке трансформатора TV1 возрастает, а в обмотке трансформатора TV2 уменьшается.

В момент t_2 ток i_2 TV2 спадает до нуля, а напряжение на первичной обмотке трансформатора уменьшается, что приводит к снижению скорости нарастания тока i_k .

В момент t_3 транзисторы запираются. На интервале t_3-t_4 энергия, накопленная в трансформаторе TV1, возвращается в источник питания через диоды VD1, VD2. Одновременно увеличивается ток в обмотках трансформатора TV2. Диод VD4 отпирается и энергия, накопленная в трансформаторе TV2, передается в нагрузку на интервале t_4-t_5 , и напряжение u_{v1} (см. рис. 3, а) уменьшается.

Результаты моделирования режима работы однотактного конвертора с двумя трансформаторами приведены во второй строке приведённой выше таблицы. Нагрузочная характеристика преобразователя показана на рис. 2, а, а зависимость КПД от тока нагрузки – на рис. 2, б. В отличие от схемы, приведенной на рис. 1, при изменении сопротивления нагрузки в схеме рис. 3 отсутствуют перенапряжения на компонентах конвертора, а КПД выше. Недостатком схемы является более резко падающий характер нагрузочной характеристики, поэтому для стабилизации напряжения нагрузки необходима система управления с обратной связью по напряжению.

Вывод. Разделение силового трансформатора на два устраняет коммутационные перенапряжения, повышает КПД и облегчает тепловой режим за счёт увеличения поверхности охлаждения трансформатора.

Литература

1. *Поликарпов А.Г.* Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА / А.Г. Поликарпов, Е.Ф. Сергиенко. – М.: Радио и связь, 1980. – 160 с.
2. *Мелешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. *Матвеев К.* Однотактный комбинированный преобразователь / К. Матвеев, В. Скворцов // Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 56–59.
4. *Лазарева Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.
5. *Гусев Б.* Транзисторный двухтрансформаторный мостовой преобразователь постоянного напряжения / Б. Гусев, Д. Овчинников // Силовая электроника. – 2005. – № 2. – С. 48–52.

Н.В. Донской, А.Г. Сергеев
(Чебоксары, ОАО «ВНИИР»)

РЕЖИМ САМОЗАПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Известно, что надёжность работы тепловых и насосных станций можно повысить, если при кратковременных снижениях или полном исчезновении питающего напряжения не отключать от сети электроприводы ответственных механизмов (дутьевых вентиляторов, дымососов, сетевых насосов и т.п.) [1, 2]. Тогда после восстановления нормального напряжения начинается их самозапуск.

Самозапуском называется восстановление нормального режима работы электродвигателя с механизмом без вмешательства эксплуатирующего персонала после кратковременного перерыва или глубокой просадки питающего напряжения.

В большинстве случаев в электроприводах с полупроводниковыми преобразователями частоты самозапуск реализуется с выключе-

чением силовых ключей (транзисторов) после снижения или исчезновения питающего напряжения [2, 3]. В этом случае двигатель во время отсутствия входного напряжения обесточивается и находится на «выбеге», частота вращения вала снижается за счёт момента сопротивления нагрузочного механизма. Алгоритм самозапуска заключается в поиске частоты вращения к моменту восстановления напряжения и включения транзисторов. Особенностью такого способа является выбор критерия завершения поиска частоты, что приводит к определённым трудностям при реализации. При неправильном выборе момента включения транзисторов наблюдаются большие броски тока.

В преобразователе частоты типа ABS-DRIVE производства ОАО «ВНИИР» [4] алгоритм самозапуска реализован без выключения транзисторов при провалах входного напряжения. В режиме векторного управления (рис. 1) при понижении или отсутствии напряжения транзисторы остаются в работе и происходит управляемое снижение угловой скорости двигателя. При этом регулятор скорости переводится в специальный режимы работы, обеспечивающий поддержание напряжения в звене постоянного тока за счёт кинетической энергии маховых масс.

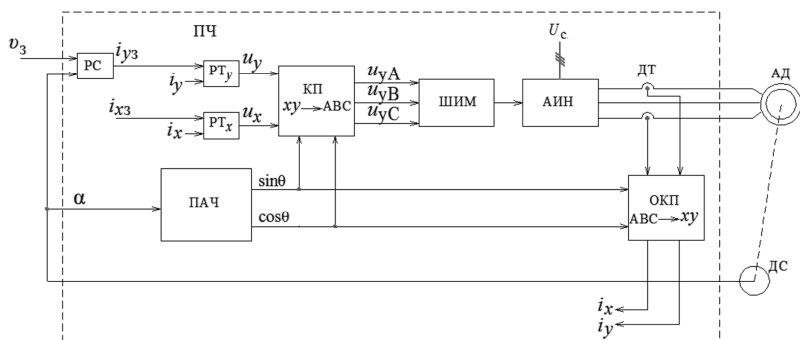


Рис. 1

Ток в этом режиме составляет 10–15 % от номинального тока двигателя. Преимуществом такого способа является то, что частота вращения двигателя постоянно контролируется и управляется во время отсутствия входного напряжения и, соответственно, нет необходимости в поиске частоты. При восстановлении напряжения начинается разгон двигателя, начиная с той

частоты, которая существует в этот момент. Данный алгоритм исключает появление бросков тока в режиме самозапуска.

Вышеописанный алгоритм самозапуска опробован на нескольких объектах заказчиков: на сетевых насосах котельных, на насосах нефтеперекачивающих станций. При провалах напряжения преобразователь частоты штатно отработывал алгоритм самозапуска и насосы оставались в работе.

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы входного и выходного напряжений, напряжения звена постоянного тока и тока двигателя, полученные на встроенном осциллографе реального времени преобразователя частоты ABS-DRIVE в момент провала (рис. 2) и восстановления (рис. 3) входного напряжения при работе двигателя 4АЗМ-1600/6000 УХЛ4 с насосным агрегатом на частоте 45 Гц. Ток в нормальном режиме работы составлял 124 А. При длительности провала напряжения 1,6 с ток в режиме поддержания напряжения звена постоянного тока составил 36 А, частота во время отсутствия напряжения снизилась до 21 Гц.

Таким образом, с применением в преобразователях частоты предложенного алгоритма самозапуска упрощается система регулирования и повышается надёжность технологических процессов.

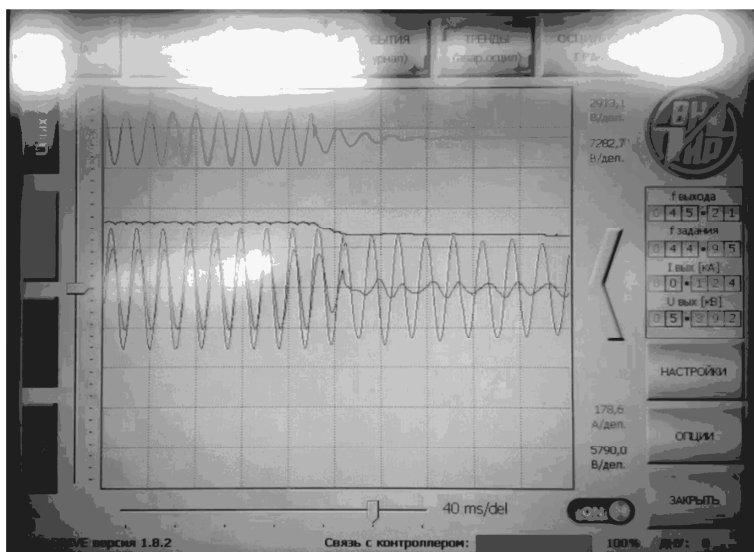


Рис. 2

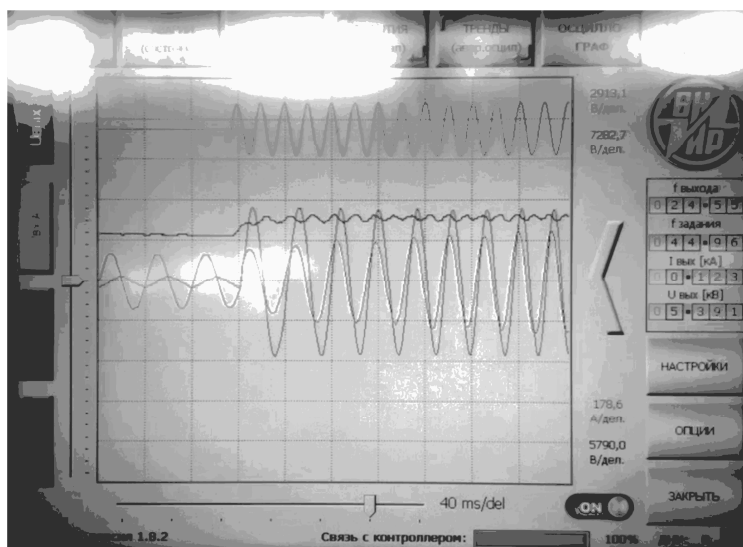


Рис. 3

Литература

1. *Голоднов Ю.М.* Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
2. *Султанов А.Т.* Требования к частотно-регулируемым электроприводам по обеспечению режима самозапуска [Электронный ресурс] / А.Т. Султанов, Г.Б. Лазарев. – Режим доступа: <http://www.center-enel.ru/publ4.html/> (дата обращения: 25.04.2020).
3. *Митюков П.В.* Особенности реализации режимов сохранения работоспособности автоматизированного асинхронного электропривода при кратковременных провалах и прерываниях питающего напряжения / П.В. Митюков, К.А. Чубуков // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА». Вып. V. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2016. – С. 86–92.
4. *Семенов А.Г.* Высоковольтные частотные электроприводы серии ABS-DRIVE-2 / А.Г. Семенов, Н.В. Донской, Т.Г. Глухенький, А.Г. Сергеев // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизиров. электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за выпуск И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 457–460.

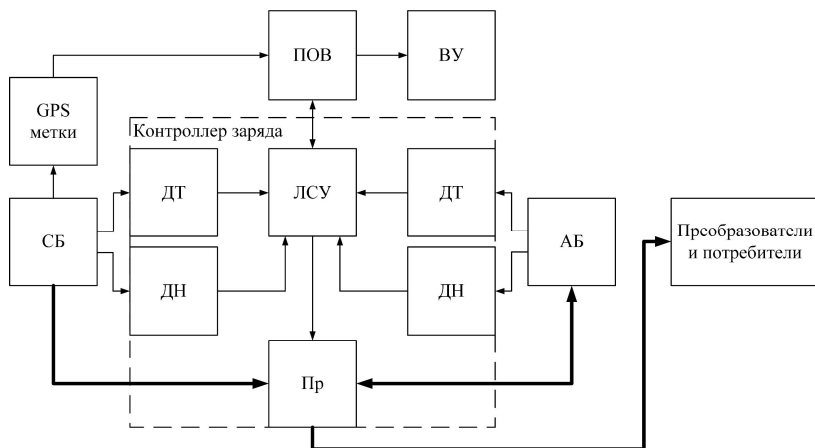
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ И АККУМУЛЯТОРОВ В СОСТАВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В современном мире всё большее распространение начинают получать энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии, при этом одними из наиболее перспективных являются солнечные энергоустановки. Типовая энергоустановка включает в себя следующие устройства: 1) солнечная панель или их батарея; 2) контроллер заряда аккумуляторов; 3) аккумуляторная батарея; 4) преобразователи напряжения. Повышенное внимание должно уделяться именно солнечным панелям и аккумуляторам, потому что они являются наиболее уязвимыми и дорогими элементами установки.

Основной целью данной работы является разработка комплексной системы диагностики технического состояния солнечной энергоустановки. При этом для диагностики солнечной панели предлагается использовать статистический анализ электрических флуктуаций, наблюдаемых в процессе работы, а для аккумуляторов – метод диагностики по переходным характеристикам [3]. Оба метода подразумевают измерение токов и напряжений солнечной панели и аккумуляторной батареи и требуют дополнительного измерительного оборудования. Прямое подключение аккумуляторов к солнечным панелям не используется из-за невозможности обеспечения правильного режима их заряда и разряда. Для решения этой проблемы используются контроллеры заряда, наиболее перспективными среди которых являются контроллеры, реализующие алгоритм ПТММ (поиск точки максимальной мощности, *maximum power point tracking*, MPPT). Таким образом, типовой контроллер заряда имеет функциональные возможности для проведения указанных выше диагностических процедур. Сдерживающим фактором является недостаточная чувствительность измерителей напряжения и ограниченная производительность управляющего микроконтролле-

ра. В работе предлагается модернизация контроллера заряда, позволяющая проводить необходимые измерения и передавать данные на удаленный сервер для проведения их обработки.

Предложенная система может представлять собой контроллер заряда аккумуляторов для солнечных энергоустановок на базе алгоритма ПТММ, который в своей базе оснащен датчиками тока и напряжения. Таким образом, предложенная система может иметь следующую структурную схему (рисунок).



Структурная схема системы управления и диагностики солнечной энергоустановки: ПОВ – платформа облачных вычислений, ВУ – визуализирующее устройство, СБ – солнечная батарея, АБ – аккумуляторная батарея, ДТ – датчики тока, ДН – датчики напряжения, ЛСУ – локальная система управления, Пр – преобразователь/исполнительное устройство

Диагностика солнечных панелей с помощью предложенной системы работает следующим образом: ЛСУ вычисляет параметры электрических флуктуаций (математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и другие статистические параметры) солнечных панелей с помощью датчиков тока и напряжения и отправляет их на ПОВ для дальнейшего анализа, в ПОВ также реализован алгоритм ПТММ. В зависимости от полученных данных в ПОВ принимается решение об изменении рабочей точки солнечной панели и на ВУ выдается результат диагностики панелей. Для обеспечения необходимой точности измерения шумовых характеристик в работе используется АЦП с высокой разрядностью 24 бит.

Диагностика аккумуляторов осуществляется по результатам анализа переходных характеристик для анализа состояния аккумуляторов, полученных путем модуляции нагрузки. Для реализации подобной системы достаточно использование недорогих средств, позволяющих коммутировать дополнительную нагрузку. Диагностика аккумуляторов с помощью предложенной системы работает следующим образом: в процессе разряда аккумуляторов осуществляется измерение их переходных характеристик, ЛСУ выполняет фитинг параметров эквивалентной схемы и отправляет их в ПОВ, которая выводит результат диагностики аккумуляторов на ВУ.

Предложенная система позволит осуществлять удаленный мониторинг состояния солнечных энергоустановок и управление режимами работы таких установок.

Литература

1. *Luque A.* Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / A. Luque, S. Hegedus. – 2nd Edition, March 2011. – 205 p.
2. *Tiwari G.N.* Handbook of Solar Energy. Theory, Analysis and Applications / G.N. Tiwari, T.S. Arvind. – 2016. – 774 p.
3. *Denisov E.* Lithium Battery Transient Response as a Diagnostic Tool / E. Denisov, R. Nigmatullin, Y. Evdokimov, G. Timergalina // Journal of Electronic Materials. – 2018. – Vol. 47, Is. 8. – PP. 4493–4501.

А.Н. Школин, А.Ю. Дракин
(Брянск, БГТУ)

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Получение и анализ частотных характеристик (ЧХ) при проектировании таких нелинейных систем как импульсный преобразователь является важным этапом с точки зрения обеспечения устойчивой работы разрабатываемых устройств электропитания. На сегодня существуют способы оценки частотных свойств импульсных преобразователей, например [1], которые хорошо себя зарекомендовали при их реализации посредством

натурного эксперимента, выполняемого на уже изготовленном преобразователе или его макете. Однако, в процессе модельно-ориентированного подхода к проектированию импульсных преобразователей важной задачей является минимизация вычислительных затрат ЭВМ при получении ЧХ нелинейной модели разрабатываемого импульсного преобразователя. Эта проблема является наиболее актуальной при построении ЧХ на основе расчёта во времени переходных процессов для временных интервалов, существенно превышающих тактовый интервал работы преобразователя, что характерно для получения ЧХ в области низких частот.

Авторами предложен способ определения необходимого временного интервала по факту фиксации выхода системы в стационарный периодический режим на основе анализа статистических оценок процессов внутри динамических интервалов, величина которых определяется периодом T_{inj} инжектируемого в контур обратной связи преобразователя гармонического сигнала. Предлагаемый способ состоит в том, что, как и при натурном эксперименте по определению частотных характеристик коэффициента петлевого усиления [1], в контур цепи обратной связи по напряжению (ОСН) вводится источник гармонического сигнала и производится расчёт модели преобразователя во временной области, а критерием останова расчёта является фиксация наличия установившегося (стационарного) режима на интервале времени, соответствующем полному периоду гармонического сигнала. Это позволяет выполнять вычисление амплитуды и фазы основной гармоники выходного сигнала преобразователя посредством алгоритма быстрого преобразования Фурье. При этом определение установившегося режима осуществляется посредством расчёта статистических показателей стационарности режима. В частности, для интервалов выделенных динамических «окон» T_w (внутри разных периодов гармонического сигнала) рассчитанного ряда данных вычисляется коэффициент корреляции Пирсона. По его значению и по результату дополнительных тестов (тест проверки на нулевую гипотезу H_0 и др.) принимается решение об останове расчёта во временной области (рис. 1).

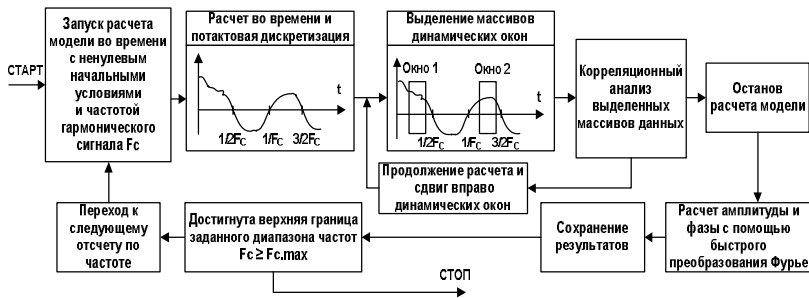


Рис. 1. Схема основных этапов частотного анализа при моделировании импульсного преобразователя

Последовательность действий при расчёте частотных характеристик при моделировании выглядит следующим образом.

1. Расчёт во времени модели для случая старта преобразователя из нулевых начальных условий с выходом в установившийся режим. При этом отсутствует сигнал, вводимый в контур ОСН.

2. Выполняется проверка на наличие стационарного периодического одноциклового режима [2, 3] по результатам анализа графика выходного напряжения, рассчитанного в п. 1.

3. Определение ненулевых начальных условий (ННУ) по всем переменным состояния линейных подсистем полной модели для фиксируемой точки внутри тактового интервала для стационарного режима (например, для начала такта).

4. Старт расчёта во времени с ННУ первой или очередной по счёту частоты из низкочастотной области полного заданного диапазона анализируемых частот.

5. При достижении времени $T_1 = T_{inj} + T_w$ для сигнала выходного напряжения выбрать из рассчитанного массива данных по одной точке внутри каждого тактового интервала (например, в начале такта) и произвести расчёт коэффициента корреляции и тест на H_0 для интервалов времени $[0, T_w]$ и $[T_{inj}, T_{inj} + T_w]$.

6. Проверка коэффициента корреляции и результата теста на H_0 . Если эти значения входят в требуемый диапазон, то переход к п.10, иначе переход к следующему п.7.

7. Расчёт дополнительного интервала времени, равного одному такту частоты коммутации a до момента $T_2 = T_{inj} + T_w + a$. Выполнить п. 5 и п. 6 для интервала, сдвинутого на один такт a частоты коммутации $[a, T_{inj} + T_w + a]$ и интервала $[T_{inj} + a, T_{inj} + T_w + a]$.

8. Если достигнуто значение общего рассчитанного интервала равного $3T_{inj}$, то произвести увеличение T_w и перейти к анализу аналогичному п. 5 и п. 6, но формулах для расчёта T_1 и T_2 применяется удвоенное значение $2T_{inj}$.

9. Если достигнуто предельное наперед заданное максимальное время моделирования, выполнить останов анализа ЧХ и вывести на экран предупреждение о ошибке.

10. Выполнить останов расчёта во временной области.

11. Полученный массив данных в п.5 обработать с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, предварительно дополнив этот массив нулевыми элементами, для получения его длины величиной, равной степени двойки, и рассчитать амплитуду и фазу гармоники с частотой, равной $1/T_{inj}$.

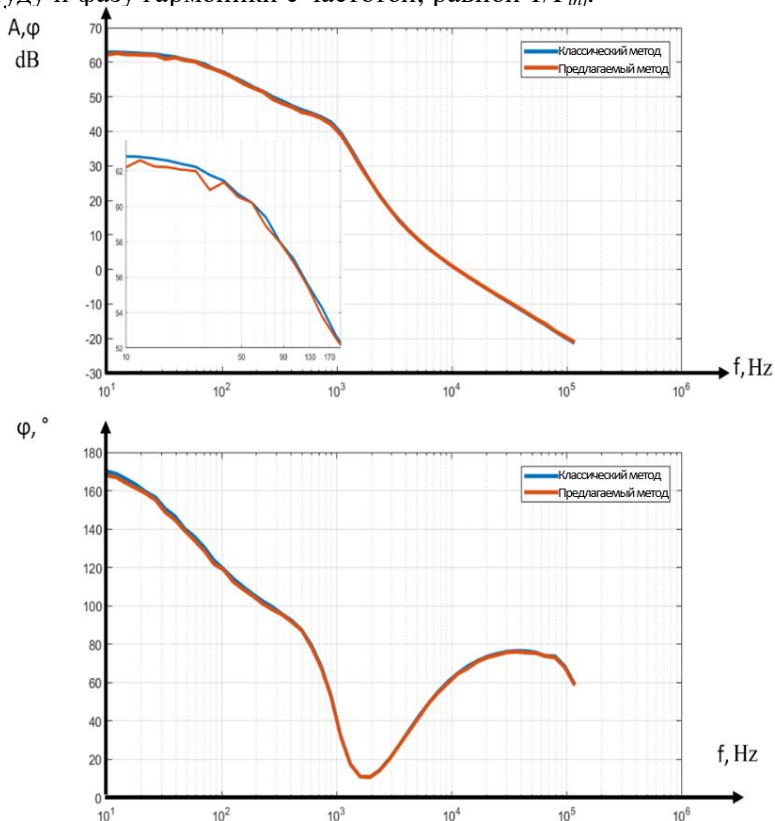


Рис. 2. Сравнительные графики частотных характеристик преобразователя

12. Увеличить частоту на заданный шаг, и если она не превышает предельных значений в соответствии с заданием на выполнение частотного анализа, перейти к п. 4.

13. Останов с сохранением результатов и построение графика АЧХ и ФЧХ для коэффициента петлевого усиления.

На рис. 2 приведены результаты моделирования, полученные на поведенческой модели импульсного преобразователя постоянного напряжения, выполненного на базе микросхемы LM2596. Графики АЧХ и ФЧХ, полученные предлагаемым способом и при значительном увеличении скорости выполнения моделирования, показали их хорошее совпадение с результатами, полученными классическим способом, основанном на анализе временных отрезков увеличенной продолжительности.

Литература

1. *Middlebrook R.D.* Measurement of loop gain in feedback systems / R.D. Middlebrook // International Journal of Electronics. – 1975. – Vol. 38, No. 4. – PP. 485–512.

2. *Алейников О.А.* Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах / О.А. Алейников, В.С. Баушев, А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 16–21.

3. *Баушев В.С.* О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием / В.С. Баушев, Ж.Т. Жусубалиев // Электричество. – 1992. – № 8. – С. 47–53.

Р.В. Коллэ

(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ИННОВАЦИОННЫЕ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯДНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Современные зарядно-выпрямительные устройства (ЗВУ) представляют собой высокотехнологичный комплекс по преобразованию переменного напряжения в постоянное. Производители ЗВУ в основном работают над повышением КПД преобра-

зователя, улучшением габаритно-массовых характеристик, применением современной силовой электронной схемотехники. Основное эксплуатационное назначение ЗВУ как элемента системы оперативного тока подстанции – это питать нагрузку и поддерживать аккумуляторные батареи (АБ) в заряженном состоянии (рис. 1). В предлагаемой статье рассматривается эксплуатационное улучшение системы ЗВУ совместно с АБ.

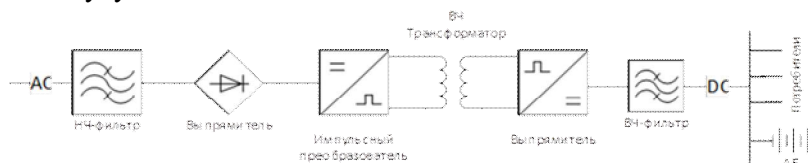


Рис. 1. Стандартная структура питания нагрузки и заряда АБ от ЗВУ

АБ на электрических подстанциях собирается из отдельных блоков по 2В (104 элемента) или по 12В (17 элементов) общим напряжением 232 В постоянного напряжения. Из контролирующих органов в ЗВУ имеются цепи измерения напряжения АБ, тока заряда-разряда АБ и датчик температуры, прикрепленный к корпусу одного из аккумуляторных элементов.

По этим данным есть возможность контролировать ток заряда АБ и разряда её на нагрузку в аварийном режиме. Система оперативного тока на подстанции должна работать в круглосуточном режиме и нет возможности регулярно проводить проверочные, контрольно-тренировочные циклы разряда-заряда АБ с фиксацией остаточной ёмкости и также для этих работ требуется выделить временной и человеческий ресурс. В данном докладе рассматривается возможность использовать интеллектуальный коммутационный блок с применением дополнительного накопителя в виде суперконденсатора (рис. 2).

В нормальном режиме работы переменное напряжение на входе зарядника имеется. Выпрямленное напряжения подаётся на выходную секцию шин, от которой запитана нагрузка, заряжаются аккумуляторы и суперконденсаторная сборка. В аварийном режиме работы в первые 5 минут после исчезновения переменного напряжения нагрузка питается от АБ и суперконденсаторной сборки (рис. 3). Резкие набросы нагрузки в этом режиме будут компенсированы.

роваться энергией, накопленной на суперконденсаторах, что позволит защищать АБ от преждевременной деградации.

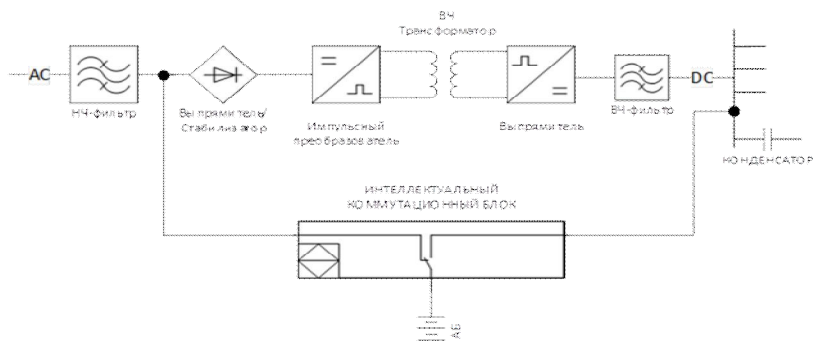


Рис. 2. Инновационная структура питания нагрузки, заряда АБ и накопителя от ЗВУ



Рис. 3. Суперконденсаторная сборка на напряжение 300 В ёмкостью 1 Ф

В длительном аварийном режиме интеллектуальный блок коммутации (ИБК) отключит цепи выпрямителя-стабилизатора от сети и переключит на работу от АБ. АБ от секции постоянного тока физически не отключается, но в ИБК подключится диодная развязка в сторону секции постоянного тока. Это делается для того, чтобы при выходе из строя преобразователя аккумуляторная батарея автоматически подхватывала нагрузку на секции. Постоянное напряжение

от АБ будет преобразовываться в стабилизированное постоянное напряжение на выходе 232 В. Со временем напряжение на АБ снизится, но выходное напряжение на секции останется стабилизированным на уровне 232 В и суперконденсаторная сборка будет полностью заряжена. После продолжительного разряда АБ в системе всегда останется полностью заряженная суперконденсаторная сборка, позволяющая произвести оперативные переключения даже при полностью разряженной АБ.

Нормальный режим работы с автоматическим режимом обслуживания АБ. В период нормальной работы подстанции может быть активирован режим автоматического обслуживания АБ. В этом режиме АБ подключается на вход выпрямителя-стабилизатора и начинает разряжаться на существующую нагрузку. Затем после полного разряда восстанавливается питание от переменного напряжения и АБ снова подключается на секцию постоянного тока для заряда. За счёт этих переключений система проведет контрольно-тренировочный цикл разряда-заряда АБ для восстановления ёмкости АБ и определения технического состояния. ИБК в автоматическом режиме проведет анализ технических характеристик АБ и заранее проинформирует обслуживающий персонал о необходимости замены АБ или проведения более глубокого обслуживания АБ.

Выводы.

1. Инновационное решение включает в себя следующий комплекс модернизаций:

1) замена обычного ЗВУ на выпрямитель-стабилизатор с широким динамическим диапазоном входного напряжения ($120 \div 300$ В);

2) автономный источник питания – аккумуляторная батарея дополнен второй системой автономного источника энергии: суперконденсатором (напряжение 300 В, ёмкость 1 Ф) (рис. 3) или литий-ионной батареей;

3) применение ИБК в цепи аккумуляторной батареи.

2. Эксплуатационные улучшения зарядно-выпрямительных устройств большой мощности для цифровых подстанций:

1) применение второго автономного источника энергии позволяет уменьшить ёмкость основной аккумуляторной батареи и удвоить надёжность системы. Энергии, накопленной супер-

конденсатором ёмкостью 1 Ф, заряженным на напряжение 232 В, достаточно, чтобы отключить 400 или включить 160 вакуумных выключателей на 6–10 кВ;

2) ИБК позволяет производить в любое время разряд АБ на существующую нагрузку, что исключает необходимость вывести систему оперативного тока из круглосуточной работы для обслуживания и организации контрольно-тренировочных циклов заряда-разряда АБ;

3) ИБК постоянно контролирует состояние всех функциональных узлов системы оперативного тока: выпрямитель-стабилизатор, АБ, нагрузку и ведет регистрацию данных;

4) ИБК рассчитывает и сигнализирует об остаточном ресурсе всего оборудования за счёт постоянного мониторинга технических характеристик;

5) за счёт применения системы ИБК частые кратковременные набросы мощности и пропадания питания ложатся на дополнительную батарею или суперконденсатор, а длительные режимы автономной работы – на основную аккумуляторную батарею, что также продлевает срок службы АБ (ресурс разряда-заряда свинцово-кислотной АБ – до 600 циклов, литий-ионной АБ – до 3000, суперконденсатора – до 10^6).

С.В. Абрамов, Д.В. Никоноров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА МИКРОСХЕМЕ MC34063

Преобразователи постоянного напряжения находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1–3]. В данной работе приводятся результаты моделирования повышающего импульсного преобразователя с одноконтурной системой управления. Исходные данные для расчёта преобразователя: выходное напряжение $u_{\text{вых,ср}} = 48$ В, минимальное входное напряжение $u_{\text{вх,мин}} = 10$ В, номинальное входное напряжение $u_{\text{вх,ном}} = 12$ В, максимальное входное напряжение $u_{\text{вх,макс}} = 15$ В, среднее значение тока нагрузки $i_{\text{н,ср}} = 5$ А, пульсации входного напряжения $\Delta u_{\text{вх}} = 0,1$ В, пульсации выходного напряжения $\Delta u_{\text{вых}} = 0,1$ В, частота переключения силового транзистора $f = 100$ кГц.

Напряжение питания микросхемы, подаваемое на вывод V_{CC} , берется со входа силовой части. В микросхеме имеется внутренний стабилизатор с выходным напряжением 1,25 В. Частота генератора импульсов определяется ёмкостью конденсатора C_3 . На этом выводе формируется пилообразное напряжение $u_n(t)$ с частотой f , изменяющееся в пределах от 0,75 до 1,25 В. Тактовые импульсы u_t формируются на другом выходе задающего генератора во время прямого хода пилообразного напряжения, когда конденсатор C_3 заряжается внутренним источником тока [4].

Были проведены расчёты силовой части преобразователя и получены следующие значения параметров LC -фильтра: $L =$

$= 28,8 \text{ мкГн}$, $C_{\text{вх}} = 87,5 \text{ мкФ}$, $C_{\text{вых}} = 396 \text{ мкФ}$, максимальное относительное время открытого состояния транзистора $\gamma_{\text{max}} = 0,7916$ [5, 6].

На рис. 2 представлена Simulink-модель исследуемого преобразователя с системой управления (рис. 3), реализующей работу микросхемы, а на рис. 4 – осциллограммы при пуске повышающего преобразователя.

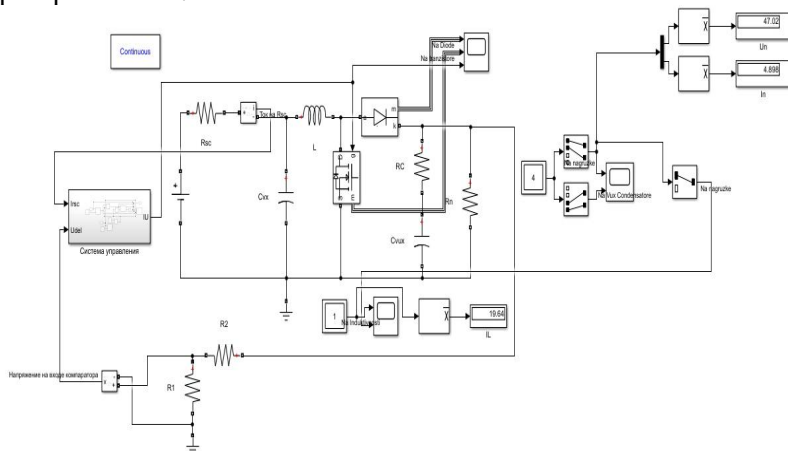


Рис. 2. Силовая часть повышающего импульсного преобразователя

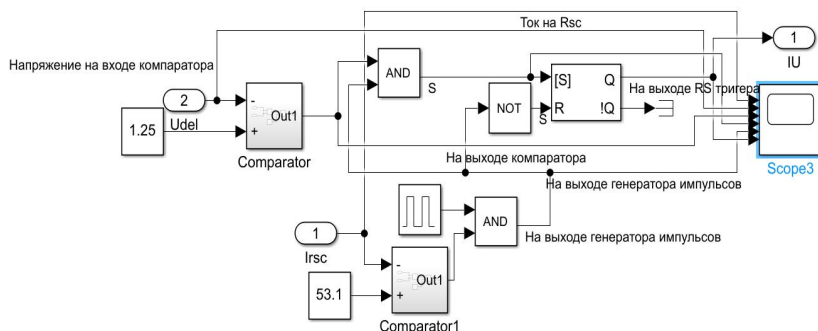


Рис. 3. Модель системы управления повышающим импульсным преобразователем напряжения

На рис. 5 показаны ток и напряжение на выходе повышающего импульсного преобразователя. Для построения нагрузочной характеристики (рис. 6) сопротивление нагрузки изменялось от $0,5R_{\text{н}}$ до $5R_{\text{н}}$.

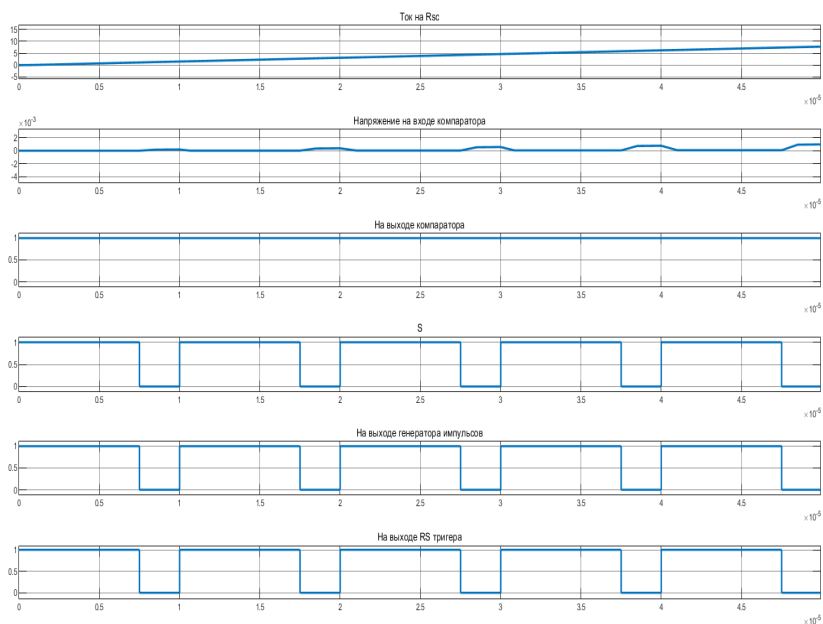


Рис. 4. Временные диаграммы пуска модели микросхемы MC34063

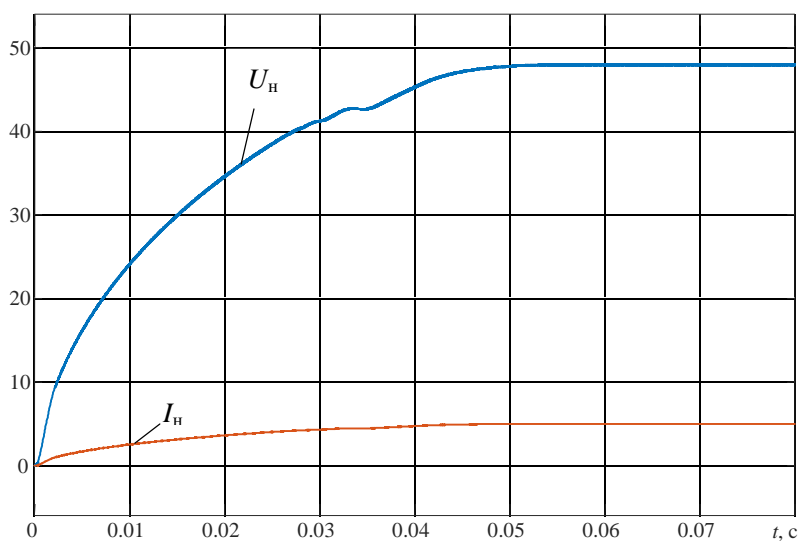


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока нагрузки

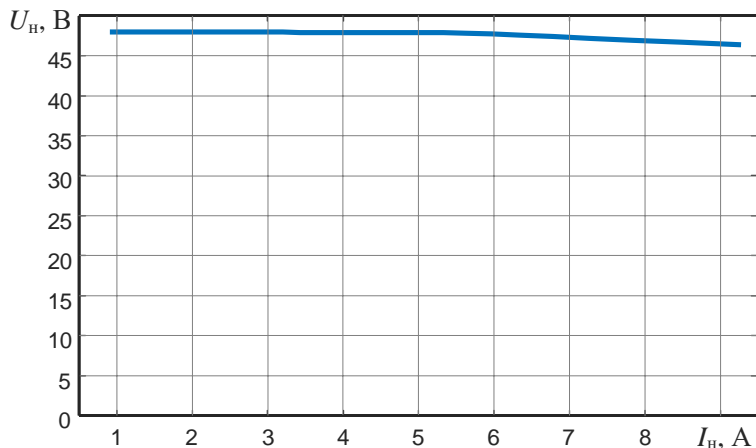


Рис. 6. Нагрузочная характеристика
повышающего импульсного преобразователя

Литература

1. Белов Г.А. Импульсные преобразователи с системами управления на серийных микросхемах / Г.А. Белов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – 329 с.
2. Белов Г.А. Теория импульсных преобразователей / Г.А. Белов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – 330 с.
3. Попков О.З. Основы преобразовательной техники / О.З. Попков. – М.: ИД МЭИ, 2007. – 200 с.
4. MC34063 1.5 A, Step-Up/Down/Inverting Switching Regulators. DataSheet [Электронный ресурс] / ON Semiconductor. – Режим доступа: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC34063A-D.PDF> (дата обращения: 12.05.2020).
5. Расчёт входного конденсатора повышающего импульсного преобразователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://radioham.ru/boost2/> (дата обращения: 12.05.2020).
6. Белов Г.А. Экспериментальное исследование и анализ процессов переключения в силовой части понижающего импульсного преобразователя / Г.А. Белов, С.В. Абрамов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2016): материалы X Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 93–108.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ТОРОИДАЛЬНОМ СЕРДЕЧНИКЕ

Исходные данные для расчёта трансформатора: напряжение первичной обмотки трансформатора симметричной прямоугольной формы $U_1 = 100$ В, напряжение вторичной обмотки $U_2 = 10$ кВ, ток вторичной обмотки $I_2 = 5$ мА, частота входных импульсов $f = 10$ кГц.

Для обеспечения нормального режима работы трансформатора в составе электрической схемы необходимо, чтобы индуктивность намагничивания была как можно больше. Этого можно добиться, выбрав сердечник из материала с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu \geq 100000$, что позволит во много раз увеличить индуктивность намагничивания, почти не изменяя индуктивности рассеяния трансформатора [1].

В качестве сердечника был выбран тороидальный сердечник типа ГМ501 ОЛ 155/135-10, характеристики которого представлены на рис. 1. Такие сердечники изготавливаются из ленты толщиной 25 мкм с аморфной структурой. Материал изготавливается методом быстрой закалки из сплава на основе кобальта, который имеет высокую начальную магнитную проницаемость, низкие коэрцитивную силу и удельные магнитные потери [2].

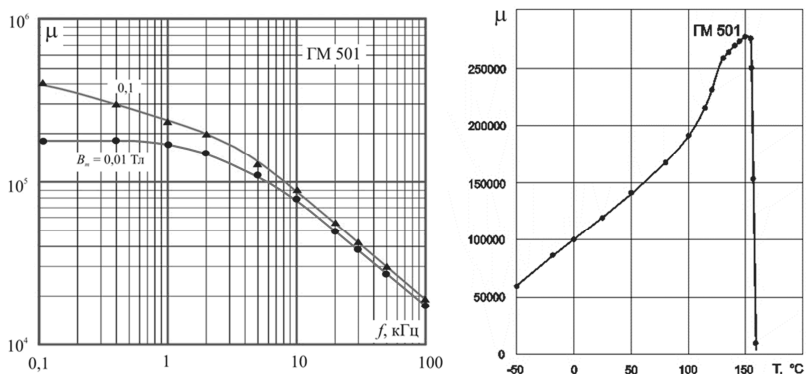


Рис. 1. Графики зависимости относительной магнитной проницаемости от частоты и температуры, использован материал [2]

Расчёт импульсного тороидального повышающего трансформатора будем проводить, используя методики описанные в [3–7].

Рассчитаем мощность вторичной обмотки

$$P_2 = I_2 U_2 = 5 \times 10^{-3} \times 10^4 = 50 \text{ Вт}$$

и габаритную мощность трансформатора

$$P_{\Gamma} = P_2 \frac{1}{\eta} + 1 \frac{P_2}{\eta} = 50 \times \frac{1}{0,95} + 1 \times \frac{50}{0,95} = 102,6 \text{ Вт},$$

где $\eta = 0,95$ – КПД, определяемый исходя из суммарной мощности вторичных обмоток по табл. 1 [3].

Таблица 1

Значение КПД при расчётной мощности трансформатора

Величина	Суммарная мощность вторичных обмоток $P_{\text{вых}}$, Вт				
	$2 \div 15$	$15 \div 50$	$50 \div 150$	$150 \div 300$	$300 \div 1000$
КПД	$0,76 \div 0,88$	$0,88 \div 0,92$	$0,92 \div 0,95$	$0,95 \div 0,96$	

Для выбранного типа сердечника наружный диаметр $D = 15,5$ см; внутренний диаметр $d = 13,5$ см; высота сердечника $h = 1$ см; сечение магнитопровода $S = 0,7 \text{ см}^2$; средняя длина магнитной силовой линии $l_{\text{cp}} = 45,5$ см; коэффициент индуктивности $A_L = 11,6, 19,3 \text{ мкГн}$.

Рассчитаем номинальный ток первичной обмотки с учетом КПД трансформатора [4]

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1 \eta} = \frac{50}{100 \times 0,95} = 0,52 \text{ А}.$$

Для расчёта сечения провода определим возможную плотность тока [4]

$$J = \frac{P_{\Gamma} \times 10^4}{K_f K_u B_m A_p} = \frac{102,6 \times 10^4}{4 \times 0,3 \times 0,43 \times 0,6} = 330,03 \approx 330 \text{ А/см}^2,$$

где $K_f = 4,44$ – коэффициент формы для синусоидального сигнала, $K_u = 0,3$ – коэффициент заполнения окна, $B = 0,43$ – магнитная индукция в Тл.

Найдём сечение проводов первичной и вторичной обмоток

$$S_p = \frac{I_1}{J} = \frac{0,52}{330} = 0,0016 \text{ см}^2, \quad S_B = \frac{I_2}{J} = \frac{5 \times 10^{-3}}{330} = 1,515 \times 10^{-5} \text{ см}^2.$$

Из полученных расчётов для первичной обмотки был выбран медный провод диаметром $d_n = 0,15$ мм, а для вторичной – $d_b = 0,06$ мм.

Число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора [4]

$$w_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{K_f B_m f S} = \frac{100 \times 10^4}{4 \times 0,43 \times 10^4 \times 0,7} = 83,056 \approx 84 \text{ витка};$$

$$w_2 = \frac{U_2 w_1}{U_1} + \frac{a}{100} \approx \frac{10^4 \times 84}{100} + \frac{56,714}{100} = 13163,950 \approx 13164 \text{ витка},$$

где $a = \frac{P_\Gamma}{2K_G K_\Sigma} \times 100 = \frac{102,6}{2 \times 0,021 \times 4289,68} = 56,714 \%$ – коэффициент регулирования мощности, где K_Γ – геометрический параметр сердечника

$$K_G = \frac{A_p S K_u}{2(D - d) + 2h} = \frac{0,6 \times 0,7 \times 0,3}{2 \times (15,5 - 13,5) + 2} = 0,021 \text{ см}^5,$$

A_p – габаритный параметр, определяется как произведение сечения магнитопровода на сечение обмоток [5].

Для расчёта коэффициента A_p воспользуемся методикой описанной в [6]

$$A_p = S S_w = \frac{K P_2}{K B_m f} \approx \frac{50}{0,017 \times 0,43 \times 10^4} = 0,6 \text{ см}^4,$$

где K – коэффициент, зависящий от топологии преобразователя. Для прямоходового и обратногоходового преобразователя $K = 0,014$, для полумостовых и мостовых схем $K = 0,017$.

Коэффициент K_Σ определяется электрическим и магнитным режимами работы [4]:

$$K_\Sigma = 0,145 K_f^2 f^2 K_m^2 \times 10^4 = 0,145 \times 4^2 \times (10^4)^2 \times 0,43^2 \times 10^4 = 4289,68.$$

Сопротивление первичной и вторичной обмоток [4]

$$R_p = [2(D - d) + 2h] \frac{w_1^2 \rho_{cu}}{S_p} \times 10^{-6} = [2(15,5 - 13,5) + 2] \frac{84 \times 1,71}{0,0016} = 0,5 \text{ Ом};$$

$$R_B = (2(D - d) + 2h) \frac{w_2^2 r_{cu}}{S_B} \times 10^{-6} =$$

$$= (2(15,5 - 13,5) + 2) \frac{13164 \times 71}{1,515 \times 10^{-5}} = 8,9 \text{ кОм},$$

где

$$\frac{\rho_{cu}}{S_P} = \frac{1,72}{0,0016} = 1075 \text{ мкОм/см}; \quad \frac{\rho_{cu}}{S_B} = \frac{1,72}{1,515 \times 10^{-5}} = 113531,4 \text{ мкОм/см};$$

ρ_{cu} – удельное сопротивление меди.

Свойства материалов намоточных проводов трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства материалов намоточных проводов

Материал	Плотность, г/см ³	Удельное сопротивление, мкОм·см	Температурный коэффициент
Медь	8,98	1,72	0,00393
Серебро	10,49	1,59	0,00380
Алюминий	2,703	2,83	0,00410

Рассчитаем индуктивность намагничивания, исходя из расчётных данных [1]

$$L_\mu = \frac{\mu_0 \mu S w_1^2}{l_{cp}} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10^5 \times 7 \times 10^{-5} \times 84^2}{0,46} = 0,135 \text{ Гн},$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость материала сердечника, S – сечение магнитопровода, l_{cp} – средняя длина магнитной силовой линии.

Собственная индуктивность первичной и вторичной обмоток [7]

$$L_{R1} = \frac{w_1^2 A_{L1}}{10^3} = \frac{84^2 \times 9,3 \times 10^{-6}}{10^3} = 136 \text{ мкГн},$$

$$L_{R2} = \frac{w_2^2 A_{L1}}{10^3} = \frac{84^2 \times 9,3 \times 10^{-6}}{10^3} = 3,345 \text{ Гн}.$$

На рис. 2 представлена трёхмерная модель трансформатора, выполненная на основе расчётных параметров с выбранным типом сердечника.

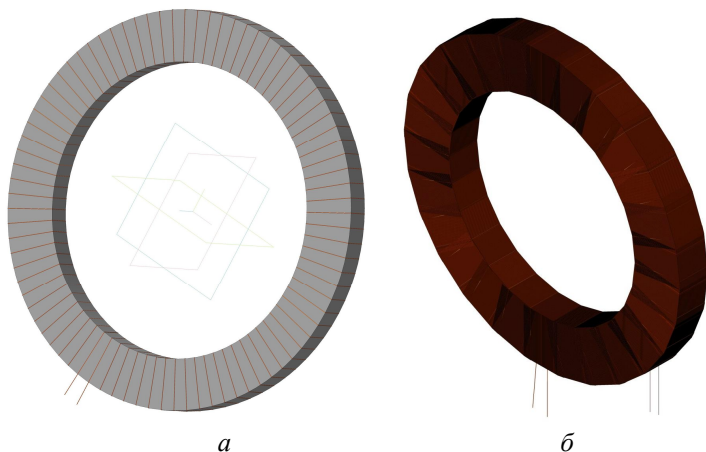


Рис. 2. Трёхмерная модель трансформатора:
первичная обмотка (а); вторичная обмотка (б)

Модель трансформатора представляет собой сборку, включающую в себя деталь сердечника с учетом его массо-центровочных характеристик, витки первичной обмотки, слой изоляции и витки вторичной обмотки.

Для проверки правильности расчёта параметров трансформатора в Matlab/Simulink была собрана схема (рис. 3) для моделирования необходимых режимов работы. Схема состоит из двух идеальных источников питания постоянного напряжения, двух транзисторов, формирующих на первичной обмотке трансформатора прямоугольные импульсы и задающего генератора сигнала управления транзисторами, и включает в себя, исследуемый трансформатор.

В схеме на рис. 3 на вход трансформатора подается переменный импульсный сигнал с частотой 10 кГц и амплитудой $U_1 = 100$ В, формируемый двумя транзисторными ключами (рис. 4). Напряжение на вторичной обмотке трансформатора повторяет входное напряжение, а амплитуда $U_2 = 10$ кВ соответствует амплитуде заданной в исходных данных.

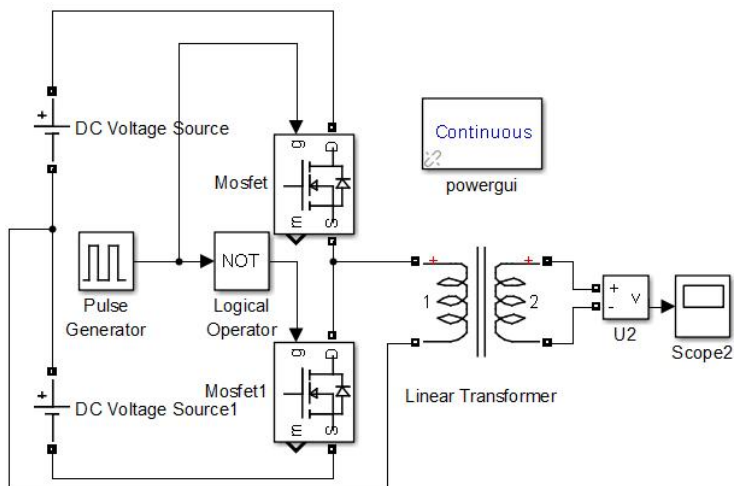


Рис. 3. Тестовая схема для проверки режимов работы трансформатора

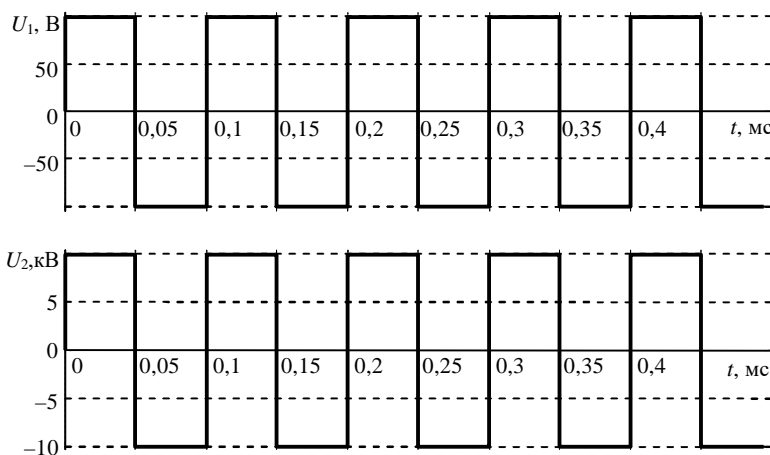


Рис. 4. Результаты моделирования работы трансформатора при импульсном входном сигнале

Таким образом, при проектировании импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике были достигнуты требуемые параметры, построена трёхмерная модель трансформатора, а результаты расчётов проверены моделированием на тестовой схеме.

Литература

1. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. – 2-е изд., перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.
2. Магнитопровод ГМ501 [Электронный ресурс] // НПП Гаммамет. – Режим доступа: <http://www.gammamet.ru/index.php/ru/gm/shell/gm501> (дата обращения: 07.05.2020).
3. Гончарук А.И. Расчёт и конструирование трансформаторов / А.И. Гончарук. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Colonel WM. Transformer and inductor design handbook third edition, revised and expanded [Электронный ресурс] / WM. Colonel, T. McLyman. – Kg Magnetics, Inc., Idyllwild, California, U.S.A. – Режим доступа: https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr_design/ (дата обращения: 07.05.2020).
5. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчёт трансформаторов малой мощности / Ю.Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.
6. Magnetics design 4 – Power Transformer Design [Электронный ресурс] / Texas Instruments. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf> (дата обращения: 07.05.2020).
7. Powder core catalog [Электронный ресурс] / Magnetics Inc. – Режим доступа: <https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCoreCatalog.pdf> (дата обращения: 07.05.2020).

С.В. Абрамов, О.О. Никитина
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ LC-ФИЛЬТРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Исходные данные для проектирования генератора: выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 10$ кВ; частота выходной синусоиды $f_{\text{вых}} = 50 \div 500$ Гц; нестабильность частоты не более $\Delta f_{\text{вых}} = 0,1$ Гц; питание устройства от аккумуляторных батарей; отклонение коэффициента формы синусоиды $\Delta k_{\text{ф}} = \pm 0,05$; длительность переходного процесса не более 2 мс.

Структурная схема генератора приведена на рис. 1. В схеме генератора используется система управления с синусоидальной ши-

отно-импульсной модуляцией, для формирования сигналов управления силовых транзисторных ключей. Формируемые транзисторными ключами импульсы подаются на трансформатор и усиливаются до амплитуды 10 кВ, после которого происходит демодуляция импульсов с помощью низкочастотного LC -фильтра.

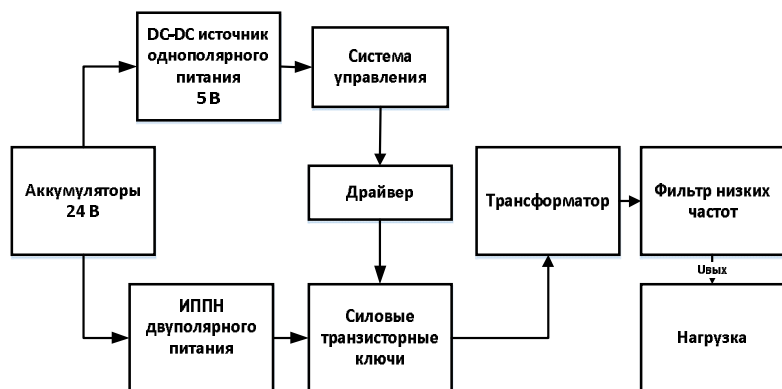


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного генератора синусоидальных сигналов

Для оценки параметров выходного низкочастотного LC -фильтра используем T -образную схему замещения трансформатора [1]. В этом случае исследуемая схема будет иметь вид, показанный на рис. 2, где L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки $L'_{s2} = L_{s2}/n$ – индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведенная к первичной, $r'_2 = r_2/n$ – сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; r_1 – сопротивление первичной обмотки; L_μ – индуктивность намагничивания; C_ϕ – ёмкость фильтра; L_ϕ и r_ϕ – индуктивность и активное сопротивление дросселя выходного фильтра.

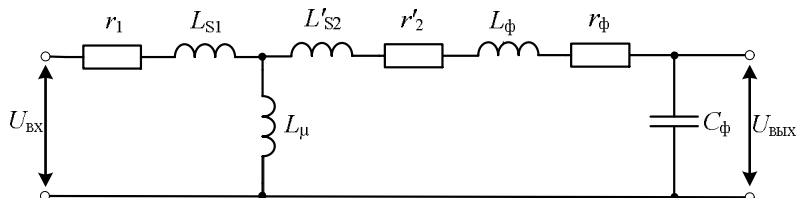


Рис. 2. Схема замещения трансформатора и низкочастотного LC -фильтра

Индуктивность намагничивания трансформатора зависит от способа намотки и при правильном проектировании и изготовлении не превышает 100 мкГн [2]. На частотной характеристике такая индуктивность добавляет выброс на высоких частотах, которые в разы превышают рабочую частоту 50–500 Гц. Поэтому можно упростить схему, приведенную на рис. 1 до схемы, приведенной на рис. 3.

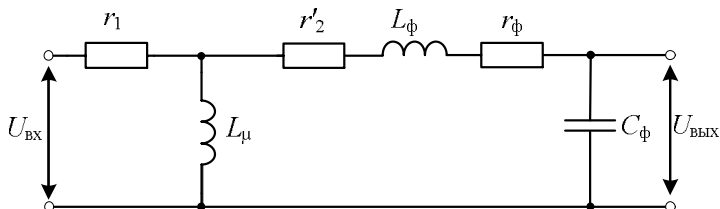


Рис. 3. Упрощенная схема замещения трансформатора и LC-фильтра

Параметры LC-фильтра должны быть рассчитаны таким образом, чтобы диапазон частот выходной синусоиды на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) лежал на участке полосы пропускания фильтра. Передаточная функция, приведенной на рис. 3 упрощенной схемы замещения, определяется выражением

$$W(p) = \frac{L_m p}{(L_m p + r_1)(C_\phi L_\phi p^2 + C_\phi(r_2' + r_\phi)p + 1)}. \quad (1)$$

На рис. 4, а представлена логарифмическая АЧХ, полученная из выражения (1) при известных параметрах трансформатора $L_\mu = 0,135$ Гн, $r_1 = 0,5$ Ом, $r_2' = 57,1$ Ом.

Спад АЧХ на рис. 4, б в области низких частот обусловлен индуктивностью намагничивания. Резонансная частота LC-фильтра определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\phi C_\phi}}.$$

Необходимо рассчитать параметры фильтра таким образом, чтобы диапазон частот выходного синусоидального сигнала находился между низкочастотным спадом на АЧХ, вызванным индуктивностью намагничивания и выбросом, вызванным резонансной частотой LC-фильтра.

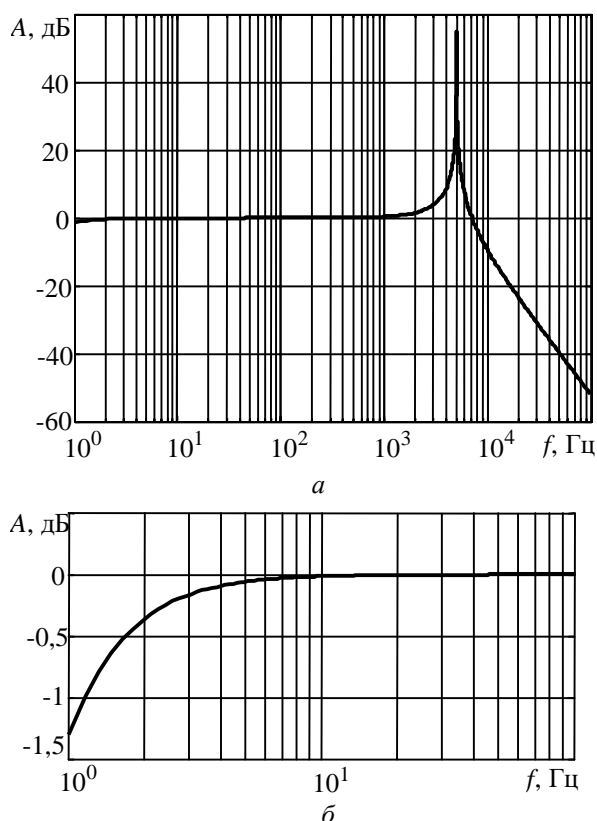


Рис. 4. ЛАЧХ, полученная по передаточной функции (1) (а);
низкочастотный участок ЛАЧХ (б)

Таким образом, полученные на основе анализа ЛАЧХ ёмкость и индуктивность LC -фильтра были выбраны равными $C_\phi = 1$ нФ, $L_\phi = 1$ Гн. В качестве конденсатора фильтра были выбраны керамические высоковольтные дисковые конденсаторы DHR4E4C331K2BB ёмкостью 330 пФ и предельным напряжением 15кВ фирмы Murata, соединённые параллельно. Индуктивность фильтра может быть выполнена на тороидальном сердечнике из аморфного сплава ГМ-501 ОЛ 15/25-10 с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu = 150000$.

Количество витков можно рассчитать, используя методики, описанные в [3–6]. Используя приближенную формулу, приведенную в [4] для выбранного типа сердечника, количество витков будет равно

$$N = \sqrt{\frac{L \times 10^3}{A_L}} = \sqrt{\frac{1 \times 10^3}{70 \times 10^{-6}}} = 4 \text{ витка},$$

где A_L – индуктивный фактор (коэффициент индуктивности), Гн. Для выбранного типа сердечника $A_L = 60 \div 70$ мкГн.

В результате применения описанного метода оценки параметров LC-фильтра удалось спроектировать компактный высоковольтный фильтр, обеспечивающий требуемые параметры генератора синусоидальных сигналов.

Литература

1. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. – 2-е изд., перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.

2. Бердников Д. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра / Д. Бердников // Современная электроника. – 2006. – № 8. – С. 58–61.

3. Colonel WM. Transformer and inductor design handbook third edition, revised and expanded [Электронный ресурс] / WM. Colonel, T. McLyman. – Kg Magnetics, Inc., Idyllwild, California, U.S.A. – Режим доступа: https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr_design/ (дата обращения: 07.05.2020).

4. Powder core catalog [Электронный ресурс] / Magnetics Inc. – Режим доступа: <https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCoreCatalog.pdf> (дата обращения: 07.05.2020).

5. Савин М. Расчёт и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя / М. Савин, С. Абрамов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2019. – № 8 (189). – С. 40–44.

6. Абрамов С. Проектирование обратноходового преобразователя с планарным трансформатором / С. Абрамов, И. Семенов // Силовая электроника. – 2019. – № 5. – С. 34–37.

УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

А.И. Федотов, Р.Ш. Мисбахов, К.Р. Бахтеев
(Казань, КГЭУ)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ГАЗОПОРШНЕВЫМИ УСТАНОВКАМИ*

Газопоршневые электростанции (ЭС) находят свое применение в первую очередь на удаленных территориях, где есть в наличии попутный газ. Его предварительная очистка перед использованием в качестве топлива предполагает определённые предварительные затраты. Однако в сравнении со стоимостью северного завоза жидкого топлива окупаемость инвестиций не превышает 3–4 лет.

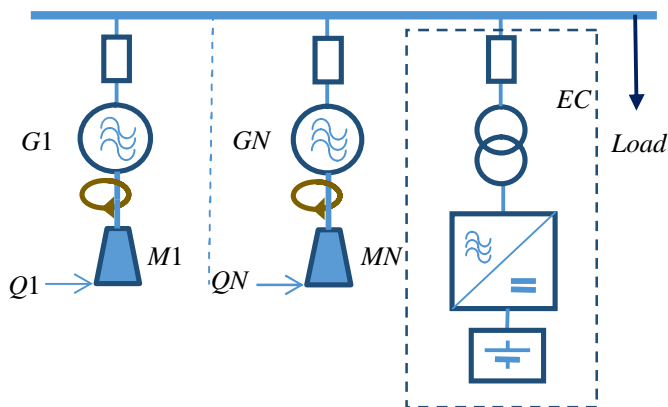


Рис. 1. Принципиальная схема электростанции с НЭ;
 G – генератор, Q – газ, M – ГПУ, EC – электрохимический НЭ

Особенностью эксплуатации газопоршневых энергоустановок (ГПУ) является их высокая чувствительность к резким

* Работа выполнена по Государственному контракту от 04 июня 2019 г. № 075-15-2019-057 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI57418X0188.

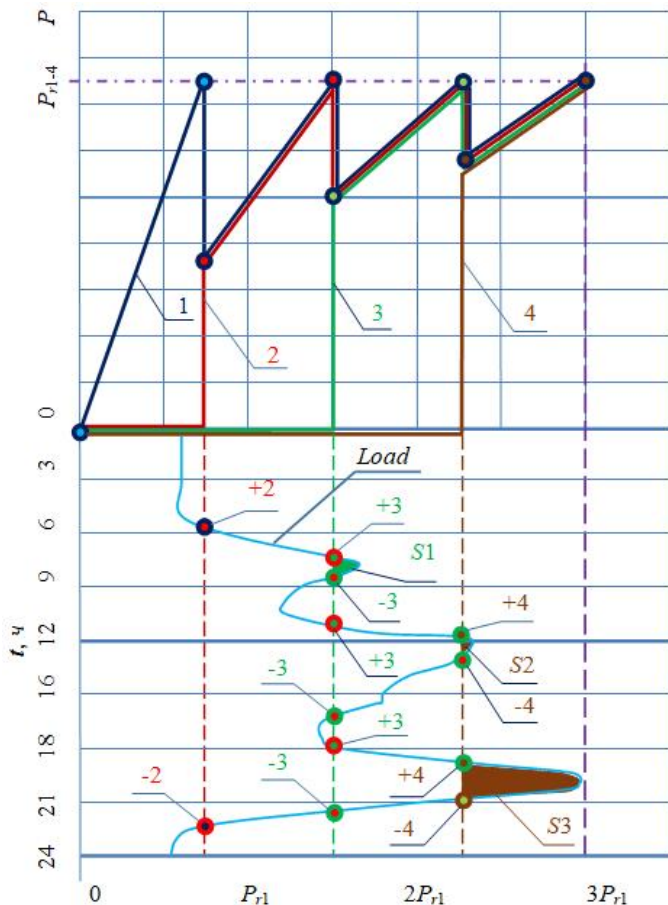


Рис. 2. Совмещенные графики генерируемой мощности ГПУ и суточный профиль мощности нагрузки $Load$; 1, ..., 4 – номера работающих ГПУ; \pm – включение/отключение соответствующей ГПУ номинальной мощностью P_r

Помимо основных функций динамической стабилизации баланса активной мощности в локальной системе электроснабжения, они могут использоваться как для экономии топлива, так и для снижения номинальной установленной мощности электростанции, в том числе и уменьшения количества энергоустановок.

На рис. 2 показано, что для локальной ЭС с 4 ГПУ при отключенном НЭ имеют место кратковременные включения энергоустановок для обеспечения баланса мощности: участки $S1$, $S2$, $S3$ (рис. 2). За счёт НЭ можно ограничиться тремя ГПУ, балансируя мощности $S2$, $S3$. Альтернативным является использование НЭ для выпуклых топливных расходных характеристик (рис. 3) в целях снижения расхода топлива ЭС.

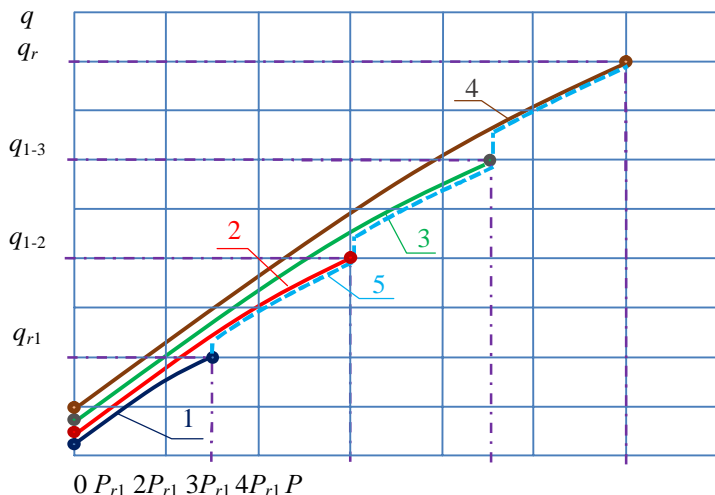


Рис. 3. Расходные характеристики электростанции;
включены: 1 — одна ГПУ; 2 — две ГПУ; 3 — три ГПУ;
4 — четыре ГПУ; 5 — суммарная расходная характеристика ЭС

Здесь снижение расхода топлива связано с отключением энергоустановок в часы минимума нагрузки (НЭ отдает энергию в нагрузку) и зарядкой НЭ в часы максимума нагрузки с возможной выдачей пиковой мощности, участок $S1$ на рис. 2, без кратковременного включения дополнительной ГПУ.

А.В. Булычев¹, Ю.В. Бычков¹, М.А. Грибков²
(¹Чебоксары, ООО «НПП Бреслер»; ²Москва, ОАО «МОЭСК»)

СПОСОБ СЕЛЕКТИВНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ЛИНИИ ПО ДАННЫМ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Дистанционный способ построения релейной защиты определяет обеспечение селективности действия защит за счёт разных выдержек времени срабатывания, которые зависят от расстояния (дистанции) между местом установки защиты и местом короткого замыкания [1]. При этом традиционно расстояние до места повреждения определяется с помощью реле сопротивления по косвенному принципу – изменению сопротивления контура короткого замыкания, вычисляемого по сигналам трансформаторов тока и напряжения. Устройство защиты формирует команду на отключение защищаемого объекта при попадании вектора сопротивления в определённую зону (область характеристики срабатывания) на комплексной плоскости.

Точность определения удалённости точки короткого замыкания через полное и удельное сопротивление переменному току контролируемой линии электропередачи низка, т.к. измерения проводятся в условиях переходных процессов, а измерение сопротивления на переменном токе в принципе основано на стационарном подходе, при котором предполагается использование гармонических (одной частоты), периодических установившихся токов и напряжений. При этом стационарном подходе неизбежно возникают большие динамические погрешности [2].

Кроме этого, вектор измеренного сопротивления может попадать в зону срабатывания дистанционной защиты при некоторых нагрузочных режимах (например, при пуске крупного асинхронного электродвигателя) и при наличии некоторых видов переходного сопротивления в месте повреждения. Эти факторы снижают точность измерения удалённости точки короткого замыкания и, следовательно, снижают степень селективности защиты.

Предложены способы реализации дистанционных защит на основе динамического контроля параметров, при котором оценка удалённости точки короткого замыкания осуществляется по непосредственным параметрам контролируемой линии электропередачи

(индуктивности, ёмкости и активному сопротивлению [2]), которые достаточно строго характеризуют свойства контролируемой линии в условиях переходных процессов, что обеспечивает более высокую точность оценки удалённости точки короткого замыкания.

При этом определяют зону защищаемой сети, в которой находится точка короткого замыкания, по индуктивности, ёмкости и активному сопротивлению в реальном (текущем) времени и формируют сигнал на отключение поврежденной линии с выдержкой времени, соответствующей удаленности точки короткого замыкания от места установки защиты.

Однако при аналоговой реализации процесс короткого замыкания анализируется только в текущем времени, и нет возможности выполнить повторные (итерационные) вычисления удаленности точки короткого замыкания, которые могли бы повысить точность измерений.

Важнейшей особенностью цифровой техники является способность запоминать сигналы и воспроизводить их в последующем. Своеобразие цифровой техники, безусловно, целесообразно использовать для улучшения свойств релейной защиты.

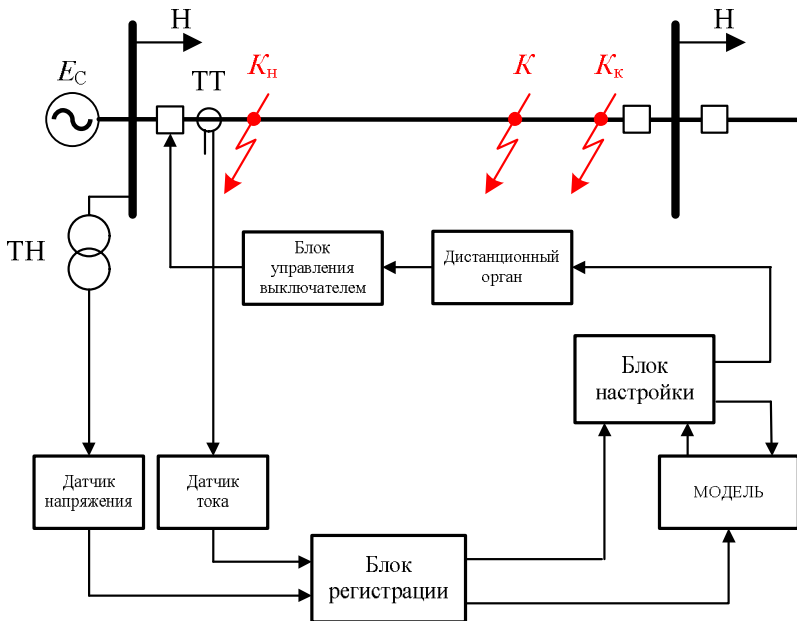
В этой связи предлагается более совершенный способ селективного отключения поврежденной линии электропередачи за счёт реализации устройства на цифровой базе путем регистрации процесса короткого замыкания и итерационного косвенного измерения удаленности точки короткого замыкания с помощью более точной модели контролируемой защитой линии.

Алгоритм селективного отключения поврежденной линии следующий: регистрируют реальный процесс короткого замыкания, измеряют параметры зарегистрированного процесса короткого замыкания, воспроизводят этот процесс в модели защищаемой сети при разной удаленности точки короткого замыкания до совпадения в соответствующем масштабе зарегистрированного и воспроизведенного процессов. Значение удаленности точки короткого замыкания, при котором процессы совпали, фиксируют как измеренное значение удаленности точки короткого замыкания, определяют зону защищаемой сети, в которой находится точка короткого замыкания, и формируют сигнал на отключение поврежденной линии с выдержкой времени, соответствующей удаленности точки короткого замыкания от места установки защиты.

Параметры сети при коротком замыкании находят путем обратного решения дифференциальных уравнений, описывающих защищаемую электрическую сеть, в модели этой сети по зарегистрированному процессу короткого замыкания, который считают решением дифференциальных уравнений модели сети в соответствующем масштабе. Найденные параметры вводят в модель сети в качестве исходных данных при воспроизведении процесса короткого замыкания. Процесс в модели защищаемой сети воспроизводят при начальных условиях, соответствующих зарегистрированному процессу короткого замыкания.

Зарегистрированные и воспроизведенные процессы короткого замыкания считают совпавшими в соответствующем масштабе, когда отклонения соответствующих мгновенных значений токов и напряжений сравниваемых процессов находятся в зоне определённых допустимых значений.

На рисунке представлена структурная схема сети и устройства, реализующего предложенный способ селективного отключения поврежденной линии.



Структурная схема устройства

На схеме изображена контролируемая линия электропередачи, первичные измерительные трансформаторы тока и напряжения и структура устройства. Устройство содержит датчики тока и напряжения, блок управления выключателем, блок регистрации, модель контролируемой сети, блок настройки, дистанционный орган и блок управления выключателем.

Предложенный способ управления сетью при повреждении линии электропередачи может быть реализован следующим образом. Регистрируют в соответствующем блоке доступные для измерения с помощью датчиков тока и напряжения сигналы процесса короткого замыкания в сети (формируют синхронизированные осциллограммы токов и напряжений). Сформированные в блоке регистрации осциллограммы передают в блок настройки, в котором по этим осциллограммам определяют первое приближение параметров цепи короткого замыкания и удаленности точки короткого замыкания от места установки устройства. Полученные значения параметров цепи короткого замыкания и удаленности точки короткого замыкания передают в модель сети. Моделируют процесс короткого замыкания при полученных данных.

Полученные при моделировании осциллограммы передают в блок настройки, где сравнивают их с соответствующими зарегистрированными осциллограммами. По результатам сравнения определяют степень их совпадения. Если отклонения соответствующих осциллограмм, полученных путем моделирования и путем регистрации, больше допустимых, то в математическом описании модели контролируемой электрической сети изменяют значения удаленности точки короткого замыкания и параметров сети. Моделируют, сравнивают процессы и корректируют данные модели до совпадения воспроизведенного и зарегистрированного процессов. Если процессы совпали, то в модели фиксируют значение удаленности точки короткого замыкания, при котором процессы совпали, и передают это значение в дистанционный орган. В зависимости от удаленности точки короткого замыкания в дистанционном органе создается выдержка времени срабатывания устройства, и по истечении этого времени формируется сигнал на отключение выключателя контролируемой линии. Сформированный сигнал на отключение передают в блок управления выключателем для исполнения.

Использование предложенного способа позволяет повысить точность действий по выявлению и отделению от сети поврежденной линии электропередачи за счёт регистрации и возможности многократного использования данных о реальном процессе короткого замыкания, применения более точной модели контролируемой защитой линии и применения более продуктивных численных методов обратного решения дифференциальных уравнений модели.

Благодаря итерационному характеру корректировки параметров модели поврежденной электрической сети по разности между зарегистрированным и смоделированным процессом короткого замыкания достигается повышение степени адекватности модели и реального процесса. Чем больше итераций, тем большая точность достигается. В свою очередь, повышение точности модели повышает точность вычисления удаленности точки короткого замыкания. Это повышает точность работы устройства в целом и позволяет, с одной стороны, более точно отстраиваться от нагрузочных режимов, а, с другой стороны, – обеспечить более высокую чувствительность отключения поврежденного элемента сети.

Литература

1. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита / Н.В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.
2. *Ванин В.К.* Релейная защита на элементах вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 336 с.

А.В. Булычев, Д.Н. Силанов

(Чебоксары, ООО «НПП Бреслер», ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ЦИФРОВУЮ СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Качество работы цифровой автоматики во многом определяется совершенством методики и точностью выбора параметров срабатывания автоматических устройств. Важно правильно выделить наиболее значимые ограничения и допущения, оказывающие определяющее влияние на выбор параметров срабатывания.

Архитектура вновь создаваемых систем управления подстанциями по технологии «Цифровые подстанции» позволяет получить существенное улучшение основных свойств релейной защиты, интегрированной в эти системы [1, 2]. Наиболее значимый эффект улучшения свойств релейной защиты может быть получен в сетях класса 6–35 кВ.

Для получения наглядного представления о преимуществах защит, интегрированных в общую цифровую систему управления подстанции, можно рассмотреть пример выбора параметров срабатывания защит применительно к присоединениям к силовому узлу двухтрансформаторной подстанции (секции шин 6 кВ). На рисунке показана схема силового узла 6 кВ этой подстанции класса 110/6 кВ.

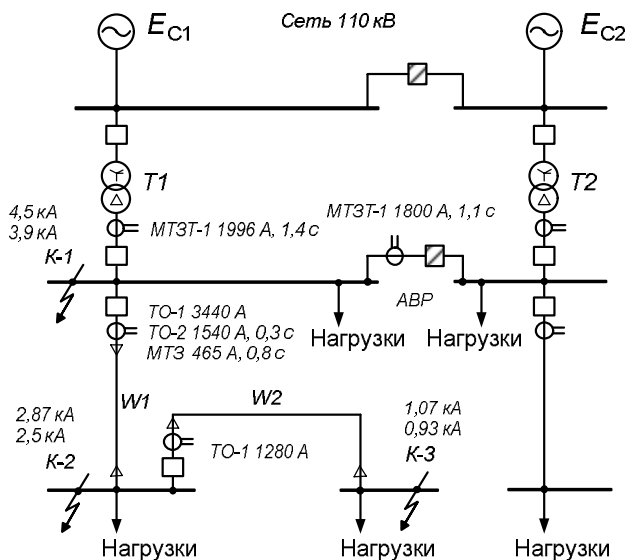


Схема силового узла подстанции
и карта параметров срабатывания

Пусть имеются основные исходные данные, необходимые для оценочного выбора параметров срабатывания защит, приведенные к ступени напряжения 6 кВ: внутреннее сопротивление питающей энергосистемы, которое для оценочных расчётов можно принять неизменным, $x_C = 0,12$ Ом; номинальный ток

трансформатора на стороне 6 кВ $I_{\text{НОМ}} = 918$ А; сопротивление трансформатора при среднем положении РПН без учета регулирования $x_T = 0,69$ Ом; максимальные и минимальные токи короткого замыкания при повреждениях в расчётных точках $K1$ – $K3$ соответственно, $I_{K-1\text{МАКС}} = 4,5$ кА, $I_{K-1\text{МИН}} = 3,9$ кА, $I_{K-2\text{МАКС}} = 2,87$ кА, $I_{K-2\text{МИН}} = 2,5$ кА, $I_{K-3\text{МАКС}} = 1,07$ кА, $I_{K-3\text{МИН}} = 0,93$ кА; максимальный рабочий ток в линиях $W1$ и $W2$ соответственно, $I_{\text{РАБМАКС}W1} = 300$ А и $I_{\text{РАБМАКС}W2} = 260$ А; номинальный ток трансформатора на стороне 6 кВ $I_{\text{НОМ}T-1} = 918$ А; максимальный коэффициент самозапуска для линии $W1$ и ввода 6 кВ трансформатора $T-1$, соответственно, $k_{C3W1} = k_{C3T-1} = k_{C3} = 1,1$.

Параметры срабатывания защит первого (нижнего) уровня с приемлемыми для сравнительного анализа допущениями и упрощениями определяются согласно [3–5]. На линиях, отходящих от шин 6 кВ подстанции, в соответствии с требованиями п. 3.2 правил устройства электроустановок (ПУЭ) должны устанавливаться трёхступенчатые токовые защиты.

В качестве первой ступени используют токовые отсечки мгновенного действия (селективные токовые отсечки). В качестве второй – токовые отсечки с выдержкой времени срабатывания (неселективные токовые отсечки). В качестве третьей ступени – максимальные токовые защиты (МТЗ).

Ток срабатывания первой ступени защиты, устанавливаемой на первой линии $W1$ (I_{TO1-1}), выбирается по условию отстройки от максимального тока КЗ при повреждении в точке $K2$:

$$I_{TO1-1} > I_{K-2\text{МАКС}}; \quad I_{TO1-1} = k_3 I_{K-2\text{МАКС}}; \quad I_{TO1-1} = 1,2 \cdot 2870 = 3440 \text{ А}.$$

Здесь k_3 – коэффициент запаса (можно принять $k_3 = 1,2$).

Ток срабатывания второй ступени защиты, устанавливаемой на первой линии $W1$ (I_{TO1-2}), выбирается по условию отстройки от тока срабатывания первой ступени защиты, устанавливаемой на второй линии $W2$:

$$I_{TO1-2} > I_{TO2-1}; \quad I_{TO1-2} = k_3^* I_{TO2-1}; \quad I_{TO1-2} = k_3^* k_3^{**} I_{K-3\text{МАКС}}; \\ I_{TO1-2} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1070 = 1540 \text{ А}.$$

Здесь k_3^* и k_3^{**} – коэффициент запаса второй ступени защиты линии $W1$ и коэффициент запаса первой ступени защиты линии $W2$ (их можно принять равными 1,2).

Ток срабатывания третьей ступени защиты (I_{MT31-3}), устанавливаемой на первой линии W1, выбирается по условию отстройки от максимального тока (тока самозапуска) в месте установки защиты (в линии W1) в послеаварийном режиме. Защита должна возвращаться в исходное состояние в послеаварийном режиме с наибольшим током самозапуска, который можно определить путем умножения коэффициента самозапуска на максимальный рабочий ток:

$$I_{B-MT31-3} > I_{C3АПМАКСW1}; \quad I_{MT31-3} = \frac{k_3}{k_B} I_{C3АПМАКСW1};$$

$$I_{MT31-3} = \frac{k_3 k_{C3}}{k_B} I_{РАБМАКСW1}; \quad I_{MT31-3} = (1,2 \cdot 1,1) / 0,85 \cdot 300 = 465 \text{ A}.$$

Здесь $I_{C3АПМАКС}$ – максимальный ток самозапуска в месте установки защиты; $I_{B-MT31-3}$ – ток возврата защиты (третьей ступени); k_B – коэффициент возврата защиты; k_{C3} – коэффициент самозапуска, характеризующий степень превышения тока самозапуска над максимальным рабочим током (можно принять равным 1,1).

Коэффициент чувствительности этой защиты (для основного действия) определяется отношением минимального тока КЗ при повреждении в конце линии W1 ($I_{K-2МИН}$) и тока срабатывания третьей ступени защиты (I_{MT31-3}):

$$k_{ЧMT31-3} = \frac{I_{K-2МИН}}{I_{MT31-3}}; \quad k_{ЧMT31-3} = 2500 / 465 = 5,4.$$

Выдержка времени срабатывания (t_{MT31-3}) определяется по условию отстройки от наибольшей из выдержек времени защит, установленных на следующих смежных линиях. Пусть МТЗ, установленная на линии W2 (t_{MT32-3}), имеет наибольшую выдержку времени (например, 0,5 с). Тогда

$$t_{MT31-3} > t_{MT32-3}; \quad t_{MT31-3} = \Delta t + t_{MT32-3}; \quad t_{MT31-3} = 0,3 + 0,5 = 0,8 \text{ с};$$

где Δt – степень селективности (можно принять $\Delta t = 0,3$ с).

В соответствии с требованиями ПУЭ [3] на вводе 6 кВ трансформатора должна устанавливаться МТЗ от внешних коротких замыканий, которая действует на вводной выключатель секции шин 6 кВ. По сути она выполняет функции резервирования защит, устанавливаемых на линиях, отходящих от соответствующей секции шин. Ток срабатывания этой МТЗ от внешних КЗ I_{MT31-1} определяется по условию отстройки от максимального тока самозапуска, возникающего в месте установки защиты в послеаварийном режиме

$$I_{\text{МТЗТ-1}} = \frac{k_3 k_{\text{СЗ}}}{k_B} I_{\text{РАБМАКСТ-1}};$$

$$I_{\text{МТЗТ-1}} = [(1,2 \cdot 1,1)/0,85] \cdot 1,4 \cdot 918 = 1996 \text{ А.}$$

Здесь $I_{\text{РАБМАКСТ-1}}$ – максимальный рабочий ток трансформатора Т-1. Этот ток, как правило, принимают равным току трансформатора при допустимой перегрузке 1,4 номинальной нагрузки.

Выдержка времени срабатывания МТЗ от внешних КЗ определяется по условию отстройки от наибольшей выдержки времени защит, установленных на других присоединениях секции шин, в том числе на междусекционном соединении. Допустив, что третья ступень защиты, установленной на линии W1, имеет наибольшую выдержку времени из защит линий, можно записать:

$$t_{\text{МТЗТ-1}} > t_{\text{МТЗ1-3}}; \quad t_{\text{МТЗТ-1}} = 2Vt + t_{\text{МТЗ1-3}}; \quad t_{\text{МТЗТ-1}} = 2 \times 0,3 + 0,8 = 1,4 \text{ с.}$$

Удвоенная ступень селективности $2\Delta t$ здесь нужна для того, чтобы согласовать МТЗ, устанавливаемую в цепи секционного выключателя, с МТЗ третьей ступени защиты линии W1 и МТЗ от внешних КЗ, устанавливаемой в выходной цепи трансформатора.

При традиционном резервировании защит отходящих линий коэффициент чувствительности этой МТЗ от внешних КЗ определяется отношением минимального тока КЗ в месте установки защиты ($I_{\text{К-2МИН}}$), при повреждении в точке К-2 в конце линии с резервируемой защитой, и тока срабатывания МТЗ от внешних КЗ:

$$k_{\text{ЧМТЗТ-1}} = \frac{I_{\text{К-2МИН}}}{I_{\text{МТЗТ-1}}}; \quad k_{\text{ЧМТЗТ-1}} = 2500 / 1996 = 1,25.$$

Необходимо отметить, что коэффициент чувствительности МТЗ от внешних КЗ, как правило, невелик. В численном примере, как видно, он имеет предельно допустимое значение.

Параметры срабатывания защит второго уровня, реализованных в блоке цифровых централизованных защит (в обозначении они имеют дополнительный индекс «Ц»), выбираются по аналогии и численно равны параметрам срабатывания соответствующих защит первого уровня.

Сравнительный анализ параметров срабатывания защит позволяет выявить следующие соотношения, характеризующие улучшение свойств защит.

Во-первых, в случае резервирования МТЗ, установленной на линии W1, ток срабатывания резервной защиты (МТЗ от внешних

КЗ) больше тока срабатывания третьей ступени цифровой централизованной защиты линии W1 второго уровня. Учитывая реальные значения коэффициентов k_3 , k_{C3} , k_B , которые, как правило, выбираются, практически равными для этих защит, можно записать:

$$I_{MT3T-1} = \frac{k_3 k_{C3}}{k_B} I_{РАБМАКСТ-1} > I_{ЦМТ31-3} = \frac{k_3 k_{C3}}{k_B} I_{РАБМАКСW1}.$$

Следовательно, коэффициент чувствительности, резервной цифровой централизованной защиты линии W1 второго уровня больше, чем соответствующий коэффициент традиционной резервной защиты МТЗ от внешних КЗ:

$$k_{ЦМТ31-3} = \frac{I_{K-2МИН}}{I_{MT31-3}} > k_{ЧМТ3Т-1} = \frac{I_{K-2МИН}}{I_{MT3Т-1}}.$$

Это иллюстрируется численным примером:

$$\frac{k_{ЦМТ31-3}}{k_{ЧМТ3Т-1}} = \frac{I_{MT3Т-1}}{I_{MT31-3}} = 1996 / 465 = 4,3 > 1.$$

Во-вторых, в случае резервирования МТЗ, установленной на линии W1, резервной защитой (МТЗ от внешних КЗ) при повреждении на линии W1 отключается вводным выключателем полностью секция шин вместе со всеми отходящими линиями. В отличие от этого в аналогичных условиях резервной цифровой централизованной защитой линии W1 второго уровня отключается только поврежденная линия. Следовательно, при резервировании степень селективности цифровой централизованной защиты линии W1 второго уровня выше, чем при традиционном резервировании.

В-третьих, время срабатывания резервного действия цифровой централизованной защиты линии W1 второго уровня меньше времени срабатывания традиционной резервной МТЗ от внешних КЗ:

$$\frac{t_{MT31-3}}{t_{MT3Т-1}} = \frac{Vt + t_{MT32-3}}{3Vt + t_{MT32-3}} < 1.$$

Более высокое быстродействие резервного действия цифровой централизованной защиты иллюстрирует численный пример:

$$\frac{t_{MT31-3}}{t_{MT3Т-1}} = 0,8 / 1,4 = 0,57 < 1.$$

Дистанционное управление коммутационными аппаратами может быть реализовано как через базовый терминал защиты и автоматики, так и через централизованный терминал. Централи-

зованный терминал принимает команду управления от верхнего уровня, обрабатывает её и отправляет в ПРЦ сигнал «замкнуть реле», в данном случае централизованная защита служит промежуточным аналитическим звеном между пунктом управления и непосредственным воздействием на привод выключателя. Если базовый терминал защиты не способен выполнить свои функции, то функция автоматики управления выключателем реализуется в ПРЦ, поскольку каждый преобразователь привязан к конкретному выключателю. В этом случае дистанционное управление реализуется через централизованный терминал воздействием ПРЦ непосредственно на привод выключателя.

На основе изложенного подхода разработана и реализована цифровая система релейной защиты для двухтрансформаторной подстанции распределительной сети. Разработана аппаратная часть системы защиты, алгоритмы и программы, реализующие функции релейной защиты. Опытный образец разработанной системы релейной защиты установлен на действующей подстанции «Аэропорт» филиала ПАО «МРСК Центра и Приволжья» – «Удмуртэнерго» и введен в эксплуатацию в декабре 2018 года.

Опытный образец построен в виде двухуровневой структуры. Первый уровень содержит локальные централизованные цифровые защиты силовых узлов (сегментов) подстанции и терминалы защиты присоединений (защиты для отходящих линий, вводов, междусекционных соединений, трансформаторов и питающих вводов), которые могут автономно выполнять все функции релейной защиты, предусмотренные нормативными документами. Этот первый уровень был реализован в первой очереди строительно-монтажных и пуско-наладочных работ на основе терминалов серии Бреслер-0107.2хх.

Централизованная цифровая защита выполнена на основе трёх терминалов (платформа Бреслер-0107.890), в которых предусмотрен взаимный обмен дискретными данными в локальной сети по протоколу МЭК 61850. Эти терминалы выполняют функции резервирования защиты и автоматики как при нормальной работе базовых терминалов РЗА первого уровня, так и при сбое любого базового терминала РЗА.

Первый терминал централизованных цифровых защит выполняет централизованное резервирование защит трансформа-

торов, установленных на стороне высшего напряжения. Второй и третий терминалы централизованных цифровых защит выполняют централизованное резервирование защит всех присоединений первой и второй секций шин подстанции. Управляющие воздействия выполняются через дополнительные модули ПРЦ, связь с которыми организована по протоколу МЭК 61850. На подстанции удалось достичь полного замещения функций; при этом выход из строя базового терминала не создает пробелов в функционировании и оперативном управлении.

Необходимо отметить, что разработанная структура цифровой системы защиты и предложенные организационные принципы реализации позволили в условиях интенсивной работы подстанции (без вывода из работы на длительный срок) выполнить все строительно-монтажные и пуско-наладочные работы по переводу её в разряд «цифровых» подстанций за 6 месяцев.

Заключение

1. Создан проект, рабочая документация и опытный образец цифровой системы релейной защиты, интегрированной в единую систему управления подстанции по технологии «Цифровая подстанция».

2. Разработана методика выбора параметров срабатывания (согласования) защит, устанавливаемых на стороне низшего напряжения подстанции. Выполнены расчёты параметров срабатывания защит.

3. Проведен анализ чувствительности и селективности защит, результаты которого позволили сделать вывод о существенном улучшении основных свойств (селективности, быстродействия, чувствительности и надёжности) защит.

Литература

1. Булычев А.В. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем / А.В. Булычев, Д.С. Васильев, В.Н. Козлов, Д.Н. Силанов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 70–76.

2. Патент RU № 194011 «Цифровое устройство защиты для электрической подстанции» / Булычев А.В. и др. – Бюл. № 33; 25.11.2019.

3. Правила устройства электроустановок / М-во энергетики РФ. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 640 с.

4. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита / Н.В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.

5. *Булычев А.В.* Релейная защита в распределительных электрических сетях / А.В. Булычев, А.А. Наволочный. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011. – 208 с.

М.Г. Попов, В.К. Ванин, Ю.А. Бобко, Л. Чжиюй, Н.Г. Павлов
(Санкт-Петербург, СПбПУ Петра Великого)

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИКИ СТУПЕНЧАТОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Энергобезопасность и надёжность современных АЭС достигается за счёт многократного резервирования схем питания и систем защиты и автоматики особо ответственных электроприёмников, а также за счёт периодических (в соответствии с регламентом) проверок устойчивой работы автономных схем электроснабжения потребителей собственных нужд. В последнем случае для автономного питания особо ответственных потребителей и механизмов собственных нужд предусматривают дизель-генераторы, номинальная мощность которых выбирается исходя из расчётных условий успешного пуска ранее указанных электроприёмников при одновременной потере рабочего и резервного источников электроснабжения. Как правило, выбранная в соответствии с этим принципом номинальная мощность дизель-генератора является соизмеримой с суммарной установленной мощностью асинхронной нагрузки, участвующей в процессе самозапуска (или вводимых резервных асинхронных двигателей), вследствие потери централизованного питания системы собственных нужд.

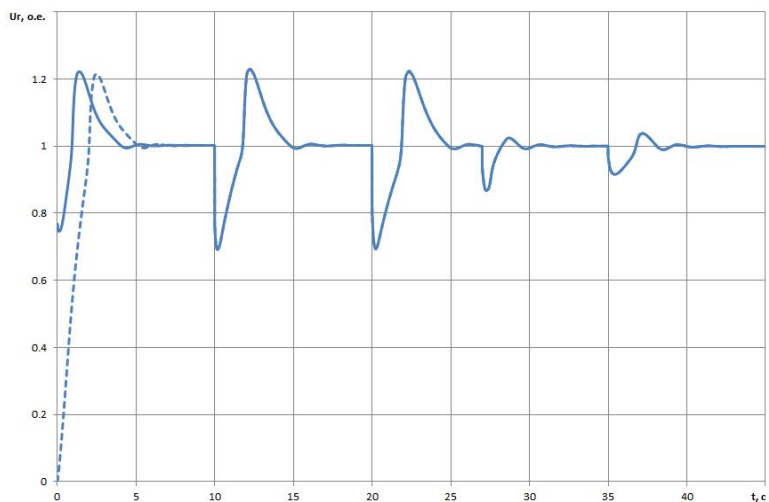
Эти нестационарные режимы пуска, самозапуска мощных асинхронных двигателей особо ответственных механизмов собственных нужд АЭС, как известно, характеризуются значительными бросками фазных токов и снижением уровня напряжений в автономной системе электроснабжения. В связи с этим для определения принципов управления каскадным пуском асинхронных двигателей в устройствах автоматики ступенчатого пуска становится ак-

туальным численное исследование таких нестационарных режимов автономных систем электроснабжения особо ответственных электроприёмников собственных нужд АЭС (СН АЭС).

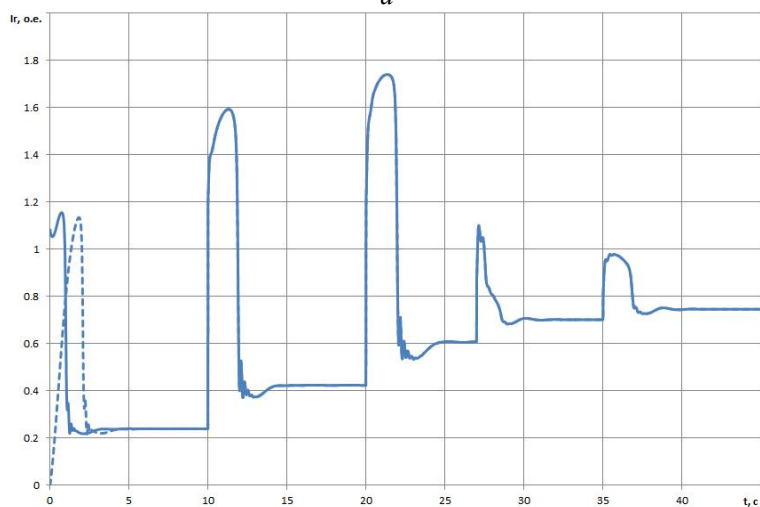
С учётом сказанного выше целью исследований, выполненных в настоящей работе, является выявление особенностей динамических свойств и условий устойчивой работы автономной системы электроснабжения, а также определение параметров срабатывания пусковых органов модернизированной автоматики ступенчатого пуска асинхронных двигателей (АД) особо ответственных механизмов СН АЭС.

Объектом исследований является модель автономной системы надёжного питания собственных нужд атомной электрической станции. Предметом исследований являются динамические свойства автономной системы электроснабжения в нестационарных режимах её работы, обусловленных пуском особо ответственных электроприёмников собственных нужд, с учетом действия адаптивной автоматики ступенчатого пуска. Состав и паспортные характеристики силового электрооборудования автономной системы электроснабжения, используемые для разработки соответствующих математических моделей, полностью соответствуют данным 3 канала системы аварийного электроснабжения (САЭ) блока № 1 Кольской АЭС [1, 2]. Методика исследования динамических свойств автономной системы надёжного питания электроприёмников СН АЭС основана выполнении численных (с помощью прикладного программного обеспечения, позволяющего выбирать заданный сценарий пуска асинхронной нагрузки) и физических экспериментов (в выделенной схеме на АЭС), последующем сравнительном анализе полученных результатов экспериментальных исследований в нестационарных режимах работы начального возбуждения дизель-генератора (рис. 1, *а* и *б*).

Анализ полученных расчётных характеристик позволяет сделать заключение об успешности ступенчатого пуска асинхронных двигателей в соответствии с заданной в стандартном алгоритме автоматики очередностью и временем их подключения. При этом основные качественные различия в протекании нестационарного режима в автономной системе электроснабжения при отсутствии или наличии предварительного возбуждения характерны только для запуска асинхронных двигателей нулевой ступени (рис. 1).



a



б

Рис. 1. Характеристики изменения среднеквадратичных значений фазных напряжений (*a*) и токов (*б*) дизель-генератора при отсутствии (штриховая линия) и наличии (сплошная линия) его начального возбуждения в нестационарных режимах ступенчатого пуска

В частности, при отсутствии начального возбуждения дизель-генератора продолжительность пуска этих двигателей не-

существенно больше и составляет около 6,1 с. В целом описанная особенность начальной стадии переходного процесса обусловлена недостаточным уровнем напряжения и, как следствие этого, малым уровнем электромагнитного момента. Дополнительно следует отметить значительную продолжительность пуска всех очередей – около 45–50 с, а также наличие перерегулирования напряжения на шинах 6 кВ.

Достоверность методики и полученных с её помощью результатов подтверждена при их сопоставлении с результатами физического эксперимента по ступенчатому пуску асинхронных двигателей собственных нужд автономной схемы электроснабжения блока № 1 Кольской АЭС [2].

Для повышения быстродействия запуска двигателей и снижения уровня напряжения при развороте асинхронных двигателей предложен и апробирован адаптивный алгоритм автоматики ускоренного ступенчатого пуска (АУСП, рис. 2).

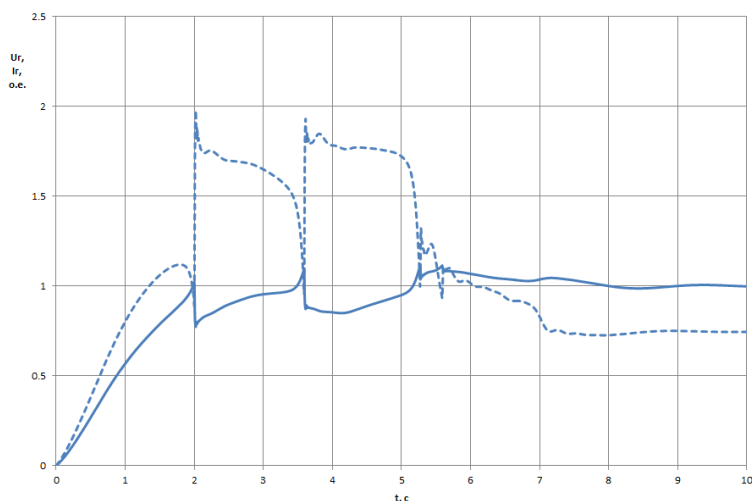


Рис. 2. Характеристики изменения среднеквадратичных значений фазного напряжения (сплошная линия) и тока (штриховая линия) дизель-генератора при действии АУСП особо ответственных электроприёмников

Принцип действия АУСП основан на контроле отношения напряжения и тока, а также среднего значения их производной. В момент времени, когда данные значения превысят заданные устав-

ки, в алгоритме АУСП происходит формирование команды на пуск следующей ступени. Определяемая таким образом очередность включения позволяет ускорить запуск особо ответственных механизмов собственных нужд АЭС и снизить при этом электродинамическое воздействие пусковых токов на дизель-генератор (рис. 2).

По результатам анализа полученных осциллограмм (рис. 2) видно, что время разворота всех двигателей составляет не более 7 с, при этом максимальный ток генератора не превышает двукратных значений (по отношению к номинальному значению) при снижении напряжения не более чем на 20 % в процессе пуска первой очереди. Кроме этого, применение такого адаптивного принципа автоматического управления позволяет избавиться от эффекта перегулирования напряжения дизель-генератором.

Литература

1. *Черновец А.К.* Электрическая часть АЭС (переходные процессы в системах электроснабжения): учеб. пособие / А.К. Черновец. – Л.: ЛПИ, 1980. – 79 с.

2. Отчёт о научно-исследовательской работе по дополнительному соглашению № 1 к договору № 140202002 от 12.09.2000 «Расчёты и экспериментальная проверка ступенчатого нагружения дизель-генераторов блоков 1, 2 Кольской АЭС по проекту реконструкции системы надёжного питания». – СПб., 2003.

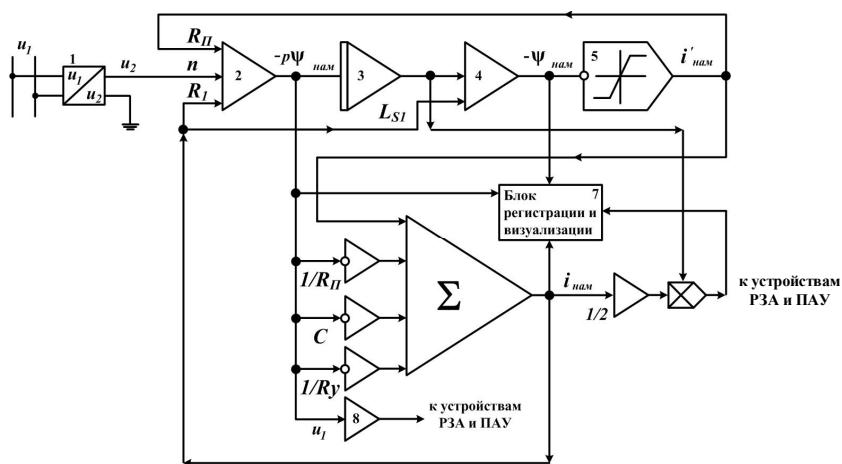
В.К. Ванин, М.Г. Попов, И.В. Ванин, Л.С. Кузнецов
(Санкт-Петербург, СПбПУ Петра Великого)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ЗАЩИТЫ

Важнейшей задачей дальнейшего развития средств релейной защиты оборудования энергетических систем, противоаварийного управления ими, измерения, регистрации аварийных событий является повышение точности их работы в стационарных и нестационарных режимах, расширение функциональных возможностей, увеличение надёжности функционирования. Всё сказанное может быть достигнуто дальнейшим повышением степени их цифровизации, и как следствие, автоматизации обслуживания.

При этом значительную роль играет устранение как инструментальных, так и методических ошибок при синтезе той или иной системы. Как правило, большое внимание следует обращать на входные датчики, которыми являются измерительные трансформаторы тока и напряжения. Эти элементы характеризуются значительными нелинейными передаточными характеристиками и определяют погрешность всей системы в целом. Учитывая большое разнообразие трансформаторов и схем их соединения, в докладе рассматриваются первичные измерительные и силовые масляные трансформаторы, для которых важно построить собственную защиту от характерных повреждений, отличающуюся от недостаточно совершенных газовых реле.

На рисунке показана структурная схема фильтра, компенсирующего методические и инструментальные погрешности измерения первичного напряжения двухобмоточного трансформатора с системой защиты на его основе, который можно назвать фильтром тока намагничивания. Методические и инструментальные погрешности, как правило, обуславливаются физическими параметрами первичной обмотки и цепей их подключения, а также параметрами вторичных обмоток и цепей нагрузки [1–6].



Структурная схема измерения первичного напряжения трансформаторов с учетом составляющих тока намагничивания

Приведенная на рисунке схема содержит ряд элементов с широко принятыми обозначениями и решает следующую систему:

$$\begin{aligned}
u_1 &= i_{\text{нам}} R_1 + L_{\Sigma 1} p i_{\text{нам}} + u_2 n, \\
p u_1 &= - p u_{\text{нам}} = i_{\Phi} R_{\Pi} + u_2 n, \\
i_{\Phi} &= f(\psi_{\text{нам}}) = \psi_{\text{нам}} / M_{\text{диф}}, \\
i_{\text{нам}} &= i_{\Phi} + i_{\Pi}, \\
i_{\Phi} &= H l / w_1,
\end{aligned}$$

где u_1, u_2 – напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора, В; $u_2 n$ – ЭДС, индуцируемая на первичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода, В; ψ_1 – потокосцепление первичной обмотки, В·с; $i'_{\text{нам}}$ – ток намагничивания в сердечнике, А; R_{Π} – сопротивление потерь от тока намагничивания, Ом; $M_{\text{диф}}$ – дифференциальная взаимная индуктивность, Гн; H – напряженность магнитного поля в сердечнике, А/м.

Главной особенностью схемы является то, что устранение методических и инструментальных ошибок, обусловленных параметрами вторичных цепей и сопротивлением нагрузки трансформатора, достигается переводом его практически в режим холостого хода с помощью электронного цифрового или аналогового сумматора с большим входным сопротивлением и коэффициентом передачи, как показано на рисунке, равным коэффициенту трансформации n .

В этом случае характеристика намагничивания $\psi_{\text{нам}} = f(i_{\text{нам}})$ соответствует заданной характеристике намагничивания сердечника трансформатора $B = f(H)$, а $p \psi_{\text{нам}}$ равно действительному первичному напряжению на выходе первого сумматора (см. рисунок). Площадь воспроизводимой характеристики намагничивания соответствует энергии магнитного поля $W_{\text{эм}} = (\psi_{\text{нам}} i_{\text{нам}}) / 2$.

Рассмотрим некоторое частное практическое приложение предложенной авторами схемы. При возникновении повреждения межлистовой изоляции магнитного сердечника замыкается накоротко сопротивление утечки и межлистовая ёмкость и существенно увеличиваются токи смещения и утечки, а также энергия магнитного поля $W_{\text{эм}}$ (площадь характеристики намагничивания). В результате срабатывают блоки защиты на отключения трансформатора. При этом

$$i_{\text{нам}} = i_{\Phi} + i_{\Pi} + i_{\text{см}} + i_y;$$

$$i_{\Pi} = \frac{pY_{\text{нам}}}{R_{\Pi}}; i_{\text{см}} = pY_{\text{нам}}C; i_y = \frac{pY_{\text{нам}}}{R_y}; i_{\phi_{\text{нам}}} = f(y_{\text{нам}}),$$

а напряжение на выходе первого сумматора соответствует аварийному режиму.

Для устранения методической и инструментальной погрешности обусловленными параметрами вторичной цепи и нагрузки введен блок квазигальванической развязки 8 (см. рисунок) характеризующийся большим входным и достаточно малым выходным сопротивлениями.

Здесь мы не останавливаемся на большом разнообразии электронных преобразователей для этих целей, включая оптические линии связи с нагрузкой различного назначения. И в заключение можно сказать, что в целом рекомендуется предложенная усовершенствованная система воспроизведения первичного напряжения и защиты трансформаторов.

Литература

1. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. Нелинейные цепи электромагнитного поля / Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев, С.С. Хухриков. – Под ред. Г.И. Атабекова, в 3-х ч. – М.: Энергия, 1966. – 280 с.

2. *Вольдек А.И.* Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

3. *Федосеев А.М.* Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

4. *Дроздов А.Д.* Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А.Д. Дроздов. – М.: Энергия, 1965. – 240 с.

5. *Ванин В.К.* Релейная защита на элементах аналоговой вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 207 с.

6. *Ванин В.К.* Воспроизведение токов и напряжений измерительных трансформаторов тока / В.К. Ванин, В.Н. Забоин, М.Г. Попов и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2018. – № 4. – С. 42–45.

А.А. Ворошилов, М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов
(Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

АВТОМАТИКА ОТКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА

Проблема сокращения потерь электроэнергии является актуальной. Эксплуатация трансформаторов подстанций (ПС) с низким коэффициентом загрузки приводит к тому, что потери холостого хода возрастают, а КПД снижается. Один из способов сокращения потерь – снижение потерь холостого хода в трансформаторах на ПС. Для того чтобы снизить потери холостого хода, целесообразно увеличить коэффициент загрузки трансформаторов путем отключения части трансформаторов и перевода всей нагрузки на трансформаторы, оставшиеся в работе.

Опыт решения данной проблемы ограничивается осуществлением переключений вручную оперативным персоналом [1, 2]. Также имеющиеся в нормативной и специальной литературе выражения для расчётов исходят либо из режима параллельной работы трансформаторов с одинаковыми параметрами, либо учитывают отличия параметров, но считают все трансформаторы работающими с одинаковыми коэффициентами загрузки. Оба эти варианта приводят к недопустимо большим погрешностям.

В современной электроэнергетике активно развивается, совершенствуется и внедряется технология «цифровой подстанции», подразумевающая использование новых информационных потоков между цифровыми устройствами и первичным оборудованием. Одной из задач «цифровой подстанции» является оптимизация потерь электрической энергии в первичном оборудовании. На основе современных интеллектуальных устройств (ИЭУ или IED) возможно создание новой автоматики нормального режима – автоматики отключения силовых трансформаторов, выполняющей переключения силовых трансформаторов на ПС в зависимости от текущей трансформируемой мощности с целью снижения потерь электроэнергии. Для максимально эффективного функционирования такой автоматики нормального режима требуется отслеживание тренда графика нагрузки ПС.

Для реализации автоматики отключения трансформаторов разработаны:

1) метод выбора числа работающих трансформаторов в произвольно заданной трансформаторной группе ПС по критерию минимума технических потерь электроэнергии в трансформаторах ПС;

2) дополнительные критерии выбора и метод многокритериальной оптимизации (минимум затрат, минимум сокращения ресурса выключателей, учет ограничений на переключения со стороны потребителей) [3];

3) программно-аппаратная архитектура данной системы управления.

Литература

1. *Воротницкий В.Э.* РД 34.09.254. Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.М. Максимов / Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации, 1986.

2. *Железко Ю.С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2009. – 456 с.

3. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции / Г. Ван Трис / пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1972. – 744 с.

К.Е. Веснин, А.А. Шемякин
(Томск, Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники)

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В современном мире одними из самых распространенных преступлений стали правонарушения в области информационно-коммуникационных технологий. Только в 2019 году количе-

ство таких нарушений, совершенных на территории Российской Федерации, выросло на 68,5 % и составило 294,4 тысячи выявленных случаев, что в свою очередь составляет 14,5 % от общего числа зарегистрированных преступлений [1].

Определение киберпреступления достаточно широко: так называется любая деятельность, целью которой является неправомерное использование компьютера, компьютерной сети или сетевого устройства [2]. В 2018 году спецслужбы США открыто заявили о том, что хакеры получили доступ к критическим объектам инфраструктуры. Первому удару по их мнению должны были подвергнуться энергетические станции.

И действительно, энергетические станции являются уязвимым звеном, особенно в эпоху всеобщей автоматизации. Отсутствие четкой политики в сфере информационной безопасности электростанций может привести к пугающим последствиям. Захват контроля над критически важными объектами может быть произведен не только для получения прибыли злоумышленником, но и в качестве террористического акта, также не исключается вероятность информационной атаки со стороны другого государства.

Современные электростанции используют в своем составе автоматизированные системы управления технологическими процессами, которые могут быть объединены в промышленные сети, связанные с офисными сетями. Объектами нападения могут быть именно эти офисные сети, имеющие доступ в интернет. Именно такие сети и являются привлекательными для атак злоумышленников. В случае использования таких сетей необходимо обеспечивать безопасность каждого отдельного рабочего места, не только фильтруя межсетевой трафик, но и не допуская несанкционированного доступа к рабочему месту подключения внешних носителей и других устройств.

Смотря на проблему с этой стороны, важно учитывать тренд на децентрализацию генерации энергии. Конечно, децентрализованная сеть имеет определённые преимущества перед централизованной. В большинстве случаев она основана на возобновляемых источниках энергии, которая существенно дешевле энергии, выработанной с использованием горючих ископаемых. Однако, если централизованные поставщики энергии обладают возможностями к защите своих сетей и данных, то с переходом на децентрализован-

ную энергетику мы можем столкнуться с серьезной проблемой атак на локальные генераторы, например при их объединении в сети для оптимизации нагрузки и обмена излишками электроэнергии возникает угроза нападения на такие объединения, а именно: возможность кражи энергии, вымогательства денежных средств для возобновления доступа к сети, нанесения ущерба отдельным гражданам или бизнесу. В такой ситуации под угрозой могут оказаться целые городские районы.

В случае широкого распространения децентрализованных электросетей необходимо провести большую работу. Важным её пунктом является принятие единых стандартов, позволяющих удостовериться в их безопасности, создание новых регулирующих органов.

Литература

1. Краткая характеристика состояния преступности в Российской Федерации за январь–декабрь 2019 года / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://мвд.рф/reports/item/19412450> (дата обращения: 09.04.2020).

2. Советы по защите от киберпреступности / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/what-is-cybercrime> (дата обращения: 10.04.2020).

А.В. Булычев, И.В. Чернышев
(Чебоксары, ООО «НПП Бреслер»)

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ С ПРЕВЕНТИВНЫМ ВЫЯВЛЕНИЕМ ПОВРЕЖДЕНИЙ

При возникновении механического дефекта в асинхронном электродвигателе (АД) или в его нагрузке, момент сопротивления, действующий на вал электродвигателя, периодически изменяется с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора электродвигателя составляющих с частотой, связанной с частотой вращения вала. Отделение этих составляющих от составляющих тока основной частоты и контроль их уровня позволяют обнаружить дефекты в механической части привода [1].

Связь отдельных составляющих тока статора с характером перегрузки при возникновении механических дефектов можно установить, пользуясь общепринятой эквивалентной схемой замещения АД, представленной на рис. 1 [2].

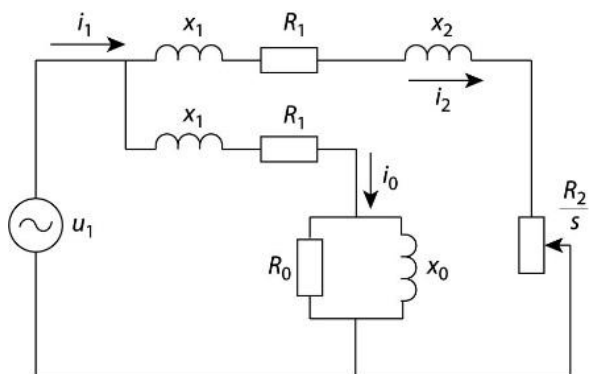


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения асинхронного электродвигателя

Ток фазы статора АД в соответствии со схемой замещения при синусоидальном напряжении питания определяется по формулам [3]

$$i_1 = i_0 + i_2 = i_0 + \frac{U_{1m} \sin(\omega_1 t - j)}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (R_1 + R_2/s)^2}};$$

$$j = \arctg \frac{\dot{e}(x_1 + x_2)}{\dot{e}} \frac{\omega}{R_1} + \frac{R_2}{s} \frac{\dot{u}}{\dot{u}};$$

где i_0 и i_2 – ток намагничивания и ток ротора электродвигателя; U_{1m} – амплитуда напряжения питания; x_1 и x_2 – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; ω_1 – частота питающего напряжения; t – время.

Ток статора определяется не только напряжением питания и параметрами электродвигателя, но и скольжением. Скольжение АД в свою очередь зависит от вращающего момента и, следовательно, от момента сопротивления вращению. Для анализа удобно использовать представление момента сопротивления M_c (рис. 2)

суммой статической M_0 и периодической синусоидальной составляющих, который определяется по формуле

$$M_c = M_0 + M_A \sin \alpha t,$$

где M_A – амплитуда изменения периодической составляющей момента; α – угловая скорость изменения периодической составляющей момента.

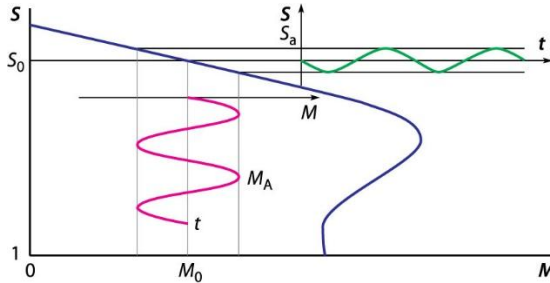


Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Решение уравнения движения ротора электродвигателя

$$J da/dt + M_c = M,$$

при этих условиях имеет вид

$$M = M_0 + \frac{M_A}{\sqrt{1 + (aT_n)^2}} \sin(a t - q) + \frac{M_A \sin q}{\sqrt{1 + (aT_n)^2}} e^{-\frac{t}{T_n}},$$

где $T_n = J\omega_0 s_n / M_n$; $\theta = \arctg a T_n$; M – вращающий момент электродвигателя; J – момент инерции агрегата двигателя – механизм; ω_0 – синхронная угловая скорость вращения ротора; s_n и M_n – номинальное скольжение и вращающий момент электродвигателя.

На линейном участке механической характеристики связь скольжения s и вращающего момента можно выразить формулой

$$s = M s_n / M_n.$$

Тогда для установившегося режима работы, скольжение определяется формулой

$$s = s_0 + s_A \sin \alpha t,$$

где

$$s_0 = M_0 \frac{s_n}{M_n}; s_A = \frac{M_A s_n}{M_n \sqrt{1 + (a T_n)^2}}.$$

Периодическое изменение скольжения вызывает периодическое изменение эквивалентного сопротивления АД. Изменение этого сопротивления в свою очередь вызывает изменение тока статора с частотой, равной α . Однако источник питания имеет частоту ω_1 , отличную от α , и в токе статора появляются составляющие не только с частотой сети, но и с частотами, определяемыми механическими возмущениями.

Учтём реальные соотношения параметров АД, когда скольжение не превышает 0,1,

$$x_1 + x_2 = \frac{R\phi}{s}; \quad R_1 = \frac{R\phi}{s}.$$

С целью получения наглядных зависимостей можно принять $x_1 + x_2 = R_1 = 0$ и представить ток статора уравнением

$$i_1 = i_0 + \frac{U_{1m} s_0}{R\phi} \sin(\omega_1 t - j) + \frac{U_{1m} s_A}{R\phi} \sin \alpha t \sin(\omega_1 t - j).$$

Подставив в это выражение значение тока намагничивания и разложив произведение синусоидальных функций на две составляющие, получим

$$i_1 = I_{0m} \sin(\omega_1 t - \Psi) + \frac{U_{1m} s_0}{R\phi} \sin(\omega_1 t - j) + \\ + \frac{U_{1m} s_A}{2R\phi} [\cos(b t - j) - \cos(g - j)].$$

где I_{0m} и Ψ – амплитуда и фаза тока намагничивания;

$$b = \omega_1 - \alpha; \quad g = \omega_1 + \alpha.$$

Ток статора при механических повреждениях АД, как видно, содержит составляющие с частотами, равными частоте источника питания, разности частот источника питания и вращения ротора и сумме этих частот. Если машина имеет p пар полюсов, то частоты составляющих соответственно равны

$$b\phi = \frac{b}{2p} = \frac{\omega_1}{2p} \frac{\pi}{\phi} + \frac{s - 1}{p} \frac{\pi}{\phi}; \\ g\phi = \frac{g}{2p} = \frac{\omega_1}{2p} \frac{\pi}{\phi} + \frac{1 + s}{p} \frac{\pi}{\phi}$$

Приняв $s = s_0$ и считая частоту питающей сети равной 50 Гц, можно оценить диапазон изменения β' и γ' . Ограничившись режимами работы АД, при которых скольжение s_0 может изменяться от 0,01 до 0,1, будем иметь для двухполусной машины (синхронная скорость 3000 об/мин) диапазоны возможных изменений частоты β' от 0,5 до 5 Гц и γ' от 99,5 до 95 Гц, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны возможных изменений частот
в зависимости от параметров асинхронного двигателя

Параметры АД		Частота $\beta/2\pi$, Гц		Частота $\gamma/2\pi$, Гц	
n , об/мин	$\omega_0/2\pi$, Гц	$s = 0,01$	$s = 0,1$	$s = 0,01$	$s = 0,1$
3000	50	0,5	5	99,5	95
1500	25	25,25	27,5	74,75	72,5
1000	16,7	33,5	35	66,5	65
750	12,5	37,6	38,75	62,4	61,25
600	10	40,1	41	59,9	59
500	8,3	41,75	42,5	58,85	57,5

Следует отметить, что чем больше полюсов имеет машина, тем меньше изменяются частоты β' и γ' при изменении скольжения и тем ближе они к частоте источника питания. Для АД с $p = 6$ (синхронная скорость 500 об/мин) имеем частоты соответственно: от 41,75 до 42,5 Гц и от 58,25 до 57,6 Гц.

Амплитуды составляющих тока с частотами β и γ зависят не только от напряжения питания и собственных электрических параметров АД, но и от амплитуды переменной составляющей скольжения, которая в свою очередь определяется амплитудой колебаний момента сопротивления вращению вала и инерционностью вращающихся элементов агрегата:

$$\frac{s_A}{s_0} = \frac{M_A}{M_0 \sqrt{1 + (\alpha T_n)^2}}. \quad (1)$$

Из отношения (1) следует, что чем больше величина αT_n , тем меньше изменяется скольжение при изменении момента сопротивления и меньше амплитуда анализируемых составляющих тока,

$$\alpha T_n = J \frac{s_H}{P_H} \omega_0^3 (1 - s_H)^2. \quad (2)$$

Приняв во внимание равенство (2) можно отметить, что инерционные свойства проявляются больше у высокоскоростных двигателей, чем у тихоходных. Кроме того, собственный момент инерции двигателя связан с его номинальной мощностью степенной зависимостью с показателем больше 1 [2], поэтому увеличение номинальной мощности АД влечет за собой существенное усиление его инерционности.

В нормальных эксплуатационных режимах момент сопротивления, а следовательно, и вращающий момент АД с круговой симметрией ротора не зависят от угла поворота вала и не содержат переменной составляющей момента. Это приводит к тому, что скольжение не изменяется периодически и в токе статора отсутствуют составляющие с частотами β и γ , отличными от частоты источника питания.

Установленная связь между механическими возмущающими воздействиями на ротор АД и током статора дает основание полагать, что дефекты в механической части машины могут быть выявлены путем частотной фильтрации отдельных составляющих тока статора и контроля их уровня.

Для экспериментального подтверждения возможности определения механического повреждения двигателя по частотам, отличным от частоты питающей сети и кратным ей, создан испытательный стенд, изображенный на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид стенда для испытаний двигателя

В качестве испытуемого двигателя был выбран асинхронный двигатель типа АДМ112МА6У2 со следующими номинальными параметрами: $P_{\text{ном}} = 3 \text{ кВт}$, $I_{\text{ном}} = 7,6 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 950 \text{ об/мин}$, $\cos \varphi = 0,79$. В качестве средства измерения и фильтрации тока

статора использовался терминал защиты двигателя Бреслер-0107.250 с частотой дискретизации 8 кГц.

Имитировались различные механические повреждения электродвигателя: нарушение эксцентриситета, разрушение подшипника вала (табл. 2).

Таблица 2

Описание режимов работы двигателя при проведении испытаний

Тип нагрузки	Вид повреждения	Способ имитации повреждения	Спектрограмма тока статора
Номинальная	Эксцентриситет	На лопасть крыльчатки вентилятора закреплен груз массой 100 г, который зацепляет корпус при каждом повороте	Рис. 5
Номинальная	Повреждение подшипника вала	Разрезана обойма подшипника вала	Рис. 6

При каждом опыте фазные токи и напряжения в двигателе фиксировались терминалом Бреслер-0107.250 и записывались соответствующие осциллограммы.

На основе анализа полученных осциллограмм, а именно частотном спектральном анализе тока статора электродвигателя строилась спектрограмма тока статора в диапазоне от 30 до 70 Гц с шагом 0,5 Гц с предварительной фильтрацией частоты основной гармоники 50 Гц.



Рис. 4. Крыльчатка вентилятора с грузом массой 100 г

Для имитации повреждения крыльчатки вентилятора, на ней был установлен груз массой 360 г. На рис. 4 изображен груз и способ крепления его к крыльчатке.



Рис. 5. Спектрограмма тока статора с поврежденной крыльчаткой вентилятора (груз массой 360 г)

Для имитации повреждения подшипника вала электродвигателя была разрезана обойма подшипника. На рис. 6 изображен данный подшипник, который устанавливался на вал, который, в свою очередь был закреплен к валу двигателя.



Рис. 6. Подшипник с разрезанной обоймой



Рис. 7. Спектрограмма тока статора
с поврежденным подшипником (разрезана обойма)

Выводы

1. Данный способ дает возможность выявления дефектов в подшипниковых узлах асинхронных электродвигателей и их нагрузок по току статора электродвигателя.

2. В основу алгоритма действия устройства должен быть положен специальный метод фильтрации составляющих тока с частотами, отличными от частоты источника питания и кратными ей в диапазоне от 0 до 100 Гц.

3. Для данного метода должны использоваться фильтры с добротностью, достаточной для фильтрации тока статора с шагом не менее 0,5 Гц.

4. Проведенные практические испытания подтвердили теоретические основы метода.

Литература

1. Булычев А.В. Способ защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки / А.В. Булычев, Е.В. Кулаков, В.Л. Третьяков // А.с. СССР № 1642548.

2. Гейлер Л.Б. Основы электропривода / Л.Б. Гейлер. – Мн.: Вышейш. шк., 1972. – 608 с.

3. Булычев А.В. Контроль состояния механической части асинхронного электродвигателя / А.В. Булычев, В.К. Ванин // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 45–47.

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ ЁМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Результаты статистической обработки материалов технологических нарушений показывают, что на напряжении 6-35 кВ из числа повреждений изоляции на линиях и подстанциях главное место (не менее 75 %) занимают повреждения изоляции фазы относительно земли. Предотвращение развития таких повреждений в междофазные короткие замыкания (МФЗ) достигается компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю индуктивными токами дугогасящих реакторов (ДГР).

Эффективность компенсации ёмкостных токов замыкания на землю с помощью ДГР в борьбе с последствиями однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) бесспорна и была подтверждена в СССР ещё в 50-60 гг. во время экспериментально-наладочных работ ОРГРЭС.

При этом в крупных электросетевых компаниях часто эксплуатируется одновременно от 2 до 4 видов ДГР и рано или поздно встает вопрос о сравнении их эффективности.

Имея накопленный опыт эксплуатации и определённую статистику ОЗЗ в сети можно сделать выводы об эффективности работы каждой системы компенсации (далее под системой компенсации понимается совокупность ДГР и автоматического регулятора).

Принято оценивать эффективность работы систем компенсации ёмкостных токов замыкания на землю по формуле

$$n_{\text{ЭФ}} = \frac{\text{æ}}{\text{ё}} \cdot \frac{n_{\text{МФЗ}}}{n_{\text{ОЗЗ}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $n_{\text{ЭФ}}$ – коэффициент эффективности компенсации ДГР (%); $n_{\text{ОЗЗ}}$ – общее количество ОЗЗ; $n_{\text{МФЗ}}$ – количество ОЗЗ, перешедших в МФЗ, и автоматически отключенных в результате действия устройств максимальной токовой защиты (МТЗ) или токовой отсечки (ТО).

Таким образом, необходимо точно подсчитать количество ОЗЗ за период и количество МФЗ, которые произошли по причине данных ОЗЗ.

Итак, первая трудность, с которой приходится сталкиваться в процессе оценки эффективности – это кропотливый анализ количества ОЗЗ, перешедших в МФЗ. По каждому событию приходится выполнять мини-расследование, ход которого можно представить в виде следующей последовательности.

1) Выгрузка информации о количестве ОЗЗ за период времени из программного комплекса, аккумулирующего сведения о технологических нарушениях.

2) Анализ записей в оперативном журнале, относящихся к ОЗЗ в исследуемом периоде, выбор технологических нарушений с переходом ОЗЗ в МФЗ.

3) Верификация переходов ОЗЗ в МФЗ. Анализируются истинные причины перехода в МФЗ, отбираются технологические нарушения, причинами которых стали именно последствия ОЗЗ, а не, например, механическое воздействие на кабель при производстве земляных работ и т.п.

Далее, на втором этапе необходимо сопоставить моменты возникновения ОЗЗ и информацию о состоянии ДГР в момент технологического нарушения. Например, после возникновения ОЗЗ произошло междуфазное короткое замыкание, что указывает на возможную расстройку компенсации, при которой возникают повышенные по сравнению с идеальной настройкой перенапряжения во всей электрически связанной сети. Но при этом ДГР была выведена из работы по различным причинам (плановый ремонт или испытания, поломка механической части, выход из работы автоматического регулятора и т.п.). В этом случае, не учитывая текущее состояние ДГР вывод об эффективности работы ДГР во время возникновения ОЗЗ будет неверным.

Для того, чтобы понять состояние системы компенсации в определённый момент времени достаточно проанализировать информацию в ремонтном журнале.

Имея корректную информацию для расчёта эффективности работы системы компенсации согласно формуле (1) мы всё равно не сможем с достаточной уверенностью сделать вывод об эффективности системы компенсации.

Простой пример. Сравниваются две системы компенсации с разными принципами работы. Обе работают в городской кабельной сети. При этом одна из них была установлена на секции шин подстанции в 1970 г, другая – на подстанции 1990 г. В первом случае имеем кабельную сеть с 50-летним сроком службы, во втором с 30-летним. Очевидно, что даже минимальные перенапряжения при идеальной настройке ДГР порядка 2,2–2,5 представляют опасность для изоляции с полувековым сроком службы, увеличивается вероятность как переходов ОЗЗ в МФЗ, так и множественных пробоев.

Другим фактором, вносящим неопределённость, является принадлежность кабельной сети или её участка. Система компенсации может быть идеально настроена в любой момент времени, но тот факт, что на участке кабельной сети, принадлежащей мелкой сетевой организации периодические испытания выполняются не по НТД с целью снизить затраты на «латание» ветхой сети, вносит большую погрешность при расчёте эффективности по формуле.

Таким образом, корректная оценка по количеству переходов ОЗЗ в МФЗ возможна только для сетей, эксплуатирующихся в аналогичных условиях.

Какой же выход можно найти из данной ситуации? Как с высокой долей вероятности сделать объективный вывод о правильной работе системы компенсации в современных условиях?

Ответ на этот вопрос дают современные микропроцессорные устройства и терминалы.

Самый простой способ – выполнить анализ данных регистраторов событий, интегрированных в современные автоматические регуляторы ДГР. К слову, согласно стандарту ПАО «Россети» «Реакторы заземляющие дугогасящие 6–35 кВ. Общие технические требования» (СТО 34.01-3.2-008-2017), ДГР должны быть оснащены автоматическими регуляторами с функциями хранения журнала событий и осциллограмм однофазного замыкания на землю в памяти, и наличия функции регистрации событий (минимальный набор регистрируемых параметров: ток ДГР, напряжение $3U_0$, фазные напряжения, дата и время возникновения замыкания).

Другим выходом из ситуации является анализ осциллограмм с трансформатора напряжения, установленного на секции шин, на которой находится ДГР.

Имея осциллограмму напряжения $3U_0$ можно сделать вывод о степени расстройки ДГР во время ОЗЗ по формуле

$$n = \frac{\epsilon}{\epsilon} - \frac{\omega T_0}{\omega T_{изм}} \cdot 100,$$

где ν – расстройка компенсации ДГР (%); T_0 – период частоты 50 Гц, равный 20 мс; $T_{изм}$ – период частоты собственных колебаний восстанавливающегося напряжения $3U_0$, мс.

Как было показано выше, оценка эффективности, базирующаяся на отношении количества ОЗЗ к МФЗ имеет не только множество сложностей при получении объективной информации, но и не затрагивает самое важное – как был настроен ДГР в момент ОЗЗ. Только от этого зависит правильность работы системы компенсации. Самая главная задача ДГР снизить остаточный ток в месте замыкания и обеспечить уровень перенапряжений не выше $2,2 \div 2,5$. На остальное ДГР повлиять не в силах. Формула (1) была предложена в те годы, когда ДГР не имели каких-либо регистрирующих устройств, не было и терминалов на секциях шин, способных записать осциллограмму по факту срабатывания при появлении напряжения $3U_0$.

Поэтому в современных условиях предлагается применять следующую формулу для оценки эффективности систем компенсации ёмкостного тока замыкания на землю:

$$n_{эф} = \frac{\omega_{ОЗЗ\text{ рез}}}{\omega} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon} \cdot 100,$$

где $n_{эф}$ – коэффициент эффективности системы компенсации (%); $n_{ОЗЗ\text{ рез}}$ – количество ОЗЗ, в которых ДГР был настроен в резонанс (расстройка компенсации не более 5 %; для ДЗО ПАО «Россети» для ДГР, установленных после 2017 года требование по точности настройки не более 1 % согласно СТО 34.01-3.2-008-2017); $n_{ОЗЗ}$ – общее количество ОЗЗ.

Основные выводы

1. Предложен расчёт эффективности систем компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в сетях с ДГР, имеющих

современные автоматические регуляторы с функцией регистрации событий или микропроцессорные терминалы ТН на секции с ДГР, который базируется только на правильности настройки ДГР во время ОЗЗ.

2. Учитывая сложности анализа информации из множества источников для проведения оценки работы системы компенсации, множество факторов, которые могут вносить погрешности в расчёт считать наиболее эффективным способ анализа встроенных в автоматические регуляторы ДГР регистраторов событий или осциллограмм $3U_0$, записанных в микропроцессорном терминале трансформаторов напряжения.

3. Момент возникновения события необходимо сопоставлять с состоянием системы компенсации.

Е.П. Грабчак¹, Е.Л. Логинов²
(Москва, ¹Минэнерго России,

²Ситуационно-аналитический центр Минэнерго России)

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖАНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

С помощью интеллектуальных системных решений, таких как формирование цифровых двойников (цифровых моделей) как подсистем энергетической суперсистемы, интегрирующей генерирующие [электроэнергию и тепло] и сетевые [транспортирующие] сегменты, можно добиться улучшения традиционных методов поддержания работы оборудования атомных и тепловых электростанций [1].

Необходимо создание интеллектуальных регуляторов, построенных на основе квазиинтегрирования энергетических кластеров с опорой на цифровые двойники (цифровые модели) [2]. Требуется разработка модулей их мониторинга, вычислительной обработки и сравнения с базой данных эталонных технологических сигналов (пакетов данных) для обеспечения поддержания результирующей синхронной работы подсистем энергетической суперсистемы [3].

В ходе исследований по созданию интеллектуальных регуляторов, обеспечивающих эффективные решения по противодействию «скольжению» кластеров и их иерархических и сетевых объединений в неустойчивое состояние с различными возможными траекториями развития, должны быть разработаны следующие технологические подходы и решения:

- технология формирования энергетических кластеров с опорой на цифровые двойники (цифровые модели) с регулирующимися технологическими режимами, содержащей интеллектуальные модули мониторинга, вычислительной обработки и сравнения технологических сигналов (пакетов данных) с базой данных эталонных технологических сигналов (пакетов данных);

- технология синхронизации энергетических кластеров с регулирующимися технологическими режимами для передающей и принимающей стороны, обеспечивающую эффективные управленческие решения;

- технология обеспечения передачи технологических сигналов (пакетов данных) с внедрением разработанных интеллектуальных регуляторов.

Необходима проработка технологии построения математических оценок показателей работы подсистем энергетической суперсистемы в виде моделей адаптивного управления с учетом различных реакций функциональных узлов оборудования на воздействия интеллектуальных регуляторов. Предлагается разработка интеллектуальных технологий мониторинга технического состояния функциональных узлов, которые вследствие низкого уровня технического состояния ведут к десинхронизации, для адаптации к динамике угроз штатным режимам работы подсистем энергетической суперсистемы, ведущих к авариям и чрезвычайным ситуациям.

Литература

1. *Логинов Е.Л.* Информационная платформа, объединяющая телематические, вычислительные и информационные сервисы в ЕЭС России / Е.Л. Логинов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2013. – № 6. – С. 19–23.

2. *Иванов С.Н.* Энергосбережение: проблемы достижения энергоэффективности / С.Н. Иванов. – М.: Нац. ин-т энергетической безопасности, 2009. – 329 с.

3. *Логинов Е.Л.* Интеллектуальная электроэнергетика: новый формат интегрированного управления в единой энергетической системе России / Е.Л. Логинов, А.Е. Логинов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2012. – Т. 8, № 29 (170). – С. 28–32.

А. Базаррагчаа¹, И.Р. Баязитов², В.Г. Медведев³, М.И. Петров⁴
(¹Улан-Батор, Министерство энергетики Монголии; ²Казань, филиал ОАО «Сетевая компания» Приволжские электрические сети; Чебоксары, ³ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ⁴ООО «НИР ЭНЕРГО»)

О ВЫПУЧИВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РЕАКТОРАХ С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НЕМАГНИТНОГО ЗАЗОРА

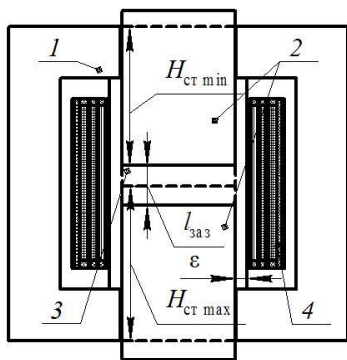


Рис. 1. Структура реактора с плавным регулированием немагнитных зазоров;

- 1 – магнитопровод,
- 2 – магнитные вставки стержня (плунжеры),
- 3 – немагнитные зазоры,
- 4 – обмотка

Переход высоковольтных электрических сетей среднего класса напряжения на цифровой формат управления подстанциями и на цифровые подстанции ставит задачу защиты от однофазных замыканий на землю. В настоящей работе делается упор на плавное изменение размеров немагнитного зазора в сердечнике магнитопровода как броневого, так и стержневого типов в дугогасительных реакторах РДМРА/АДМРА, РДСРА/АДСРА (рис. 1).

В соответствии с [1, 2, 3] ширина выпучивания магнитного потока e равна:

$$e = \frac{l_{зaz}}{\rho} \ln \frac{H_{ст} + l_{зaz}}{l_{зaz}}.$$

В настоящей работе исследована зависимость скорости изменения ширины выпучивания магнитного поля в немагнитных зазорах для двух случаев.

В первом случае проводится исследование зависимости $\varepsilon(H_{\text{ст}})$ при постоянном значении $l_{\text{зав}} = 2,2$ см (рис. 2), какое выбрано в работе [1]. Продифференцировав левую и правую части вышеприведенного выражения по $l_{\text{зав}}$, получим:

$$\frac{d\varepsilon}{dl_{\text{зав}}} = \frac{1}{\rho} \frac{d\varepsilon}{dH_{\text{ст}}} \frac{dH_{\text{ст}}}{dl_{\text{зав}}} + \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}} + l_{\text{зав}}} \frac{dH_{\text{ст}}}{dl_{\text{зав}}}.$$

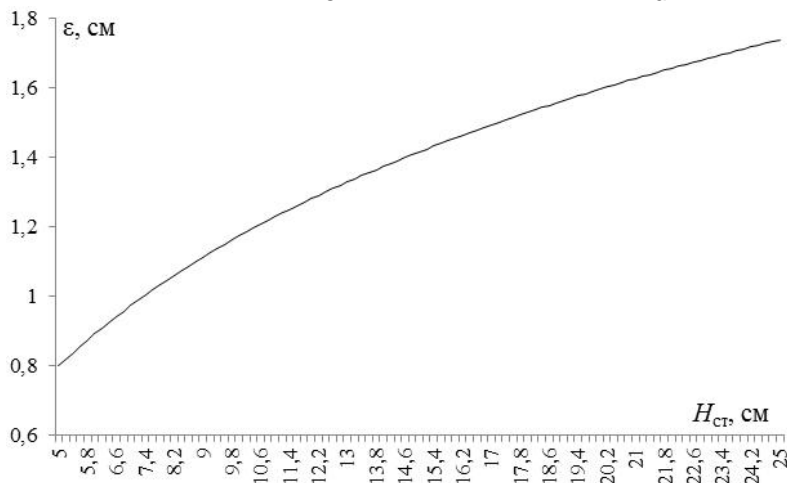


Рис. 2. Зависимость $\varepsilon(H_{\text{ст}})$

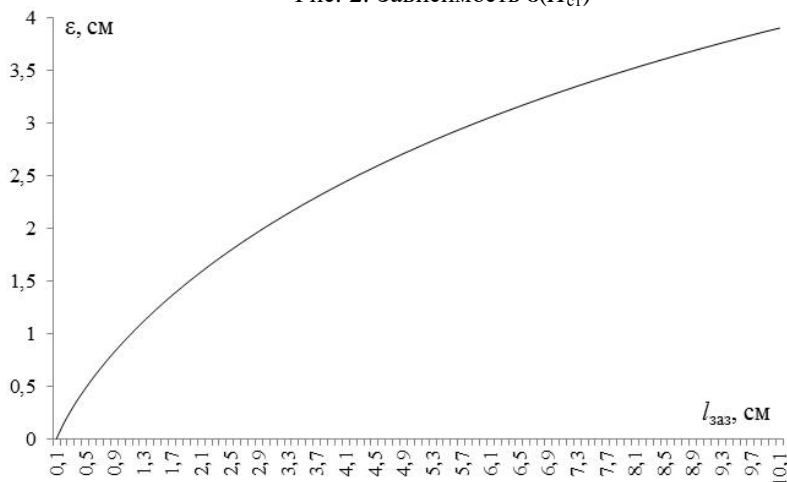


Рис. 3. Зависимость $\varepsilon(l_{\text{зав}})$

Во втором случае проводится исследование зависимости $\varepsilon(l_{\text{ззз}})$ при постоянном значении $H_{\text{ст}} = 25$ см (рис. 3), как в работе [1]. Продифференцировав левую и правую части того же выражения по $H_{\text{ст}}$, получим:

$$\frac{de}{dH_{\text{ст}}} = \frac{l_{\text{ззз}}}{p} \frac{1}{H_{\text{ст}} + l_{\text{ззз}}}.$$

На графиках на рис. 2 и 3 видно, что зависимость ширины выпучивания ε от высоты немагнитного зазора и высоты магнитной вставки нелинейна и также нелинейно влияет на электрические характеристики дугогасящего реактора.

Литература

1. Кузьмин А.А. К вопросам оценки активной части реактора дугогашения с распределёнными зазорами / А.А. Кузьмин, В.Г. Медведев, М.И. Петров, И.Г. Хадыев // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 119–126.
2. Klement'ev S.V. To determine the width of the bulging magnetic flux in the air gaps of current transformers / S.V. Klement'ev, V.G. Medvedev, I.R. Bayazitov // Colloquium-journal, Część, Warszawa, Polska. – 2020. – No. 1 (53). – PP. 5–6.
3. Klementyev S.V. Research of dependence of the magnetic field extension width on the dimensions of non-magnetic gap and magnetic insert of current transformers / S.V. Klementyev, V.G. Medvedev, I.R. Bayazitov // Colloquium-journal, Część, Warszawa, Polska, 2020. – No. 4 (56). – PP. 11–14.

В.В. Карагодин, Д.В. Рыбаков
(Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТИ И МЕСТ УСТАНОВКИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В настоящее время продление эксплуатации оборудования распределительных электрических сетей (РЭС) специальных объектов напряжением 6(10)/0,4 кВ, полная реконструкция которого затруднительна из-за недостаточного финансирования,

возможна при условии внедрения энергосберегающих технологий. Одним из мероприятий, обеспечивающим уменьшение электропотребления и снижение потерь электроэнергии, является применения компенсирующих устройств (КУ).

При этом дополнительные преимущества, которые могут быть весьма значительными, может дать оптимизация размещения КУ. При решении оптимизационной задачи необходимо учитывать ряд ограничений как экономического, так и технического характера, которые зачастую носят противоречивый характер. В связи с этим данная задача является, как правило, многокритериальной и может быть сведена к нахождению подмножества парето-оптимальных решений.

Наиболее важным вопросом при формулировании оптимизационной задачи является выражение векторного критерия $f(Q_K) = \{f_1(Q_K), f_2(Q_K), \dots, f_r(Q_K)\}$, компонентами которого являются частные критерии. Каждый из них определяет ценность (полезность) решения поставленной задачи с точки зрения того или иного предъявляемого требования и множества (набора) предполагаемых к установке в РЭС КУ с мощностью $Q_{K_i}, i = 1 \dots n$

$$Q_K = \left\{ \begin{pmatrix} Q_{K1}, Q_{K2}, \dots, Q_{Kn} \end{pmatrix}^T : Q_K \in R^+ \right\}.$$

Для решения поставленной оптимизационной задачи определения мощности и мест установки КУ в РЭС сформирован следующий состав частных критериев, каждый из которых определяет полезность (ценность) решения с точки зрения того или иного требования.

1. Инвестиции (в рублях) в установку КУ

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (c_i Q_{K_i} + p_i) \rightarrow \min ,$$

где Q_{K_i} – установленная мощность компенсации в i -м узле системы, кВАр; c_j – удельная стоимость 1 кВАр КУ, зависящая от класса напряжения в узле подключения, руб./кВАр; p_j – расходы, связанные с установкой и подключением КУ.

2. Стоимость потерь электрической энергии при её передачи (в рублях)

$$f_2 = \sum_{j=1}^m \frac{e}{e} a_j P_{nj}^2 + \frac{e}{e} Q_{nj} - \sum_{i=1}^n \frac{e}{e} Q_{ki} \div \frac{\ddot{o}^2}{\emptyset} \dot{u} c_{эз} T_{расч} +$$

$$+ \frac{e}{e} DP_{xx} T + DP_{кз} \frac{e}{e} \sqrt{P_{н тр}^2 + \frac{e}{e} Q_{н тр} - \sum_{i=1}^n \frac{e}{e} Q_{ki} \div \frac{\ddot{o}^2}{\emptyset}} \Big/ S_{ном.тр} \div \frac{\ddot{o}^2}{\emptyset} \dot{u} t c_{эз} \textcircled{R} \min,$$

где первое слагаемое – затраты, связанные с потерями электрической энергии в линиях электропередачи (ЛЭП), второе – затраты, связанные с потерями электрической энергии в трансформаторах напряжением 6(10)/0,4 кВ.

В выражениях приведенных критериев использованы следующие обозначения: a_j – коэффициенты, зависящие от параметров ЛЭП (удельного активного сопротивления $r_{л0}$ и длины $l_{л}$) и уровня напряжения $U_{л}$, $a_j = r_{л0} l_{л} / U_{л j}$; P_{nj} , Q_{nj} – активная и реактивная нагрузки j -й линии РЭС; j – номер ЛЭП с подключенной к ней нагрузкой; $S_{ном.тр}$ – номинальная мощность трансформатора; DP_{xx} – активные потери холостого хода на перемагничивание и создание вихревых токов в стали трансформатора (потери в стали); $DP_{кз}$ – активные потери короткого замыкания на нагрев обмоток трансформатора (потери в меди); $P_{н тр}$, $Q_{н тр}$ – активная и реактивная нагрузки трансформатора; T – время работы трансформатора; $T_{расч}$ – время, за которое рассчитываются потери активной мощности в ЛЭП; τ – время максимальных потерь.

3. Кроме выполнения требования наибольшей экономичности при выборе КУ необходимо обеспечить требование к значению коэффициента реактивной мощности для потребителей, присоединенных к электрическим сетям, вытекающее из требований нормативно-правовых документов в области компенсации реактивной мощности [2]. Значение коэффициента $\text{tg } \varphi$ реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети, для потребителей, присоединенных к электрическим сетям, в зависимости от уровня напряжения в точке присоединения учитывается соотношением

$$f_3 = \frac{Q_{н} - \sum_{i=1}^n Q_{ki}}{P_{н}} \textcircled{R} \min.$$

4. Частный критерий, учитывающий техническое ограничение по допустимому отклонению напряжения в РЭС во всех режимах её работы, может быть определен в следующем виде:

$$f_4 = \min_{j=1}^m \frac{P_j R_{лj} + (Q_{нj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki}) X_{лj}}{U_{лj}^2} \cdot 100 \text{ } \textcircled{R} \text{ } \min,$$

где $R_{лj}$ и $X_{лj}$ – активное и реактивное сопротивления в ЛЭП.

Все рассмотренные частные критерии являются негативными, т.е. все принимаемые решения должны стремиться к их уменьшению. В связи с этим оптимизационная задача размещения КУ в РЭС в окончательном виде может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти множество парето-оптимальных решений задачи векторной оптимизации, где вектор целей

$$f(Q_k) = \{f_1(Q_k), f_2(Q_k), f_3(Q_k), f_4(Q_k)\} \textcircled{R} \min, \text{ т.е.}$$

$$f(Q_k)^T = \left[\begin{array}{c} \sum_{i=1}^n (c_i Q_{ki} + p_i) \\ \sum_{j=1}^m a_j P_j^2 + \sum_{j=1}^m Q_{нj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki} \frac{\sigma_{цз}^2}{\sigma_{цз}} T_{расч} + \\ + \sum_{xx} D_{xx}^P T + \sum_{кз} D_{кз}^P \sqrt{P_{нтр}^2 + \sum_{j=1}^m Q_{нтрj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki} \frac{\sigma_{цз}^2}{\sigma_{цз}}} / S_{ном.тр} \frac{\sigma_{цз}^2}{\sigma_{цз}} t_{цз} \\ \frac{Q_{нj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki}}{P_{нj}} \\ \sum_{j=1}^m \frac{P_j R_{лj} + (Q_{нj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki}) X_{лj}}{U_{лj}^2} \cdot 100 \end{array} \right] \textcircled{R} \min.$$

Таким образом, сформулирована многокритериальная технико-экономическая задача оптимизации мощности и мест установки КУ в РЭС специальных объектов, решение которой позволит обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей электрической энергией в необходимом количестве и требуемого качества. Положительный эффект достигается за счёт

учета противоречивых требований, предъявляемых к РЭС при проектировании и эксплуатации.

Для решения поставленной многокритериальной оптимизационной задачи могут быть использованы различные методы. В частности, можно использовать метод главного критерия, при реализации которого исходная многокритериальная задача сводится к задаче оптимизации одного из показателей (целевой функции), который объявляется главным.

Литература

1. Карагодин В.В. Проблема компенсации реактивной мощности в распределительных сетях объектов Космических войск / В.В. Карагодин, Д.В. Рыбаков, В.В. Рыбаков, Е.П. Вишняков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 627. – С. 37–41.

2. Порядок расчёта значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения): приказ Минпромэнерго № 49 от 22.02.07 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.matic.ru/index> (дата обращения: 10.03.2020).

А.Е. Воронин, Н.Е. Пешехонов
(Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Особое место в динамике развития и функционирования Российской Федерации является обеспечение надёжности функционирования важных объектов страны.

Под важными объектами (ВО) страны будем понимать объекты, прекращение функционирования которых приводит к потере управления экономикой страны, субъекта или административно-территориальной единицы, его необратимому негативно-му изменению, разрушению или существенному снижению без-

опасности жизнедеятельности проживающих на этой территории на длительный период времени.

К важным объектам предъявляются повышенные требования по надёжности функционирования, которые задаются количественными характеристиками. ВО постоянно подвергаются оценке соответствия заданным требованиям.

В комплексе технических средств любого ВО, обеспечивающих его функционирование, важное место занимает система электроснабжения (СЭС). Отказ СЭС приводят к нарушению функционирования технологических и технических системам, составляющих ВО. Данное обстоятельство делает требование к надёжности одним из главных требований, предъявляемых к СЭС ВО.

Требования к надёжности электроснабжения потребителей, в роли которых выступают технологические и технические системы ВО, исторически в России задаются категорийностью их электроприёмников [1]. Недостатками такого подхода являются неполная чёткость их разделения по категориям, задание требований к надёжности качественными характеристиками, отсутствие количественных норм и показателей надёжности (ПН) [2]. Кроме этого, выполнение только качественных требований к надёжности СЭС, заданных согласно ПУЭ, в большинстве случаев не позволяет обеспечить требуемую надёжность функционирования ВО.

Таким образом, требования по надёжности функционирования ВО задаются количественными характеристиками, а требования по надёжности СЭС – качественными. Такой двойной подход задания требований к надёжности ВО и составляющим его системам является недостаточно корректным.

В условиях, когда задан ПН для ВО в целом, задача обоснования количественных требований к надёжности составляющих его технических и технологических систем (в том числе и к СЭС) сводится к распределению между ними нормативного значения ПН ВО. Причем ПН должен быть распределен так, чтобы общая надёжность систем, составляющих ВО, была не менее заданной.

В зависимости от наличия тех или иных исходных данных существуют различные методические приемы по распределению требований к надёжности ВО между её системами. Для решения задачи по распределению ПН в данной работе предлагается

использовать математическую модель определения количественных значения ПН СЭС объекта.

В общем виде независимо от номенклатуры распределяемого нормативного ПН данная модель является функцией, зависящей от нормативного значения ПН ВО $ПН_{во}$, значения ранга СЭС в составе СО $R_{сэс}$, а также от функционала надёжности СО $f(R)$:

$$F(ПН_{со}, R_{сэс}, f(R)).$$

Под рангом СЭС понимается количественная характеристика значимости СЭС в процессе эксплуатации ВО. Ранг можно определить с использованием характеристического уравнения матрицы функциональных связей [3].

Функционал надёжности ВО зависит от вида вероятностной функции надёжности объекта и выражается через ранги рассматриваемых его систем. Функционал надёжности определяется выражением:

$$f(R) = \prod_{j=1}^k \frac{a_j}{\prod_{i \in Z_j} z_i^{-1}}, \quad Z_j = \{R_i\}, \quad i = \overline{1, N},$$

где k – число слагаемых в функционале надёжности ВО; j – номер слагаемого в функционале надёжности ВО; a_j – коэффициент при j -м слагаемом функционала надёжности ВО; z_i – i -й элемент множества Z_j ; Z_j – множество значений рангов систем, входящих в j -е слагаемое функционала надёжности ВО.

Авторами получены частные математические модели определения количественных значения ПН СЭС, а именно:

- если нормативный ПН задан интенсивностью отказов $L_{во}$, то

$$l_{сэс} = L_{во} \frac{1}{R_i} f(R),$$

где $l_{сэс}$ – требуемые значения интенсивностей отказов СЭС; R_i – ранг i -х системы; $f(R)$ – функционал надёжности ВО;

- если нормативный ПН задан вероятностью безотказной работы $P_{во}$, то

$$p_{сэс} = e^{(\ln P_{во}) \frac{1}{R_i} f(R)},$$

где $p_{сэс}$ – требуемое значение вероятности безотказной работы СЭС;

• если нормативный ПН задан коэффициентом готовности $K_{Г\text{ ВО}}$, то

$$K_{Г\text{ СЭС}} = 1 + \frac{T_{В\text{ СЭС}}(1 - K_{Г\text{ ВО}}) \frac{1}{R_i} f(R) \sigma^{-1}}{T_{В\text{ ВО}} K_{Г\text{ ВО}}},$$

где $K_{Г\text{ СЭС}}$ – требуемое значение коэффициента готовности СЭС; $T_{В\text{ СЭС}}$ – среднее время восстановления СЭС; $T_{В\text{ ВО}}$ – нормативное среднее время восстановления СО.

Достоверность частных математических моделей определения количественных значений ПН СЭС объекта подтверждается тем, что при подстановке значений ПН i -х систем ВО, полученных в процессе распределения нормативного ПН СО между ними, получается исходное значение ПН, заданное для ВО в целом.

Представленная математическая модель отличается от известных тем, что она учитывает степень значимости СЭС в процессе функционирования ВО, определённой на основе анализа функциональных связей составляющих его систем, и вероятностной функции надёжности рассматриваемого объекта. Применение данной математической модели позволяет определить требуемые значения показателей надёжности СЭС путем распределения нормативных значений показателей надёжности ВО, выраженных как единичными, так и комплексными показателями надёжности, между составляющими его системами с учетом их степени значимости.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2011. – 1168 с.
2. Пешехонов Н.Е. Актуальные проблемы учета требований к надёжности электроэнергетической системы при построении систем электроснабжения специальных объектов / Н.Е. Пешехонов, А.Е. Воронин, В.В. Рыбаков // Известия Тульского государственного университета. – 2018. – № 10. – С. 392–398.
3. Voronin A. Method of Setting Reliability Requirements for a Power Supply System / A. Voronin, N. Peshekhonov, V. Rybakov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – PP. 1–4.

Л.И. Абдуллин¹, А.Ф. Абдуллазянов¹,
М.Н. Хабибуллин¹, Г.В. Вагапов²
(Казань, ¹ОАО «Сетевая компания», ²КГЭУ)

ВЫДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6-10 КВ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ*

Распределительные электрические сети напряжением 6-10 кВ являются одними из наиболее протяженных в большинстве как региональных, так и федеральных сетевых компаниях. Электрические сети рассматриваемого класса напряжений в ряде случаев выступают в качестве единственного источника питания для конечных потребителей, например, трансформаторные подстанции напряжением 6-10/0,4 кВ, питающие «частный сектор». Одновременно электрические сети данного класса напряжения являются источником питания для мелкомоторных потребителей. В ряде публикаций [1, 2, 3] показано, что наиболее часто встречающимся видом повреждений в электрических сетях рассматриваемого класса напряжений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

Один из методов локализации места ОЗЗ основан на анализе спектрального состава токов и напряжений [4, 5]. Определение поврежденного участка с ОЗЗ основывается на информации о спектральном составе высших гармоник по каждой из потребительских подстанций. Информация получается со стороны 0,4 кВ потребительских подстанций. Для передачи информации используются узлы учета электроэнергии с беспроводным каналом связи.

В ОАО «Сетевая компания» в рамках энергосервисного договора были установлены приборы учета *ISKRAEMECO*. Данные счётчики электрической энергии обладают возможностью передачи данных о параметрах сети через *GSM* канал по прото-

* Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надёжности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, NoFZSW-2020-0007).

колу *DLMS\GOSEM*. Функционал прибора учета *ISKRAEMECO* позволяет распознавать гармонический спектр сети до 31-й гармоники включительно.

В лаборатории испытаний интеллектуальных систем было проведено исследование технических возможностей приборов учета по определению возможности опроса электрической сети на предмет выделения высших гармоник и передачи их на верхний уровень, а именно на АРМ диспетчера.

Распределительная сеть имитировалась установкой РЕТОМ-61. С имитационной установки на счётчик электрической энергии подавался тестовый сигнал различных частот на фазу А, начиная от 500 Гц. Проявление гармоник, а также их процентное соотношение анализируется на верхнем уровне в БД *HES*-система.

В качестве примера на рис. 1–3 приведены полученные результаты по анализу напряжения фаз. Сопоставление амплитуд высших гармоник позволяет однозначно идентифицировать как фидер, так и фазу с повреждением.


 Harmonics & THD	
Name	Value
L1	
Instantaneous voltage L1 harmonic 1	100 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 2	12.1 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 3	79.7 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 4	102.1 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 5	37.7 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 6	72.2 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 7	189.5 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 8	37 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 9	62.2 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 10	129.2 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 11	113.7 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 12	47.3 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 13	141.5 %
Instantaneous voltage L1 harmonic 14	63 %

Рис. 1. Проявления высших гармоник по фазе А


 Harmonics & THD	
Name	Value
Instantaneous voltage L2 harmonic 3	27 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 4	9.4 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 5	12.5 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 6	6.6 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 7	8.2 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 8	4.7 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 9	25.4 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 10	53.1 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 11	18 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 12	4.7 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 13	8.2 %
Instantaneous voltage L2 harmonic 14	15.2 %

Рис. 2. Проявления высших гармоник по фазе В


 Harmonics & THD	
Name	Value
L3	
Instantaneous voltage L3 harmonic 1	100 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 2	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 3	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 4	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 5	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 6	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 7	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 8	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 9	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 10	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 11	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 12	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 13	0 %
Instantaneous voltage L3 harmonic 14	0 %

Рис. 3. Проявления высших гармоник по фазе С

Литература

1. *Шуин В.А.* Защиты от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.

2. *Шалин А.* Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты / А. Шалин // Новости электротехники. – 2005. – № 1. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php>.

3. *Шалин А.* Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Влияние электрической дуги на направленные защиты / А. Шалин // Новости электротехники. – 2006. – № 1. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/07.php>.

4. *Абдуллазянов Р.Э.* Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Казань, 2013. – 184 с.

5. *Абдуллин Л.И.* Определение мест однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6–35 кВ по параметрам аварийного режима на стороне высшего и низшего напряжения понижающих подстанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Казань, 2017. – 186 с.

Л.И. Абдуллин, А.Ф. Абдуллазянов, М.Н. Хабибуллин
(Казань, ОАО «Сетевая компания»)

РАСШИРЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Развитие систем учета электрической энергии в Российской Федерации предопределило появление новых технических возможностей и, как следствие, новых технических терминов,

например, термин интеллектуальная система учета электрической энергии (мощности) [1]. В качестве одной из таких технических возможностей является возможность удаленного анализа результатов измерений параметров электрической энергии, расширяющего диагностические возможности систем электроснабжения на основе интеллектуальных систем учета электроэнергии. Подобные диагностические возможности описаны [2, 3, 4].

Практическое исследование возможности реализации предложенных концепций было осуществлено в рамках деятельности лаборатории испытания интеллектуальных систем ОАО «Сетевая компания». Одна из основных практических задач при реализации диагностических возможностей на основе интеллектуальных систем учета электроэнергии заключается в определении требований к минимальному набору функции приборов учета. Определение минимальных требований осуществлялось на основе интеллектуальной системы учета электрической энергии с применением программного обеспечения Пирамида 2.0.

При определении минимальных требований основой системы был выбран сервер с установленным программным обеспечением подключений к подсети с доступом к *APN* оператора связи ПАО «МТС». В *GSM* модуле находится *SIM*-карта с подключенной услугой *APN* и со статическим *IP*-адресом, модуль подключен к *Master* счётчику по интерфейсу *RS-485 (RF-433)*. Приборы учёта, установленные на лабораторном стенде, подключаются к *Master* счётчику: по интерфейсу *RS-485 Slave* счётчик, через беспроводной канал связи *RF-433* одно- и трёхфазный приборы учёта прямого включения.

В результате проведенных тестовых исследований выявлен ряд требований к минимальному набору функции приборов учета, таких как:

- проверка автоматизированного сбора зафиксированных показаний счётчиков, профилей мощности счётчиков;
- проверка формирования и получения аварийного сигнала при отключении/включении напряжения питания;
- проверка формирования и получения аварийного сигнала при отключении/включении напряжения в одной фазе;

- проверка формирования и получения аварийного сигнала при отключении нейтрали;
- проверка формирования и получения аварийного сигнала отклонения напряжения: $\pm 10\%$, от номинального напряжения;
- проверка получения телесигнала об изменении состояния дискретного входа;
- проверка автоматического определения приборов учета в сети.

Литература

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: Федер. закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ.

2. *Федотов А.И.* Диагностические признаки однофазного замыкания на землю / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин, Н.В. Чернова // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посв. 60-летию высш. нефтегаз. образов. в Респ. Татарстан. – Альметьевск: Альметьевский гос. нефт. ин-т, 2016. – С. 261–265.

3. *Абдуллазянов Р.Э.* Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03. – Казань, 2013. – 184 с.

4. *Абдуллин Л.И.* Определение мест однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6–35 кВ по параметрам аварийного режима на стороне высшего и низшего напряжения понижающих подстанций: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03. – Казань, 2017. – 187 с.

ТЕРМИНОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Исторически система электроснабжения образовалась путем развития источников электроэнергии, позволявших обеспечивать электрической энергией сразу нескольких потребителей с разными профилями нагрузки и фактически именно с систем распределённой генерации началось современное понимание этого термина. По мере совершенствования технологий производства и передачи электроэнергии экономически выгодно стало обеспечивать множество потребителей от мощных центральных электростанций и небольшие электростанции применялись лишь там, где невыгодно или невозможно реализовать централизованное электроснабжение. Совершенствование источников электроэнергии, систем передачи и систем управления с одной стороны и рост стоимости электроэнергии за счёт роста цены первичных энергоносителей с другой, привел к экономически обоснованному применению источников малой мощности, максимально приближенных к потребителю. В современной мировой энергетике ввод электрической мощности систем распределённой генерации практически в два раза превышает ввод мощностей источников на ископаемом топливе [Лит.].

Несмотря на широкое применение этого термина, в настоящее время однозначного и устоявшегося понимания, что кроется под понятием «распределённая генерация» нет. При буквальном понимании, в настоящее время вся электроэнергия у нас вырабатывается в одной большой системе распределённой генерации – энергосистеме страны. Поэтому в ряде документов в нашей стране признаком распределённой генерации и микрогенерации является максимальная присоединенная генерирующая мощность. Федеральный закон № 35-ФЗ от 26.03.2003 г. «Об электроэнергетике» определил эти значения как 25 МВт и 1 МВт. Причем речь идет о выработке электрической и тепловой энергии. Вторым признаком является децентрализация управления в системе, что на наш взгляд является более важным при-

знаком для новых распределённых систем электроснабжения. В ряде документов значимым фактором распределённых систем является близость источников электроэнергии к потребителю. В разных странах используются понятия «встроенная генерация», «рассредоточенная генерация», «децентрализованная генерация», которые очень близки по своей сути.

В странах ЕС понятие распределённая генерация неразрывно связывается с понятием виртуальная электростанция (Virtual Power Plant), которая представляет собой группу взаимосвязанных децентрализованных комбинированных энергосистем с преимущественным использованием технологии возобновляемых источников, установленных у потребителей и объединенных общей системой управления. Взаимодействие источников и потребителей в такой системе организуется таким образом, что система управления энергосистемы верхнего уровня или соседних систем рассматривают её как единое целое – виртуальную электростанцию. Такая электростанция может быть как и энергоизбыточная, так и энергодефицитная. Ключевая особенность такой системы, отличающей её от традиционных систем, – наличие в контуре управления потребителей. Ситуация, характерная для традиционных энергосистем, когда производство «подстраивается» под график нагрузок, исключена. Это позволяет организовать множество стратегий ресурсосбережения, в том числе и за счёт ограничения потребления в часы пиковой нагрузки (программы ценозависимого снижения потребления).

Таким образом, к системе распределённой генерации следует относить систему из множества источников и потребителей электроэнергии сопоставимой между собой мощности, связанных общностью процесса производства и потребления электроэнергии на ограниченной территории, и способную функционировать как в изолированном, так и в синхронном режиме с централизованной системой.

Если исключить из рассмотрения проблемы конъюнктурного характера, то на пути развития распределённых систем есть ещё множество сложностей технического характера.

В отличие от централизованных энергосистем с источниками «бесконечной» мощности по сравнению с любым единичным потребителем, в системе РГ мощность источника и потребителя сопоставимы, поэтому приходится учитывать и статические и

динамические характеристики источников и что является новым – потребителей. Здесь существующие подходы к построению систем управления в энергосистемах не применимы. Поэтому требуется применение новых методов, построенных, как правило, на базе методологии искусственного интеллекта, обеспечивающих быстрый поиск оптимальных решений при большом количестве вариантов (например генетических или иммунных алгоритмов). В случае высокой доли возобновляемых источников энергии, зависящих от погодных условий, задача прогнозирования производства становится весьма сложной. Как правило, сети распределённой генерации имеют более сложную конфигурацию, отличную от традиционной иерархической, с отсутствием замкнутых контуров. Это существенно усложняет расчёт токов короткого замыкания и соответственно координацию уровней срабатывания защит.

Но несмотря на множественные сложности за распределённой генерацией будущее, в первую очередь в системах малой мощности до 10–15 МВт со значительным количеством маломощных потребителей. Перспективность развития таких систем подтверждается заявлениями ряда крупных энергопредприятий (например «Россети») о развитии проектов в этом направлении.

Литература

Ерошенко С.А. Научные проблемы распределённой генерации / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11-12. – С. 126–133.

Рин.Ш. Мисбахов
(Казань, КГЭУ)

СИСТЕМА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ МИНИ-ТЭЦ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

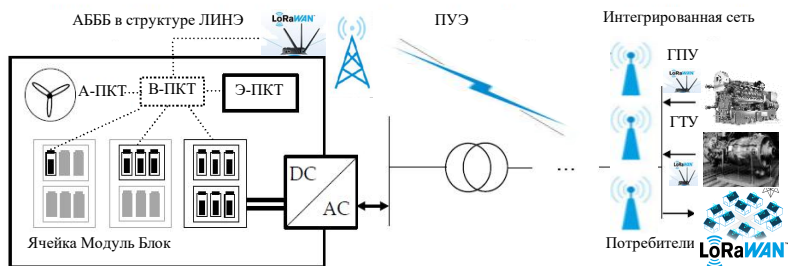
Мини-ТЭЦ позволяет экономить более 40 % энергии газообразного топлива по сравнению с раздельным производством электрической и тепловой энергии. Выработанная на мини-ТЭЦ

электрическая и тепловая энергия может потребляться на месте, а также продаваться соседним потребителям. При этом КПД мини-ТЭЦ достигает 90 %, а поскольку потребители энергии находятся рядом с ней, то потери энергии при распределении оказываются меньше, чем у централизованных электро- и теплосетей. Это означает, что при современном развитии техники децентрализованная выработка электрической и тепловой энергии с точки зрения снижения общих эксплуатационных затрат становится всё более экономически привлекательной.

В настоящее время резко возрос интерес к применению накопителей энергии в электроэнергетических системах. Это объясняется как тенденциями развития генерирующих мощностей, так и новыми технологиями производства некоторых типов накопителей энергии, в частности аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ). В связи с общемировым прогрессом в области эксплуатационных характеристик химических аккумуляторов (в частности литий-ионных), а также из-за наметившейся динамики на снижение их стоимости в ближайшем будущем ожидается значительное расширение сферы их экономически обоснованного применения, например, в электрических транспортных средствах.

Цель настоящей работы состоит в постановке задач по созданию системы волоконно-оптического мониторинга электрохимического литий-ионного накопителя энергии (ЛИНЭ) и разработке стенда для её экспериментальной апробации на основе теплового, деформационного и химического анализа процессов, протекающих в ходе эксплуатации АББМ.

Рисунок даёт схематический обзор структуры ЛИНЭ и её связи с интегрированной сетью. ЛИНЭ обычно включает в себя саму АББМ (ячейки батареи, собранные в модули, и дополнительно упакованные в блоки), подсистему контроля теплового режима и управление температурой (ПКТ) (которая может быть подразделена на ПКТ АББМ (А-ПКТ) и ПКТ электронных компонент ЛИНЭ (Э-ПКТ)), а также подсистему управления энергопотреблением (ПУЭ). В зависимости от условий энергопотребления ПУЭ может состоять из одного или нескольких инверторов напряжения DC/AC и, потенциально, трансформатора для интеграции в более высокие уровни напряжения сети.



Обобщённая структурная схема ЛИНЭ

Условия потребления определяют достижимую прибыль мини-ТЭЦ, при этом важными факторами являются относительное расположение ЛИНЭ и потребителей и качество и надёжность работы АББМ. Соответствующие размеры ЛИНЭ (АББМ и силовая электроника) являются ещё одним критерием оптимизации системы, так как на максимизацию выручки влияет не только достижимая прибыль, но и первоначальные затраты на инвестиции и потенциальные затраты на эксплуатацию и ремонт.

Таким образом, система мониторинга ЛИНЭ является одним из важнейших факторов, позволяющих контролировать как его техническое состояние, так и достижимую прибыль при его эксплуатации и эксплуатации мини-ТЭЦ в целом.

В ряде известных приложений А-ПКТ контролирует температуру элементов АББМ в соответствии с их назначением в терминах абсолютных значений и температурных градиентов внутри блоков. Однако электрохимические процессы и старение сильно зависят от температуры любой ячейки, и, таким образом, колебания температуры внутри нее, модуля, блока и батареи в целом могут привести к несбалансированному току и ускорению процесса старения. Таким образом, А-ПКТ служит обеспечению функциональности батареи не только с точки зрения безопасности, но и для обеспечения её длительного срока службы.

В приложениях АББМ коммунального масштаба дополнительно используется система теплового управления, которая действует как тепловой барьер от прямого воздействия условий окружающей среды на аккумуляторные стойки. В установках меньшего размера обычно ограничиваются помещениями с контролируемой температурой внутри. Фактически из-за более низ-

ких технических требований в таких А-ПКТ используют только пассивное воздушное охлаждение.

Таким образом, А-ПКТ должна охватывать своим контролем не только отдельные точки АББМ, но и каждую её ячейку. Кроме того А-ПКТ должна вырабатывать команды обратной связи на подсистему жизнеобеспечения АББМ, входящую в состав ЛИНЭ, в зависимости от различной степени рисков вплоть до риска выхода из строя одной из ячеек.

В этом плане следует в первую очередь решить следующие задачи:

- 1) оперативный текущий тепловой контроль температуры ячейки на поверхности и внутри неё для оценки сроков её работоспособности;

- 2) деформационный контроль ячейки с целью подтверждения критического влияния изменения температуры на габаритные показатели ячейки с целью обеспечения безопасности эксплуатации АББМ в целом;

- 3) химический контроль процессов внутри ячейки рефрактометрическими методами с целью прецизионного определения их качества и принятия решений на ранней стадии развития дефектов;

- 4) организация сети сбора и передачи данных.

Использование дополнительных датчиков для определения состояния заряда (СЗ) и состояния надёжности (СН) ячейки АББМ, а также измерение рабочих параметров и раннее обнаружение сбоев является многообещающим стратегическим решением для критически важных приложений ЛИНЭ. Причем это относится как к пакетированным ячейкам, поскольку неактивные материалы, такие как корпус аккумуляторной батареи, составляют очень небольшую долю от общего веса, так и к призматическим и цилиндрическим.

На основании проведенного анализа использование волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР), которые действуют как датчики деформации, уже позволяет определить, с одной стороны, СЗ через обнаружение обратимого, так называемого дыхания ячейки, а с другой стороны, СН через измерение необратимого роста ячеек из-за выделения газа, межфазных изменений в твёрдом электролите или кристаллизации электродов. Ключевые преимущества ВБР по сравнению с другими датчи-

ками, например, электронными, включают полную электромагнитную совместимость, недорогой материал для их изготовления и его пассивность к химическим элементам АББМ, возможность интегрировать несколько датчиков в ячейке с выходом на один волоконный световод, а также для одновременного контроля различных измеряемых величин, таких как механическое напряжение, температура, показатель преломления электролита.

Использование оптического волокна будет подразумевать создание волоконной ПКТ (В-ПКТ, рисунок, пунктирные линии) с расширенными функциями по деформациям и рефрактометрическому контролю ячеек, объединенных пассивной оптической сетью, с выходом на беспроводной интерфейс Loga-WAN для обеспечения связи с генерирующими газотурбинными (ГТУ) или поршневыми (ГПУ) установками и потребителями и создания каналов обратной связи. Данная задача должна быть решена на следующем этапе проектирования системы волоконно-оптического мониторинга накопителей энергии децентрализованных мини-ТЭЦ.

Решение поставленных задач будет приведено в нескольких работах в рамках конференции ИТЭЭ-2020 и основаны на концепции Smart Grid Plus, развиваемой автором на базе ЦКП волоконно-оптической метрологии НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ.

Рин.Ш. Мисбахов¹, В.Ю. Казаров²
(Казань, ¹КГЭУ, ²КНИТУ-КАИ)

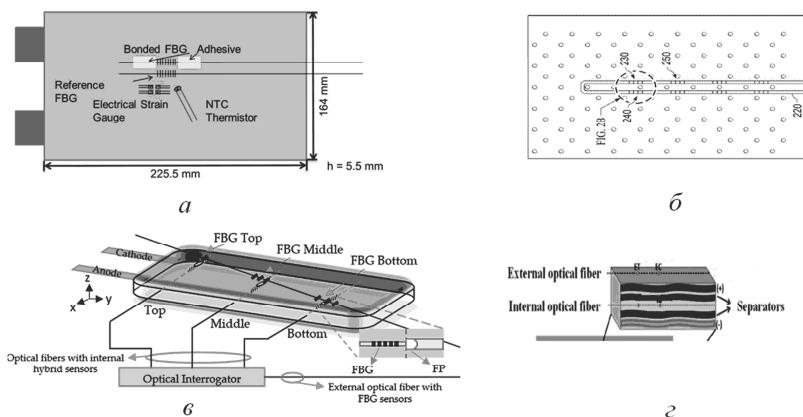
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИЙ ПАКЕТИРОВАННЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Высокопроизводительные, долговечные накопители энергии могут значительно стимулировать внедрение технологий децентрализованных сетевых хранилищ. Пакетированные литий-ионные батареи (ЛИБ), как элемента накопителя энергии, представляются перспективным вариантом для таких реализаций. Тем не менее, их массовое использование ограничено такими факторами как высокая стоимость, малый срок службы, узкий диапазон регулирования и подверженность неожиданным сбоям. В течение циклов зарядки и разрядки материалы электродов ЛИБ подвергаются обратимым изменениям материальной фа-

зы – интеркаляции, которая имеет тенденцию изменяться по мере старения и сигнализирует о ходе деградации батареи. Мониторинг процессов интеркаляции в режиме реального времени во время эксплуатации был бы очень полезен для эффективной оценки состояния (SOx) ЛИБ, для чего необходимо создание системы мониторинга и управления (СМУ) батареями. В настоящее время состояние ЛИБ можно охарактеризовать только с помощью специальных длительных лабораторных тестов, таких как медленная циклическая вольтамперометрия.

Данный доклад посвящен возможностям применения для реализации сенсорной части СМУ волоконно-оптических датчиков (ВОД) и отслеживания точек перехода на стадии интеркаляции. ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), как наиболее перспективные, исследовались нами в ряде ранее опубликованных работ. Хорошо известно, что эти датчики чувствительны к деформации и температуре. В настоящем исследовании ВБР были прикреплены как снаружи, так и внутри ЛИБ по различным топологиям. Использование ВБР позволило надёжно определять точки перехода между различными стадиями интеркаляций на различных скоростях заряда/разряда.

На рисунке представлены известные решения по встраиванию волоконно-оптических датчиков в пакетированные ЛИБ [1].



Топологии включения ВБР в структуру ЛИБ: параллельная точечная наружная (а) и квазираспределённая внутренняя (б); многоточечная наружная (в); многоточечная наружная и внутренняя (г)

В нашем исследовании методология зондирования на основе ВБР основывалась на трёх компонентном датчике, описанном в [2]. Для повышения точности измерений и упрощения интеррогационной схемы использовались многокомпонентные адресные ВБР [3].

Адресный датчик был закреплен на поверхности литий-ионной ячейки и встроен внутрь неё для мониторинга деформаций и температурных сдвигов *in situ*. Для анализа был использован гальваностатический цикл с различными скоростями, который оценивался соответствующими изменениями напряжения.

В таблице показаны ключевые точки, связывающие температуру и деформации ЛИБ, выраженную через величину сдвига центральной длины волны ВБР, с параметрами гальваностатического цикла, выраженного через напряжение батареи.

Параметры ЛИБ на различных этапах гальваностатического цикла по границам временных промежутков

Этап гальваностатического цикла	Изменение напряжения (и разность между этапами), В	Изменение температуры ΔT ($^{\circ}\text{C}$)/сдвиг центральной длины волны ВРБ (и разность между этапами), пм	Изменение деформации $\Delta \epsilon$ ($\mu\epsilon$)/сдвиг центральной длины волны ВРБ (и разность между этапами), пм
Постоянное напряжение	3,5	0/0	0/0
Заряд	4 (0,5)	2/20 (+20)	100/100 (+100)
Постоянное напряжение	3,75 (- 0,25)	1/10 (- 10)	100/100 (0)
Разряд	2 (- 1,75)	15/150 (+140)	140/140 (+40)
Постоянное напряжение	3,4 (+1,4)	1/10 (- 140)	40/40 (- 100)

Таким образом, состояние внутренней структуры ЛИБ (температура и деформации) является важным информационным параметром, напрямую связанным с параметрами его эксплуатации, в нашем случае, гальваностатическим циклом заряд/разряд.

Методология зондирования центральной длины волны адресной ВБР [2, 3] для различения внутренней деформации и температуры ЛИБ оказалась эффективной, не инвазивной и прецизионной процедурой мониторинга процессов, происходящих внутри нее.

Решение поставленной задачи проводилось в рамках концепции Smart Grid Plus, развиваемой на базе ЦКП волоконно-оптической метрологии НИИ ПРЕФЖС КНИТУ-КАИ.

Литература

1. *Novais S.* Internal and external temperature monitoring of a Li-ion battery with fiber Bragg grating sensors / S. Novais, et al. // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1394.

2. *Казаров В.Ю.* Волоконно-оптические рефрактометры на основе брэгговских решеток с фазовым π -сдвигом / В.Ю. Казаров, О.Г. Морозов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. – 2016. – № 8. – С. 34–41.

3. *Мисбахов Р.Ш.* Адресные волоконные брэгговские решетки в системах мониторинга состояния аккумуляторных батарей / Р.Ш. Мисбахов и др. // *Ядерные технологии: от исследований к внедрению: материалы науч.-практ. конф.* – Н. Новгород: ННГТУ, 2018. – С. 135–136.

Рин.Ш. Мисбахов¹, В.Ю. Казаров², О.Г. Морозов²
(Казань, ¹КГЭУ, ²КНИТУ-КАИ)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ

Для оперативного и прецизионного контроля состояния литий-ионных накопителей энергии необходим и обязателен сбор информации непосредственно внутри каждой его ячейки – литий-ионной батареи (ЛИБ). Различные методы и средства были разработаны [1] для достижения данной цели.

Однако для проведения внутренних измерений в ЛИБ должны быть выполнены многие условия. С одной стороны, датчик не должен быть подвержен влиянию электролита, с другой стороны, должно быть предотвращено ускоренное старение батарей, вызванное интеграцией сенсорной системы как постороннего объекта. Помимо поддержания производительности ЛИБ по соображениям эксплуатационной безопасности необходимо предотвратить накопление лития на датчике, что объясняет невозможность использова-

ния металлических датчиков без покрытия. Кроме того, герметичность материала корпуса ЛИБ должна быть обеспечена в точке ввода чувствительного элемента, чтобы избежать как попадание влаги внутрь и вытекание электролита наружу. Наконец, сенсорное оборудование для ЛИБ не должно приводить к значительному увеличению её цены для развития.

Данный доклад посвящен возможностям применения для реализации внутренней сенсорной части СМУ ЛИБ волоконно-оптических датчиков (ВОД) и измерения с их помощью показателя преломления электролита. ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), как наиболее перспективные, исследовались нами в ряде ранее опубликованных работ [2, 3].

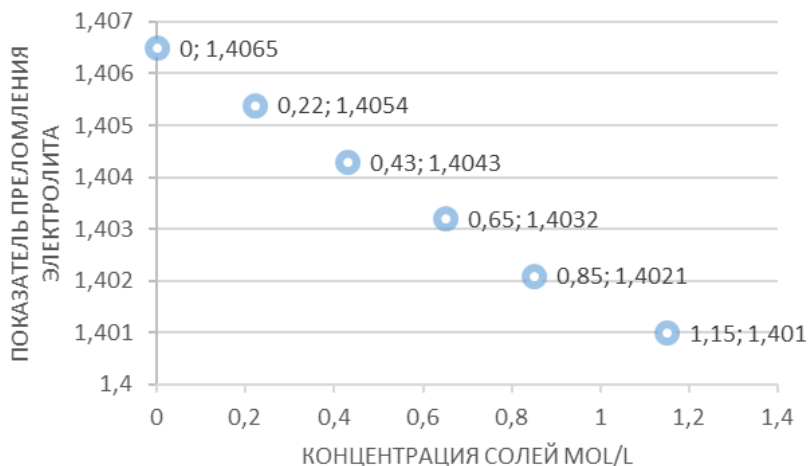
Чтобы удовлетворить указанным выше требованиям был разработан трёхкомпонентный ВОД параллельной структуры, который позволяет одновременно измерять внутреннюю температуру ЛИБ, температурно-компенсированные деформации её геометрических параметров и показатель преломления.

Для создания датчика было использовано стандартное телекоммуникационное волокно. Ключевые преимущества таких оптических датчиков включают полную электромагнитную совместимость, низкую стоимость, возможность получения комплексов измерений с оценкой параметров SOx.

Если решения для измерения температуры и деформаций хорошо известны, чувствительность датчика к показателю преломления достигается травлением волокна в ортофосфорной кислоте.

На рисунке показана зависимость изменения центральной длины волны ВБР и соответствующего ей показателя преломления электролита ЛИБ от концентрации солей в нем.

Диапазон измерений ВОД в основном соответствует реально существующему диапазону концентраций солей и отражает эту практически линейную зависимость. Однако для этого эксперимента следует отметить, что результирующий сдвиг длины волны недостаточен для практического применения, чувствительность измерений мала. Кроме того, существующие интеррогаторы очень дороги, а их разрешающая способность составляет единицы пикаметров. Поэтому основная цель будущей работы будет связана с увеличением чувствительности и разрешающей способности измерений на основе адресных многокомпонентных ВБР.



Изменение показателя преломления стандартного электролита ЛИБ с увеличением концентрации проводящих солей

Её можно сформулировать следующим образом: создание радиофотонной многосенсорной системы контроля показателя преломления электролита (ППЭ) ЛИБ, в которой используются датчики на основе адресных ВБР (АВБР) в качестве чувствительных к ППЭ элементов, и измерительная система, состоящая из волоконно-оптических и электрооптических компонентов для преобразования сигналов, создаваемых датчиками, в пригодные для последующей обработки информативные сигналы радиодиапазона. Разработка такой радиофотонной системы позволит снять ограничения, присущие существующим беспроводным системам мониторинга ППЭ, связанным с чувствительностью к электромагнитным помехам, и волоконно-оптическим системам, связанным с использованием дорогих, вибронеустойчивых интеррогаторов (систем опроса классических ВБР).

Решение поставленной задачи проводилось в рамках концепции Smart Grid Plus, развиваемой на базе ЦКП волоконно-оптической метрологии НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ.

Литература

1. Nedjalkov A. Refractive index measurement of lithium ion battery electrolyte with etched surface cladding waveguide Bragg grat-

ings and cell electrode state monitoring by optical strain sensors / A. Nedjalkov, et al. // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1394.

2. *Казаров В.Ю.* Волоконно-оптические рефрактометры на основе брэгговских решеток с фазовым π -сдвигом / В.Ю. Казаров, О.Г. Морозов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. – 2016. – № 8. – С. 34–41.

3. *Мисбахов Р.Ш.* Адресные волоконные брэгговские решетки в системах мониторинга состояния аккумуляторных батарей / Р.Ш. Мисбахов и др. // *Ядерные технологии: от исследований к внедрению: материалы науч.-практ. конф.* – Н. Новгород: ННГТУ, 2018. – С. 135–136.

Рин.Ш. Мисбахов¹, А.Н. Васёв²
(Казань, ¹КГЭУ, ²КНИТУ-КАИ)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ И БЕСПРОВОДНЫХ МНОГОСЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ МИНИ-ТЭЦ

Общемировой опыт эксплуатации энергетических распределительных устройств показывает, что их надёжность и безаварийность, обеспечение максимального ресурса работы невозможны без комплексного внедрения современных средств контроля и диагностики с использованием волоконно-оптических датчиков на основе ВБР, обладающими множеством преимуществ [1].

Для распределительных комплектных устройств (РКУ) были разработаны ВОД температуры (ВОДТ) токоведущих шин и соединительных контактов, ВОД акустического обнаружения (АО) частичных разрядов (ЧР) акселерометрического типа, ВОД относительной влажности (ОВ), одна из адресных ВБР которого имеет восстановленное полиимидное покрытие, ВОД распределённого типа (РТ) для кабельной инфраструктуры энергетических сетей, ВОД для систем мониторинга и управления литий-ионными батареями (ЛИБ).

Первым естественным решением следует считать оценку комплексного использования всех разработанных датчиков. Так можно найти варианты построения ВОМСС, основанных на

технологиях ПОС с работой как на отражение от датчиков, так и на пропускание. Добавление новых типов датчиков приведет к тому, что их комбинация станет практически одним отдельным ONU. Такое решение приведет к необходимости разделения таких ONU как по длинам волн, так и по частотам АББР.

Таким образом, при построении ВОМСС с комплексированными в ONU ВОДТ, ВОДАО ЧР, ВОД ОВ, ВОД РТ, ВОД ЛИБ необходимо пользоваться общими рекомендациями по построению ПОС для ССПИ с датчиков, приведенными в [2], где рассматриваются принципы организации их волнового мультиплексирования и работы [3], где рассматриваются принципы мультиплексирования ВОД на АББР по адресной частоте. К сожалению, объединенных рекомендаций ранее разработано не было.

Вторым естественным решением следует считать объединение объектов ССПИ и ВОМСС.

Несмотря на развитую волоконно-оптическую информационную сеть между энергетическими организациями, только сейчас начинается формирование принципов построения волоконно-оптических объектов ССПИ ПС и ТП. Поэтому важным вопросом является построение объектов ПОС на основе технологии GPON, а также переход от технологий передачи информации «по меди» к технологиям передачи «по волокну».

Дополнительной проблемой является обмен данными между электронными цифровыми системами, построенными по рекомендациям ГОСТ Р МЭК 60870-5-101 и ГОСТ Р МЭК 60870-5-104 и объектовыми ПОС ССПИ. Это требует разработки практических рекомендаций по установке интерфейсных устройств для применения волоконно-оптических сенсорных и телекоммуникационных устройств на объектах энергетики.

Разработка рекомендаций осуществлялась в рамках концепции «Smart Grids Plus» для слоя диагностического мониторинга на основе пассивной волоконно-оптической сенсорной сети гибридной структуры с радиофотонной обработкой сигналов и использования технологий GPON, «Радио-по-волокну», новой системы мобильной беспроводной связи 5G, беспроводных интерфейсов сети LoraWAN. При этом учитывались преимущества как волоконно-оптических, так и беспроводных систем связи и особенности применения в них адресных ВБР.

Литература

1. *Васёв А.Н.* Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества / А.Н. Васёв и др. // Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 1-2. – С. 52–63.

2. *Васёв А.Н.* Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок / А.Н. Васёв и др. // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 16–26.

А.В. Голенищев-Кутузов, А.В. Семенников,
Д.А. Иванов, Р.И. Калимуллин, М.В. Аввакумов
(Казань, КГЭУ)

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ*

На кафедре «Промышленная электроника и светотехника» КГЭУ в последние годы был разработан комплексный метод с одно-временным использованием электромагнитных и акустических датчиков, позволяющий дистанционно измерять набор характеристик частичных разрядов (ЧР) и по ним судить о техническом состоянии высоковольтных изоляторов (ВИ) [1]. Все измерения выполнялись на экспериментальном стенде [2] путем бесконтактного приема электромагнитным перестраиваемым приёмником в диапазоне 50–600 МГц импульсных сигналов ЧР, их индикации и компьютерной обработки. В каждом из дискретных интервалов фазового напряжения определялись средние значения количества и интенсивности импульсов ЧР, которые либо не превышают допустимый порог для возникновения дефектов и их развития по сравнению с эталонным ВИ, либо превышают его.

* Научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2020-172.

Особое внимание было обращено на развитие дефектов при различных электрофизических процессах, а также перенапряжения в условиях эксплуатации. В частности, недавно была обнаружена генерация сверхбольших ЧР (СБЧР) [3], способных создавать эрозию диэлектрических поверхностей дефектов. Обсуждения подобных индуцированных эффектов в высоковольтных изоляторах, по нашим данным, не проводилось. Так же мало изучены особенности возникновения СБЧР на модельных образцах.

Наличие наиболее опасных дефектов определяется резким увеличением количества ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, расширением самих фазовых интервалов излучения ЧР а также по значительному отличию ширины и формы одиночных импульсов ЧР. Для измерения параметров характеристик ЧР в зависимости от приложенного напряжения использовался регулируемый источник переменного высокого напряжения.

В качестве исследуемых образцов использовались полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации и имевшие различные дефекты. Размеры, виды дефектов и их местоположение были вначале оценены визуально. После этого на стенде были измерены наборы характеристик ЧР, соответствующие видам дефектов, в зависимости от приложенного напряжения (до 40 кВ). Накопление сигналов ЧР выполнялось в течение 18 с, что вполне удовлетворяло случайному характеру возникновения ЧР. Это позволяло обнаруживать СБЧР, периодичность которых не превышала 1–5 раз за период сети.

В результате сравнительного анализа полученных данных после компьютерного накопления и обработки сигналов ЧР мы получили данные в виде набора характеристик, соответствующих каждому типу дефектов в ВИ. Визуальным осмотром были выделены малодефектные и содержащие крупные дефекты ВИ. Характеристики ЧР симметричны для обоих фазовых интервалов, ширина которых увеличивается с ростом размеров дефектов на стержне. Также наблюдалась сопоставимость характеристик ЧР, измеренных с помощью акустических и электромагнитных датчиков. Характеристики ЧР для малых дефектов на стержне и

стержне-оконцевателе, на которых не сказывалось влияние небольших индуцированных полей, незначительно отличались друг от друга. Значительно отличались характеристики ЧР для крупных дефектов.

Вид дефекта, несомненно, отражается и на форме импульсов ЧР. Это обстоятельство неоднократно пытались использовать для определения и контроля дефектов в ВИ. Однако само измерение формы импульсов при использовании контактного метода связано с определёнными дополнительными сложностями, зависящими от метода детектирования. В различных способах детектирования на форму импульсов влияют резистивные или ёмкостные связи, а также параметры резонансных контуров, поэтому в ряде случаев наблюдались как экспоненциальные, так и колебательные формы с различной длительностью самих импульсов ЧР. По-видимому, наиболее точную форму и длительность импульса можно определить с помощью детектирования импульсов бесконтактным электромагнитным методом на высоких (10^8 – 10^9 Гц) частотах.

Литература

1. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов: пат. 2679759 РФ. МПК GO1R 31/12 / А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов и др.; опубл. 12.02.2019.

2. *Голенищев-Кутузов А.В.* Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов и др. // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2016. – № 5–6. – С. 87–93.

3. *Salustiano R.* Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools / R. Salustiano, R.M. Capellini, S.R. de Abreu, et al. // International Conference on High Voltage Engineering and Application: ICHVE conf. proceedings. – Poznan: IEEE, 2014. – PP. 1–4.

РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сложившаяся система управления электроэнергетикой обладает централизованной архитектурой построения. Реализация данной архитектуры происходила в рамках концепции передачи электроэнергии от электрических станций большой мощности к потребителям. Развитие так называемой «малой генерации» приводит к необходимости согласования режимов работы объектов последней с режимами работы традиционных электростанций, межсистемных линий электропередач, распределительных сетей и подстанций. Актуальность решения данной задачи вытекает из динамики роста установленной мощности объектов «малой генерации», развития технологии управляемого потребителя и систем накопления электроэнергии [1–3].

Изменение структуры установленной мощности и конфигурации электрических сетей, появление регулируемых потребителей проявляется в следующих аспектах: изменение графиков нагрузки в электроэнергетических системах; развитие розничного рынка электроэнергии и мощности; увеличение выработки электроэнергии объектами «малой генерации»; построение сетевой автоматики и релейной защиты с учетом дополнительной генерации и др.

Задача по развитию архитектуры управления электроэнергетической системой является многокритериальной оптимизационной, которая решается с учётом требований надёжности, гибкости, технико-экономической эффективности работы оборудования и др.

Необходимо отметить существующие риски при совершенствовании архитектуры управления, заключающиеся в необходимости резервирования мощности у различных субъектов генерации, отличающихся параметрами надёжности, мощности, режима работы, организационно-правовой формой, формировании конкурирующей цены выработки электроэнергии между традиционной и «малой генерацией» и т.д.

Неизбежное администрирование конкуренции между субъектами традиционной и «малой генерации» следует проводить с учётом преимуществ последних. Одним из основных преимуществ является снижение потребности в установленной мощности традиционной генерации за счёт вовлечения большого количества источников «малой генерации», но эффект при этом достигается только при некотором критическом количестве источников.

Архитектура управления электроэнергетической системы в рассматриваемом случае должна обладать свойством интеграции с режимами работы субъектов «малой генерации» и микрогенерации, к объектам которой планируется отнести генерацию мощности до 15 кВт.

Необходимо отметить, что увеличение количества субъектов «малой генерации» и микрогенерации может привести к росту расходов на организационное взаимодействие и дополнительные информационно-управляющие системы.

В этом отношении архитектура управления должна позволять снижать указанные затраты при достижении прочих целей. Реализация архитектуры управления связана с формированием проекта цифровой электроэнергетической системы, в которой на основе систем мониторинга режимов работы осуществляется оптимальное управление всеми объектами генерации и активными потребителями.

Реализация цифровых проектов преследует цель повышения эффективности работы электроэнергетической системы в условиях перспективы роста установленной мощности объектов «малой генерации» и микрогенерации, активных потребителей. Учитывая, что класс напряжения указанных субъектов и потребителей в большинстве случаев не превышает 110 кВ, можно утверждать, что основной эффект от создаваемой архитектуры будет получен для данного класса напряжения, т.е. в узлах электроэнергетических систем на уровне распределительных сетей.

Следует отметить, что развитие архитектуры управления является упреждающим, поскольку отечественная электроэнергетика и государственная политика в области энергетики имеет ряд особенностей: существенный запас по имеющейся установленной мощности субъектов традиционной генерации; значительная протяжённость межсистемных связей, обусловленная низкой плотностью

электроприёмников; низкой инвестиционной активностью в области реализации проектов в сфере «малой генерации», микрогенерации и управляемого потребления.

Архитектура управления электроэнергетической системой должна позволять интегрировать и обеспечивать согласованную работу традиционной электроэнергетики с электростанциями малой мощности, в том числе возобновляемыми источниками электроэнергии, сетевыми накопителями электроэнергии и системами электроснабжения с управляемой нагрузкой.

В связи с этим на следующем этапе после создания архитектуры управления электроэнергетической системой является этап формирования функциональности и перечня задач управления, включая все субъекты генерации, сетевых компаний и потребителей.

Литература

1. *Шевелева А.В.* Влияние инноваций на международный электроэнергетический бизнес в XXI веке / А.В. Шевелева, Я.Н. Зубкова, Т.Б. Гусева // *Journal of Economic Regulation*. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 77–87.

2. *Еризко В.В.* Цифровая энергетическая парадигма: стратегия и перспективы развития отрасли / В.В. Еризко // *Научный ежегодник Центра анализа и прогнозирования*. – 2018. – № 1(2). – С. 153–158.

3. *Nezevak V.* Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. – Vol. 982. – PP. 524–538.

Л.М. Рыбаков, О.И. Канюгин
(Йошкар-Ола, Марийский государственный университет)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10 КВ

Вопросам исследования надёжности и обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ посвящены работы многих учёных [1, 2]. Ими показано, что обеспечение требу-

емой надёжности можно достигнуть путем повышения качества профилактических ремонтных работ, установления оптимального периода технического обслуживания элементов, аппаратов и оборудования, эксплуатируемых в распределительных сетях, комплектованием достаточного аварийного запаса, использованием современных защитных аппаратов от перенапряжений.

В состав распределительной сети, которые являются объектом исследования данной работы, входят воздушные линии 10 кВ, силовые трансформаторы 10/0,4 кВ, коммутационные аппараты, средства релейной защиты, автоматики и телемеханики, аппараты защиты от перенапряжений.

Особенностью распределительных сетей 10 кВ является их большая протяженность, рассредоточенность нагрузок по площадям при незначительной их величине, а также подверженность воздействию повторяющихся внешних климатических факторов.

Анализ основополагающих работ по обеспечению работоспособности распределительных сетей 10 кВ позволил выявить основные недостатки, определить обеспечение надёжности электроснабжения потребителей качественной электрической энергией.

Из опыта эксплуатации и анализа отказов элементов, аппаратов оборудования распределительных сетей 10 кВ могут быть определены следующие приоритетные задачи для повышения надёжности работы 10 кВ:

1. Создание информационно-измерительной системы и мониторинга для оценки текущего состояния элементов, аппаратов и оборудования, подключенных к сетям.

2. Разработка метода контроля и испытания изоляции сетей под рабочим напряжением.

3. Разработка методов дистанционного диагностирования изоляционных элементов сетей.

4. Разработка методов прогнозирования отказов и технического состояния элементов и оборудования распределительных сетей.

5. Разработка методики комплектования аварийных бригад персоналом, аварийным запасом аппаратов и оборудования на необходимый период.

6. Разработка рациональной стратегии технического обслуживания элементов и оборудования сельских распределительных сетей 10 кВ.

Литература

1. *Рыбаков Л.М.* Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ: науч. изд. / Л.М. Рыбаков. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 421 с.

2. *Рыбаков Л.М.* Обслуживание элементов и оборудования электроустановок по результатам диагностирования технического состояния: монография / Л.М. Рыбаков, З.Г. Иванова, Н.Л. Макарова. – Йошкар-Ола: Изд-во Мар. гос. ун-та, 2015. – 318 с.

А.В. Шалухо, Л.Е. Веселов, В.И. Федорчатенко
(Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ГЕНЕРИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЁРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Важной задачей энергетической стратегии России является обеспечение надёжного и качественного энергоснабжения потребителей в удалённых районах, в том числе предприятий сельскохозяйственной отрасли [1]. Решение этой задачи основано на развитии распределённых источников энергии, отличающихся высокой эффективностью и экологичностью.

Сельскохозяйственные предприятия (животноводческие и растениеводческие комплексы) имеют возможность выработки биогаза путем утилизации производственных отходов. В статье в качестве источников энергии, работающих на биогазе, рассматриваются твёрдооксидные топливные элементы (ТОТЭ). ТОТЭ характеризуются высоким КПД выработки энергии и отсутствием загрязняющих выбросов.

Объектом исследования является автономная система электроснабжения животноводческого комплекса. Цель работы заключается в разработке алгоритма управления комбинированной системой генерирования на основе ТОТЭ, использующих в качестве топлива биогаз.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение о предоставлении грантов для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук № 075-15-2020-097 от 18.03.2020 г.).

Недостатком ТОТЭ является низкая маневренность, что затрудняет интеграцию ТОТЭ в автономные системы электроснабжения. Проведено исследование сочетания ТОТЭ с дополнительными источниками и накопителями электроэнергии для обеспечения маневренности работы системы генерирования. На рис. 1 показана структурная схема комбинированной системы генерирования, включающей в состав ТОТЭ, систему накопления на основе аккумуляторных батарей (АБ) и резервный электрогенератор на биогазе (РЭБ).

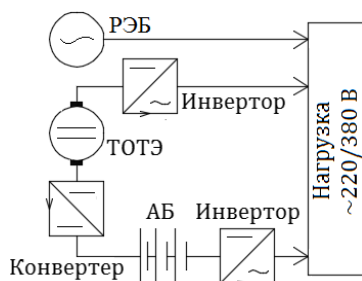


Рис. 1. Комбинированная система генерирования на основе сочетания ТОТЭ, РЭБ и АБ

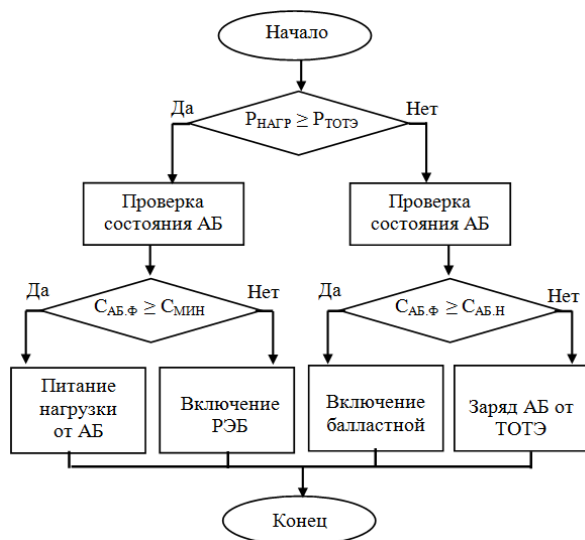


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления комбинированной системы генерирования

Основным источником энергии является ТОТЭ. Разработан алгоритм управления комбинированной системой генерирования (рис. 2). Исходными данными являются мощность нагрузки предприятия ($P_{\text{НАГР}}$) и мощности энергоустановок ($P_{\text{ТОТЭ}}$, $P_{\text{РЭБ}}$). В основу работы алгоритма положено выражение

$$P_{\text{НАГР}} \geq P_{\text{ТОТЭ}}. \quad (1)$$

При выполнении условия (1) осуществляется проверка состояния системы накопления с прекращением процесса заряда АБ от ТОТЭ и включением РЭБ. Если условие (1) не выполняется, РЭБ не должен находиться в работе. Выполняется проверка на условие

$$C_{\text{АБ.Ф}} \geq C_{\text{АБ.Н}},$$

где $C_{\text{АБ.Ф}}$ – фактический уровень заряда системы накопления (А·ч); $C_{\text{АБ.Н}}$ – номинальный уровень заряда системы накопления (А·ч).

Тестирование алгоритма выполнено с помощью Simulink-модели исследуемой системы электроснабжения. Simulink-модель была разработана с учетом структурной схемы энергообеспечения предприятия и результатов расчёта параметров комбинированной системы генерирования. В модели использованы типовые и программируемые блоки Matlab-Simulink. Подробное описание Simulink-модели приведено в [2].

Литература

1. Проект «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. – М., 2014. – Режим доступа: <http://media.rspp.ru/document/1/c/e/ceef7d9d4df403f7f78fa3bd217d7285.pdf> (дата обращения: 25.04.2020).

2. *Shalukho A.V. The Research of Power Supply System Operating Modes with Solid Oxide Fuel Cells on Biogas / A.V. Shalukho, E.N. Sosnina, L.E. Veselov // 2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE). – PP. 585–593.*

Л.В. Быковская, В.А. Маслов
(Оренбург, Оренбургский государственный университет)

УЧЁТ РАСЩЕПЛЕНИЯ ФАЗЫ ПРИ РАСЧЁТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЛЭП 500 КВ

В линиях напряжением 500 кВ с целью увеличения пропускной способности каждую фазу выполняют расщепленной на несколько

проводов. Зачастую в расчётах электрического поля (ЭП) ЛЭП применяют эквивалентный радиус. Проведем расчёт напряженности ЭП ВЛ 500 кВ для случая с учетом расщепления фаз. Сравним результаты с расчётом без учета расщепления фаз. Для линий 500 кВ примем, что фаза расщеплена на два провода АСО-700 [1].

Исходные данные: радиус провода $r_0 = 0,0181$ м; электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,65 \times 10^{-12}$ Ф/м; расстояние между проводами фаз $d = 12$ м; высота подвеса провода $H_{\Pi} = 22$ м; габарит линии $H_0 = 8,65$ м; шаг расщепления $a = 0,4$ м; стрела провеса $f = 13,35$ м; фазное напряжение $U_{\phi} = 500/\sqrt{3}$ кВ; ёмкость фазы $C = 8,479 \times 10^{-12}$ Ф/м; высота размещения провода $H = 8,65$ м, точка расчёта $x = 0$; $y = 1,8$ м.

Примем допущение, что линия не имеет грозозащитных тросов или они изолированы от опор в целях использования их для отбора мощности. Расчёт проведем с использованием метода зеркальных изображений. ЭП ВЛ будет создаваться зарядами проводов и зарядами их зеркальных изображений. Вектор напряженности суммарного поля будет равен геометрической сумме векторов напряженностей всех зарядов [2].

Найдем отрезки m и n для первого провода фазы А:

$$m_{A1} = \sqrt{(x + d + a)^2 + (H - h)^2}, \quad n_{A1} = \sqrt{(x + d + a)^2 + (H + h)^2}.$$

Найдем коэффициент k для первого провода фазы А:

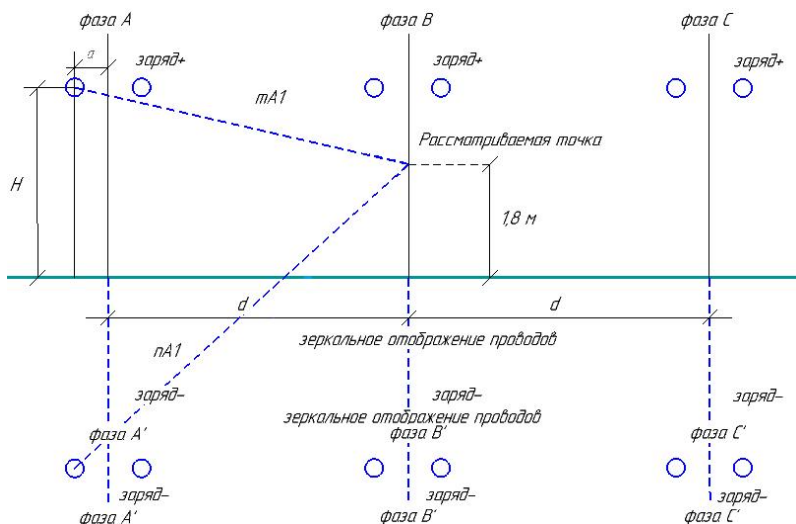
$$k_1 = \frac{(x + d + a)}{m_{A1}^2} - \frac{(x + d + a)}{n_{A1}^2}.$$

Отрезки m и n , а также коэффициенты k для других проводов находятся аналогично с учетом расположения проводов (см. рисунок).

Горизонтальная составляющая напряженности ЭП от первых и вторых проводов фаз А, В, С:

$$E_{x1} = \frac{CU_{\phi}}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_1 - k_5 - k_9)^2 + 3(k_5 - k_9)^2};$$

$$E_{x2} = \frac{CU_{\phi}}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_3 - k_7 - k_{11})^2 + 3(k_7 - k_{11})^2}.$$



К расчёту ЭП с учетом расщепления фаз

Вертикальная составляющая напряженности ЭП от первых и вторых проводов фаз А, В, С:

$$E_{y1} = \frac{CU_{\phi}}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_2 - k_6 - k_{10})^2 + 3(k_6 - k_{10})^2};$$

$$E_{y2} = \frac{CU_{\phi}}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_4 - k_8 - k_{12})^2 + 3(k_8 - k_{12})^2};$$

Суммарная напряженность электрического поля:

$$E = \sqrt{(E_{x1} + E_{x2})^2 + (E_{y1} + E_{y2})^2}.$$

Напряженность электрического в искомой точке $x=0$; $y=1,8$ м, составила 14600 В/м. Аналогично был произведен расчёт электрического поля ЛЭП 500 кВ без учета расщепления фаз. Напряженность ЭП в этом случае составила 9595 В/м.

Выводы.

1. С увеличением эквивалентного радиуса фаз снижается напряженность электрического поля вокруг фазы (примерно на 34,3 %) и, следовательно, снижаются потери на коронирование. Суммарные значения этих потерь для ВЛ 500 кВ имеют большие значения и используются при анализе режимов линий.

2. С увеличением эквивалентного радиуса фаз наблюдается уменьшение ёмкости фаз ВЛ и, следовательно, уменьшение ёмкостной проводимости.

Литература

1. Ключкова Н.Н. Расчёт электропитающих сетей: учеб. пособие / Н.Н. Ключкова, А.В. Обухова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 146 с.

2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов / П.А. Долин. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

3. Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – Т. 3. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 2003. – 316 с.

5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Главтехнадзор России. – 7-е изд. – М.: Энергосервис, 2007. – 610 с.

К.Р. Валиуллин, С.И. Тушев
(Оренбург, Оренбургский государственный университет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ НАГРЕВА ОДНОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ В СЕТЯХ 0,4 КВ

В процессе короткого замыкания выделяется большое количество энергии, которая поглощается проводником. С течением времени, в результате нагрева проводника током увеличивается его удельное сопротивление, в результате чего ток короткого замыкания постепенно уменьшается. Этот процесс получил название «эффект теплового спада тока короткого замыкания» [1].

Для исследования данной закономерности авторами предлагается математическая модель зависимости тока короткого замыкания от температуры нагрева кабеля, реализованная со следующими допущениями:

1. Процесс нагрева адиабатический, то есть не происходит обмена с окружающей средой, и вся тепловая энергия поглощается проводником [2]. Данное допущение обосновывается тем, что процесс КЗ развивается очень быстро и за короткий промежуток времени проводник не успевает отдать значительное количество тепловой энергии в окружающую среду;

2. Проводник имеет однородное сечение и однородную структуру по всей своей длине;

3. Не учитывается распределение температуры в сечении;

4. Проводник одножильный – не учитывается нагрев от соседних жил.

Начальные условия до возникновения короткого замыкания:

1) $I_{кз0} = 0$, $I = I_{ном}$; 2) $t_{кз0} = 0$; 3) $T_0 = 20^\circ\text{C}$; 4) $dT = 0$.

Из первого допущения следует, что вся энергия, выделившаяся в результате прохождения электрического тока по сопротивлению R за время t , расходуется на нагрев проводника, на основании этого можно составить уравнение теплового баланса [3]:

$$I_{кз}^2 t_{кз} r / S = c \rho S \Delta T.$$

Пересчёт тока КЗ в зависимости от нагрева кабеля осуществляется итерационным способом.

Начальный ток КЗ, относительно которого ведется пересчёт, рассчитывается по формуле

$$I_0 = \frac{\sqrt{3} U_{срНН}}{r_{к0} l},$$

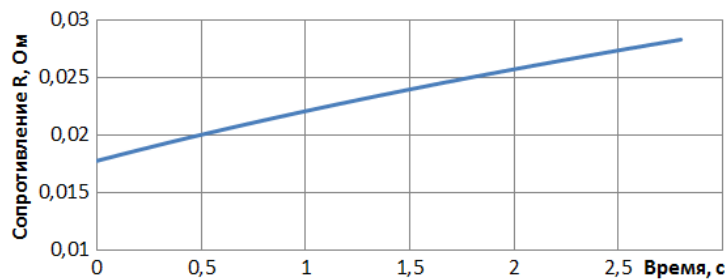
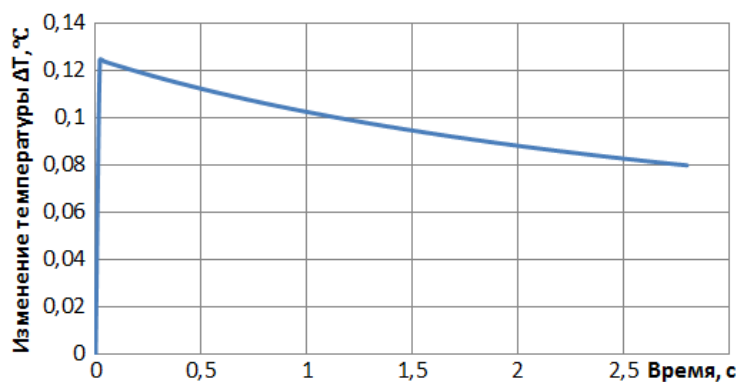
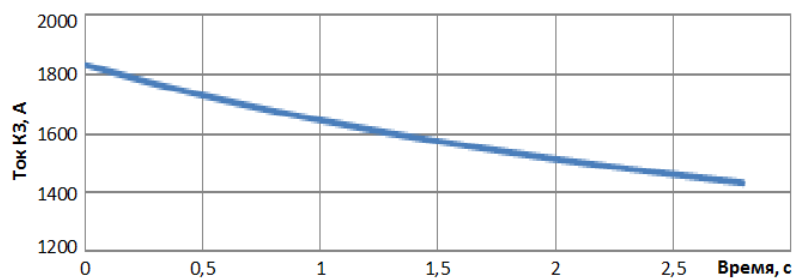
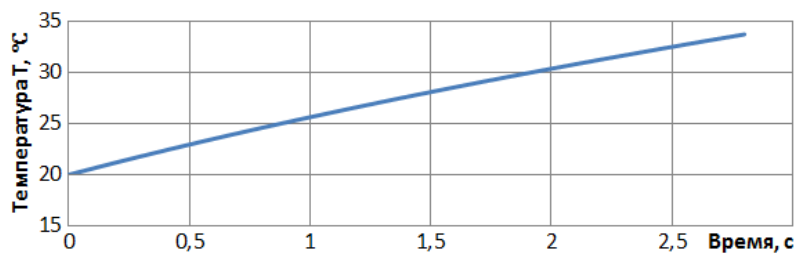
где $r_{к0}$ – сопротивление проводника при $T = 20^\circ\text{C}$; l – длина линии.

На рисунке показано изменение тока короткого замыкания, температуры, сопротивления и ΔT во времени при следующих параметрах проводника:

$$S = 185 \text{ мм}^2, c = 385 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}, \gamma = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, l = 1 \text{ м}.$$

Выводы.

1. За время протекания тока КЗ увеличивается удельное сопротивление проводника, что приводит к постепенному уменьшению тока. Моделирование нагрева кабеля показывает, что ток КЗ через 1 с снижается более чем на 5 % при $S = 185 \text{ мм}^2$.



Изменение тока короткого замыкания, температуры, сопротивления и ΔT во времени

2. Уменьшение тока КЗ в результате «теплового спада» может вносить погрешность в работу защит в сетях до 1000 В.

Литература

1. *Егорушкин И.О.* Учет теплового спада тока короткого замыкания при проектировании сельских электрических сетей / И.О. Егорушкин, Л.П. Костюченко // Аграрная наука на рубеже веков: материалы регион. науч.-практ. конф. – Ч. 2. – Красноярск, 2007.

2. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Введ. 1995-01-01. – Мн., 1995. – 47 с.

3. *Лапидус А.А.* Увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током короткого замыкания / Лапидус А.А. // 31 Неделя науки СПбГПУ: материалы межвуз. науч. конф. – СПб., 2003. – С. 5–7.

А.В. Шихина, А.Е. Коченгин, В.А. Шихин
(Москва, НИУ МЭИ)

КОМБИНИРОВАННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Для решения задач прогнозирования цены рынка электроэнергии по данным в форме временных рядов (ВР) обычно используются статистические модели различных типов [1–4]. Авторегрессионные модели прогнозирования для европейских рынков электроэнергии достигают 10–17 % точности прогнозирования и лишь в исключительных случаях 5 % точности на наиболее стабильном рынке Северной Европы с использованием меры точности, соотносимой с размерностью временного ряда n , значениями прогнозируемой переменной и её прогнозным значением:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|.$$

При решении задач прогнозирования цены электроэнергии нашли применение главным образом *ARIMA*-модели:

$$D^d y_t = j_0 + \sum_{i=1}^p j_i D^d y_{t-i} + \sum_{i=1}^q w_i D^d e_{t-i} + e_t,$$

где y_t – уровень ВР в момент времени t ; $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$ – уровни ВР в соответствующие моменты времени $t-1, t-2, \dots, t-p$; p ; $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ – оцениваемые коэффициенты; e_t – случайный остаток, коэффициент φ_0 определяет постоянный уровень ряда. Последовательность значений получаемого исходного ряда в форме $ARIMA(p,d,q)$ -модели после интегрирования ряда образует $ARMA(p,q)$ -модель.

Комбинированная статистическая регрессионная модель с временным трендом. Известны попытки учесть многофакторное влияние посредством гибридной регрессионной модели. Поэтому проведем дополнительное исследование, взяв за основу, предложенную в [1] форму гибридной модели. Предлагается следующая структура комбинированной регрессионной многофакторной модели прогноза (КРМП):

$$y_t = \varphi_0 + at + b_1 z_1 + \dots + b_n z_n + c_1 x_1 + \dots + c_m x_m + \varepsilon_t,$$

где коэффициент φ_0 определяет постоянный уровень ряда, a – коэффициент временного тренда в цене; ε_t – случайный остаток временного ряда $\varepsilon_t \leftrightarrow N(0, \sigma_t^2)$; z_1, \dots, z_n – дамми-переменные, например, это дни недели; x_1, \dots, x_m – факторы, например, длительность светового дня, цена газа, курс евро, дневная температура окружающего воздуха и др. Оценка ошибки прогнозирования на временном ряде сентябрь 2018 г. – июнь 2019 г. составила по $MAPE = 9,2\%$, что сопоставимо с известными опубликованными данными, но всё же КРМП позволяет проводить наглядный анализ влияния избранных факторов на формирование цены электроэнергии.

Закключение. Обосновано рассмотрение комбинированных регрессионных моделей в качестве инструмента изучения и численной оценки влияния отдельных факторов, формирующих цену электроэнергии на прогнозируемый период. При этом уровень точности комбинированных регрессионных моделей соответствует достигнутому в настоящее время уровням точности прогноза цены электроэнергии.

Литература

1. Смирнова Е.О. Решение задачи прогнозирования цен на электроэнергию на рынке «На сутки вперед» эконометрическими

методами [Электронный ресурс] / Е.О. Смирнова. – Режим доступа: https://olymp.msu.ru/archive/Lomo_nosov_2012/1946/44283_e645.pdf (дата обращения: 25.04.2020).

2. *Поршнев С.В.* Исследование методов анализа и прогнозирования технологической информации, собираемой информационными системами тепловых электрических станций / С.В. Поршнев, И.В. Соломаха. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 208 с.

3. *Шихин В.А.* Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей / В.А. Шихин, Г.П. Павлюк // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 10. – С. 39–45.

4. *Дробыш И.И.* Статистические модели прогнозирования цен на оптовых рынках электроэнергии: российский и зарубежный опыт / И.И. Дробыш // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Экономика и менеджмент». – 2017. – Т. 11, № 3. – С. 41–54.

С.И. Малафеев^{1,2}, С.С. Малафеев³, А.Ю. Игнатов²
(¹Москва, ООО Компания «Объединённая Энергия»;

²Владимир, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых;

³Владимир, Владимирский политехнический колледж)

РЕГУЛЯТОР ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОГО КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Для повышения эффективности использования электрической энергии в электрических системах применяют компенсирующие устройства различных типов [1–3]. Особый интерес представляет разработка алгоритмов управления для быстродействующих компенсирующих устройств, обеспечивающих оптимальные по различным критериям режимы в системе электропитания [4].

В настоящей работе представлены результаты разработки и моделирования регулятора для тиристорно-реакторного компенсирующего устройства, ориентированного на использование в электрических сетях горных предприятий при работе мехатронных комплексов с рекуперацией энергии [4].

Функциональная схема системы управления компенсирующим устройством показана на рис. 1.

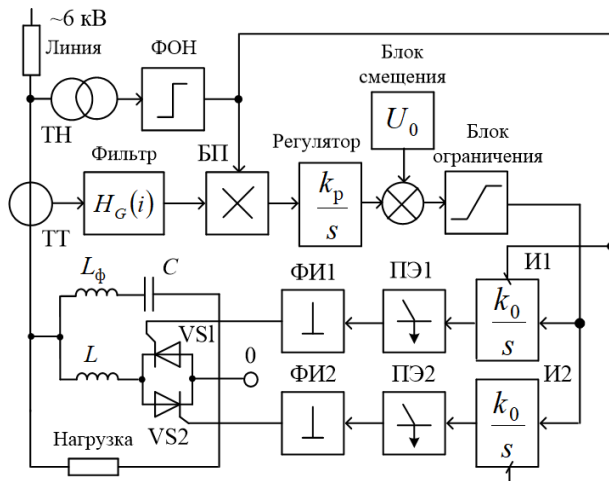


Рис. 1. Функциональная схема регулятора тиристорно-реакторного компенсирующего устройства: ТТ – трансформатор тока; ТН – трансформатор напряжения; ФОН – формирователь опорного напряжения; БП – блок перемножения; ФИ1 и ФИ2 – формирователи импульсов; ПЭ1 и ПЭ2 – пороговые элементы; И1 и И2 – интеграторы

Силовая часть компенсирующего устройства содержит реактор L с тиристорным регулятором из двух встречно-параллельно включенных тиристоров VS1 и VS2 и конденсаторную батарею C с последовательно включенным реактором L_ϕ . Управление компенсатором производится по критерию минимума квадратурной составляющей тока питающей сети. Формирователь опорного напряжения (ФОН) генерирует последовательность прямоугольных импульсов, совпадающих по фазе с напряжением питающей сети. Фильтр выполняет преобразование Гильберта от тока нагрузки. Постоянная составляющая сигнала на выходе блока перемножения БП пропорциональна квадратурной составляющей основной гармоники тока питающей электрической сети. Интегральный регулятор формирует сигнал для устройства управления встречно-параллельными тиристорами VS1 и VS2. Это устройство содержит два идентичных канала, каждый из которых состоит из интегратора со сбросом, порогового элемента и формирователя импульсов.

Система регулирования компенсирующим устройством – дискретная и нелинейная. Время регулирования при скачкообразном изменении реактивного тока нагрузки зависит от фазы этого изменения $T < t_p < 2T$, где T – период напряжения питающей сети [5].

Представленная на рис. 1 схема регулятора обеспечивает регулирование квадратурной составляющей основной гармоники тока питающей сети. Различные модификации устройства позволяют реализовывать другие алгоритмы, например, регулирование напряжения [6].

Моделирование системы выполнено с помощью Simulink. Параметры системы: $C = 180$ мкФ; $L = 0,08$ Гн; активное сопротивление сети $R_c = 5$ Ом; индуктивность сети $L_c = 0,032$ Гн; $k_p = 10$ с⁻¹; $U_0 = 10$ В. На рис. 2, а приведены диаграммы процессов для мгновенных значений тока в сети $i_c(t)$ и напряжения на нагрузке $u_n(t)$ и действующего значения напряжения на нагрузке $U_n(t)$.

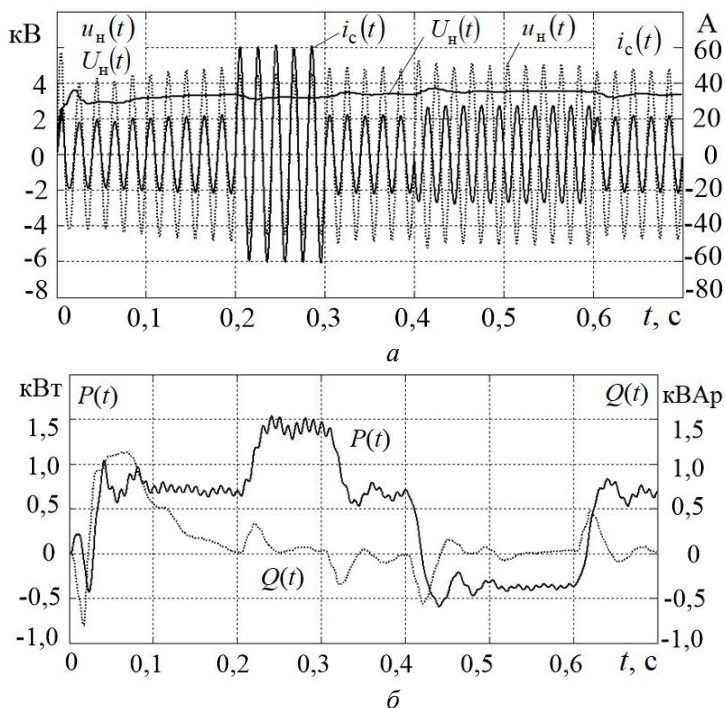


Рис. 2. Осциллограммы процессов в электрической системе с тиристорно-реакторным компенсирующим устройством

Постоянно действующая нагрузка сети имеет параметры $R_n = 220 \text{ Ом}$; $L_n = 0,04 \text{ Гн}$. В интервале времени $t = 0,1 \div 0,2 \text{ с}$ включается активно-индуктивная нагрузка $DR_n = 110 \text{ Ом}$; $DL_n = 0,05 \text{ Гн}$. В интервале времени $t = 0,4 \div 0,6 \text{ с}$ происходит рекуперация энергии, амплитуда тока рекуперации равна 50 А. На рис. 2, б показаны осциллограммы активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощности.

Время регулирования при включении и отключении нагрузки, а также при переходе в режим рекуперации энергии в сеть не превышает 40 мс, т.е. двух периодов напряжения питающей сети.

Литература

1. *Dixon J.* Reactive power compensation technologies, State-of-the-Art Review / J. Dixon, et al. // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, No. 12. – PP. 2144–2164. – DOI: 10.1109/JPROC.2005.8599937.
2. *Singh H.* Reactive Compensation Capability of Fixed Capacitor Controlled Reactor for Load Power Factor Improvement: A Review / H. Singh, D. Sharma // International Journal of Scientific & technology Research. – 2015. – Vol. 4, Is. 01. – PP. 225–228.
3. *Taylor C.W.* Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation / C.W. Taylor, et al. // IEEE Transactions on Power Systems. – 1994. – Vol. 9, No. 9. – PP. 229–240.
4. *Malafeev S.I.* Compensation for Loss Voltage in the Power Line / S.I. Malafeev, S.S. Malafeev // Chapter 28 in DAAAM International Scientific Book 2018; B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria. – PP. 317–324.
5. *Малафеев С.И.* Автоматическая система управления тиристорно-реакторным компенсатором / С.И. Малафеев // Электричество. – 1997. – № 6. – С. 13–18.
6. *Malafeev S.I.* Investigation of electric power processes during the operation of a mining excavator / S.I. Malafeev, S.S. Malafeev // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 25-29 March 2019, Sochi, Russia, IEEE Conference Location. – PP. 1–5. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743002.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПРОАКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ УЩЕРБОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Даже у самых надёжных трансформаторов неизбежно возникают дефекты и, как следствие развития дефектов, – повреждения. Каждое внезапное возмущение, обусловленное повреждением трансформатора, повышает риск возникновения аварийной ситуации в электроэнергетической системе (ЭЭС). Желательно, чтобы система релейной защиты обеспечивала мгновенное отделение поврежденного трансформатора от исправной части ЭЭС [1].

Приблизить свойства защит, устанавливаемых на трансформаторах, к идеальным можно путем реализации упреждающих действий релейной защиты за счёт выявления потенциальных повреждений на ранней стадии развития. При этом существенно снижается риск возникновения внезапных повреждений в трансформаторах, и, следовательно, риск внезапных возмущений в ЭЭС. Необходимо отметить, что большая часть дефектов могла бы быть своевременно выявлена применением существующих методов и средств технической диагностики.

Система диагностики трансформаторов, как, впрочем, и другого оборудования, должна иметь полноценное информационное, техническое, нормативное обеспечение, а также стратегию принятия решений о возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации трансформатора или необходимости вывода в ремонт.

Обоснуем технико-экономический эффект от применения систем проактивной диагностики силовых трансформаторов. Для этого оценим примерный ущерб от аварийного отключения трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ из-за повреждения его обмоток.

Полные экономические потери (ущерб), возникающие при повреждении силового трансформатора включают ущерб от повреждения оборудования и ущерб от перерывов в электроснабжении потребителей:

$$Y = Y_{\text{об}} + Y_{\text{потр}}, \text{ тыс. руб.}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{об}}$ – ущерб от повреждения оборудования, тыс. руб.; $Y_{\text{потр}}$ – ущерб от перерывов в электроснабжении потребителей, тыс. руб.

Средние удельные потери мощности трансформатора по данным [2] составляют $y_y = 566,37$ тыс. руб./МВ·А при курсе доллара США $1\$ = 63$ руб.

Согласно данным таблицы 4 [2] повреждаемость k обмоток трансформаторов от общего числа повреждений составляет 25,5 %. Тогда ожидаемый ущерб от аварийного отключения трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 63$ МВ·А из-за повреждения его обмоток составит

$$Y = k y_y S_{\text{ном}} = 9098,7 \text{ тыс. руб.}$$

Анализ итоговых данных таблицы 1 [2] показывает, что процент возникающего ущерба от повреждения оборудования составляет 56,95 %, а на долю ущерба от перерывов в электроснабжении приходится 43,05 %.

С учетом формулы (1) получим:

$$Y_{\text{об}} = 5181,7 \text{ тыс. руб.}; Y_{\text{потр}} = 3917,0 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно [3], [4], повреждаемость новых трансформаторов составляет 0,2 % (каждый 500-й трансформатор), а возрастом 30 лет – 1 % (каждый 100-й трансформатор). Согласно источнику [5] для трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 – 500 кВ мощностью 63 МВ·А и более, работающих в электрических сетях, удельная повреждаемость, сопровождающаяся возникновением внутренних коротких замыканий, составляет 0,45 % в год или каждый 222-й трансформатор. При этом повреждения обмоток имеют место у трансформаторов с любыми сроками эксплуатации [3].

Установка системы проактивной диагностики на 222 трансформатора позволит предотвратить ожидаемый ущерб. При этом ежегодная экономия денежных средств составит $\Xi = 9098,7$ тыс.руб./год.

Анализ предложений ведущих отечественных производителей микропроцессорных устройств показал, что ориентировочная стоимость одного комплекта программно-аппаратного комплекта составит 80 000 рублей, тогда инвестиции в 222 трансформатора соста-

вят 17 760 000 рублей. Расчёт показал, что дисконтированный срок окупаемости вложений составит около двух лет.

Литература

1. *Alyunov A.N.* Automation of calculations of power transformers windings parameters taking into account the position of the voltage regulator / A.N. Alyunov, O.S. Vyatkina, L.R. Mukhametova, et al. // E3S Web of Conferences 2019. – P. 02016.

2. *Бартли У.* Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартли // Энергетика и менеджмент. – 2011. – № 1(58). – С. 40–45.

3. *Анин Б.В.* О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Анин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.

4. *Bogomolov V.S.* Problems of autotransformers operation in systems with fault currents upgrowth / V.S. Bogomolov, N.N. Khublarov, M. Yu. Lvov, A.O. Lvov. – CIGRE, Session-2000. – Paper No. 12-106.

5. *Львов М.Ю.* Силовые трансформаторы на 110 кВ и выше. Будущее определит диагностика / М.Ю. Львов // Новости электротехники. – 2003. – № 6 (24).

А.Р. Ефимова, С.А. Василенко
(Москва, НИУ МЭИ)

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ТЭЦ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Утилизационные ТЭЦ (УТЭЦ) различных видов используются повсеместно. Применение технологий, которые способствуют получению максимальной полезной работы на единицу сжигаемого топлива, обусловлено тенденциями по повышению экономичности производственных процессов, роста цен на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР). Одним из путей развития в этом направлении является увеличение в энергобалансе доли вторичных ресурсов, образующихся при протекании основных производственных процессов [1]. Например, подвод доменного и коксового газов, которые являются побочным продуктом при плавке металла в доменных печах, к энергетическим котлам для использования их в

качестве топлива в смеси с природным газом. Очевидно, что данный способ утилизации существенно снижает затраты металлургического завода на ТЭР и, таким образом, на электрическую и тепловую энергию. ТЭЦ ОАО «НЛМК» – пример УТЭЦ, работающей за счёт сжигания доменного газа.

Минимальная стоимость потребляемых ТЭР достигается при снижении доли потребления природного газа и максимизации расхода доменного и коксового газов. Проблема автоматизации котлов на данном виде топлива состоит в сложности регулирования расхода топлива для поддержания параметров пара на заданном уровне при колебаниях калорийности и давления доменного газа в коллекторе. Кроме того, состав доменного газа отличается от состава природного: содержание монооксида углерода составляет – 23–30 %, водорода – 1,5–9 %, углекислого газа – 16–19 %, азота – 45–52 %, влаги – 3,5 % и др. [2]. Изменение доли доменного газа в процессе сжигания топлива приводит к увеличению выброса токсичных оксидов азота, изменению теплообмена в топке и параметров перегретого пара. Поэтому для поддержания процесса устойчивого горения факела в котлах необходимо регулировать расход природного газа.

Автоматизация данной станции усложняется также переходом к тепловой схеме с поперечными связями: пар от трёх котлов направляется в общую паровую магистраль, откуда распределяется на три паровые турбины и воздухоподувку. Существует несколько способов регулирования давления в общем паропроводе:

1. Все котлы работают в регулирующем режиме.
2. Только часть агрегатов работает в регулирующем режиме.

Оба способа имеют свои недостатки. При первом все котлоагрегаты работают не в оптимальном режиме, из-за чего повышается потребление топлива, и понижается к.п.д. каждого котла. При втором возникает недостаточное качество регулирования на участках, отдаленных от регулируемого котла [3].

Таким образом, авторами были обозначены проблемы, представляющие ТЭЦ ОАО «НЛМК» нестандартным технологическим объектом управления в сравнении с другими электрическими станциями. Был проведен глубокий анализ различных режимов работы УТЭЦ для определения оптимальных решений описанных проблем, которые будут представлены в докладе.

Литература

1. *Каблукова М.С.* Повышение объемов использования доменного газа на металлургическом предприятии / М.С. Каблукова, Е.Б. Агпитов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2011. – № 69. – С. 95–97.

2. *Турунов А.Д.* Использование доменного газа в качестве основного топлива ТЭЦ металлургических предприятий / А.Д. Турунов, К.В. Осинцев, С.Д. Тайферов // Энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике и социальной сфере. – 2014. – № 1. – С. 304–311.

3. *Лебединский Р.А.* Регулирование давления в общем коллекторе острого пара ТЭЦ с поперечными связями / Р.А. Лебединский, Н.С. Благодарный // Вестник ангарской государственной технической академии. – 2011. – № 5. – С. 66–69.

А.В. Шалухо, Н.И. Эрдили, А.С. Власов
(Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОСЕТЬЮ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Один из эффективных подходов к управлению микросетями с распределённой генерацией связан с применением мультиагентных технологий, в которых управляющие реакции формируются в результате взаимодействия отдельных агентов, представляющих собой программно-аппаратные модули с развитой архитектурой [1]. Объектом исследования является интеллектуальная электрическая сеть (0,4–10 кВ), объединяющая распределённые объекты с разнохарактерной собственной генерацией (энергетические ячейки), которые могут работать параллельно с энергосистемой или изолировано.

Для систем с небольшим количеством однотипных распределённых объектов могут быть использованы разветвляющиеся алгоритмы управления [2]. Системы с достаточно большим количеством распределённых разнохарактерных объектов требуют применения более эффективных алгоритмов функционирования.

Представлен подход к решению этой задачи путем перехода к мультиагентной системе (МАС) управления, функционирование которой основано на взаимодействии множества агентов (таблица).

Формализованные агенты в составе МАС микрогрид

Агент	Функциональность	Правила функционирования
Агент централизованной сети (Ag_{ES})	1, 2, 3	Ag_{ES} связывается только с Ag_{Bus}
Агент распределённой генерации мини-электростанции (Ag_{MES})	1, 2	Ag_{MES} связывается только с Ag_{Bus}
Агент распределённой генерации ВИЭ (Ag_{RES})	1, 2	Ag_{RES} связывается только с Ag_{Bus}
Агент накопителей электроэнергии (Ag_{ESS})	1, 2, 4, 5	Ag_{ESS} связывается только с Ag_{Bus} , который связан с Ag_{RES}
Агент шин (Ag_{Bus})	1, 6, 7	Ag_{Bus} может быть связан с любым типом агентов в МАС
Агент линии электропередач (Ag_{Line})	1, 6, 8, 9	Ag_{Line} может быть связан только с Ag_{Bus}
Агент трансформатора (Ag_{Trans})	1, 6, 8	Ag_{Trans} может быть, присоединен или отделен от Ag_{Bus} в МАС
Агент нагрузки (Ag_{Demand})	1, 10	Ag_{Demand} может быть связан только с Ag_{Bus}

В таблице цифрами обозначены следующие функции: 1 – присоединение/отсоединение в МАС; 2 – обеспечение поставляемой мощности; 3 – прием мощности от микрогрид; 4 – контроль уровня заряда; 5 – прием излишков мощности от энергоячейки с ВИЭ; 6 – обмен информации между соседними агентами; 7 – повторное определение ресурсов мощности; 8 – расчёт потерь мощности и уровня напряжения; 9 – изменения по направлению потока мощности; 10 – оптимизация потребляемой мощности.

В работе исследуется применение мультиагентного подхода к решению задачи повышения эффективности функционирования микросетей с распределённой генерацией.

Литература

1. *Черемисин В.Т.* Повышение эффективности распределительных электрических сетей железных дорог на основе мультитангентного метода управления режимами / В.Т. Черемисин, Е.А. Третьяков // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 4. – С. 54–63.

2. *Соснина Е.Н.* Вопросы обмена электрической энергией между объектами распределённых систем электроснабжения / Е.Н. Соснина, А.В. Шалуха, Н.И. Эрдили // 24-я Нижегородская сессия молодых учёных (технические, естественные, математические науки). – Н. Новгород, 2019. – С. 245–247.

А.Д. Макаров, З.С. Хисматулина,
Ю.С. Хованская, Р.А. Якимов, Е.С. Денисов
(Казань, КНИТУ-КАИ)

ОБЛАЧНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

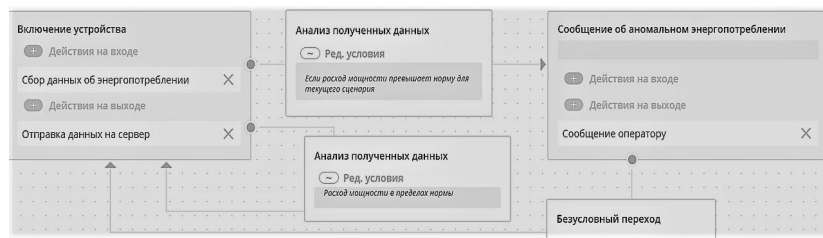
При реализации распределённых систем мониторинга электропотребления выделяются три ключевых этапа обработки данных: измерение информативных параметров на локальном устройстве, передача данных на сервер и обработка данных на нем. В рамках данной работы рассматривается реализация двух последних этапов.

Для обработки данных была выбрана отечественная облачная платформа “Rightech.io”. Для передачи данных на сервер используется протокол MQTT, поскольку он позволяет использовать более простые аппаратные средства обработки данных на локальном устройстве, снизить нагрузку на каналы передачи данных и обеспечивать поддержку большого количества локальных устройств. Для идентификации конкретного локального устройства используется идентификатор сервиса и уникальный ключ для каждого локального устройства.

Разработанное программное обеспечение облачного сервиса служит для анализа данных, передаваемых локальными устройствами о текущем потреблении энергии. Целью анализа служит накопление статистики по расходу электроэнергии с привязкой

к времени суток, дням недели, местоположению и типовым сценариям использования электрооборудования. В момент первого запуска система содержит информацию о наборе тривиальных сценариев, в процессе эксплуатации пользователи могут задавать более сложные сценарии как в ручном, так и в автоматическом режимах. Благодаря собранной статистике алгоритмы программы смогут выявлять значительные отклонения расхода мощности, например, увеличенные расходы энергии в квартире в дневное время, когда никого не должно быть дома, или в производственном помещении в нерабочее время.

Пример автомата, реализующего сценарий контроля превышения потребления в квартире в рабочее и нерабочее время, приведен на рисунке.



Автомат контроля потребления электроэнергии в квартире
в рабочее и нерабочее время на платформе Rigttech

В случае обнаружения значительного отклонения энергопотребления сервис немедленно оповещает пользователя, тогда как в остальное время данные о расходе энергии записываются на облачные сервера и сохраняются там до востребования. Отклонением также считается отключение измерительного устройства, с которого ведется сбор данных, поскольку такая ситуация расценивается как отключение электроэнергии в доме.

Программа также предполагает возможность дистанционного отключения энергии подключенных устройств через интерфейс приложения. Поддерживается возможность выделять некоторые устройства как «важные», к примеру: холодильник или другие устройства, которые должны быть включены всегда. Такие устройства пользователь не может выключить просто так и должен сначала удалить их из категории «важные», чтобы впоследствии их выключить.

В работе разработан облачный сервис для реализации функции обработки данных в распределённой системе мониторинга энергопотребления на базе отечественной платформы Rightech.io. Основным направлением дальнейших работ является накопление статистики и разработка алгоритмов машинного обучения для детектирования аномалий в энергопотреблении.

А.Д. Макаров, З.С. Хисматулина,
Ю.С. Хованская, Р.А. Якимов, Е.С. Денисов
(Казань, КНИТУ-КАИ)

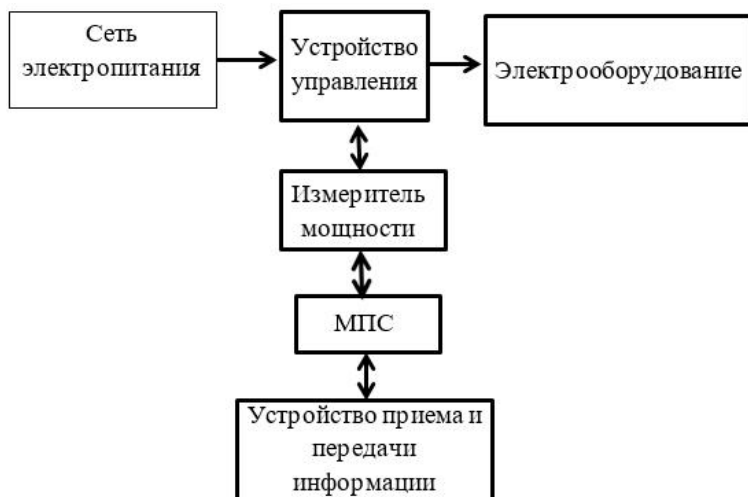
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ

Современный этап развития общества характеризуется глубоким проникновением информационных технологий во все сферы жизнедеятельности. Одним из наиболее успешных направлений, обусловленных этими процессами, являются технологии Интернета-вещей, позволяющие реализовывать удаленные системы сбора и обмена информацией, управления и мониторинга технического состояния.

В рамках данной технологии нами предлагается устройство для удаленного измерения мощности потребления электрического оборудования. Разработанное устройство содержит модуль измерения мощности потребления, реализованный на основе метода вольтметра-амперметра, микропроцессорное устройство управления и радиомодуль для беспроводного подключения к сети интернет. Кроме того, разработанное устройство выполнено с возможностью удаленного включения/выключения подключенного оборудования. Структурная схема устройства представлена на рисунке.

Контролируемое электрооборудование подключается к сети электропитания с действующим напряжением 220В и частотой 50Гц через разработанное устройство. В образованной электрической цепи начинает протекать переменный электрический ток. Для измерения мгновенной мощности потребления измеряются амплитудные значения тока I и напряжения U , а также косинус угла между фазами тока и напряжения $\cos \varphi$, при этом мощность вычисляется по следующей формуле:

$$P = UI \cos \varphi.$$



Упрощенная структурная схема устройства для измерения электропотребления с дистанционным доступом

Измерение электрических параметров осуществляется посредством функциональных блоков, встроенных в микроконтроллер STPM32 (МПС). К МПС подключен модуль WiFi для подключения к сети интернет и передачи данных в облачный сервис “Rightech.io”. Данные передаются через заданный промежуток времени посредством протокола передачи данных MQTT.

Программное обеспечение облачного сервиса на основе полученных данных собирает статистику о потреблении электроэнергии. Данные в текущий момент времени и за установленный период пользователь может свободно просматривать в любой момент времени. Пользователь дистанционно может подавать и отключать питание электрооборудования, подключенного к измерителю мощности. Кроме того, система проводит автоматический анализ потребления электрической энергии и может в автоматическом режиме сообщать об аномалиях в режимах работы электрического оборудования и производить его отключение в критических режимах.

Е.Н. Соснина, А.В. Иванов
(Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Современные наука и технологии являются одним из основных инструментов обеспечения устойчивого и в то же время динамичного развития государства, а также его национальной безопасности [1]. Стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий стимулирует внедрение передовых систем обработки цифровых данных во все экономически важные сферы, в том числе и в электроэнергетику. Отсутствие должного внимания к вопросам исследования и применения данных технологий может привести к потере независимости и конкурентоспособности России.

Цифровизация электросетевого комплекса помимо принципов и механизмов передачи информации между отдельными единицами оборудования также полностью меняет представления и взгляды на процессы, в число которых входит и проектирование. Основным регламентирующим документом при этом выступает серия стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК) 61850.

В рамках цифрового подхода чертежи, схемы и прочие элементы традиционной проектной документации заменяются на электронные файлы различных типов, сформированные согласно требованиям [2]. Тип файла непосредственно зависит от вида содержащейся в нем информации. Так, информация об используемых на энергообъекте единицах силового оборудования и их соединениях, то есть фактическая однолинейная схема, содержится в электронном файле типа System Specification Description (SSD).

Формализация, то есть представление информации в доступном для обработки ЭВМ виде, осуществляется благодаря использованию языка разметки System Configuration description Language (SCL).

В настоящий момент разработка электронной проектной документации осуществляется вручную, что в корне не рационально, так как главное преимущество цифрового подхода – возможность автоматизировать процессы не используется. Форми-

рование файлов электронной проектной документации вручную обусловлено следующими факторами:

- невозможность использовать зарубежное программное обеспечение (ПО) из-за имеющихся особенностей отечественной электроэнергетики;
- незаконченный процесс профилирования (адаптации) стандартов МЭК 61850;
- недостаточная научно-техническая база.

Взяв в качестве объекта исследования электротехнические комплексы, а в качестве предмета новые методы автоматизированного проектирования, соответствующие вызовам цифровой экономики, поставлена задача разработать электронную проектную документацию цифрового электротехнического комплекса в части SSD файлов, соответствующих МЭК 61850, используя при этом автоматизированные методы.

Результаты исследования будут использованы при разработке программного обеспечения, позволяющего автоматизировано формировать комплекты электронной проектной документации, что существенно повысит эффективность процесса проектирования.

Литература

1. Указ Президента РФ «О стратегии научно-технического развития Российской Федерации» от 1 декабря 2016 г. № 642 // Сайт Президента России. – Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>.

2. IEC 61850-6. Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IED.

Е.Н. Соснина, Н.В. Шумский, П.А. Шрамко
(Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

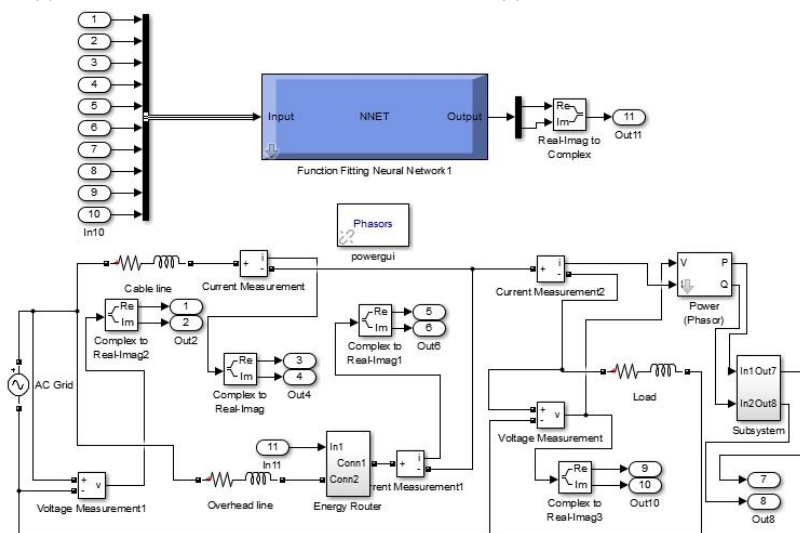
ОБУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРОУТЕРА НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Концепция создания Энергетического интернета [1] представляет новый принцип построения активно-адаптивной элек-

трической сети, позволяющий обеспечить потребителей доступной электроэнергией высокого качества. Ключевым устройством, реализующим контролируемость и управляемость потоков мощности в сети, является энергетический роутер. В НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработано полупроводниковое устройство (энергорouter), позволяющее управлять потоками мощности за счёт введения в сеть вольтодобавочного напряжения [2].

Для управления группой таких энергорouterов может быть использована автономная распределённая система управления (СУ) на основе нейронной сети (НС) [3]. Разработка потребует произвести процесс обучения, состоящий из пяти этапов: генерация, фильтрация, оптимизация, обучение и тестирование.

Генерация данных происходит с использованием математической модели участка электрической сети перебором комбинаций переменных параметров. Для каждой комбинации производится расчёт установившегося режима. Фильтрация в зависимости от выбранных ограничений по току и напряжению делит сгенерированные данные на три зоны: зеленую, желтую и красную. Для каждой зоны рассчитывается вольтодобавка энергорouterа [4]. Оптимизированные данные являются входными для обучения НС. Выходными данными является оптимальная вольтодобавка.



Компьютерная модель участка сети с энергорouterом и СУ

Для тестирования СУ энергорутера была создана Matlab модель участка сети (рисунок). На вход СУ приходят данные о токах ветвей, напряжений и мощности нагрузки. СУ обрабатывает входные данные и, основываясь на обученной модели, генерирует управляющий сигнал, задающий вольтодобавку.

Исследования показали, что СУ позволяет осуществить переход большей части значений из желтой и красной зоны в зеленую зону. Величина реальной вольтодобавки отличается на 1 % от ожидаемой, что говорит об эффективности работы СУ.

Литература

1. Wang K. A Survey on Energy Internet: Architecture, Approach, and Emerging Technologies / K. Wang, J. Yu, Y. Yu, et al. // IEEE Systems Journal. – 2018. – Vol. 12. – PP. 2403–2416.
2. Асабин А.А. Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей / А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 2 (125). – С. 112–118.
3. Соснина Е.Н. Технические решения создания интернета энергии / Е.Н. Соснина, Н.В. Шумский, П.А. Шрамко // Тинчуринские чтения. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2019.
4. Соснина Е.Н. Разработка алгоритма определения оптимальных параметров функционирования ТРВДН / Е.Н. Соснина, Н.В. Шумский, Л.А. Пюро // Сессия молодых учёных. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018.

С.С. Фролов, Д.А. Шатилов
(Оренбург, Оренбургский государственный университет)

ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ИСКАЖЕНИЙ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА РЕКУПЕРАЦИИ В СЕТЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ В СЕТЬ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ СИГНАЛОМ С ООШИМ-2

Исследование выполнено в рамках работ по разработке системы управления принудительным (тренировочным и восста-

новительным) разрядом (ПР) аккумуляторных батарей (АКБ) в однофазную сеть (рис. 1) резервных и бесперебойных систем питания удалённых промышленных объектов, подключённых к электросети с нестабильной подачей энергии.

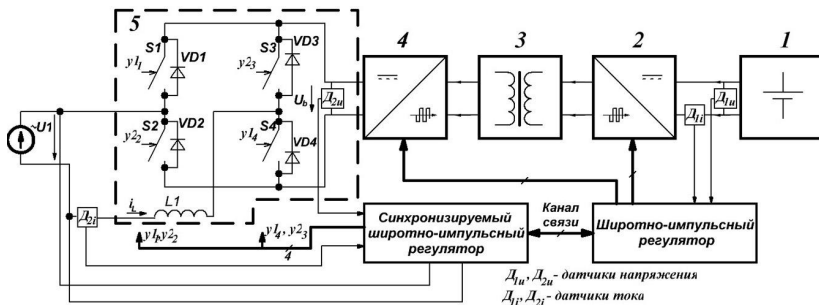


Рис. 1. Многоступенчатая система рекуперации энергии АКБ при принудительном разряде в сеть

Применение в системе ПР активного выпрямителя 5 (АВ) в режиме инвертирования [1] целесообразно для уменьшения массы зарядно-разрядных устройств за счёт удаления мощных резистивных нагрузок для разряда.

Для формирования тока рекуперации i_L применяются сигналы управления с одноканальной двусторонней, либо односторонней ШИМ [2]. В настоящей работе исследована степень искажений формы тока i_L при применении односторонней ШИМ – ООШИМ-2, при которой длительность i -го импульса определяется значением синусоидальной функции в начале i -го периода.

Для исследования выполнены действия, описанные ниже.

1) В программе MathCAD сформирована функция тока i_L суммированием его нарастаний и спадов на каждом i -м периоде ООШИМ-2 при положительной ($i = 0, \dots, N/2 - 1$)

$$D_{L,i}^+ = I_{m,\max} \frac{e^k}{e} - \sin \frac{2p}{N} \frac{\partial}{\partial u} D_i, \quad D_{L,i}^- = -I_{m,\max} \sin \frac{2p}{N} \frac{\partial}{\partial \phi} (1 - D_i)$$

и при отрицательной полуволне в сети ($i = N/2, \dots, N - 1$)

$$D_{L,i}^+ = -D_{L,i-N/2}^-, \quad D_{L,i}^- = -D_{L,i-N/2}^+,$$

где N – число ШИМ-импульсов на период сетевого напряжения, $I_{m,\max}$ – максимальная при индуктивности L амплитуда тока i_L .

2) Получены выражения для коэффициентов заполнения

$$D_i = \frac{1}{k_u} \frac{e^{j k_i}}{e} \frac{2\pi}{N} \cos \frac{\pi 2p}{N} \frac{\omega}{\omega} + \sin \frac{\pi 2p}{N} \frac{\omega}{\omega} \text{ при } i = 0, \dots, N/2 - 1,$$

$$D_i = D_{i-N/2} \text{ при } i = N/2, \dots, N-1,$$

где $k_i = I_m / I_{m,\max}$, I_m – требуемая амплитуда тока, $k_u = U_b / U_m$, U_m – амплитуда сетевого напряжения, U_b – напряжение питания АВ.

3) Получено выражение спектральной плотности положительной полуволны $S^+(w)$ и одно периода тока $S(w)$

$$S^+(w) = \frac{-I_{m,\max}}{\omega^2 T_M} \sum_{i=0}^{N/2-1} \frac{e^{j k_i}}{e} \frac{2\pi}{N} \cos \frac{\pi 2p}{N} \frac{\omega}{\omega} - e^{-j \frac{w D_i}{N f_c}} \sin \frac{\pi 2p}{N} \frac{\omega}{\omega} - e^{-j \frac{w D_i}{N f_c}} \frac{e^{j w}}{e^{j w}},$$

$$S(w) = S^+(w) - S^+(w) e^{-j \frac{w}{2 f_c}},$$

где T_M – период ШИМ-сигнала, f_c – частота в сети.

4) Выведены выражения амплитуд и фаз гармоник тока i_L

$$I_{L,n} = 2 f_c |S(n 2 p f_c)|, \quad y_n = \arg\{S(n 2 p f_c)\}. \quad (1)$$

Корректность спектральных функций проверена сравнением диаграмм сформированного в программе MathCAD сигнала тока i_L и функции суммы ряда Фурье

$$i_{L,\sim}(t) = \sum_{n=1}^{9N/2} I_{L,n} \cos(n 2 p f_c t + y_n).$$

Известно, и исследованиями диаграмм амплитудного спектра (1) в программе MathCAD подтверждено – последний группируется полосами в области низших частот и в окрестностях частот, кратных частоте ШИМ-сигнала $N f_c$. Полосы в окрестностях $k N f_c$ (k – целое число) подавляются сетевыми фильтрами приборов той же сети.

Поэтому в исследовании рассматривались только низшие частоты с $n \ll N$. Анализ амплитуд (1) в указанной области показал – чётные составляющие в спектре отсутствуют, а внимания заслуживают «вредные» составляющие с номерами $n=3$ и $n=5$.

Зависимости 3-й и 5-й гармоник, приведённые к 1-й

$$k_{г,3} = I_{L,3} / I_{L,1}, \quad k_{г,5} = I_{L,5} / I_{L,1}$$

от приведённой амплитуды тока k_i (рис. 2, а, б) показывают – уровень 5-й гармоники на порядок меньше 3-й. Поэтому степень искажения достаточно оценить с помощью отношения $k_{г,3}$.

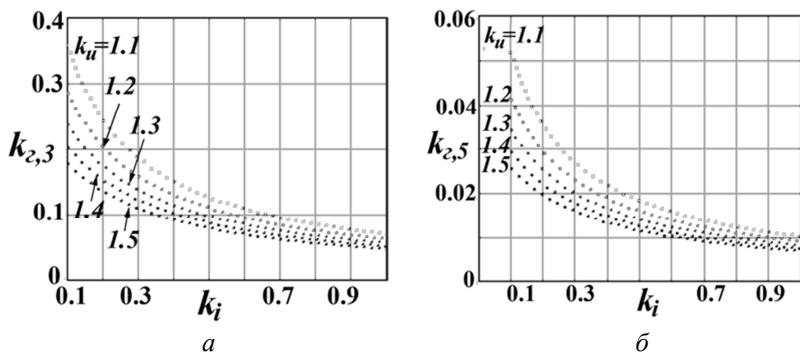


Рис. 2. Зависимости приведённых амплитуд:
3-й (а) и 5-й (б) гармоник от приведённой амплитуды тока k_i

Исследованы зависимости степени искажений $k_{r,3}(k_i)$ при фиксированных значениях k_u (рис. 2, а) и $k_{r,3}(k_u)$ при фиксированных значениях k_i (рис. 3, а), обе при $N = 100$, а также зависимость $k_r(N)$ при $k_u = 1,1$ и $N = 100 \dots 5000$ (рис. 3, б).

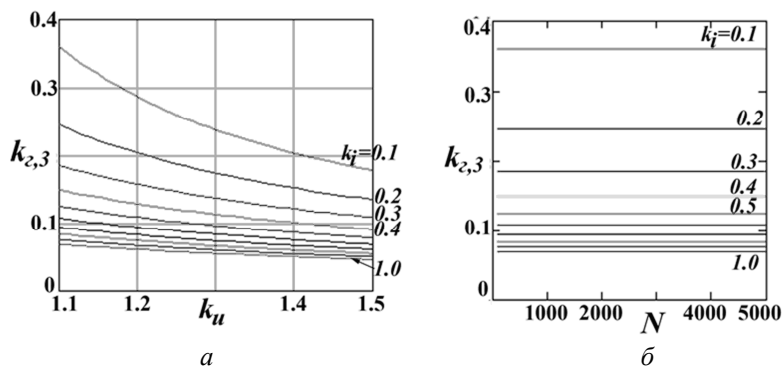


Рис. 3. Зависимости степени искажений: от k_u (а) и от N (б)

Последняя диаграмма (рис. 3, б) показывает практическую независимость степени искажений от отношения N частоты ШИМ-сигнала к частоте сети.

Полученные зависимости $k_{r,3}(k_i)$ и $k_{r,3}(k_u)$ дают полезную информацию для разработчика программного обеспечения микроконтроллеров широтно-импульсных регуляторов рис. 1. В частности, потребуются при разработке подпрограмм подстройки тока разряда АКБ при заданных ограничениях на степень иска-

жения синусоидальности k_r . Ток разряда связан с напряжением питания АВ U_b и амплитудой тока катушки I_m . В свою очередь, соотношения между напряжением питания U_b и амплитудой напряжения сети U_m , а также между амплитудой тока катушки I_m и его максимальной амплитудой $I_{m,\max}$ (определяется индуктивностью L_1), влияют на и степень искажения синусоидальности тока рекуперация k_r .

Литература

1. *Чаплыгин Е.Е.* Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие / Е.Е. Чаплыгин. – М.: МинОбрНауки РФ, НИУ МЭИ, 2012. – 48 с.
2. *Берендс Д.А.* Приборы и системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией / Д.А. Берендс, Р.М. Кукулиев, К.К. Филиппов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 280 с.

Н.Г. Егорова, И.Л. Кузьмин, Р.Г. Хузяшев
(Казань, КГЭУ)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Регистрация сигналов переходного процесса (СПП) с высокой частотой дискретизации до 10МГц поставляет большой объем данных, интеллектуальная обработка которых позволяет определять не только место повреждения, но и причину возникновения СПП, начиная от частичных разрядов и кончая короткими замыканиями и плановыми коммутациями [Лит.]. Разработка интеллектуальных методов обработки данных позволит оперативно доставлять диспетчеру лишь информацию об аварийных событиях, и после обработки отчёты о состоянии изоляции на разных участках сети. Эти работы безусловно актуальны, так как позволяют существенно улучшить качество информации о состоянии важнейшего объекта электроэнергетики – кабельных и воздушных линий.

В апреле 2019 г. на кабельной линии 110кВ «Центральная – Восточная 2 цепь» длиной 11,058 км был установлен программ-

но-аппаратный комплекс (ПАК) волнового определения места повреждения (ВОМП) в составе двухканальных датчиков № 23, установленного на подстанциях (ПС) Восточная, и № 29, установленного на ПС Центральная (рис. 1).

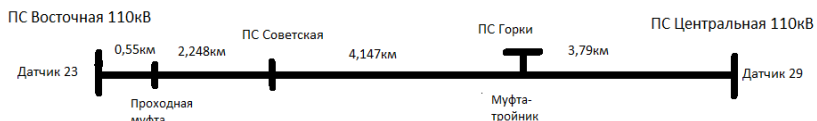


Рис. 1. Схема кабельной линии

За время эксплуатации было зарегистрировано семь синхронных событий. События, сигналы которых зарегистрированы одновременно в глобальной шкале времени двумя датчиками на противоположных сторонах линии, называются синхронными.

Ближайший датчик к месту повреждения должен регистрировать СПП, который имеет большие амплитуду, длительность, энергию и малый период свободных колебаний относительно аналогичных параметров сигнала, зафиксированного на большем удалении от места повреждения. Однако экспериментальные результаты не всегда это подтверждают.

График зависимости (рис. 2) отношения энергий показывает линейное увеличение с увеличением расстояния возникновения СПП. Этот график несимметричен по вертикали относительно единицы, что требует дальнейших исследований. Приведенные результаты анализа осциллограмм и их параметров указывают на перспективность использования разработанного комплекса при поиске места повреждения и места дефектов высоковольтной изоляции, проявляющихся в виде частичных разрядов.



Рис. 2. Отношение энергии в зависимости от места возникновения СПП от ПС Восточная

Литература

Практическая реализация волнового метода определения места повреждения в разветвленных распределительных электрических сетях 6(10) кВ / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин, В.Д. Васильев, С.М. Тукаев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – Т. 2, № 53. – С. 98–107.

Н.Г. Егорова, И.Л. Кузьмин, Р.Г. Хузяшев
(Казань, КГЭУ)

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Важнейшим показателем уровня функционирования энергосистемы является бесперебойность электроснабжения. Скорость определения места повреждения (ОМП) определяет время восстановления электроснабжения. Волновой метод ОМП двусторонних измерений основан на измерении времени между моментами достижения двух концов линии фронтами сигналов переходного процесса (СПП), возникающих в месте повреждения. Для реализации данного метода используется программно-аппаратный комплекс (ПАК) [1].

Для экономия ресурсов контроллера датчика ПАК предлагается проверять наличие СПП по алгоритму [2] не в каждой фазе, а в их сумме. На рис. 1 видно, что эффективность обнаружения СПП при этом не уменьшается.

В данном событии № 16460 для датчика № 31 СПП двух каналов находятся в противофазе. Однако даже для такого случая результирующие значения позволяют обнаружить СПП (рис. 2).

Таким образом, такая обработка СПП не менее эффективно выделяет СПП, поэтому предложенный алгоритм цифрового фильтра датчика предпочтителен, так как занимает меньшие ресурсы памяти и требует меньших вычислительных мощностей микроконтроллера.

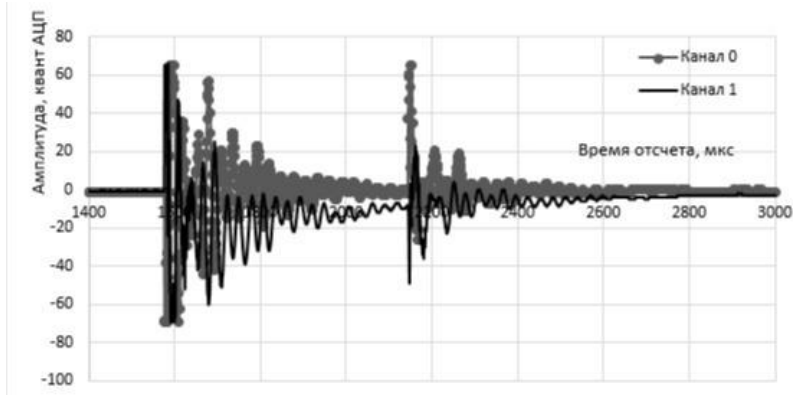


Рис. 1. Осциллограмма исходных СПП для двух каналов для д.31 от 16.04.2019 19:45:25

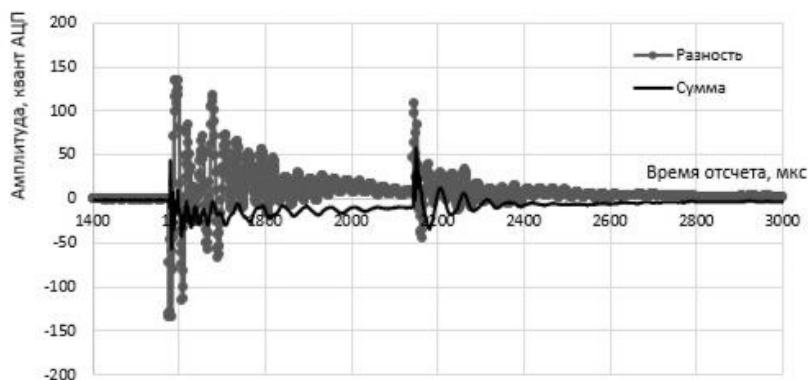


Рис. 2. Результирующий график СПП для д.31 от 16.04.2019 19:45:25

Литература

1. Хузяшев Р.Г. Практическая реализация волнового метода определения места повреждения в разветвленных распределительных электрических сетях 6(10) кВ / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин, В.Д. Васильев, С.М. Тукаев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – Т. 2, № 53. – С. 98–107.
2. Новиков С.И. Простейшие алгоритмы обнаружения сигналов переходного процесса напряжения в линиях электропередач / С.И. Новиков, И.Л. Кузьмин, Р.Г. Хузяшев // Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 7-8. – С. 114–125.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

Моделирование электроэнергетических сетей (ЭЭС) подразумевает расчёт переходных процессов и установившегося режима.

Автоматический выключатель (АВ) представляет собой совокупность механического выключателя с дискретными состояниями и цифрового устройства, управляющего положением выключателя.

Моделирование установившегося режима сводится к решению системы алгебраических уравнений, составленной на основе схемы замещения ЭЭС в соответствии с законами Кирхгофа. Для АВ в системе в данном случае имеет значение только заданное состояние, а логика управления не учитывается.

При моделировании переходных процессов в ЭЭС для схемы замещения формируется система дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) [1]. Для описания поведения выключателей и расчёта коротких замыканий можно перейти к классу гибридных систем (ГС), представляющих системы с непрерывным и дискретным поведением [2]. Использование подкласса гибридных систем с изменяющимися параметрами позволяет осуществлять моделирование без изменения системы уравнений при изменении состояния ГС. АВ моделируется с помощью дискретного переключателя и алгоритма управления, регулярно срабатывающего с тактовой частотой, на основе текущих значений токов и напряжений, а также значений, сохранённых в памяти устройства.

На основе описанного подхода разработана программа для моделирования ЭЭС. Модель системы задаётся на специально разработанном языке. В описании системы задаются элементы системы, их параметры, соединения между узлами элементов, тип и параметры расчёта, такие как количество итераций численного метода решения, интервал времени и т.д. Поддерживаются два типа расчёта: «переходные процессы» и «устойчивый режим». Язык поддерживает базовые типы – логический, цело-

численный, числа с плавающей запятой, строки, а также много-элементные типы – массивы и объекты, представляющие собой последовательность «ключ – значение».

Модель сети преобразуется во внутреннее представление, основанное на гиперграфе, рёбрами которого являются элементы, а вершинами – узлы элементов. На основе гиперграфа происходит формирование системы уравнений, в соответствии с имеющимися математическими моделями элементов и структурными связями [3]. Результатом процесса является система уравнений в текстовом виде.

Отдельный модуль производит разбор системы уравнений и создаёт внутреннее представление. Модуль разбора также производит символьное дифференцирование по дереву выражения. Далее все полученные выражения упрощаются с помощью свёртки констант и преобразуются в выражение в формате обратной польской нотации. Эти выражения формируют задачу, которая решается выбранным численным методом. Для решения уравнений реализованы неявные методы BDF1, RADAU3, RADAU5 и метод Ньютона.

Для моделирования логики АВ разработан компактный язык программирования АВ, интерпретирующийся в процессе расчёта дискретно-непрерывного поведения системы.

В дальнейшем планируется расширение языка моделирования для добавления новых элементов и макросов, а также переход к классу гибридных систем с изменением системы уравнений.

Литература

1. *Лыкин А.В.* Математическое моделирование электрических систем и их элементов: учеб. пособие / А.В. Лыкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 228 с.
2. *Новиков Е.А.* Моделирование жестких систем: учеб. пособие / Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников. – СПб.: Лань, 2019. – 420 с.
3. *Колесов Ю.Б.* Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю.Б. Колесов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.

М.Н. Атаманов¹, А.Г. Зиганшин¹, Г.М. Михеев²

(Чебоксары, ¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ²Чебоксарский институт
(филиал) Московского политехнического университета)

РАЗВИТИЕ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 0,38–10 кВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ САМОНЕСУЩИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ СО ВСТРОЕННЫМ ОПТОВОЛОКНОМ

В настоящее время работа многих областей производства, а также жизнедеятельность человека, определяются уровнем развития связи. Очевидно, что осуществлять все виды связи в черте города намного проще и дешевле, чем в отдалённых районах. По этой причине качество услуг связи в сельской местности заметно уступает соответствующим показателям для городских условий. В связи с этим перед операторами связи остро стоит задача ликвидации цифрового неравенства городов и сельской местности.

Одним из способов решения этой задачи является применение каналов связи на основе оптоволокну для передачи телекоммуникационных данных. С этой целью операторы планируют задействовать существующие воздушные линии (ВЛ), которые принадлежат Сетевым Компаниям. В связи с этим с каждым годом растёт количество обращений с их стороны в адрес электросетевых предприятий Республики Татарстан о предоставлении опор ВЛ распределительной сети для подвеса оптоволоконных кабелей и организации каналов связи непосредственно до каждого абонента.

В настоящее время ОАО «Сетевая компания» Республики Татарстан располагает обширной разветвленной сетью передачи данных на основе воздушных оптоволоконных линий связи (ВОЛС), построенных на базе ВЛ 6–500 кВ. Строительство ВОЛС ведётся как собственными силами, так и с привлечением операторов связи, которые выступают в качестве инвесторов.

Данная сеть служит для организации каналов связи не только для нужд операторов связи, но и для собственных объектов Компании. Однако такой подход негативно отражается на эксплуатации и техническом обслуживании объектов электросетевого хозяйства: увеличивается нагрузка на опоры, что в некоторых случаях требует их усиления; ВЛ загромождается оборудованием сторонних орга-

низаций; возникает сложность в процессе контроля работ сторонних организаций на объектах Сетевой Компании.

Как известно, трансформаторные подстанции населённых пунктов в России питаются по ВЛ 6(10) кВ. На этих линиях в настоящее время, кроме токопроводящих элементов и арматуры, во многих случаях устанавливаются выключатели нагрузки, реклоузеры. Так, например, на ВЛ 10 кВ в сетевой компании Республики Татарстан установлены выключатели нагрузки финской компании «Ensto», реклоузеры компании «Таврида», которые нуждаются в устойчивой связи для оперативного управления.

Организация телекоммуникационных систем путем строительства новых линий связи обходится весьма дорого. Более того, в районах с разветвленной сетью ВЛ 0,38 кВ, по которым осуществляется непосредственное потребление электрической энергии сельскими жителями, такое решение является крайне не эффективным. Монтаж оптоволоконных линий связи по существующим опорам и арматурам ВЛ существенно упрощает и удешевляет проектно-сметную стоимость строительства этих систем. К тому же, согласно принятому недавно закону РФ [1] с 1 июля 2020 года при установке умных приборов учета электрической энергии они будут включены в баланс сетевых организаций. Значит, требуется устойчивая связь между Сетевой Компанией и абонентами для съёма показаний приборов и проведения аналитических работ.

Одним из этапов создания ВОЛС, совмещенной с силовой частью распределительной сети, является разработка технических решений строительства мультисервисной электрической сети на основе применения самонесущих изолированных проводов (СИП) со встроенным оптоволоконном. Это позволит поставлять электроэнергию с параллельным оказанием услуг связи. На рис. 1 показаны основные элементы СИП со встроенным оптоволоконном.

Расчёты показывают, что экономически выгодным является организация связи по ВЛ 10 кВ с заменой одного фазного провода на СИП-3-А/О [2], что имеет ряд следующих преимуществ: возможность организации собственного канала связи по ВЛ 10 кВ для организации передачи информации телеметрии, диспетчерской связи, автоматической системы коммерческого учёта электроэнергии (АИСКУЭ) и видеонаблюдения с ПС 110 кВ; возможность организации связи с выключателей нагрузок и реклоузеров, установлен-

ных на ВЛ 10 кВ; возможность развития собственной сети или сдачи в аренду свободных оптических волокон.

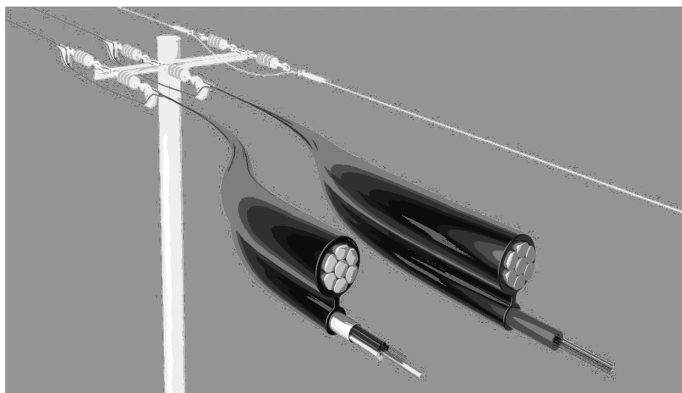


Рис. 1. Поперечный разрез СИП -3/ВОК 24-П 1х70-20 со встроенным оптоволоконном

Как показал опыт эксплуатации, у ранее существующей системы связи по технологии «*GSM*», основной проблемой в работе коммутационных аппаратов была нестабильная связь, которая зависела от уровня сигнала и работы базовой станции оператора сети.

Теперь же с заменой фазного провода на СИПЗ-А/О и выполнением спуска до шкафа управления выключателем нагрузки волоконно-оптическим кабелем взамен одного оптического волокна все эти проблемы решаются. В шкафу управления устанавливается оптический кросс, а вместо *GSM* модема, который для питания потребляет около 200 мА, монтируется медиаконвертер с током потребления до 300 мА. Однако увеличение этой нагрузки никак не влияет на работу шкафа управления, т.к. его максимальный ток потребления для приборов связи составляет 3 А. Одновременно производится настройка блока управления выключателем нагрузки (рис. 2). В итоге удаётся получить автономный канал связи телемеханики, в котором не задействованы сторонние организации (операторы связи).

Также на сегодняшний день не менее успешно развивается информационная инфраструктура энергетики по линиям 0,4 кВ. Примером тому является ВОЛС на СИП-1, выполненная методом навивки, что также эффективно на СИП-2. Как известно,

СИП-1 представляет собой самонесущий провод с жилой из сплава алюминия, изолированный светостабилизированным сшитым полиэтиленом. Поверх изолированной токопроводящей жилы навит оптический кабель марки ДПО-П_У [3] ёмкостью от 2-х до 128 волокон.



Рис. 2. Элегазовый выключатель нагрузки 10 кВ «Auguste» компании Ensto из Финляндии со шкафом управления на опоре ВЛ

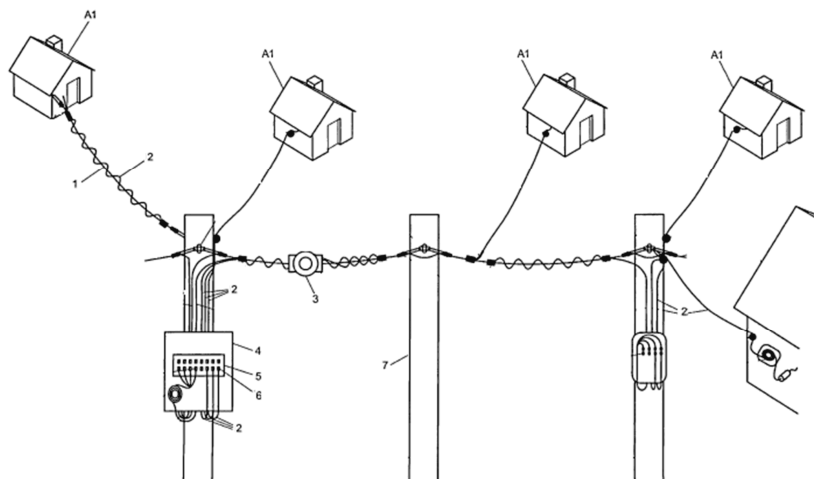


Рис. 3. Схема подключения ВОЛС, выполненной методом навивки:
 1 – СИП; 2 – навивной ВОЛС; 3 – навивная машинка;
 4 – шкаф навесной; 5 – кросс оптический; 6 – порт оптический;
 7 – опора; А1 – жилой дом

На рис. 3 изображена схема подключения ВОЛС, выполненная методом навивки на ВЛ 0,38 кВ. Такая схема может применяться для получения данных по учету электроэнергии, а также предоставления цифровых услуг связи сельскому населению.

Внедрение провода СИП-3, совмещенного с ВОЛС, при реконструкции или строительстве ВЛ 6(10) кВ и применение ВОЛС на СИП-1, выполненным методом навивки на существующих линиях электропередач, несомненно является эффективным шагом в развитии мультисервисной сети 0,38/10 кВ и открывает новые возможности в решении задачи «цифрового неравенства города и сельской местности».

Достоинствами создания телекоммуникационных систем, совмещенных с силовой частью распределительной сети, являются:

- организация управления сетями «*Smart Grid*»;
- получение дополнительной прибыли за счёт сдачи в аренду провайдерам;
- техническая эстетика сетей;
- удешевление стоимости строительства до 15 % и снижение сроков реализации проектов до 20 % на уровне отдельных поселков;
- повышение качества жизни населения за счёт предоставления широкого спектра цифровых услуг и услуг и связи;
- возможность организации автоматической системы коммерческого учёта электроэнергии по оптическому каналу и повышение собираемости тарифов.

Литература

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: Федер. закон от 27 декабря 2018 г. № 522-ФЗ.

2. Провод самонесущий изолированный со встроенным волокном марки СИП-3 А/О [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://n-er.ru/provod-sip/> (дата обращения: 02.05.2020).

3. Быстрокабель – система поиска кабельно-проводниковой продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bystrokabel.ru/factory/> (дата обращения: 02.05.2020).

О.С. Рахимов, М.И. Тошходжаева
(Худжанд, Политехнический институт Таджикского технического
университета имени академика М.С. Осими)

РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Распределённая генерация (РГ) представляет всё больший интерес для энергетики. Новый уровень развития технологий позволяет рассматривать РГ как альтернативный путь обеспечения потребителей электрической энергией [1, 2].

В России сейчас на долю распределённых источников приходится 17 ГВт установленной мощности электростанций. В Республике Таджикистан по инициативе правительства было предложено развивать сельскую электрификацию на основе альтернативных источников энергии.

Существуют два основных типа классификации устройств РГ [3]. Первая классификация рассматривает установленную мощность генераторных установок: микро ($1 \text{ Вт} \div 5 \text{ кВт}$); малые ($5 \text{ кВт} \div 5 \text{ МВт}$); средние ($5 \text{ МВт} \div 50 \text{ МВт}$); крупные ($50 \text{ МВт} \div 300 \text{ МВт}$) (редко используются). Вторая классификация основана на технологии производства электроэнергии: возобновляемые; блочные; когенерационные.

РГ, основанная на возобновляемых источниках энергии, рассматривается как наиболее благоприятная для окружающей среды. Для систем РГ используются следующие технологии [4]: малые газотурбинные установки и микротурбины, поршневые двигатели, солнечные батареи, ветровые генераторы, топливные элементы и мини-ГЭС.

Технология использования солнечных батарей (СБ) с точки зрения экологии является одной из самых чистых, но будут проблемы с утилизацией неисправных и использованных СБ. Кроме этого, данные технологии менее затратные. Тем не менее, существуют ограничения по расположению устройств данного типа, кроме того они требуют значительных капитальных вложений. Более того, без дополнительного ввода устройств аккумуляирования электроэнергии выходная мощность солнечных батарей неравномерна.

Использование ветровых генераторов, также как и СБ, является очень чистой технологией производства электроэнергии. Кроме этого, ветровой генератор может использоваться в одиночном режиме. У этой технологии имеются те же самые минусы, что и у солнечных батарей: высокая стоимость, ограниченные возможности по размещению, неравномерная выходная мощность.

Область применения устройств РГ может быть весьма обширной. В первую очередь, это резервное (аварийное) электроснабжение, покрытие пиковой нагрузки, экспорт энергии в распределительную сеть.

Промышленное использование потенциала ВИЭ на основе солнечной энергии в нашей Республики отсутствует, хотя климатические условия способствуют широкому использованию солнечной энергии. Использование доступной солнечной энергии в Согдийской области могло бы удовлетворить до 10–20 % спроса на энергию в данном регионе. По оценкам экспертов солнечный потенциал Таджикистана составляет около 25 млрд. кВт·ч/год. Большая часть потенциала не используется, тем не менее, освоение этого потенциала является доступным [5]. Суммарная солнечная радиация при ясном небе достигает $700\text{--}800\text{ Вт/м}^2$ или $7,5\text{--}8,0\text{ МДж/м}^2$, интенсивность прямой солнечной радиации меняется в пределах от 1,0 до $1,3\text{ кВт/м}^2$ (рис. 1).



Рис. 1. Солнечная прямая нормальная инсоляция

По данным некоторых метеостанций число солнечных дней в Таджикистане достигает 280 дней. По мнению специалистов, в течение 10 месяцев в году 60–80 % потребности данного региона в электроэнергии могут быть обеспечены солнечной энергией. В пересчёте на условное топливо это составляет около 400 тысяч тонн условного топлива, что эквивалентно 460 млн. м³ газа или 528 тыс. тонн мазута. В таблице приведена суммарная месячная солнечная радиация по Согдийской области, Вт/м².

Солнечная месячная суммарная радиация по Согдийской области, Вт/м²

Пункт	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Согдийская область	87	114	164	229	290	330	322	290	243	164	100	65

Сеть метеорологических наблюдений в Таджикистане считается не очень развитой и недостаточно плотной. Из-за этого в республике до настоящего времени реальный потенциал энергии ветра остается практически не изученным. Например, не проводились измерения скорости ветра на уровне 30 метров от земной поверхности, так как возможно, что на такой высоте потенциал энергии ветра может быть на 10–20 % выше, чем на уровне 10 метров [5]. Но, несмотря на это, ветроэнергетический потенциал по оценкам экспертов, достигает от 25 до 150 млрд. кВт·ч/год (рис. 2).

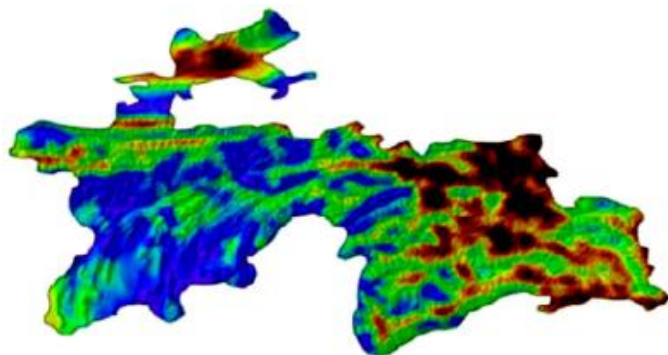


Рис. 2. Карта ветроресурсов Республики Таджикистан

Известно, что годовая атмосферная циркуляция может оказывать влияние на скорость ветра и его направление. Например, в

Согдийской области повторяемость штилей снижается до 20–30 %, а в замкнутых котловинах и под склонами гор наблюдается максимальная повторяемость штилей (45–55 %). Предварительные ресурсы ветровой энергетики в Согдийской области могут быть оценены следующими величинами: валовый потенциал – 62257,3 МВт = 163 млн. т.у.т/год; технический потенциал – 3852,6 МВт = 10,13 млн. т.у.т/год; экономически целесообразный потенциал – 1926,4 МВт = 5,07 млн. т.у.т/год.

Таким образом, можно утверждать, что потенциал ВИЭ в Согдийской области можно использовать в интересах промышленных предприятий. Для осуществления внедрения систем распределённой генерации в республике необходимо: совершенствование материально-технической и нормативно-правовой базы электроэнергетического сектора; привлечение частных инвесторов для строительства малых источников на базе возобновляемых источников энергии; создание национального фонда поддержки ВИЭ и т.д.

Литература

1. Промежуточная стратегия по возобновляемым источникам энергии для интегрированного сельского развития / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.undp.org/content/dam/tajikistan/docs/library/UNDP_TJK_Intermediate_Strategy_for_RES_BI_Rural_Development_Rus.pdf (дата обращения: 25.04.2020).

2. Куликов А.Л. Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики / А.Л. Куликов, В.Л.Осокин, Б.В. Папков // ВЕСТНИК НГИЭИ. – 2018. – № 11 (90). – С. 123–136.

3. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (дата обращения: 25.04.2020).

4. Киргизов А.К. Потенциал нетрадиционных источников энергии в Таджикистане / А.К. Киргизов, С. Р. Расулов, У.У. Косимов // Энергетика: Экология, Надёжность, Безопасность: материалы 18-й Всерос. науч.-техн. конф. – Томск: СПБ Графикс, 2012. – С. 99–101.

5. Щелкунов Г.В. Солнечная энергетика. Глобальные проекты / Г.В. Щелкунов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2002. – № 6. – С. 36–39.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И МЕТОДОВ ИХ РАСЧЁТА

Целью расчёта электроэнергетических систем (ЭЭС) переменного тока является определение некоторых параметров на основе исходных данных и условия задачи.

Режим работы ЭЭС постоянно меняется вследствие изменения потребления энергии, её структуры, воздействия внешних факторов. Различают установившиеся и переходные режимы. Режим работы системы может рассматриваться как установившийся лишь на небольших промежутках времени и при незначительных изменениях режимных параметров [Лит.].

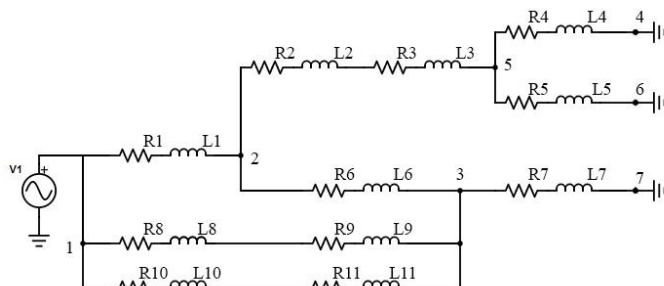
Метод, с помощью которого формулируются уравнения цепей, имеет ключевое значение для компьютерной программы анализа цепей. Он существенно влияет на время установки, программирование, требования к хранилищу и скорость выполнения. Выбранный метод должен быть гибким, вычислительно эффективным и экономичным.

На основе законов Кирхгофа разработан ряд практических методов расчёта, позволяющих сократить вычисления при расчёте сложных схем, например, методы узловых потенциалов (МУП) и контурных токов.

Для проверки работы алгоритмов был выбран ряд типовых задач для расчёта устоявшегося режима и переходных процессов. Принимая во внимание удобство реализации алгоритмов в компьютерных программах были также рассмотрены различные вариации методов, например, модифицированный метод узловых потенциалов.

Для расчёта устоявшегося режима, определения токов и напряжений на узлах, была взята обобщенная модель внутренней сети, содержащая последовательные RL нагрузки и источник постоянного напряжения. Для проверки результатов схема также была построена в среде Simulink Matlab.

На рисунке представлена схема в графическом виде и в виде системы уравнений, полученных с помощью МУП.



Пример принципиальной схемы с нагрузками RL

Математическое представление схемы имеет вид

$$j_1(G_1 + G_8 - 11) - j_2G_1 - j_3G_8 - 11 = I_0 - I_{12} - I_{13};$$

$$j_2(G_1 + G_2 - 3) - j_5G_2 - 3 - j_3G_6 = I_{12} - I_{25} - I_{23};$$

$$j_3(G_7 + G_8 - 11 + G_6) - j_2G_6 - j_1G_8 - 11 = I_{13} + I_{23} - I_{34};$$

$$j_5(G_2 - 3 + G_4 + G_5) - j_2G_2 - 3 - j_6G_4 - j_7G_5 = I_{25} - I_{56} - I_{57},$$

где j_n – потенциал узла n , G_l – общая проводимость участка цепи l , I_{km} – ток в ветки $k-m$.

В среде Simulink выведем результаты с помощью утилиты Steady-State, которая отображает установившиеся напряжения и токи модели. Результат получается практически одинаковым при решении системы уравнений и расчёте схемы в Matlab (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Значения потенциалов

	j_1	j_2	j_3	j_5
Расчёт системы	6000	3912,94	4263,15	569,8456
Расчёт Matlab	6000,00	3912,94	4263,15	569,85

Таблица 2

Значения токов

	I_{12}	I_{13}	I_{25}	I_{23}	I_{34}	I_{56}	I_{57}
Расчёт системы	10,269	6,792	4,1788	0,7	2,279	1,899	6,0902
Расчёт Matlab	10,27	6,79	4,18	0,7	2,28	1,90	6,09

Литература

Лыкин А.В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов: учеб. пособие / А.В. Лыкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 228 с.

ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Одним из самых уязвимых элементов воздушных линий электропередач (ВЛЭП) и других энергетических объектов являются изоляционные конструкции, которые относятся к внешней изоляции. На ВЛЭП класса напряжения более 35 кВ используются подвесные линейные изоляторы. Такого рода изоляторы испытывают одновременно несколько видов воздействий: электромагнитные, механические (вибрационные), атмосферные. С течением времени каждое из воздействий приводит к уменьшению электрической прочности изолятора или их группы (гирлянды), что в свою очередь приводит к потерям электроэнергии и аварийным режимам работы. Таким образом, контроль дефектов изоляторов и, что самое важное, степени их дефектности является важной задачей, для надёжной работы энергосистемы.

Один из наиболее перспективных методов дистанционного контроля технического состояния изоляторов в настоящее время – контроль по характеристикам излучения частичных разрядов [1].

Частичные разряды можно разделить на два типа: 1) внутренние микроразряды, происходящие внутри дефектов, находящихся в объёме диэлектрика; 2) пробой вдоль границ раздела двух разных диэлектриков (обычно твёрдого диэлектрика и газа).

Первый тип разрядов обычно связан с электрохимическим старением диэлектрика [2].

Для проведения эффективного дистанционного контроля и оценки его результатов необходимо знать, какие дефекты наиболее часто реализуются в том или ином диэлектрическом материале. Высоковольтные линейные изоляторы ВЛЭП изготавливаются из керамических диэлектрических материалов или из полимерных материалов.

Керамические материалы представляют собой неорганические материалы, получаемые из минералов и оксидов металлов путем высокотемпературного спекания [3]. Электротехнический фарфор получают путем спекания смеси из глины-каолина

(Al_2O_3 2SiO_2 $2\text{H}_2\text{O} \sim 50\%$), кварцевого песка ($\text{SiO}_2 \sim 25\%$) и полевого шпата (K_2O (H_2O)). Спекание конечной композиции проводится в течение 20–70 часов при температуре 1300–1500 °С. После спекания для устранения поверхностной пористости электротехнический фарфор покрывается глазурью. Глазурирование проводят стеклосмалями, температура плавления которых ниже температуры обжига фарфора. Согласно разным источникам толщина глазури варьируется от 0,1 до 0,3 мм.

Любые керамические материалы обладают пористостью, в той или иной степени. Объём закрытых пор может варьироваться в пределах от 2 до 25 % в зависимости от длительности спекания материала [3]. В ряде работ указывается, что поры внутри керамики сферические. Характерные размеры «маленьких» пор варьируются в пределах $0,4 \div 0,8$ мкм. Концентрация таких пор лежит в диапазоне $(3 \div 9) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Отдельные единичные поры могут иметь размер от 50 до 100 мкм [4]. К основным дефектам изоляционных керамических материалов относят не только отдельные «крупные поры», но и поверхностные радиальные трещины шириной от 0,01 до 0,5 мм [5].

К керамическим материалам также относятся и стекла. Основным материалом для производства высоковольтных стеклянных изоляторов является закалённое стекло, содержащее SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO [3].

Закалённое стекло лишено дефектов, характерных для фарфора. Во многих работах утверждается, что в случае появления дефекта снижается прозрачность закалённого стекла. Кроме того, на этапе производства изолятор подвергается испытанию на тепловой удар (определяется его термостойкость). В случае недоброкачественной закалки или каких-либо других дефектов в изоляторе он разрушается в процессе этого испытания [3].

Однако в некоторых работах рассматриваются дефекты стекла в виде инородных твёрдых включений, который не отсеивается испытаниями на термостойкость. Установлено, что в случае дислокации этих дефектов в головной части стеклодетали достаточно вероятны повреждения изоляторов при напряжениях, ниже нормированных [6].

Полимерные материалы, используемые для изолирующих конструкций, представлены в основном синтетическими смола-

ми и кремнийорганическими резинами. Характерными дефектами для данных материалов являются дендритные структуры. Так, в работе [7] приводятся значения толщины канала дендрита 1–20 мкм. В работе по исследованию роста дендритов в эпоксидной смоле [8] видимые размеры каналов полученных дендритов составляли 10–90 мкм.

Кроме того, в полимерных материалах присутствуют дефекты в виде газовых включений, однако в ходе анализа источников не было найдено достаточной информации о характерных размерах дефекта данного типа. Только в работе [9] приводится информация, основанная на данных рентгеноструктурного анализа, согласно которым газовые включения в полианилине высокой плотности обладали эллипсоидальной формой со средним размером полуоси эллипсоида 1,46 мм.

Таким образом, в работе приведены результаты обзора характерных дефектов в основных твёрдых диэлектрических материалах, используемых при изготовлении изоляторов ВЛЭП. Накопление и систематизация знаний о дефектах необходима для проведения эффективного контроля технического состояния изоляторов по характеристикам частичных разрядов.

Литература

1. *Куффель Е.* Техника и электрофизика высоких напряжений / Е. Куффель, В. Цаенгль, Д. Куффель. – Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2011. – 520 с.
2. *Бортник И.М.* Электрофизические основы техники высоких напряжений / И.М. Бортник и др. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
3. *Ржевская С.П.* Электротехнические материалы. Диэлектрики: курс лекций / С.П. Ржевская. – Мн.: Изд-во БНТУ, 2009. – 141 с.
4. *Слуцкер А.И.* Влияние микропористости на прочностные свойства SiC-керамики / А.И. Слуцкер и др. // Физика твёрдого тела. – 2008. – Т. 50, № 8. – С. 1395.
5. *Хуснутдинов Р.А.* Аппаратно-программный комплекс и методика дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2017. – 123 с.

6. Дар К. Влияние технологических факторов на электрическую прочность высоковольтных стеклянных изоляторов / К. Дар и др. – 2014.

7. Аввакумов М.В. Компьютерная информационно-измерительная система контроля дефектов диэлектрических элементов высоковольтного оборудования методом частичных разрядов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2003. – 138 с.

8. Носков М.Д. Моделирование роста дендритов и частичных разрядов в эпоксидной смоле / М.Д. Носков и др. // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 2. – С. 121–128.

9. Bezerra J.M.B. Evaluating failures of polymer insulators in Brazilian distribution networks / J.M.B. Bezerra, et al. // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2018. – Vol. 35, No. 1. – PP. 38–44.

А.В. Варганова, Н.А. Анисимова
(Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова)

ПОСТРОЕНИЕ УТОЧНЕННЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОТЛОАГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Промышленные предприятия больших мощностей, как правило, обладают собственной генерирующей базой и, в связи с этим, требуется разработка методов управления и контроля сложными системами электроснабжения с электростанциями [1]. В таких энергоузлах устанавливаются электростанции мощностью от единиц до сотен мегаватт и возникает задача оптимального распределения активной и тепловой нагрузки между ними [2]. В работе [3] предлагается определять оптимальные режимы основного оборудования электростанций по критерию минимума приведенных затрат на пар. Приведено построение моделей котлов, которые учитывают зависимость себестоимости свежего пара от их паропроизводительности.

Для котлоагрегатов при построении моделей важно определение возможных составов топливной смеси. Это объясняется тем, что на промышленных предприятий чёрной и цветной металлургии имеются вторичные энергоносители, которые выгодно использовать в качестве топлива.

При разработке моделей авторы столкнулись с необходимостью их уточнения с целью определения оптимального состава смеси. Для этого использован один из самых простых методов оптимизации – метод линейного программирования. В качестве целевой функции используются суммарные затраты на энергоноситель

$$Z_n = \sum_{i=1}^n (B_i \times \Pi_i) \rightarrow \min.$$

Учтены также ограничения, связанные с технической составляющей:

$$\begin{aligned} B_{i \min} &\leq B_i \leq B_{i \max}, \\ Q_j &= \text{const.} \end{aligned}$$

где Z_n – суммарные затраты на используемые энергоресурсы, тыс. руб.; B_i , Π_i – расход, стоимость i энергоресурса, используемого в топливной смеси соответственно тыс. м³ и руб./(тыс. м³); $B_{i \min}$, $B_{i \max}$ – минимально и максимально возможный расход i -го ресурса, используемого в топливной смеси; Q_j – теплота сгорания топлива для заданной j -й производительности котла, кДж/кг.

Использование разработанных моделей позволит определять оптимальные загрузки котлоагрегатов промышленных электростанций методом динамического программирования

Литература

1. Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей / А.В. Варганова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 76–85.

2. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций / А.В. Варганова // Промышленная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 17–22.

3. Малафеев А.В. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игуменцев и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 112 с.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОМПЛЕКСА УСТРОЙСТВ САУ ГА

Комплекс устройств САУ ГА – совокупность аппаратно-программных средств, осуществляющих контроль и управление производственными и технологическими процессами, поддерживающих обратную связь и активно воздействующих на ход процесса при отклонении его от заданных параметров, обеспечивающих регулирование и оптимизацию управляемого процесса. Для проверки алгоритмов работы устройств САУ ГА в условиях, приближенных к реальным, разработана цифровая модель Чебоксарской ГЭС на базе комплекса RTDS [Лит.].

На Чебоксарской ГЭС установлено 18 вертикальных гидроагрегатов, которые объединены в блоки по 4 генератора на один трансформатор. В модели Чебоксарской ГЭС генераторы, включенные в каждом из блоков, объединены в один эквивалентный для снижения вычислительной нагрузки на RTDS. Мощность каждого эквивалентного генератора принята равной сумме мощностей генераторов блока. Таким образом, модель Чебоксарской ГЭС представлена пятью эквивалентными генераторами.

Схема энергорайона Чебоксарской ГЭС представлена шинами 220 кВ и 500 кВ эквивалентных подстанций ПС 220 кВ и ПС 500 кВ. Связь Чебоксарской ГЭС с указанными подстанциями осуществлена по линиям электропередачи.

К шинам ПС 500 кВ подключены эквивалентный генератор мощностью 5000 МВт и источник ЭДС, имитирующий энергосистему бесконечной мощности. В случае, если необходимо имитировать работу станции в изолированном энергорайоне (для моделирования режимов с изменением частоты), от шин ПС 500 кВ может быть отключена энергосистема бесконечной мощности.

Схема разработанной модели Чебоксарской ГЭС и внешней энергосистемы представлена на рис. 1.

Управление моделью генератора Г1 осуществляется комплексом устройств САУ ГА, который включает в себя следующие устройства.

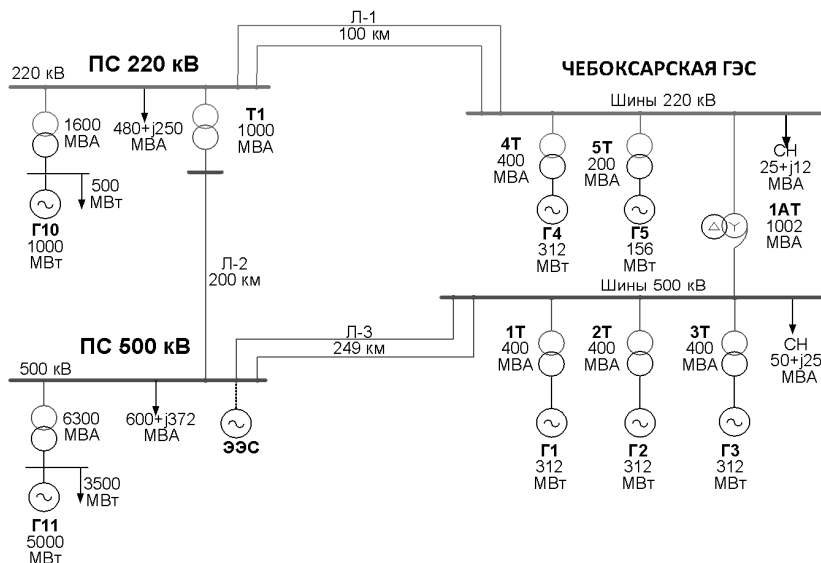


Рис. 1. Схема модели Чебоксарской ГЭС и внешней энергосистемы

1. Устройство технологической автоматики (ТА) на базе микропроцессорного терминала серии ЭКРА 200. Устройство ТА выдает команды пуска при соблюдении условий для пуска и останова гидроагрегата при получении команды от оператора, включает и отключает возбуждение генератора.

2. Устройство точной синхронизации генераторов (ТСГ) на базе микропроцессорного терминала серии ЭКРА 200. Устройство ТСГ производит синхронизацию генератора с сетью и выдает корректирующие воздействия в регулятор возбуждения и контроллер АРЧ.

3. Устройство автоматики регулирования частоты (АРЧ), реализованное на программируемом логическом контроллере SIEMENS, выполняющем информационные и управляющие функции. Подсистема АРЧ формирует регулирующие воздействия на электрогидравлический преобразователь гидромеханической части электрогидравлического регулятора гидротурбины на основе информации, поступающей от первичных датчиков и

органов управления, в соответствии с программой, введенной в микропроцессорную часть АРЧ.

Перечисленные выше устройства (АРЧ, ТА и ТСГ) являются внешними по отношению к модели. Связь между моделью RTDS, устройствами ТА и ТСГ осуществляется по протоколу GOOSE стандарта МЭК 61850-8-1. Передача напряжений с выводов генератора и обмотки НН трансформатора в устройство ТСГ осуществляется по протоколу SV стандарта МЭК 61850-9-2. Связь между моделью RTDS и устройством АРЧ осуществляется по протоколу МЭК 60870-5-104. Схема обмена данными между устройствами представлена на рис. 2.

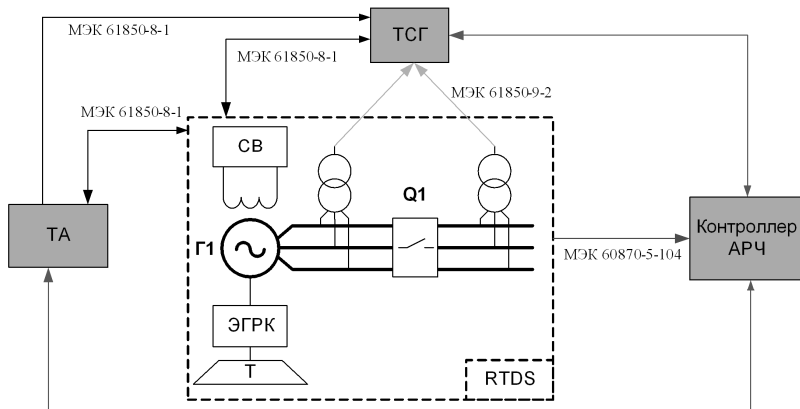


Рис. 2. Схема обмена данными между устройствами

Разработанная модель позволяет проводить испытания алгоритмов работы систем управления гидроагрегатами как в условиях работы станции на энергосистему, так и в условиях работы в изолированном энергорайоне.

Литература

Законьшек Я. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени / Я. Законьшек, А.Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1 (06). – С. 66–72.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВКЛЮЧЕНИЯ БСК ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЗАЩИТ БСК-110 кВ НА ЦИФРОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ RTDS

Согласно [1] для конденсаторных батарей напряжением 110-220 кВ для защиты от коротких замыканий применяют следующие виды защит: дифференциальная защита (ДЗ), предназначенная для защиты БСК от многофазных замыканий и замыканий на землю; небалансная защита, предназначенная для защиты от внутренних повреждений БСК (повреждение одного или нескольких конденсаторов силовой ветви).

Указанные защиты, несмотря на относительную простоту и надёжность функционирования по принципу действия, требуют более тщательного подхода к выбору и проверке их параметров срабатывания [2]. В связи с этим был выполнен расчёт переходных процессов при включении БСК для проверки параметров срабатывания защит на цифровой динамической модели энергосистемы RTDS.

Расчёт переходных процессов при включении БСК на сборные шины выполнен на примере ПС «Ново-Лабинская». Номинальная мощность БСК составляет 25 МВАр, номинальное напряжение 110 кВ. Каждая фаза БСК содержит 6 последовательно соединённых групп конденсаторов. В каждой группе содержится 4 параллельно соединённых конденсатора. Также в каждой фазе БСК включён реактор, предназначенный для уменьшения тока включения БСК.

Прежде чем приступить к разработке цифровой динамической модели энергосистемы на RTDS, предварительно был проанализирован характер переходных процессов на предмет возможности их воспроизведения в аналоговом виде имеющейся аппаратурой. Для этих целей была использована среда визуального моделирования Simulink, входящая в состав ПК Matlab. В Simulink была собрана однолинейная схема (рис. 1), включающая эквивалентный источник ЭДС и БСК.

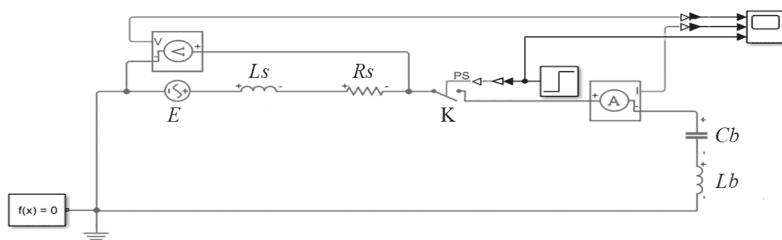


Рис. 1. Однолинейная схема замещения участка сети в Simulink:
 E – ЭДС источника; L_s , R_s – индуктивность и активное сопротивление
 связи между ЭДС источника и БСК; C_b – ёмкость БСК;
 L_b – индуктивность реактора

Включение БСК осуществляется ключом К. Момент включения соответствует прохождению мгновенного значения напряжения через ноль (рис. 2).

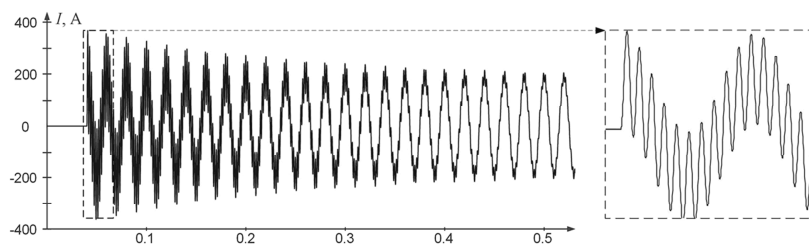


Рис. 2. Осциллограмма тока при включении БСК

Как видно из осциллограммы, в переходном токе содержится высокочастотная гармоническая составляющая, частота которой определяется эквивалентными индуктивностью и ёмкостью контура, образованного источником напряжения и БСК. Резонансная частота колебательного контура определяется по выражению

$$f_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{(L_s + L_b)C_b}} = \frac{2\pi}{\sqrt{(0,001 + 0,012) \times 6,63 \times 10^{-6}}} = 542 \text{ Гц.}$$

Полученные значения амплитуды (рис. 2) и частоты переходного тока обеспечивают возможность корректного проведения программно-аппаратного тестирования устройства защиты БСК. В дальнейшем разработанная в Simulink модель может использоваться для предварительной оценки переходных величин, и верификации модели, разработанной на RTDS.

Осциллограммы тока включения БСК, полученные на модели RTDS, приведены на рис. 4. Расчётные условия включения БСК на рис. 4, *a* аналогичны условиям на рис. 2. Исходя из осциллограммы, следует отметить слабое затухание высокочастот-

ной составляющей переходного процесса из-за малого активного сопротивления системы.

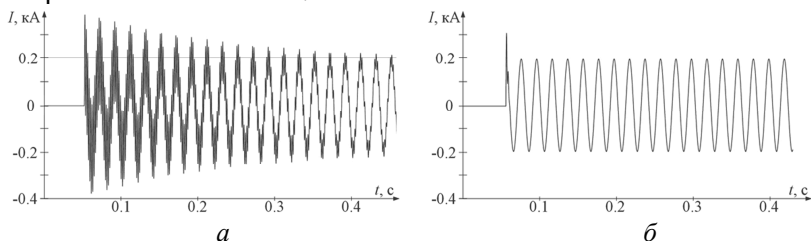


Рис. 4. Осциллограммы тока включения БСК

Следующий опыт включения БСК (рис. 4, б) проведен в полной схеме, то есть с подключенными к шинам 110 кВ моделями ЛЭП и понижающих трансформаторов. Нагрузки на принимающих концах ЛЭП и со стороны НН понижающих трансформаторов представлены активно-индуктивными шунтами, включенными параллельно. Следует отметить довольно сильное затухание переходного процесса, что обусловлено увеличением активного сопротивления в эквивалентных контурах протекания свободного тока.

По результатам моделирования сформулированы следующие выводы:

1) переходный процесс в сети с подключенной БСК сопровождается высокочастотными колебательными процессами, частота которых определяется эквивалентными индуктивностью и ёмкостью контура, образованного источником напряжения и БСК;

2) интенсивность затухания переходного процесса после включения БСК зависит от активного сопротивления эквивалентного контура, в котором протекает свободный ток;

3) разработанная модель может применяться для программно-аппаратного тестирования защит БСК.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. (ПУЭ) / Главгосэнергонадзор России. – М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.

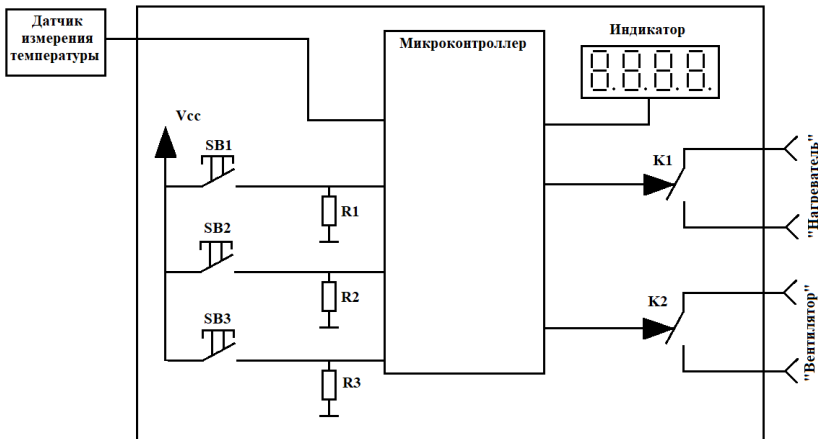
2. СТО 56947007-29.120.70.186-2014 Методические указания по расчёту и выбору параметров настройки (уставок) микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики для БСК напряжением 110–330 кВ.

ТЕРМОСТАТ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ШКАФОВ

Задача поддержания температуры одна из наиболее часто встречающихся в различных технических приложениях. В частности, термостаты нашли применение в электротехнике, например, в электротехнических шкафах, которые требуют поддержания заданного микроклимата.

На вход каждого такого устройства подаётся информация о температуре с датчика, далее она обрабатывается и сравнивается с установленным значением, после чего регулятор должен подать сигнал на исполнительные устройства (нагреватель и охладитель), если это требуется.

В данной работе предлагается устройство термостатирования для электротехнических шкафов. Функциональная схема предлагаемого устройства представлена на рисунке.



Функциональная схема устройства поддержания температуры

В состав данного устройства входит термодатчик DS18B20 фирмы Maxim Integrated Products (его диапазон измерения температуры составляет от -55 до 125°C) [1], который подключён по 1-Wire интерфейсу к управляющему микроконтроллеру.

В предлагаемом термостате используется стандартный гистерезисный регулятор [2]. Если температура внутри шкафа превышает верхний порог гистерезиса, то включается охладитель, который понижает температуру. Прохождение температурой нижнего порога гистерезиса в свою очередь ведет к включению нагревателя. Охладитель и нагреватель должны находиться на расстоянии не менее 100 мм от термостата, иначе это может привести к его некорректной работе.

Таким образом, применение термостата обеспечивает поддержание оптимальной температуры внутри электротехнического шкафа и предотвращает перегрев, переохлаждение, образование конденсата, а также коррозию элементов.

Предлагаемое устройство оснащено дисплеем, на котором отражается как текущая температура, так и целевая температура. В качестве органов управления устройством используются кнопки *SB1*, *SB2*, *SB3* с помощью которых выставляется заданная температура. Также в состав схемы входят несколько пассивных элементов.

Таким образом, разработанный прибор обеспечивает поддержание температуры в заданном диапазоне при помощи исполнительных устройств (нагревателя и охладителя).

Литература

1. Справочные данные термодатчика DS18B20 с сайта компании Maxim Integrated Products. – Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

2. *Эйсмонт В.П.* Регуляторы: учеб.-справ. пособие / В.П. Эйсмонт. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: Инфра-инженерия, 2019. – 336 с.

О.А. Петров
(Чебоксары, ОАО «ВНИИР-Прогресс»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ПОВЫШЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Электромагнитные коммутационные аппараты (КА) – контакторы и реле – являются наиболее массовыми коммутационными

электрическими аппаратами. На надёжную и безотказную работу КА в условиях эксплуатации значительное влияние оказывают механические внешние воздействующие факторы (ВВФ): вибрации, удары, линейные ускорения. Уровни воздействия ВВФ, в обобщенном виде отражающих условия эксплуатации КА, стандартизованы и приведены в ГОСТ: для изделий общепромышленного назначения – ГОСТ 17516.1-90 и др., для изделий специального (военного) назначения – ГОСТ РВ 20.29.414.1 и др. В силу специфики назначения и применения требования к стойкости КА для изделий военного назначения значительно жестче.

Устойчивость КА к воздействию климатических и радиационных факторов обеспечивается, как правило, выбором соответствующих по стойкости материалов, покрытий и конструкцией изделий, устойчивость к воздействию механических ВВФ – кинематической схемой и конструкцией тягового электромагнита КА.

В общем случае устойчивость к воздействию повышенных уровней механических ВВФ КА может быть достигнута:

1) монтажом КА при помощи различного вида амортизаторов пружинного типа, пневматических, тросовых и др. Данный способ работоспособен в ограниченном диапазоне частот и ускорений, применяется чаще для комплектных устройств,

2) принудительной фиксацией подвижных частей аппаратов, например при помощи постоянных магнитов (поляризованные магнитные системы) или механическим заклиниванием,

3) уравниванием подвижных звеньев конструкции КА (элементов контактной и электромагнитной систем) относительно оси (осей) крепления.

В конструкции КА повышенной механической устойчивости наибольшее распространение получили электромагниты:

1) с внедряющимся якорем (броневое типа), позволяющие получить большой ход якоря при значительном тяговом усилии, а также заданную форму тяговой характеристики за счёт изменения формы и размеров элементов магнитопровода [1];

2) с внешним поперечно движущимся якорем поворотного типа; Такие электромагниты развивают небольшие усилия и применяются реже, как правило, для конструирования маломощных реле.

Вместе с тем они позволяют изменять тяговую характеристику за счёт выполнения соответствующей формы полюсов [2];

3) с внешним притягивающимся якорем клапанного типа. Данные электромагниты, как правило, развивают значительные усилия, но применяются при сравнительно небольших рабочих ходах якоря; однако они конструктивно просты и позволяют разрабатывать на их базе множество уравновешенных конструкций КА [3]. Пример кинематической схемы КА с электромагнитом клапанного типа приведен на рис. 1.

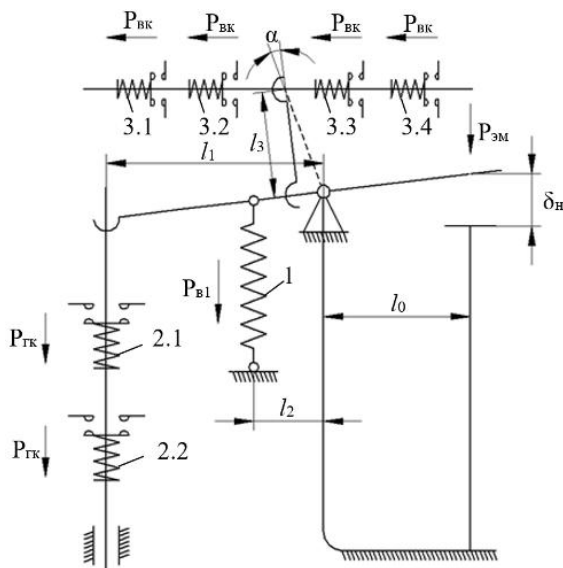


Рис. 1. Упрощенная кинематическая схема КА:

1 – возвратная пружина; 2.1, 2.2 – контактные пружины главных контактов; 3.1, 3.2, 3.3 – контактные пружины вспомогательных контактов

Благодаря уравниванию масс подвижных элементов конструкции КА (траверс с контактами, якоря, пружин и др.) вдоль осей абсцисс и ординат относительно оси вращения достигается устойчивость КА к воздействию механических ВВФ. При этом такие КА, как правило, имеют крутую механическую характеристику. Это обусловлено необходимостью применять контактные пружины со значительно (до 5 раз) большим удельным нажатием [4] и, как

правило, применением контактов мостикового типа, замыкающихся одновременно, для обеспечения перспективных требований по повышению номинального напряжения контактов КА. Это приводит к необходимости обеспечивать в разы большее значение начального тягового электромагнитного усилия электромагнитов по сравнению с обычными КА [4] и повышать крутизну тяговых характеристик электромагнитов.

Увеличение начального тягового усилия может быть обеспечено форсированным включением электромагнита или применением в его конструкции магнитных шунтов.

Параметры магнитной системы могут быть рассчитаны по методикам [5, 6, 7 и др.] с использованием безразмерных характеристик электромагнитной, магнитодвижущей сил и основных геометрических размеров, полученных методами теорий подобия и планирования эксперимента:

$$F = F^* \frac{B_0}{m_0} d_c, P_{эм} = P^* \frac{B_0^2 p d_c^2}{4 m_0},$$

где $F^* = f_1(H^*, A^*, d^*, c^*, d^*, B_0)$;

$P^* = f_2(H^*, A^*, d^*, c^*, d^*, B_0)$;

$H^* = H_0 / d_c$; $A^* = A_0 / d_c$;

$d^* = d_n / d_c$; $c^* = c / d_c$;

$d^* = d / d_c$

где H^* , A^* , d_c , c – основные геометрические размеры электромагнита, выраженные в абсолютных значениях или соответствующих величин (рис. 2), B_0 – магнитная индукция в нейтральном сечении магнитопровода.

Электромагниты могут быть рассчитаны также по частным критериям оптимальности в зависимости от предъявляемых к электромагниту требований по оптимизации основных параметров КА [8, 9 и др.].

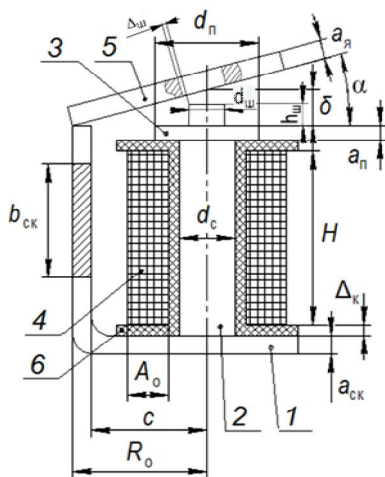


Рис. 2. Клапанный электромагнит (с магнитным шунтом)

Литература

1. *Любчик М.А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М.А. Любчик. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
2. *Гордон А.В.* Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
3. *Нежданов В.Т.* Контактторы электромагнитные специальные. ТС-07. Аппараты низкого напряжения. Обзорная информация / В.Т. Нежданов. – М.: Информэлектро, 1981. – 88 с.
4. *Петров О.А.* Новые разработки контакторов серии КЭ16 / О.А. Петров // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. научн. тр. – Вып. IX. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 219–227.
5. *Никитина О.А.* Выбор размеров форсированного П-образного двухкатушечного привода контактора / О.А. Никитина, О.А. Петров, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 91–95.
6. *Петров О.А.* Расчётное моделирование электромагнитных характеристик клапанного электромагнита с цилиндрическим шунтом на полюсном наконечнике / О.А. Петров, Г.П. Свинцов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XI Всерос. научн.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 145–149.
7. *Сахаров П.В.* Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
8. *Зайцев Ю.М.* Минимизация массы активных материалов клапанного приводного электромагнита постоянного напряжения, работающего в повторно-кратковременном режиме / Ю.М. Зайцев, И.П. Иванов, А.В. Приказчиков и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 38–42.
9. *Зайцев Ю.М.* Минимизация потребляемой мощности клапанным электромагнитом постоянного напряжения в повторно-кратковременном режиме работы / Ю.М. Зайцев, И.П. Иванов, О.А. Петров и др. // Электротехника. – 2015. – № 8. – С. 43–46.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТАНОВКИ СТАТКОМ НА ПРОТЕКАНИЕ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА*

В настоящее время в связи с развитием электроэнергетических систем (ЭЭС), повышением требований к надёжности их функционирования и появлением новых электросетевых технологий, таких как управляемые системы электропередачи переменного тока (Flexible Alternative Current Transmission System, FACTS), неизбежно возникает необходимость проведения комплекса всесторонних исследований режимов и процессов в ЭЭС [1]. В настоящей работе рассматривается влияние устройств FACTS на примере статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ) при интеграции их в ЭЭС на протекание асинхронного режима (АР) и, как следствие, функционирование автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), которая отслеживает изменение сопротивления до точки электрического центра качаний (ЭЦК) и выявляет АР после начала первого цикла.

Динамическое моделирование схемы ЭЭС, в которую устанавливалось устройство СТАТКОМ, проводилось в программно-аппаратном симуляторе реального времени RTDS. Была использована девятиузловая схема тестовой модели энергосистемы, утвержденная стандартом АО «СО ЕЭС» для проведения сертификационных испытаний устройств АЛАР [2]. Результаты моделирования представлены в таблице.

Место подключения СТАТКОМ	U , кВ	Сопротивление до ЭЦК, Ом	Амплитуда U , кВ	Амплитуда I , А
Без (ПС № 5)	304,8	76,2	313,712	2,71
ПС № 3	299,4	131,853	298,136	2,64
ПС № 4	296,2	75,508	318,128	2,69
ПС № 5	311,5	131,878	296,961	2,64

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № МК-1675.2019.8.

Моделирование и последующее построение годографов сопротивлений показали, что сопротивление, измеренное от точки установки АЛАР до ЭЦК, изменяется при подключении устройства СТАТКОМ. Во-первых, это происходит из-за увеличения напряжения на шине, к которой подключено устройство, за счёт вводимой реактивной мощности. Во-вторых, система управления СТАТКОМ работает в условиях динамического изменения параметров режима, например, при подключении/отключении нагрузки, и таким образом изменяет величину компенсации. Также влияние на значение сопротивления до точки ЭЦК оказывает место подключения СТАТКОМ. Наименьшее изменение наблюдается в случае подключения к шинам ПС № 4, к которой ближе всего при начальных условиях находится точка ЭЦК. В других случаях ЭЦК выходит за пределы зоны действия АЛАР, что приводит к несрабатыванию автоматики при возникновении АР. Таким образом показано, что установка устройств FACTS может приводить в некоторых случаях к существенным изменениям протекания переходных и аварийных процессов в ЭЭС, из-за чего необходимо наиболее полно и достоверно учитывать влияние данных устройств и дополнять существующие стандарты и методики по настройке релейной защиты и автоматики, в частности, устройств АЛАР.

Литература

1. *Лямов А.С.* Исследование влияния быстродействующих устройств режимного регулирования на показатели устойчивости / А.С. Лямов, С.В. Смоловик, С.А. Солодянкин и др. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2018. – № 1 (78). – С. 35–44.
2. *СТО 59012820.29.020.008-2015.* Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования. Изм. 18.03.2019. – М.: Стандартинформ, 2015. – 80 с.

Н.М. Александров¹, А.Ю. Хренников²
(¹Чебоксары, НПП «Динамика»; ²Москва, НТЦ ФСК ЕЭС)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА

Силовые трансформаторы являются одними из наиболее важных устройств, установленных на объектах генерации, передачи и распределения электроэнергии. Механические деформации обмоток трансформаторов приводят к их повреждению. Метод анализа частотного отклика (SFRA) является наиболее чувствительным к любым изменениям в конструкции обмотки [Лит.]. В статье приведен пример анализа обмотки силового трансформатора с наличием деформации обмотки в результате испытания его электродинамической стойкости.

Исследования частотной характеристики силового трансформатора. Для интерпретации результатов в данной публикации использованы частотные характеристики трансформатора ТДЦ-400000/220, полученные путем дискретного преобразования Фурье откликов, полученных методом низковольтного импульса, при испытаниях на электродинамическую стойкость к токам КЗ данного трансформатора. Результаты НВИ для фазы С представлены на рис. 1. В результате 2-го зачетного опыта КЗ обмотки НН фазы «С» трансформатора произошло повреждение обмотки.

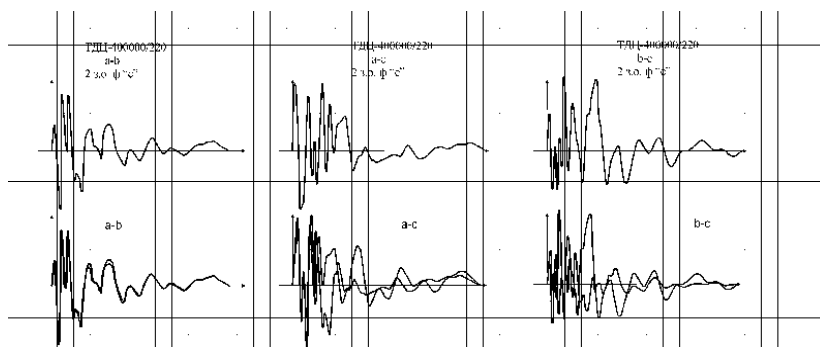


Рис. 1. Результаты НВИ фазы С трансформатора ТДЦ-400000/220

На фотографиях (рис. 2) можно наблюдать начало потери радиальной устойчивости трансформатора.

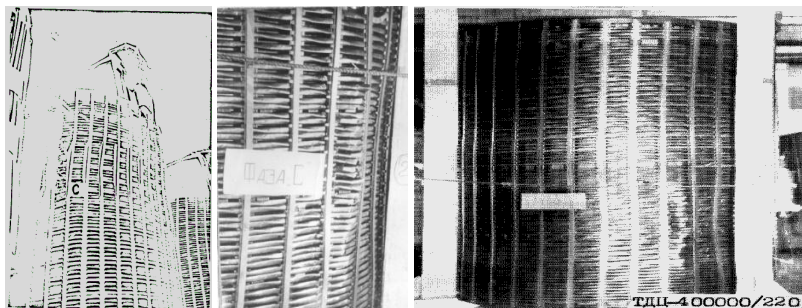


Рис. 2. Фаза С после испытаний на электродинамическую стойкость (начало потери радиальной устойчивости)

В результате исследования откликов (рис. 3) было установлено следующее:

- характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм отличаются;
- частоты резонанса сдвинуты друг относительно друга в некоторых случаях на величину до 80 кГц;
- значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса:
 - увеличение на 60 % на частоте 200 кГц;
 - уменьшение на 50 % на частотах 300 кГц и 350 кГц.

В ходе опытов короткого замыкания суммарное отклонение сопротивления короткого замыкания X_k от базового после пяти зачетных опытов составило на фазе С +1,6 %.

Результаты разборки показали, что на фазе С произошло смещение столбов прокладок на наружном слое равномерно от середины по ходу винта в верхней части от 0 до 60 мм, в нижней части от 0 до 10 мм. В нескольких местах катушки имеют выпуклость в прилегающий канал НН-ВН от 20 до 30 мм и от 5 до 10 мм внутрь с повреждением бумажной изоляции.

Показатели коэффициент корреляции и ASLE (см. таблицу) демонстрируют наличие повреждений в фазе С трансформатора.

Расчёт показателей исследования фазы С

	Фаза С а-б	Фаза С а-с	Фаза С b-с
KK	0,982	0,541	0,731
ASLE	0,046	0,195	0,23

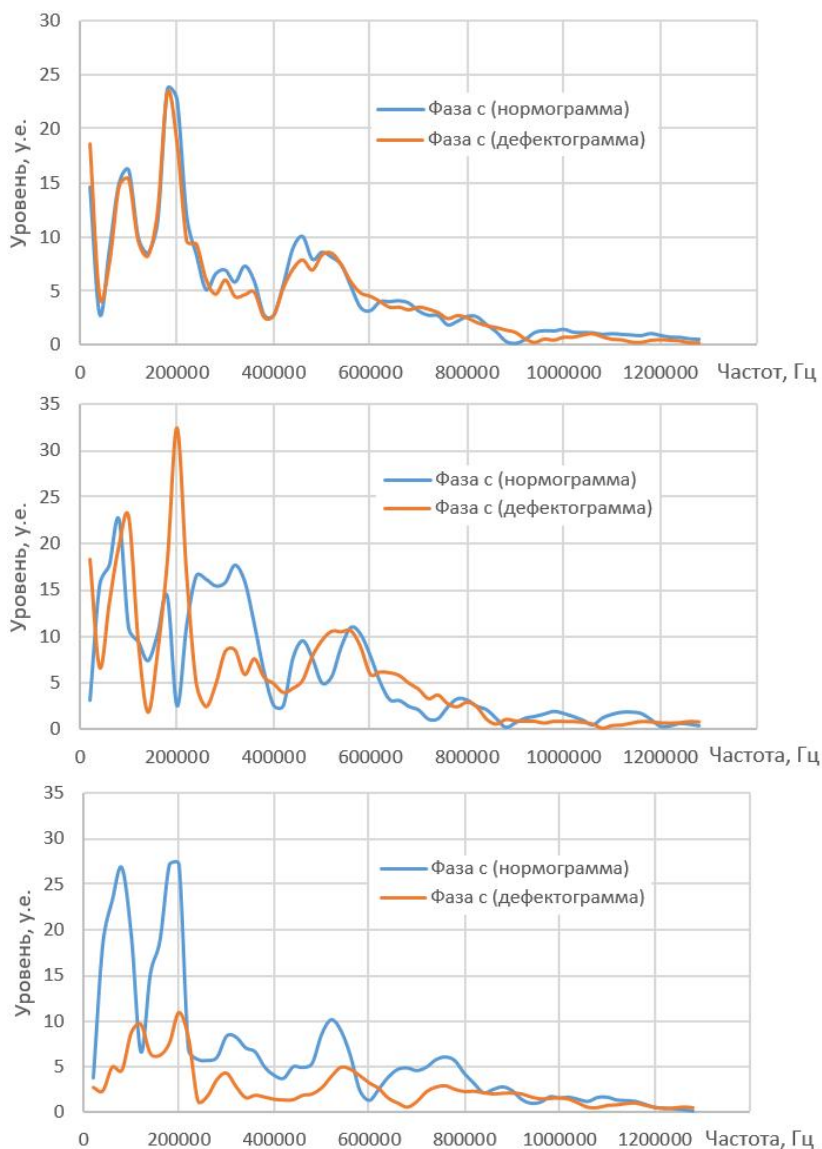


Рис. 3. Частотные характеристики фазы С по схеме а-в, а-с, в-с

Приведённый пример анализа частотных характеристик силового трансформатора с потерей радиальной устойчивости об-

мотки показывает, что для данного вида повреждения обмотки основные изменения характеристики произошли в диапазоне частот от 200 до 350 кГц.

Выводы. Результаты исследования трансформатора ТДЦ-400000/220 показали, что любое изменение частотного отклика (SFRA) соответствует значительным деформациям обмоток, в ходе которых происходит изменение не только ёмкостных, но и индуктивных связей между катушками и витками обмотки. Как показано выше на примере диагностики состояния обмоток трансформатора между опытами КЗ, применение анализа частотного отклика является достаточно эффективным.

Литература

Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в процессе эксплуатации / А.Ю. Хренников // Промышленная энергетика. – 2006. – № 12. – С. 12–14.

Л.Э. Александрова, Е.Ю. Казакова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕАВАРИЙНЫМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для сохранения устойчивости электроэнергетической системы при изменении режимов в широком диапазоне, в том числе в послеаварийных режимах, применяется противоаварийная автоматика (ПА), одной из элементов которой является специальная автоматика отключения нагрузки (САОН), которая формирует управляющее воздействие на отключение нагрузки в приемной части энергосистемы. Недостаточное оснащение информацией средств ПА (в частности САОН) было одной из причин крупной аварии в российских энергосистемах, что подтверждает актуальность проблем, возникающих при настройке и работе САОН.

Пусковым фактором САОН является снижение напряжения на шинах 110–220 кВ объекта, где она установлена. Запла-

нированное отключение потребителей в рамках договорных условий с энергокомпаниями осуществляется для обеспечения баланса мощности, для поддержания нормального уровня частоты в сети, при прохождении пика нагрузки, при выделении микросети на автономную работу [1]. Ограничение нагрузки бывает необходимым в послеаварийных ситуациях, вызванных отключением одного или нескольких элементов, для сохранения параметров режима в допустимых пределах.

Для реализации поставленной задачи вводятся графики аварийного ограничения (ГАО) и временного отключения потребителей (ГВО) по ступеням, в зависимости от параметров предшествующего режима (с учетом постоянного контроля тока питающей линии и загруженности этой линии), не вызывая избыточного отключения нагрузки.

Объем ступени может отличаться в разное время, причем за расчётный принимается минимально возможное значение отключаемой нагрузки. На каждом из объектов отключаемые присоединения объединяются в ступени отключения нагрузки (ОН) САОН. Из очередей с учетом их текущей нагрузки должны формироваться нагрузки таким образом, чтобы объем воздействий был близок к заранее заданным величинам (например, ОН-1-50 МВт, ОН-2-100 МВт и т. д.). Формирование ступеней отключения нагрузки из очередей САОН выполняется в автоматическом режиме по алгоритму подбора очередей с учетом возможных критериев оптимальности (приоритетность, цена и другие) [2].

Информацию о загруженности линий необходимо собирать в центр сбора и обработки информации по составлению актуального плана отключений. Связь может осуществляться с помощью средств существующей телемеханики, АСУТП, SKADA[1].

В качестве примера реализации составления графиков отключений можно привести разработку, в которой осуществляется подбор в реальном времени ступеней отключения (из рассчитанного заранее множества значений нагрузки, предполагаемой под отключение) в зависимости от конкретных схемно-режимных условий [2]. При работе САОН возникают проблемы, в том числе: неопределённость нагрузки питающих линий; срабатывание по факту аварийного отключения элемента сети (на опережение), что имеет как положительную (быстродействие)

так и отрицательную (не учитываются параметры режима) стороны; как следствие перечисленных проблем – отключение большей мощности, чем необходимо; необходимость многовариантных расчётов для различных режимов.

Целью данной работы является оценка возможности использования разработанных автором программ [3] для решения этих и других проблем ПА:

1) программа расчёта обобщенных параметров схемы замещения электрической сети «ZCK» (Свидетельство о госрегистрации № 2017614464 от 17.04.17 года);

2) программа расчёта величины ограничения нагрузки узла для сохранения напряжений послеаварийных режимов в допустимых пределах «UZLDOP» (Свидетельство о госрегистрации № 2017614450 от 17.04.17 года);

3) программа расчёта допустимых нагрузок узлов для сохранения токов и мощностей ветвей послеаварийных режимов в допустимых пределах «DOPNAGS» (Свидетельство о госрегистрации № 2017614216 от 10.04.17).

Срабатывание САОН «на опережение» не позволяет учесть параметры аварийного режима. Жёсткое распределение отключаемых потребителей по ступеням ведёт к отключению большей нагрузки, чем требуется для устойчивости послеаварийного режима. Расчёты по названным программам позволяют оптимизировать объём и состав отключаемой нагрузки с учётом особенностей работы энергосистемы [4]. Допустимое напряжение задаётся в виде комплексного числа и каждому его модулю соответствует множество сочетаний действительной и мнимой частей и множество сочетаний активной и реактивной составляющих отключаемой мощности. Из них можно выбрать оптимальный вариант с учётом требований устойчивости и аварийной и технологической брони.

Разработанные программы основаны на применении обобщённых параметров схемы замещения, получаемых по программе «ZCK», в которой реализован их пересчёт при коммутациях в схеме. Это позволяет быстро и эффективно выполнять многовариантные расчёты показателей режимов для различных состояний схемы.

Литература

1. Куликов А.Л. Применение статистического подхода для адаптации автоматики отключения потребителей к их фактической нагрузке / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин // Электрические станции. – 2016. – № 12. – С. 36–40.

2. Воропай Н.И. Адаптивные алгоритмы автоматики рас-
пределённого отключения нагрузки / Н.И. Воропай, Д.Н. Ефи-
мов, Б.Н. Каратаев и др. // Электрические станции. – 2016. –
№ 11. – С. 27–35.

3. Александрова Л.Э. Анализ сложных аварийных режимов чу-
вашской энергосистемы / Л.Э. Александрова // Региональная энер-
гетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. –
Вып.10. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 60–70.

Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

СХЕМА ДИАГНОСТИКИ УСТРОЙСТВ РЗА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАСЧЁТА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ*

Особое внимание при разработке централизованной системы релейной защиты и автоматики (РЗА) с помощью современных (цифровых) информационных технологий необходимо уделять таким требованиям как селективность, быстродействие, чувствительность и надёжность. В связи с этим в настоящее время в энергетике актуальной задачей является разработка системы диагностики централизованной системы РЗА [1, 2].

На рисунке представлена схема диагностики устройств РЗА, которая основана на расчёте алгоритма определения места повреждения (ОМП) [3].

Цифровым регистратором аварийных событий (ЦРАС) в централизованной системе РЗА формируются осциллограммы (в формате регистрации осциллограмм переходных процессов (аварий) в

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чувашской Республики в рамках научного проекта № 19-48-210005 р_а

энергосистемах COMTRADE), которые вместе с данными о модели ОМП (длине, активных и реактивных сопротивлениях участков линий, параметрах параллельных линий и ответвлений и т.д.) передаются в блок «Модуль расчёта ОМП». В этом блоке рассчитывается расстояние до места повреждения, фиксируется дата, время, вид короткого замыкания (КЗ). Кроме этого определяются особая фаза, значения токов и напряжений, действующие в момент КЗ и во время работы системы в предаварийном режиме. При КЗ также фиксируются значения нулевой, прямой и обратной последовательностей токов и напряжений.

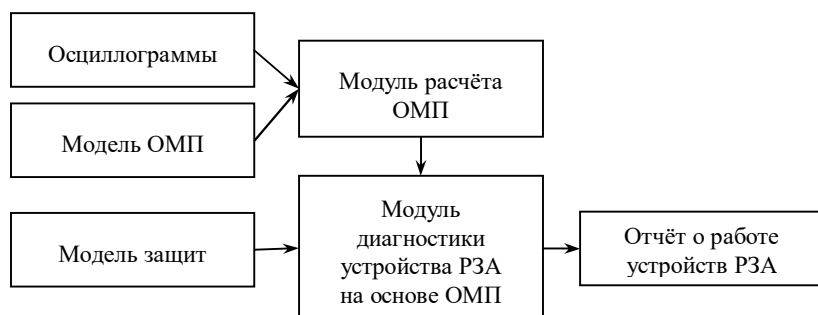


Схема диагностики устройств РЗА,
основанная на расчёте алгоритма ОМП

В блоке «Модуль диагностики устройства РЗА на основе ОМП» анализируется работа основных и резервных защит. Затем в блоке «Отчёт о работе устройств РЗА» формируется протокол экспресс-анализа аварийного режима [4].

Таким образом, разработаны алгоритмы анализа работы функций РЗА на основе ОМП и создан программный комплекс анализа и диагностики комплектов и функций защит.

Литература

1. Булычев А.В. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем / А.В. Булычев, Д.С. Васильев, В.Н. Козлов, Д.Н. Силанов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 71–77.

2. *Моисеев Д.В.* Анализ существующих методик построения систем регистрации аварийных событий и диагностики работы устройств РЗА / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сб. материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 391–396.

3. *Моисеев Д.В.* Разработка структурной схемы подсистемы регистрации и диагностики аварийных событий системы релейной защиты и автоматики / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: сб. матер. IV Всерос. студ. конф. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 80–83.

4. *Моисеев Д.В.* Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 167–175.

Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИЙ ЗАЩИТ УСТРОЙСТВ РЗА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ*

Как известно, функции защиты устройств РЗА могут быть реализованы на основе использования эталонной модели защиты, а также с помощью устройств максимальной токовой защиты (МТЗ), токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП), защиты минимального напряжения (ЗМН), дистанционной защиты (ДЗ) и направленной высокочастотной защиты (НВЗ) [1–4].

На основе анализа работы МТЗ, ТЗНП, ЗМН, ДЗ и НВЗ нами были разработаны алгоритмы расчёта пуска и срабатывания этих защит по определению места повреждения (ОМП) [5–7].

В качестве примеров ниже представлены схемы алгоритмов расчёта пуска и срабатывания МТЗ и ТЗНП по ОМП. На рис. 1 и 2 показаны схемы алгоритмов расчёта пуска МТЗ и ТЗНП по ОМП, соответственно.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чувашской Республики в рамках научного проекта № 19-48-210005 р_а.

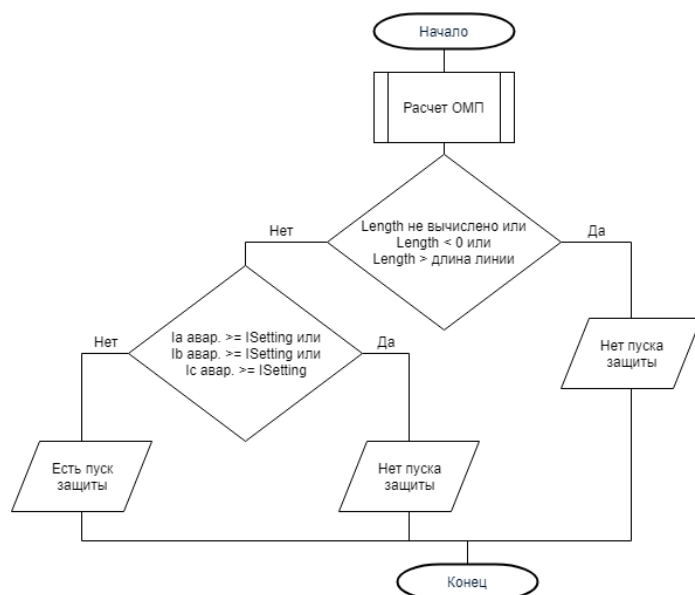


Рис. 1. Схема алгоритма расчёта пуска МТЗ по ОМП

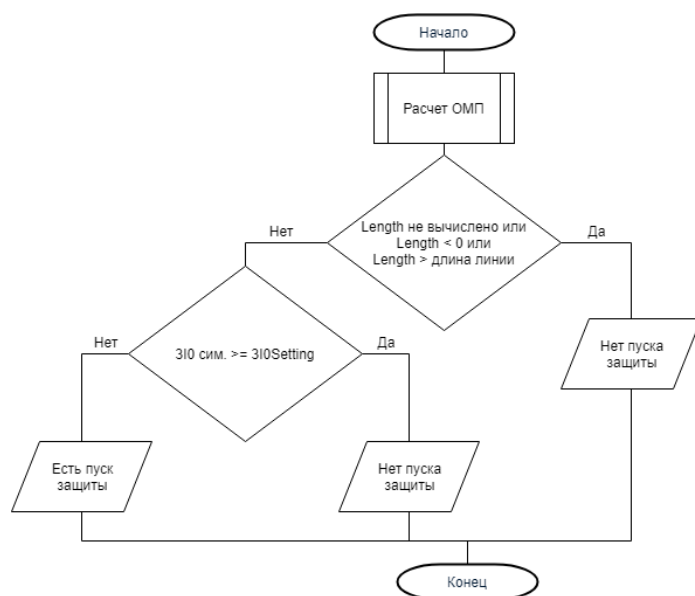


Рис. 2. Схема алгоритма расчёта пуска ТЗНП по ОМП

В схемах были использованы следующие обозначения: Length – расстояние до места возникновения короткого замыкания (КЗ); I_a авар., I_b авар., I_c авар. – фазные аварийные токи, I_{Setting} – ток срабатывания МТЗ; $3I_{0\text{сим}}$ – ток нулевой последовательности; $3I_{0\text{Setting}}$ – ток срабатывания ТЗНП. На рис. 3 представлена схема алгоритма проверки правильности срабатывания МТЗ и ТЗНП по ОМП. В схеме использованы следующие обозначения: $T_{\text{кз}}$ – длительность КЗ; OperationDelay – время от момента пуска защиты до её срабатывания.

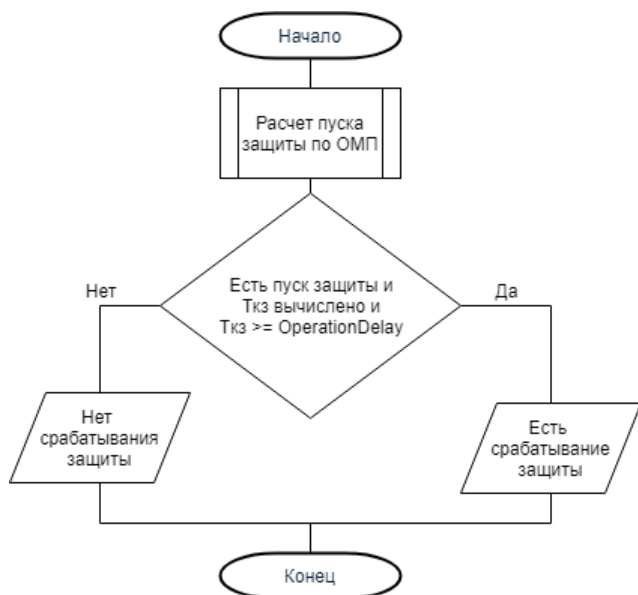


Рис. 3. Схема алгоритма проверки правильности срабатывания МТЗ и ТЗНП

При этом при разработке модели алгоритма защит устройств РЗА необходимо предусмотреть гибкость в её настройке, так как одни и те же функции защиты в устройствах разных производителей имеют некоторые отличия.

В традиционных системах РЗА, используемых на энергообъектах, обычно осуществляется аппаратное резервирование устройств РЗА. Сравнение результатов пуска и срабатывания одних и тех

же защит на разных устройствах, частично или полностью выполняющих аналогичные функции, можно использовать при диагностике работы функций РЗА.

Если резервирование не производится, то к системе РЗА на электромеханических реле можно параллельно подключить цифровое устройство РЗА, функционирующее по протоколу ИЕС 61850. При этом при использовании цифрового устройства РЗА можно добиться и экономической выгоды, так как в отличие от традиционных систем РЗА оно одно может реализовывать все функции защиты. В случае выхода из строя одного из устройств РЗА есть возможность выявить это посредством сравнения результатов работы устройства РЗА с результатами работы цифрового устройства. Подобные смежные системы РЗА в последнее время стали активно внедряться на энергообъектах.

На основе разработанных алгоритмов был создан программный комплекс анализа и диагностики комплектов и функций защит. Исследования показали, что использование данных алгоритмов возможно и в реальных электроэнергетических системах.

Литература

1. *Булычев А.В.* Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем / А.В. Булычев, Д.С. Васильев, В.Н. Козлов, Д.Н. Силанов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 71–77.

2. *Евминов Л.И.* Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / Л.И. Еминов, Г.И. Селивестров. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – 531 с.

3. *Моисеев Д.В.* Анализ существующих методик построения систем регистрации аварийных событий и диагностики работы устройств РЗА / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сб. материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 391–396.

4. *Моисеев Д.В.* Экспресс-анализ и анализ аварийных режимов электрической системы на основе эталонных алгоритмов / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Проблемы и пер-

спективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 273–279.

5. *Моисеев Д.В.* Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 167–175.

6. *Моисеев Д.В.* Разработка алгоритмов анализа работы функций релейной защиты и автоматики с использованием данных о месте повреждения / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 97–112.

7. *Moiseev D.V.* Conducting an Express Analysis of Emergency Events of the Electrical System for Determining the Fault Location / D.V. Moiseev, N.A. Galanina, N.N. Ivanova // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – Moscow, 2020. – PP. 1–4. – DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059206.

Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЗА*

Целью работы является разработка программного комплекса (ПК) диагностики централизованной системы РЗА. ПК диагностики централизованной системы РЗА имеет клиент-серверную архитектуру и состоит из следующих компонентов: ПО RPADiagnostics Configurator (конфигуратор системы); ПО RPADiagnosticsServer (сервер системы); ПО RPADiagnostics (клиент системы); база данных (БД).

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чувашской Республики в рамках научного проекта № 19-48-210005 p_a.

Система диагностики централизованной системы РЗА настраивается в ПО RPADiagnosticsConfigurator. Данные системы диагностики централизованной системы РЗА разделены на три группы: общие настройки; настройки хранения; конфигурация системы.

В общих настройках содержится директория COMTRADE файлов, в которой модуль RPADiagnosticsServer «Монитор COMTRADE файлов» осуществляет мониторинг новых появившихся файлов [1]. В общих настройках также хранится TCP/IP-порт подключения клиентов RPADiagnostics.

Настройки хранения содержат параметры подключения к БД: имя сервера БД, имя БД, имя пользователя и пароль для подключения. Конфигурация системы включает в себя всю информацию по объектам защиты: описание электрических сетей, подстанций, объектов защит (ЛЭП, трансформатор, секция шин), комплектов защит и устройств РЗА, включая параметры функций защит.

Работа цифровой системы диагностики сосредоточена в трёх программных компонентах: конфигураторе RPADiagnosticsConfigurator, сервере RPADiagnosticsServer и клиентах RPADiagnostics. После успешного конфигурирования и загрузки настроек системы в сервер начинается основной цикл работы сервера. Осциллограммы, записанные ЦРАС и РАС традиционного исполнения в централизованной системе РЗА, загружаются в общую директорию, куда имеет доступ и RPADiagnosticsServer [2]. Сервер, анализируя поступающие осциллограммы на основе конфигурации, настроенной в RPADiagnosticsConfigurator, записывает результаты анализа в БД. Клиенты RPADiagnostics получают информацию о результатах анализа и выводят информацию пользователю системы для его дальнейшего принятия решений.

Программный комплекс находится в опытной эксплуатации и проходит этап тестирования. После прохождения всех запланированных тестов планируется окончательное внедрение программного комплекса в энергосистему Оренбургской области.

Литература

1. *Mouceev Д.В.* Conducting an Express Analysis of Emergency Events of the Electrical System for Determining the Fault Location /

Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – М., 2020. – С. 1–4.

2. *Моисеев Д.В.* Экспресс-анализ и анализ аварийных режимов электрической системы на основе эталонных алгоритмов / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 273–279.

3. *Моисеев Д.В.* Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы / Д.В. Моисеев, Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 167–175.

4. *Булычев А.В.* Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем / А.В. Булычев, Д.С. Васильев, В.Н. Козлов, Д.Н. Силанов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 71–77.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ

И.Д. Кочетов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО «Релематика»)

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАБЛЮДАЕМОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛОКАЦИИ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Модель наблюдаемого объекта представляется в базисе комплексных величин одним из двухпроводных каналов. В общем случае несимметричной многопроводной системы – это модальный канал [1], а в случае трёхфазной симметричной линии электропередачи – безнулевой канал, объединяющий прямую и обратную последовательности одной фазы. Момент повреждения в энергообъекте разделяет наблюдаемый процесс на предшествующий режим до возникновения повреждения и текущий режим после повреждения. Данные режимы представлены в виде наблюдаемых токов и напряжений предшествующего $\underline{U}_{\text{спд}}$, $\underline{I}_{\text{спд}}$, $\underline{U}_{\text{лпд}}$, $\underline{I}_{\text{лпд}}$ и текущего $\underline{U}_{\text{стк}}$, $\underline{I}_{\text{стк}}$, $\underline{U}_{\text{гтк}}$, $\underline{I}_{\text{гтк}}$ режимов, что определяет также и чисто аварийные составляющие данных величин $\underline{I}_{\text{сав}}$, $\underline{I}_{\text{рав}}$, $\underline{U}_{\text{сав}}$, $\underline{U}_{\text{рав}}$.

Про выделение локальных составляющих наблюдаемого процесса более подробно описано в [2]. Метод получения локальных составляющих заключается в следующем. Для начала задаётся модель неповреждённого энергообъекта через параметры четырёхполюсника формы A

$$\underline{A} = \frac{\hat{e}A}{\hat{e}C} \frac{B\dot{u}}{D\dot{u}}.$$

Коэффициенты матрицы A определяются заранее по параметрам энергообъекта или на основе информации о предшествующем режиме объекта [3].

Далее к модели неповреждённого объекта прикладываются текущие напряжения или их аварийные составляющие. Полу-

ченная реакция данной модели в виде токов так называемого нормального режима используется для нахождения локальных токов наблюдаемого процесса

$$\underline{I}_{\text{лк}} = \underline{I}_{\text{тк}} - \underline{I}_{\text{тк,нм}} \quad \text{или} \quad \underline{I}_{\text{лк}} = \underline{I}_{\text{ав}} - \underline{I}_{\text{ав,нм}}.$$

Локальная составляющая, являясь частью аварийного процесса, также является частью текущего процесса. Поэтому нет отличий в нахождении её по текущим или аварийным составляющим.

Особенностью локальных составляющих является то, что они возникают только при повреждении внутри защищаемого объекта, однозначно указывают на место этого повреждения и остаются на нулевом уровне при внешнем повреждении. Однако для получения локальных составляющих необходимо наблюдение энергообъекта с двух сторон и наличие канала связи для передачи информации о токах и напряжениях с удалённого конца. Все эти особенности ограничивают применение алгоритма определения места повреждения (ОМП) на основе локальных составляющих. Рассмотрим применение данного алгоритма на конкретных примерах и оценим эффективность метода ОМП.

Для определения места повреждения в энергообъекте воспользуемся замером

$$\underline{H} = \frac{\underline{I}'_{s,\text{лк}} - \underline{I}'_{r,\text{лк}}}{\underline{I}'_{s,\text{лк}} + \underline{I}'_{r,\text{лк}}},$$

где $\underline{I}'_{s,\text{лк}}$, $\underline{I}'_{r,\text{лк}}$ – безнулевые локальные составляющие токов аварийного или текущего режима с двух концов. На этапе обучения для данного замера заранее строится таблица соответствия места повреждения от величины замера \underline{H} . В общем случае модуль этого замера представляет собой прямую линию

$$H = 1 - 2x_f^*,$$

где $x_f^* = x_f / l$, l – длина защищаемой линии электропередачи.

В качестве первого объекта рассмотрим линию 110 кВ, параметры которой следующие: $\underline{Z}_1^0 = 0,21 + j0,40$ Ом/км, $\underline{Z}_0^0 = 0,39 + j1,09$ Ом/км, $B_1^0 = 2,75$ мкСм/км, $B_0^0 = 1,56$ мкСм/км, $l = 24,2$ км. Для корректной работы алгоритма ОМП производится синхронизация токов и напряжений по предшествующему режиму.

Из рис. 1 и 2 видно, что на линии произошло однофазное КЗ фазы С на землю.

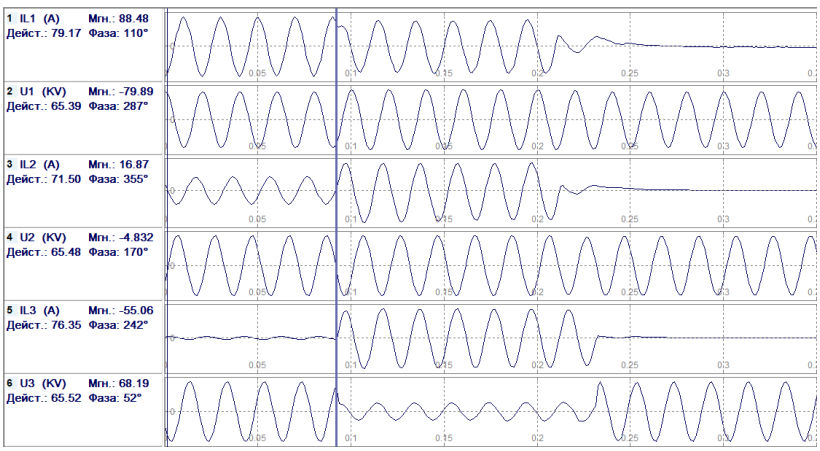


Рис. 1. Осциллограмма токов и напряжений при $K_C^{(1)}$ с левого конца

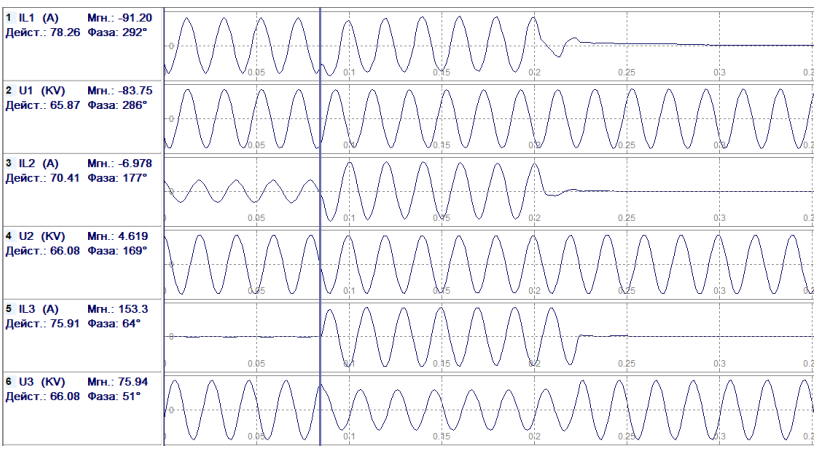


Рис. 2. Осциллограмма токов и напряжений при $K_C^{(1)}$ с правого конца

Работа алгоритма ОМП на основе локальных составляющих показала, что место повреждения находится на расстоянии 12,97 км, в то время как реальное место повреждения – на расстоянии 14,5 км, таким образом, погрешность в определении места повреждения составила 1,53 км, что относительно велико. Однако результат работы ОМП, установленного на терминале защиты,

показал результат 11,3 км с погрешностью 3,2 км, что недопустимо велико для рассматриваемой линии электропередачи.

Основная погрешность в алгоритме ОМП на основе локальных составляющих обусловлена погрешностями трансформаторов тока и напряжения, а также несовершенством синхронизаций токов и напряжений, производимых вручную. Последнюю погрешность можно значительно снизить, используя, например, оптический канал связи с синхронизацией наблюдаемых величин.

Рассмотрим ещё одно такое же повреждение на той же линии электропередачи – КЗ фазы С на землю (рис. 3 и 4).

Однако в данном случае предшествующий режим отсутствует, следовательно, выделение локальных составляющих может производиться по текущим токам и напряжениям. Ручную синхронизацию придётся выполнить также по текущим величинам токов и напряжений.

ОМП на основе локальных составляющих показало, что место повреждения находится на расстоянии 15,36 км, в то время как реальное место повреждения – 14,5 км, таким образом, погрешность в определении места повреждения составила 0,86 км. Результат работы ОМП, установленного на терминале защиты, показал результат 11,3 км с погрешностью 3,2 км.

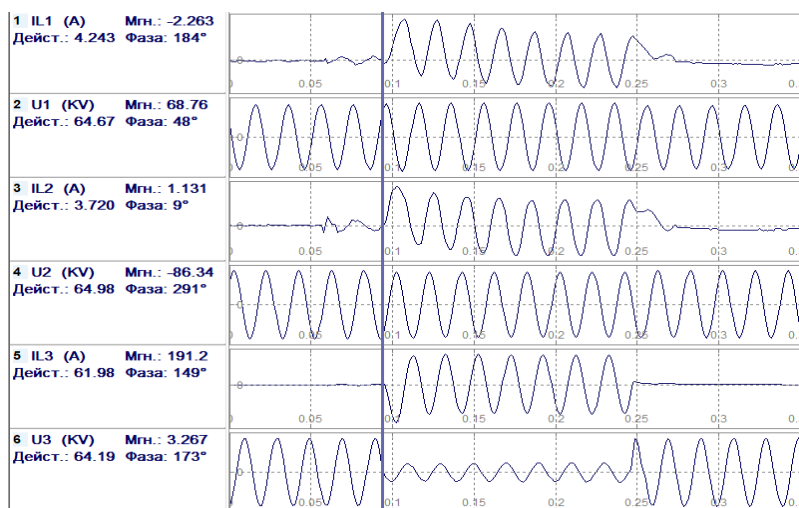


Рис. 3. Оциллограмма токов и напряжений при $K_C^{(1)}$ с левого конца

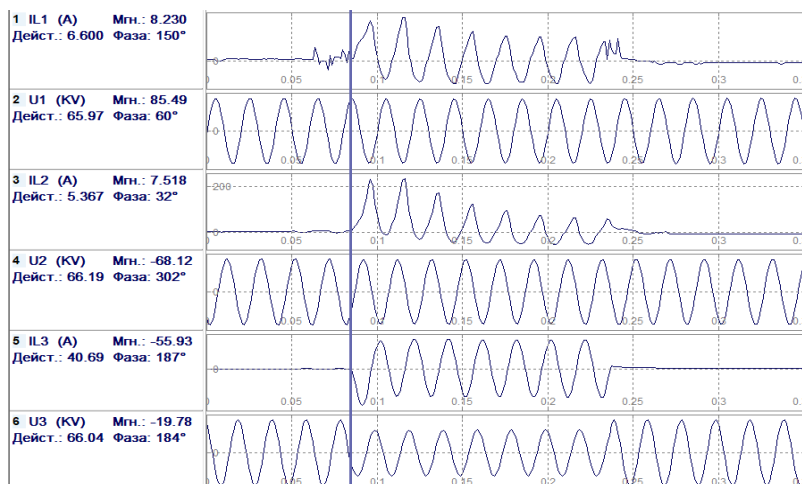


Рис. 4. Осциллограмма токов и напряжений при $K_C^{(1)}$ с правого конца

В качестве третьего объекта рассматривается другая линия 110 кВ, которая представлена в виде 13 различных участков с различными сопротивлениями. Параметры данного объекта представлены в таблице. На линии произошло КЗ фазы А на землю (рис. 5, 6).

Параметры наблюдаемого объекта

№	\underline{Z}_1^0 , Ом/км	\underline{Z}_0^0 , Ом/км	B_1^0 , мкСм/км	B_0^0 , мкСм/км	l , км
1	0,20+j0,42	0,42+j1,42	2,59	1,55	1,03
2	0,25+j0,42	0,49+j1,39	2,64	1,57	1,00
3	0,21+j0,41	0,43+j1,38	2,61	1,65	2,45
4	0,21+j0,42	0,47+j1,34	2,66	1,78	0,90
5	0,21+j0,41	0,36+j1,43	2,71	1,55	3,03
6	0,21+j0,40	0,31+j1,37	2,71	1,55	9,20
7	0,19+j0,40	0,31+j1,37	2,76	1,55	1,51
8	0,19+j0,41	0,31+j1,37	2,66	1,62	0,90
9	0,19+j0,40	0,31+j1,37	2,76	1,55	1,70
10	0,19+j0,41	0,31+j1,37	2,68	1,46	6,13
11	0,20+j0,41	0,31+j1,37	2,66	1,62	1,66
12	0,19+j0,40	0,31+j1,37	2,76	1,55	0,72
13	0,20+j0,40	0,42+j1,40	2,75	1,59	2,80

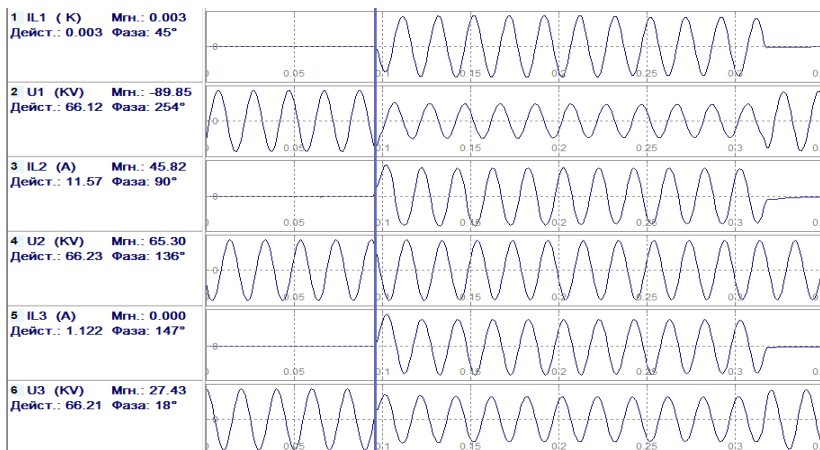


Рис. 5. Осциллограмма токов и напряжений при $K_A^{(1)}$ с левого конца

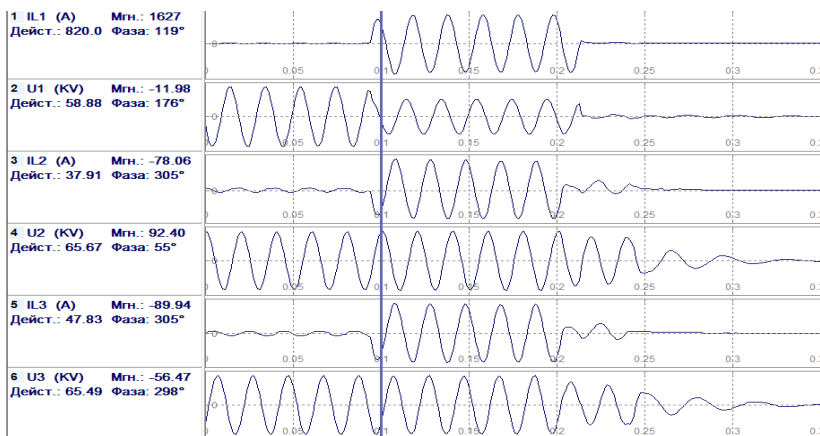


Рис. 6. Осциллограмма токов и напряжений при $K_A^{(1)}$ с правого конца

ОМП на основе локальных составляющих показал, что место повреждения находится на расстоянии 0,67 км, в то время как реальное место повреждения – на расстоянии 0,75 км, таким образом, погрешность в определении места повреждения составила 0,08 км. Результат работы ОМП, установленного на терминале защиты, показал результат 4,9 км с погрешностью 4,15 км.

Таким образом, полученные результаты показывают, что применение ОМП на основе локальных составляющих предпо-

читательнее из-за меньшей погрешности. Однако в некоторых случаях погрешность данного ОМП была высока, но её можно значительно снизить, применив синхронизацию наблюдаемых токов и напряжений с обоих концов, так как значительная ошибка обусловлена отсутствием корректной синхронизации.

Литература

1. *Кочетов И.Д.* Инвариантные параметры поврежденного состояния энергообъекта / И.Д. Кочетов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 164–168.

2. *Кочетов И.Д.* Информационные свойства пассивной модели наблюдаемого энергообъекта / И.Д. Кочетов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 169–173.

3. *Захар-Иткин М.Х.* О фазном и модальном методах расчёта волновых процессов в линиях электропередачи / М.Х. Захар-Иткин // Электричество. – 1971. – № 4. – С. 18–23.

Ф.А. Макашкин, А.О. Ашмарин
(Чебоксары, ООО «Релематика»)

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОРГАНА В ФУНКЦИИ БАВР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Кратковременное нарушение электроснабжения, особенно у ответственных потребителей, может привести к останову технологического процесса и, следовательно, к большим экономическим издержкам. Статистика аварийных режимов работы нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий показывает, что 40–70 % отключений происходит по причине нарушений в работе системы внешнего электроснабжения [1]. При этом срабатывание обычных устройств автоматического ввода резерва (АВР), обеспечивающих переключение на резервный источник за время более

0,090–0,140 с, может привести к экономическому ущербу, связанному с нарушением непрерывности технологических процессов и возникновением гидравлических ударов, вызывающих повреждение оборудования насосных станций, трубопроводов и, как следствие, пожары. Для предотвращения длительных перерывов питания применяются устройства быстрогодействующего автоматического ввода резерва (БАВР).

Для повышения чувствительности и улучшения быстродействия предлагается использовать дифференциальный принцип работы. Применение дифференциального органа рассматривается на примере БАВР для схемы с неявным резервированием (рис. 1, а), в таком случае замер представляет собой разность фазных напряжений секций шин 1 и 2:

$$\Delta U_n = |U_{1\text{сш}_n}| - |U_{2\text{сш}_n}|,$$

где $U_{1\text{сш}_n}$, $U_{2\text{сш}_n}$ – напряжение первой и второй секций шин соответственно, $n = A, B, C$. Следует отметить, что знак замера несёт информацию о том, на какой из секции шин наблюдается большая просадка напряжения. Казалось бы, данный замер очень прост, но он представляет собой огромную информационную ценность, поскольку совмещает в себе как пусковые, так и блокирующие условия, что позволяет в свою очередь разграничить режимы для обеспечения селективности и повышения чувствительности.

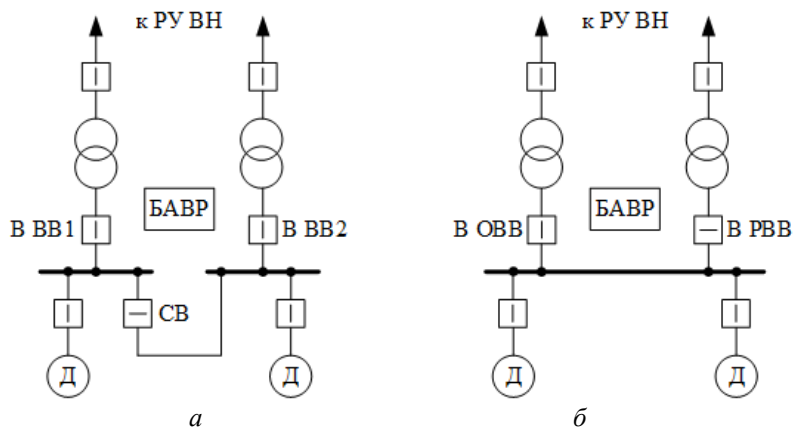


Рис. 1. Типовые схемы применения БАВР:
с неявным резервированием (а); с явным резервированием (б)

Принцип работы дифференциального органа по напряжениям рассматривается на примере энергосистемы на рис. 2.

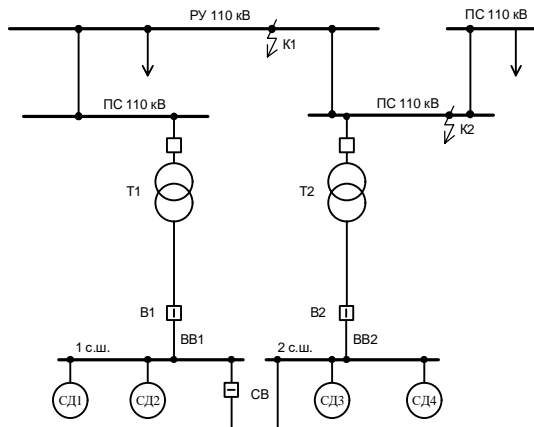


Рис. 2. Модель энергосистемы

При коротком замыкании в общей точке K1 (рис. 2) срабатывание устройства БАПР не произойдет, так как замер стремится к нулю при одновременной просадке напряжений. При КЗ в точке K2 произойдет срабатывание поскольку в этом случае замер будет отличен от нуля.

Улучшение быстродействия в данном случае связано с тем, что можно выставить уставки по разности напряжений в соответствии с допустимым диапазоном колебаний напряжения силовых цепей [2], то есть 20 % от $U_{ном}$, что в свою очередь было невозможно используя стандартный принцип работы БАПР, поскольку это привело бы к неселективной работе.

Литература

1. Гумиров Д.Т. Оценка влияния кратковременных нарушений электроснабжения на работу потребителей нефтедобывающих предприятий и разработка устройства АВР для надёжного их электропитания: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 2010. – 209 с.

2. ОТТ-29.130.00-КТН-119-17 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Устройства быстродействующего автоматического ввода резерва на основе быстродействующих вакуумных выключателей напряжением более 1000 В. Общие технические требования.

ОБУЧАЕМЫЙ МОДУЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛА

Параметрическая идентификация сигнала подразумевает определение параметров заранее известной функции (модели), описывающей сигнал. Исследуемый сигнал, как правило, зашумлен и для определения параметров модели применяют различные методы оптимизации. Выбор подходящего метода оптимизации и его настройка являются нетривиальной задачей, при этом универсальный метод, с достаточным уровнем точности решающий любую задачу, не существует и принципиально не может быть создан [2].

В работе предлагается метод подбора оптимальных настроек алгоритма методами машинного обучения без учителя для целей решения заранее определённого вида задач, реализованный в форме обучаемого модуля параметрической идентификации сигналов, а также алгоритм оптимизации на основе данного модуля.

Обучаемый модуль является основой предлагаемого алгоритма оптимизации, принимающего в качестве входных данных выборку отсчётов наблюдаемого сигнала и возвращающего параметры модели, описывающей сигнал. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

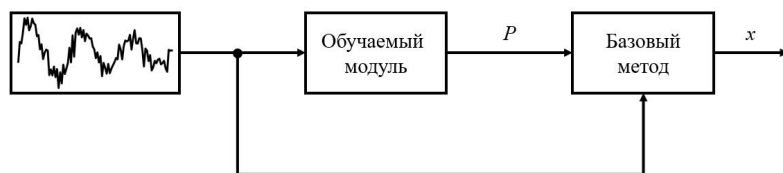


Рис. 1. Блок-схема алгоритма: P – параметры метода;
 x – искомые параметры модели

Начальные приближения x_0 в данном случае выступают параметрами метода.

В качестве базового метода оптимизации в работе применен метод градиентного спуска (МГС), каждая итерация которого описывается выражением

$$x^{[j+1]} = x^{[j]} - \lambda^{[j]} \tilde{\nabla} F(x^{[j]})$$

где $\tilde{\nabla} F$ – градиент функции F ; $\lambda^{[j]}$ – скорость градиентного спуска.

Наиболее часто встречающимися проблемами градиентных методов являются попадание в локальный минимум и медленная сходимость метода. В качестве решения предлагается использовать обучаемый модуль, результатом работы которого является начальный вектор параметров для МГС, при котором в окрестности отображаемой точки, соответствующей этим параметрам, функция выпукла и содержит глобальный минимум.

Модуль будет оптимизировать работу базового алгоритма для сигналов, соответствующих анализируемой модели, в качестве которой использована функция

$$y = f(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + j) + n, \quad (1)$$

где A – амплитуда; δ – коэффициент затухания; ω – частота; φ – начальная фаза, n – аддитивный шум: $n \sim N(0, \sigma^2)$.

На рис. 2, изображен сигнал, определённый функцией (1) и его вид при $n=0$.

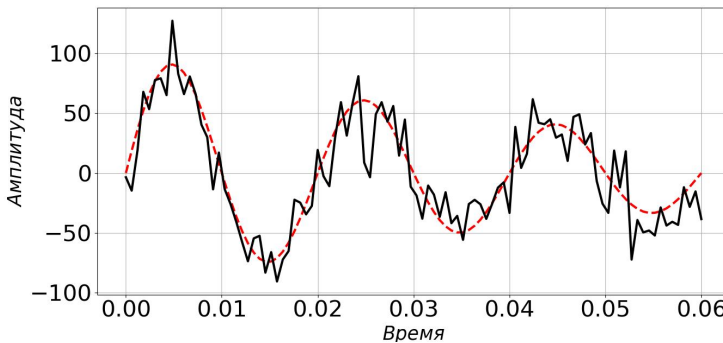


Рис. 2. Рассматриваемые сигналы: без шума (пунктирная линия); зашумленный (сплошная линия)

Целевая функция для задачи оптимизации составлена в соответствии с критерием наименьших квадратов.

$$F = \mathop{\mathring{a}}_t e = \mathop{\mathring{a}}_t f(x) = \mathop{\mathring{a}}_t (y_m - f(A, \delta, \omega, j))^2,$$

где $F: R^d \rightarrow R$; y_m – значения отсчётов сигнала, подлежащего анализу.

Для заданной функции (1) наибольшую сложность представляет поиск начального приближения частоты ω и коэффициента затухания δ . В работе будет рассмотрено обучение модуля именно для этих параметров.

Для решения поставленной задачи целесообразно разделить параметры на наблюдаемые и ненаблюдаемые. Ненаблюдаемые параметры – это параметры модели, которые невозможно измерить напрямую, наблюдаемые параметры – результат математических преобразований отсчётов сигнала y_m .

Обучение модуля представляет собой аппроксимацию функции, обратной M , являющейся моделью наблюдаемых параметров S , определяемой ненаблюдаемыми G :

$$M: R^2 \rightarrow R^2$$

$G = (\omega, \delta)$ – двумерная область ненаблюдаемых параметров, где $\omega \sim u(\omega_{\min}, \omega_{\max})$, $\delta \sim u(\delta_{\min}, \delta_{\max})$ – множества полученных значений из равномерного распределения; $S = (m_1, m_2)$ – двумерная область значений функции M , где m_1 и m_2 – значения наблюдаемых параметров.

Для получения математического описания обучаемого модуля предлагается объединить двумерные пространства G и S в одно четырехмерное и использовать наблюдаемые параметры в качестве аргументов, а ненаблюдаемые параметры – в качестве значений обратных функций (функции коэффициента затухания δ и частоты ω) и на основании полученных результатов подобрать аппроксимирующие функции

$$g_d = \underset{g}{\operatorname{argmin}} \|g(S) - d\|^2, \quad g_w = \underset{g}{\operatorname{argmin}} \|g(S) - w\|^2.$$

На рис. 3 представлены графики обратной функции M^{-1} для коэффициента затухания δ и частоты ω в зависимости от наблюдаемых параметров.

В качестве наблюдаемых переменных могут применяться различные значения, связанные с ненаблюдаемыми. В данной работе использовались действующее значение сигнала m_1 и взвешенные значения спектра сигнала m_2 , при использовании которых обратная функция однозначна.

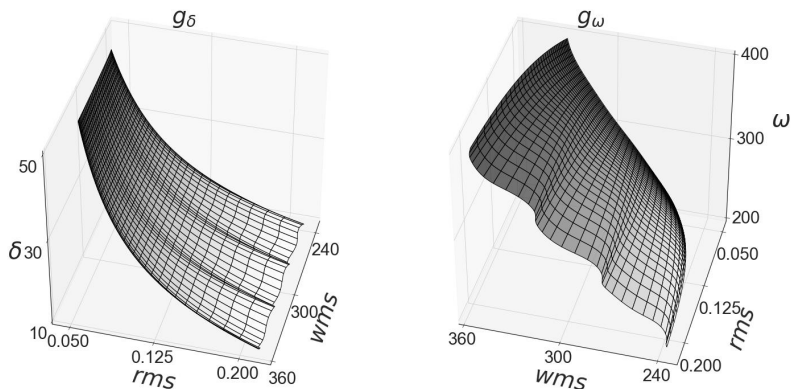


Рис. 3. Аппроксимация функции M_{δ}^{-1} относительно коэффициента затухания δ ; аппроксимация функции M_{ω}^{-1} относительно частоты ω

Результатом работы алгоритма являются начальные приближения, которые позволяют начать оптимизацию целевой функции непосредственно в области глобального минимума, что значительно повышает эффективность метода.

Литература

1. *Simovici D.* Mathematical Analysis For Machine Learning And Data Mining Hardcover / D. Simovici. – 2018. – 968 p.
2. *Wolpert D.H.* No free lunch theorems for optimization / D.H. Wolpert, W.G. Macready // IEEE Transactions on evolutionary computation. – 1997. – Vol. 1, No. 1. – PP. 67–82.
3. *Banerjee S.* Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications Hardcover / S. Banerjee. – 2014. – 276 p.

А.А. Белянин, А.В. Гордеев, И.В. Смирнова, М.Ю. Широкин
(Чебоксары, ООО «Релематика»)

УСТРОЙСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ КАК ИСТОЧНИК ЛОКАЛЬНОГО РЕЖИМА

Развитие принципов алгоритмического моделирования позволило использовать модель энергообъекта для оценки его текущего

состояния, что, в свою очередь, заложило основы метода локализации [1-3]. Согласно указанному методу наличие повреждения в защищаемом объекте определяется неким током, названным локальным. Локальный ток определяется разностью между наблюдаемым током в реальном объекте и оценкой данного тока, полученной с использованием неповрежденной модели защищаемого объекта. Точность воспроизведения реального объекта в виде модели является главным условием получения достоверных результатов.

В проведенных ранее исследованиях показана высокая распознающая способность метода локализации для определения внутренних повреждений трансформатора [3-5]. В тоже время, причины появления локального тока, не связанные с наличием внутреннего повреждения, изучены недостаточно. Одной из таких причин может быть наличие в трансформаторах устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Для оценки уровня локального тока, обусловленного РПН, в программном комплексе MatLab\Simulink была реализована имитационная модель сети с односторонним питанием (рис. 1).

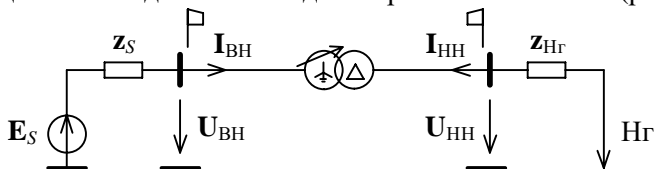


Рис. 1. Схема исследуемой сети

Имитационная модель была построена со следующими допущениями: силовой трансформатор моделировался без учета нелинейной характеристики намагничивания, а работа устройства РПН учитывалась изменением виткового коэффициента трансформации.

Параметры модели следующие: система: $E_{S\text{ ном}} = 123,9 \text{ кВ}$, $z_{S1} = 0,726 + j2,688 \text{ Ом}$, $z_{S0} = 2,820 + j2,799 \text{ Ом}$; двухобмоточный трансформатор типа ТРДЦН-63000/110: $S_{\text{ном}} = 63 \text{ МВА}$, $\pm 9 \times 1,78 \%$, $U_{BH} = 115 \text{ кВ}$, $U_{HH} = 10,5 \text{ кВ}$, $U_k = 10,5 \%$, $P_k = 245 \text{ кВт}$, $\Delta P_x = 59 \text{ кВт}$, $I_x = 0,65 \%$; нагрузка: $S_{Hr} = 0,7 \times S_{\text{ном}} \text{ МВА}$, $\cos \varphi = 0,8$.

При помощи полученной модели был определен уровень локального тока на сторонах ВН и НН для каждого положения устройства РПН (рис. 2). Для этого модель нормального режима была построена без учета устройства РПН. По оси абсцисс отложены положения РПН ($N_{\text{РПН}}$), причем «-9» соответствует крайнему нижнему положению, «0» – среднему положению, а «+9» – крайнему верхнему положению устройства РПН.

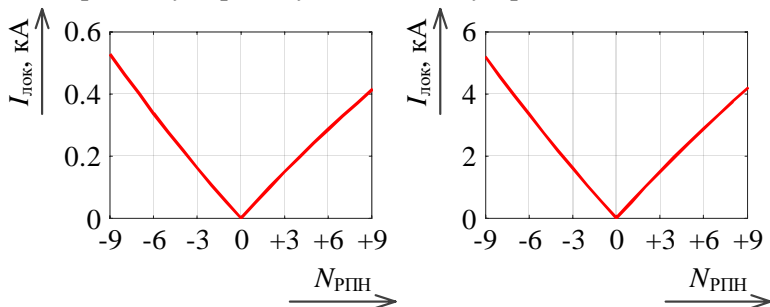


Рис. 2. Зависимость уровня локального тока от положения РПН: на стороне ВН (а); на стороне НН (б)

Из приведенных графиков видно, что минимальный уровень локального тока соответствует среднему положению устройства РПН, т.е. тому положению, в котором РПН не оказывает никакого влияния на трансформатор, что соответствует построенной модели нормального режима. Максимальный же уровень тока соответствует одному из крайних положений устройства РПН и равняется 529 А для стороны ВН и 5205 А для стороны НН.

На рис. 3 и 4 приведено сравнение максимального значения локального тока, вызванного наличием РПН ($I_{\text{локРПН}}$), с локальным током при внутренних повреждениях ($I_{\text{локВКЗ}}$). Для этого при помощи описанной выше имитационной модели были рассмотрены витковые короткие замыкания в трансформаторе со средним положением РПН по ранее изложенной методике [3] через переходное сопротивление $R_f=0,1$ Ом в обмотках фазы А ВН (рис. 3) и НН (рис. 4) при изменении числа замкнувшихся витков (x_f).

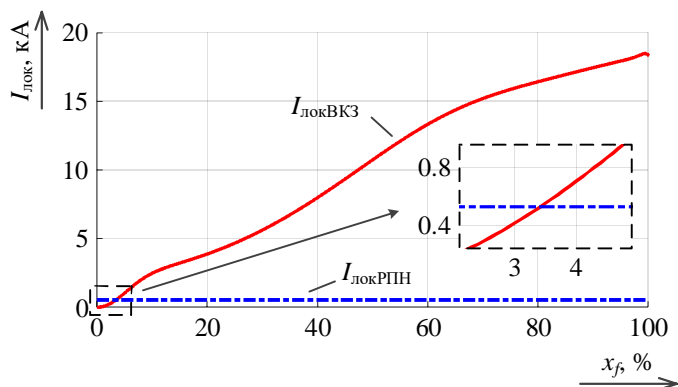


Рис. 3. Локальные токи при ВКЗ фазы А стороны ВН

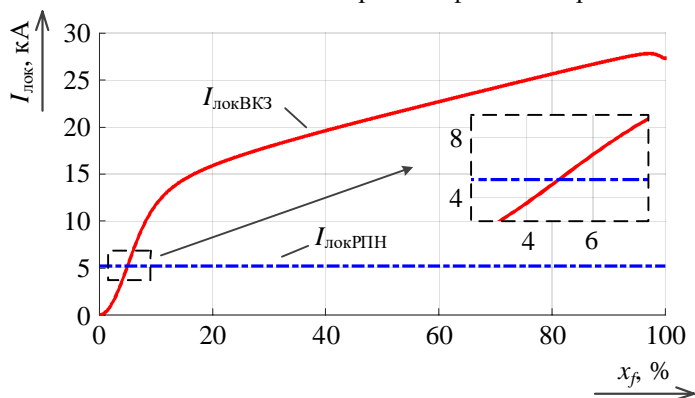


Рис. 4. Локальные токи при ВКЗ фазы А стороны НН

Полученные результаты свидетельствуют о том, что без учета положения РПН в модели нормального режима и при отстройке от него только по уровню локального тока алгоритм, основанный на методе локализации, оказывается нечувствителен к витковым замыканиям с малой долей замкнувшихся витков (в проведенных опытах менее 5 %).

В то же время, влияние устройства РПН может быть исключено путем учета его положения в модели нормального режима. Тем самым все полученные ранее результаты [3–5] остаются справедливыми, но накладываются дополнительные требования к реализации самого алгоритма.

Литература

1. *Лямец Ю.Я.* Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов / Ю.Я. Лямец, П.И. Воронов, А.Б. Атнишкин // *Электричество*. – 2018. – № 9. – С. 29–38.

2. *Белянин А.А.* Адекватность или неадекватность модели как критерии состояния объекта / Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин, П.И. Воронов, М.В. Мартынов // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X Всерос. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 244–246.

3. *Белянин А.А.* Модель силового трансформатора как составная часть алгоритма защиты от витковых замыканий / А.А. Белянин, М.Ю. Широкин // *Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.* – Т. 1. – Казань, 2016. – С. 439–442.

4. *Белянин А.А.* Новый подход к защите трансформатора / А.А. Белянин, М.Ю. Широкин // *Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 67–71.

5. *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 университета*. – 2019. – № 3. – С. 22–28.

А.Н. Никитина, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСТАВОК АЛАР ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНОМ ОТБОРЕ МОЩНОСТИ НА ЛЭП

Селективность действия устройств АЛАР и, следовательно, успешность ликвидации асинхронного режима сети во многом зависят от точности определения местоположения электрического центра качаний (ЭЦК) [1]. Это требование достаточно легко выполняется при защите транзитной электропередачи без отбора

мощности [2, 3]. Совершенно иначе обстоит дело при защите ЛЭП с ответвительными или проходными подстанциями, например ЛЭП 110–220 кВ. Отбираемая мощность на этих подстанциях меняется в широких пределах и недоступна для измерений, что значительно усложняет задачу идентификации появления ЭЦК на части контролируемого участка, находящейся за местом отбора мощности. Очевидно, что неправильный выбор расчётных режимов приводят либо к ложному действию АЛАР при расположении ЭЦК вне контролируемого участка, либо к несрабатыванию при расположении ЭЦК на контролируемом участке.

Задача учета влияния промежуточного отбора мощности на работу устройств АЛАР известна давно, в технической и научной литературе описано множество различных способов её решения. Например, в источнике [4] в различных рабочих и ремонтных схемах предлагается выбирать усредненные характеристики срабатывания АЛАР. Успешность такого подхода во многом зависит от профессиональных качеств специалиста по расчёту режимов, и нередко принятые решения бывают далеки от оптимального.

Авторами предлагается способ учета промежуточного отбора мощности линий 110–220 кВ в устройстве АЛАР, оптимальный по критерию точности определения местоположения ЭЦК на контролируемом участке. Актуальность темы статьи продиктована, прежде всего, широким применением устройств АЛАР в противоаварийной автоматике линий напряжением 110–220 кВ, изобилующих промежуточным отбором мощности.

Рассмотрим выбор оптимальных уставок АЛАР при контроле электропередачи 110–220 кВ с промежуточным отбором мощности (рис. 1).

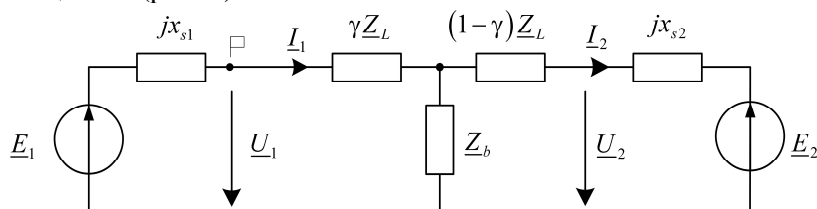


Рис. 1. Расчётная схема электрической сети с промежуточным отбором мощности (место установки устройства АЛАР обозначено флажком, электрическая удаленность точки промежуточного отбора мощности от места установки устройства задается коэффициентом g)

Промежуточный отбор мощности характеризуется неизменной в асинхронном режиме комплексной мощностью \underline{S}_b из диапазона от минимальной $\underline{S}_{b,\min} = S_{b,\min} e^{j\theta_{b,\min}}$ до максимальной $\underline{S}_{b,\max} = S_{b,\max} e^{j\theta_{b,\max}}$ величины [5].

АЛАР на угловом принципе [2] измеряет угол θ_c между напряжением в месте установки \underline{U}_1 и оценкой напряжения в конце контролируемой зоны (в нашем случае на противоположном конце линии)

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - g \underline{Z}_L \underline{I}_1 - (1 - g) \underline{Z}_L \underline{I}_2. \quad (1)$$

В оценке напряжения \underline{U}_2 присутствует неопределённость, связанная с неизвестностью величины нагрузки \underline{Z}_b . Обычно она разрешается путем задания в настройках АЛАР фиксированной мощности нагрузки $\underline{S}_{b,\text{set}}$. Уставочное значение сопротивления нагрузки в АЛАР рассчитывается через номинальное напряжение сети $U_{\text{ном}}$:

$$\underline{Z}_{b,\text{set}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{b,\text{set}}} e^{j\theta_{b,\text{set}}}. \quad (2)$$

Тогда оценка тока на участке линии за промежуточным отбором мощности вычисляется следующим образом:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_{b,\text{set}}} + g \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_{b,\text{set}}} \underline{U}_1 \frac{1}{\underline{Z}_{b,\text{set}}}. \quad (3)$$

Принятое допущение, выраженное в виде оценки (3), приводит к ошибке в оценке напряжения на конце контролируемого участка \underline{U}_2 . Воспользовавшись оценками (1) и (3) и следуя схеме сети (рис. 1), погрешность оценки напряжения \underline{U}_2 можно выразить как

$$\Delta \underline{U}_2 = \underline{U}_2 - \underline{U}_2 = (1 - g) \underline{Z}_L (\underline{U}_1 - g \underline{Z}_L \underline{I}_1) \frac{1}{\underline{Z}_{b,\text{set}}} - \frac{1}{\underline{Z}_b}. \quad (4)$$

Как видно из диаграммы рис. 2, именно сдвиг вектора оценки $\hat{\underline{U}}_2$ относительно вектора напряжения \underline{U}_2 определяет угловую погрешность АЛАР Δd_c , причем её значение зависит от вектора ошибки \underline{DU}_2 и его положения.

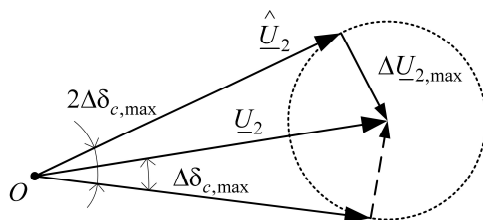


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая связь погрешности в оценке угла d_c с ошибкой \underline{DU}_2 в оценке вектора напряжения \underline{U}_2 . Положение векторов соответствует условию максимальной угловой погрешности АЛАР

Обозначим проводимостей нагрузки как

$$\underline{DY}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} - \frac{1}{\underline{Z}_{b,set}}. \quad (5)$$

Из выражения (4) видно, что погрешность \underline{DU}_2 оценки напряжения на противоположном конце контролируемого участка \underline{U}_2 прямо пропорционально разности \underline{DY}_b в задании уставки проводимости нагрузки в соответствии с формулой (5) и достигает максимального значения $\underline{DU}_{2,max}$ при расположении точки промежуточного отбора мощности около места установки устройства АЛАР, т. е. при $g=0$.

Определим условия оптимальности выбора уставки по мощности промежуточного отбора.

Как следует из выражений (4) и (5), минимальная погрешность оценки напряжения $\hat{\underline{U}}_2$ достигается при

$$\underline{DY}_b = \frac{\underline{DS}_b}{U_{nom}^2} \textcircled{R} \min, \quad (6)$$

где \underline{DS}_b представляет собой модуль разности мощности нагрузки

$$\underline{DS}_b = S_b e^{j\varphi_b} - S_{b,\text{set}} e^{j\varphi_{b,\text{set}}} \quad (7)$$

Для выполнения условия оптимальности (6) необходимо во всем диапазоне изменения мощности промежуточного отбора \underline{S}_b обеспечить минимальность модуля \underline{DS}_b любого из возможных векторов \underline{DS}_b по выражению (7).

Удобно анализировать правила выполнения условия оптимальности (6) на комплексной плоскости с координатными осями P и jQ (рис. 3). Интуитивно ясно, что конец вектора уставки по мощности $\underline{S}_{b,\text{set}}$ должен лежать в центре окружности O_1 , описывающей область изменения мощности нагрузки, очерченной сектором $A-B-C-D$.

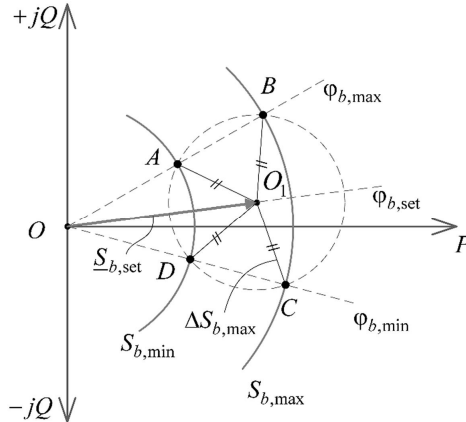


Рис. 3. Правило выбора уставки по мощности $\underline{S}_{b,\text{set}}$

Характеристические параметры уставки будут следующими:
модуль

$$S_{b,\text{set}} = \frac{S_{b,\text{max}} + S_{b,\text{min}}}{2 \cos \frac{j_{b,\text{max}} - j_{b,\text{min}}}{2}} \quad (8)$$

и аргумент

$$j_{b,\text{set}} = \frac{1}{2} (j_{b,\text{max}} + j_{b,\text{min}}). \quad (9)$$

Напомним, уставка по сопротивлению для алгоритмической модели промежуточного отбора мощности в АЛАР определяется по формуле (2) с учетом уставок (8) и (9). Отметим, что минимальная мощность промежуточного отбора может быть равна нулю, т.е. $S_{b,\min} = 0$.

Формулы (8) и (9) определяют оптимальные параметры промежуточного отбора мощности для всех γ . Выбор $\underline{S}_{b,\text{set}}(\underline{Z}_{b,\text{set}})$ не обеспечивает полного исключения погрешности АЛАР, а лишь определяет условие минимальности угловой погрешности.

Литература

1. Беркович М.А. Основы автоматизации энергосистем / М.А. Беркович. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 432 с.

2. Никитина А.Н. Способ ликвидации асинхронного режима при электрическом центре качания в месте установки устройства / А.Н. Никитина, В.С. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 348–350.

3. Елкин С.В. Применение векторных измерений для определения параметров АЛАР / С.В. Елкин, Е.Н. Колобродов, Т.Г. Климова // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2. – С. 28–31.

4. Принципиальные схемы устройств автоматического прекращения асинхронного хода. Типовые материалы для проектирования № 407-0-174.88 / Институт «Энергосетьпроект», 1988.

5. Гоник Я.Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я.Е. Гоник, Я.Е. Иглицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.

М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с изолированной нейтралью однофазное замыкание на землю часто переходит в двойное замыкание [1, 2, 3], которое требует немедленного отключения поврежденной линии электропере-

дачи устройствами релейной защиты. Известно, что задача определения мест повреждения таких замыканий значительно усложняется из-за разнесённости мест замыканий. Кроме того, при разработке устройств определения мест повреждения нужно учитывать особенность распределительных сетей, заключающуюся в их разветвленности и многочисленности. Поэтому с целью повышения рентабельности устройств в электрических системах применяются преимущественно односторонние способы определения мест повреждения на основе параметров аварийного режима [4]. Устройства двустороннего определения мест повреждения не получили широкого применения из-за их дороговизны и необходимости использования оборудования связи и синхронизации устройств.

В настоящем докладе развиваются методы одностороннего определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, основанные на применении алгоритмических моделей защищаемой сети и энергетического критерия для определения мест замыкания [4].

Основные предпосылки. Используются измерения фазных напряжений и линейных токов в месте установки устройства. Расстояния до мест замыканий отсчитываются от места измерения, следовательно, координата места расположения устройства $x = 0$, и все измеряемые устройством электрические величины – фазные напряжения $\underline{U}_n(0)$ и линейные токи $\underline{I}_n(0)$ – имеют нулевой аргумент ($n = A, B, C$). Следуя этим правилам, все рассчитываемые величины далее снабжаются аргументом x , означаящим, что величины рассчитываются на удалении x от места установки устройства; фазное напряжение и ток фазы будут обозначаться как $\underline{U}_n(x)$ и $\underline{I}_n(x)$ соответственно.

В устройстве используется алгоритмическая модель сети. Её отличие от модели сети заключается в представлении ветвей с переходными сопротивлениями в предполагаемых местах замыканий на землю источниками тока, равными токам замыканий соответствующих фаз на землю. Для определённости примем, что замыкания произошли в фазах B и C , тогда это будут источники с токами $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$.

Согласно принципу компенсации в месте измерений (установки устройства) известные напряжения $\underline{U}_n(0)$ можно заме-

нить соответствующими источниками ЭДС. Тогда алгоритмическая модель сети будет иметь вид, представленный на рис. 1.

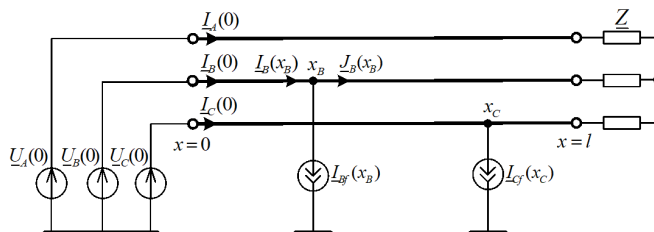


Рис. 1. Алгоритмическая модель сети при двойном замыкании на контролируемой линии электропередачи; известны измеренные величины – фазные напряжения $\underline{U}_n(0)$ и токи фаз $\underline{I}_n(0)$, а также значение нагрузки \underline{Z} ; неизвестны местоположения источников

$\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$, их расположение в сети условно

Общий принцип определения места замыкания. Подразумевается, что сопротивление цепи замыкания имеет резистивный характер [4]. Это важное предположение о характере замыкания физически вполне обоснованно и важно по той причине, что позволяет организовать процесс поиска мест замыканий на основе ясных положений, одно из которых заключается в понимании, что поперечный поток энергии в месте замыкания, направленный от фазного провода к земле, носит чисто диссипативный характер. Другими словами, в месте замыкания мощность в поперечной цепи замыкания носит чисто активный характер, и чтобы определить место замыкания, достаточно найти на поврежденной фазе линии точку, в которой расчётная реактивная мощность будет равна нулю.

На деле это будет выглядеть следующим образом. Устройство, используя измерения напряжений $\underline{U}_n(0)$ и токов фаз $\underline{I}_n(0)$ в алгоритмической модели (рис. 1) для каждой точки линии с координатой x определяет токи источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$, $\underline{I}_{Cf}(x)$ и напряжения $\underline{U}_B(x)$, $\underline{U}_C(x)$ и вычисляет реактивную мощность источников. Следуя общему принципу, за место замыкания на землю на поврежденной фазе принимается точка на линии, в которой целевая функция (в нашем случае реактивная мощность) переходит через нуль (рис. 2).

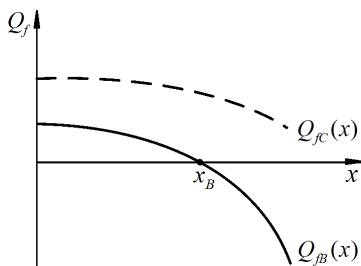


Рис. 2. Изменение целевых функций фаз B и C в зависимости от предполагаемой координаты расположения первого места повреждения; видно, что ближайшее к месту установки замыкания расположено на фазе B на расстоянии x_B

может быть представлена в виде двух моделей: модели неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на её входах измеренных фазных напряжений (рис. 3) и модели сети чисто аварийного режима контролируемого участка (рис. 4) при действии источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$.

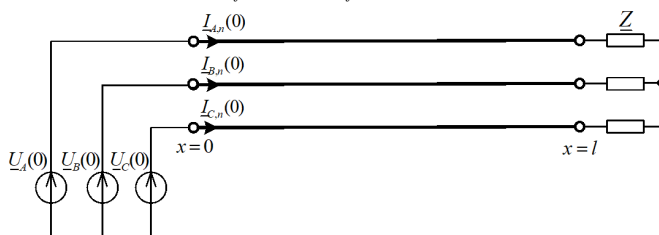


Рис. 3. Модель неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на её входах измеренных фазных напряжений; определяются токи $\underline{I}_{n,n}(0)$ на входе модели

В связи с тем, что чисто аварийные токи можно выразить как сумму токов от источников тока (рис. 4), токи источников тока определяются как

$$\underline{I}_{Bf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(x) - \underline{I}_{B,pf}(x)}{\frac{\dot{e}}{e} \dot{k}_{d,nz}(x) + \frac{k_{d,0}(x)}{2} \frac{\dot{u}}{u} - 1}, \quad \underline{I}_{Cf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(x) - \underline{I}_{C,pf}(x)}{\frac{\dot{e}}{e} \dot{k}_{d,nz}(x) + \frac{k_{d,0}(x)}{2} \frac{\dot{u}}{u} - 1},$$

где $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между ненулевыми составляющими тока источника тока и тока фазы справа от него; $\underline{k}_{d,0}(x)$ – коэффициент связи между составляющими нулевой последовательности тока источника тока и тока фазы справа от него; $\underline{I}_{n,pf}(x) = \underline{I}_n(x) - \underline{I}_{n,n}(x)$ – чисто аварийные токи фаз; $\underline{I}_{n,n}(x)$ – токи фаз в модели неповрежденной сети (рис. 3).

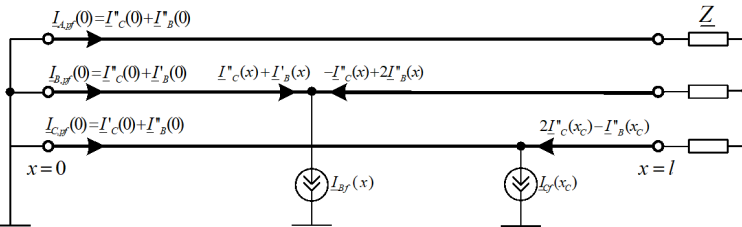


Рис. 4. Модель сети чисто аварийного режима контролируемого участка;

$\underline{I}_B^{\mathcal{C}}$ – ток, протекающий по фазе B от источника тока в фазе B ;

$\underline{I}_C^{\mathcal{C}}$ – ток, протекающий по фазе C от источника тока в фазе C ;

$\underline{I}_B^{\mathcal{C}}$ и $\underline{I}_C^{\mathcal{C}}$ – токи, протекающие по неповрежденной фазе от источников тока в фазах B и C соответственно

Далее, согласно общему принципу, устройство формирует целевые функции для поврежденных фаз. Первому месту замыкания x_h будет соответствовать точка на одной из поврежденных фаз $h = \overline{B, C}$, в которой целевая функция переходит через нуль и координата которой ближе к месту измерения (рис. 2).

Метод определения второго места замыкания на линии. Координата второго места замыкания определяется на основе новой алгоритмической модели сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рис. 5).

Снова, как и при поиске первого места замыкания, новую алгоритмическую модель (рис. 5) можно представить в виде модели неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на её входах фазных напряжений первого места замыкания (рис. 6), и модели сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого

места замыкания (рис. 7) при действии источника тока $\underline{I}_{Cf}(x)$. Поскольку фазные напряжения $\underline{U}_n(x_B)$ в первом месте замыкания рассчитаны, то согласно принципу компенсации, вместо них можно включить соответствующие источники ЭДС.

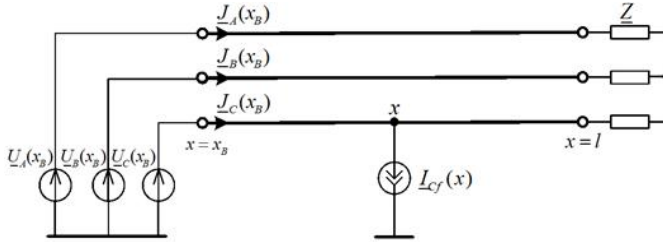


Рис. 5. Новая алгоритмическая модель сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания; $\underline{J}_1(x_B)$ – линейные токи справа от первого места замыкания

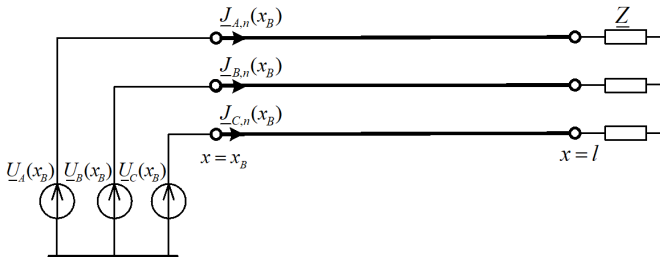


Рис. 6. Модель неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на её входах фазных напряжений первого места замыкания

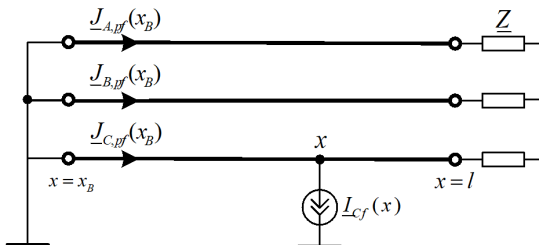


Рис. 7. Модель сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания

Для вычисления целевой функции по уже рассчитанным линейным токам $\underline{J}_n(x_B)$ справа от первого места замыкания и напряжениям в первом месте замыкания $\underline{U}_n(x_B)$ определяется напряжение $\underline{U}_C(x)$ на источнике тока в новой алгоритмической модели сети (рис. 5). Затем из модели сети чисто аварийного режима (рис. 7) рассчитывается ток источника тока

$$\underline{I}_{Cf}(x) = \frac{3\underline{J}_{C,pf,nz}(x)}{2\underline{k}_{d,nz}(x)},$$

где $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока и тока фазы слева от него, определяемый для координаты предполагаемого замыкания x , $\underline{J}_{C,pf,nz}(x)$ – безнулевая составляющая чисто аварийного тока второй поврежденной фазы в предполагаемом месте замыкания. Для определения аварийных составляющих дополнительно используется новая модель неповрежденной сети для контролируемого участка (рис. 6).

За второе место замыкания принимается точка, в которой целевая функция также переходит через нуль.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определить два топографически разнесенных места замыкания из модели сети чисто аварийного режима с использованием целевых функций.

Литература

1. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. *Хакимзянов Э.Ф.* Поведение измерительных органов сопротивления при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях 6–35 кВ / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Исаков // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 1 (14). – С. 18–21.
3. *Хакимзянов Э.Ф.* Измерительный орган сопротивления, выявляющий двойное замыкание на землю в распределительных сетях 6–35 кВ / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Исаков, Р.Г. Мустафин // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 3 (16). – С. 29–35.
4. *Лямец Ю.Я.* Диагностика линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов и др. // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – С. 9–32.

Н.Г. Иванов, Е.С. Воробьев, М.И. Александрова,
В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПРИ КОММУТАЦИИ МАЛОНАГРУЖЕННОЙ ЛЭП С ШУНТИРУЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ*

Режим включения в работу малонагруженной линии электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами характеризуется двумя существенными особенностями тока включения. Во-первых, уровень принужденной составляющей тока включения сравнительно мал из-за малой нагруженности линии, и во-вторых, значительную часть его свободного процесса составляет аperiodическая слагаемая тока шунтирующего реактора с малым коэффициентом затухания. Поэтому ток включения, протекающий через выключатель, состоит преимущественно из аperiodической слагаемой, график которой длительно не имеет точек перехода через нуль. Это утяжеляет условия работы выключателя при отключении линии, форсированного непредвиденным коротким замыканием или неправильным действием релейной защиты сразу после включения линии.

В то же время на режим форсированного отключения ЛЭП сразу после её включения влияет и тип используемого выключателя, что в основном связано с характером процесса гашения дуги.

Так, например, в традиционных воздушных выключателях интенсивность сдувания дуги не зависит от тока. Воздушным выключателям свойственен значительный ток среза, в связи с чем они могут отключать токи, не содержащие точек перехода через нуль. Однако при отключении цепи с индуктивной нагрузкой это свойство воздушных выключателей создаёт опасные для изоляции перенапряжения. Нередко при отключении шунтирующих реакторов перенапряжения вызывают пробой межконтактного промежутка с последующим повреждением воздушного выключателя [1, 2].

* Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15030ГУ/2020).

В то же время, в элегазовых выключателях интенсивность гашения дуги находится в непосредственной зависимости от тока, поэтому при отключении ими малой нагрузки дутьё в камере будет слабым, благодаря чему отключение малых синусоидальных индуктивных токов производится ими без среза тока и, следовательно, перенапряжений. Но в случае отключения мало-нагруженной ЛЭП с шунтирующими реакторами это свойство элегазовых выключателей становится основным недостатком, поскольку при отключении тока с преобладающей апериодической составляющей выключатель теряет способность к гашению дуги и дуга между контактами горит до тех пор, пока в кривой тока не появятся точки перехода через нуль [2, 3]. Длительное горение дуги приводит к оплавлению контактов, вызывает перегрев элегаза и катастрофический рост давления в дугогасительной камере выключателя. Характерными примерами подобных аварий являются аварии на ПС 1150 кВ «Алтайская» (26.02.2007 г.) и ПС 750 кВ «Новобрянская» (13.07.2011 г.) [4].

Принципы безопасной коммутации цепи с шунтирующим реактором довольно подробно рассмотрены в работах [5, 6]. Однако в них рассматриваются режимы, когда реактор перед коммутацией находится в уравновешенном электромагнитном состоянии (переходный процесс отсутствует). В настоящей работе рассматриваются принципы предотвращения опасных для выключателя режимов при форсированном отключении линии сразу же после её включения, основанные на технологии управляемой коммутации [7, 8].

Нас интересуют факторы, приводящие к росту начального значения апериодической составляющей по отношению к амплитуде принужденной составляющей в токе через выключатель при включении малонагруженной двухпроводной линии с шунтирующими реакторами (рис. 1, *а*). Рассматривая процессы в схеме сети будем иметь в виду, что в режиме включения выключатель удаленного конца разомкнут (ток нагрузки в линии отсутствует).

Рассмотрим факторы, влияющие на уровень апериодической составляющей. Внутреннее сопротивление питающей системы обычно мало по сравнению с сопротивлением реактора ($w_0 L_S = w_0 L_{SR}$) и входным сопротивлением всей схемы (рис. 1, *б*) на промышленной частоте $\underline{Z}_m(w_0) = z_{in}(w_0) \mathfrak{D}j(w_0)$.

Поэтому напряжения на входе линии и на реакторе SR $u_s(t)$ практически равны ЭДС системы

$$e_s(t) = u_s(t) = U_s \sin(\omega_0 t + y_s). \quad (1)$$

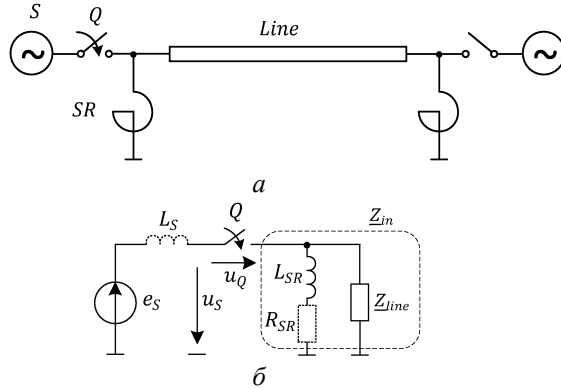


Рис. 1. Схема ЛЭП с шунтирующими реакторами в режиме включения (а) и её схема замещения (б)

Эта особенность схемы, возникающая при включении линии с шунтирующим реактором, позволяет рассматривать процессы в реакторе и линии автономно, хотя при этом через выключатель протекают обе составляющие тока включения – и ток реактора, и ток линии.

Структурно ток включения

$$i_Q(t) = i_f(t) + i_a(t) + \overset{\times}{\underset{q=1}{\mathbf{a}}} i_{d,q}(t) \quad (2)$$

состоит из принужденной составляющей $i_f(t)$ и составляющих свободного процесса – аperiodической составляющей $i_a(t)$ в реакторе SR и суммы высокочастотных затухающих слагаемых линии (последний член уравнения). Аperiodическая составляющая тока через выключатель полностью определяется цепью шунтирующего реактора SR:

$$i_a(t) = \frac{U_s \cos y_s}{\omega_0 L_{SR}} e^{-t/t}, \quad (3)$$

где $t = L_{SR}/R_{SR}$ – постоянная времени, определяемая потерями в реакторе, U_s – амплитуда напряжения питающей системы, ω_0 и y_s – частота и начальная фаза соответственно. Хотя принуж-

денная составляющая тока $i_f(t)$ включает в себя одноименные составляющие токов реактора и линии, её удобно определять через входное сопротивление всей схемы $Z_{in}(w_0)$:

$$i_f(t) = \frac{U_s}{z_{in}(w_0)} \sin[w_0 t + y_s - j(w_0)]. \quad (4)$$

Это удобно при анализе зависимости принужденной составляющей от степени компенсации зарядной мощности k_c и оценивании кратности начального значения аperiodической составляющей тока реактора относительно амплитуды принужденной составляющей тока включения.

Когда коэффициент компенсации зарядной мощности ЛЭП

$$k_c = \frac{2}{w_0^2 L_{sr} C_0 D} \quad (5)$$

приближается к единице, в линии создаются резонансные условия на частоте принужденной составляющей тока линии, поэтому входное сопротивление всей схемы растет ($z_{in}(w_0) \rightarrow \infty$), а принужденный ток уменьшается ($i_f(t) \rightarrow 0$, здесь D – длина линии, C_0 – удельная ёмкость). Поэтому ток включения такой сильно компенсированной линии практически состоит только из аperiodической слагаемой, поскольку высокочастотные слагаемые тока ($i_{d,q}(t)$ в (2)) обычно быстро затухают и имеют существенно меньшую амплитуду, чем аperiodическое слагаемое. Кроме того доля аperiodической составляющей в токе через выключатель становится подавляющей, если момент включения линии оказывается в окрестности точки перехода кривой напряжения через нуль. В связи с этим ток выключателя в течение длительного времени не имеет естественных точек перехода кривой через нуль (рис. 2), что вызывает длительное горение дуги в элегазовых выключателях. Известны случаи, когда между контактами выключателя электрическая дуга горела около 50 с, вызвав впоследствии повреждение выключателя [4].

Гарантированное предупреждение повреждения выключателя при коммутациях ЛЭП с ШР обеспечивается при условии, что начальное значение аperiodической слагаемой тока будет меньше амплитуды принужденной слагаемой. Из уравнения (3) следует, что

этого можно добиться управлением моментом коммутации выключателя таким образом, чтобы включение ЛЭП произошло как можно ближе к точке максимумов напряжения питающей системы (при оперативном включении) или напряжения на контактах выключателя (при повторном включении в цикле АПВ) [3, 9]. Однако это требование противоречит условию обеспечения допустимого уровня перенапряжений на ЛЭП, поскольку её включение в окрестности максимума напряжения приводит к повышению уровня коммутационных перенапряжений [7, 10]. Поэтому при выборе момента включения ЛЭП нужно идти на компромисс, выбирая его между точкой перехода кривой напряжения через нуль и точкой максимума напряжения, чтобы ни коммутационные перенапряжения, ни апериодическая слагаемая тока не представляли опасности для силового оборудования [9].

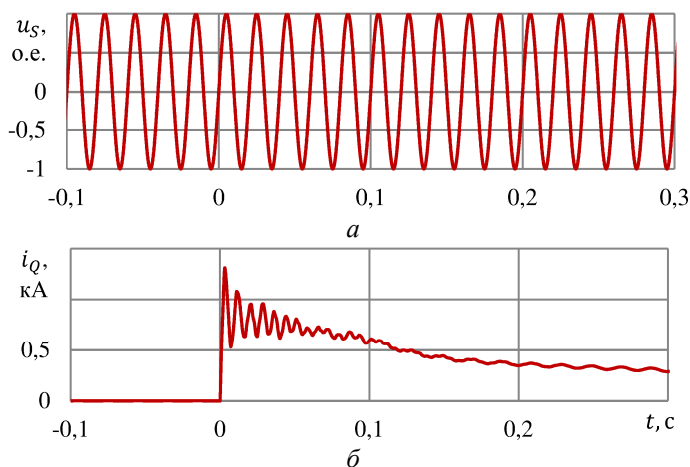


Рис. 2. Напряжение питающей системы (а) и ток через выключатель (б) при включении ЛЭП с ШР в момент перехода кривой напряжения через нуль (номинальное напряжение сети 500 кВ, длина линии 432 км, степень компенсации зарядной мощности $k_c = 0,95$)

Включение ЛЭП в оптимальную фазу $u_{s,opt}$ должно, с одной стороны, предупредить повреждение выключателя, а с другой стороны, обеспечить максимально возможное снижение уровня коммутационных перенапряжений при этих ограничениях. Поэтому предлагается рассматривать задачу выбора момента

включения как **задачу оптимизации уровня коммутационных перенапряжений** с учетом ограничения, вызванного требованием обеспечения безопасности для выключателя. Следовательно, оптимизация уровня перенапряжений предполагает минимизацию фазы напряжения в момент включения $u_s \otimes 0$ [7], а требование к безопасности коммутации будет заключаться в выборе такой фазы включения $u_{s,opt}$, которая обеспечивает появление в токе выключателя перехода через нуль уже на первом периоде его принужденной составляющей.

Для оптимальной фазы коммутации должно выполняться условие

$$\max |i_a(t)| \leq \max |i_f(t)|, \quad (6)$$

которое с учетом (3) и (4) может быть записано в виде неравенства

$$u_{s,opt} \geq \arccos \frac{\dot{e} w_0 L_{SR}}{\ddot{e} z_{in}(w_0)} \frac{\dot{u}}{\ddot{u}}. \quad (7)$$

Как видно из (7), оптимальная фаза включения зависит от соотношения сопротивления шунтирующего реактора $w_0 L_{SR}$ и сопротивления неповрежденной фазы ЛЭП $z_{in}(w_0)$ на частоте питающего напряжения. При аргументе арккосинуса, равном или больше 1, амплитуда принужденной составляющей будет больше начального значения апериодической слагаемой при любой фазе включения. Поэтому фаза включения ЛЭП должна выбираться исходя из условия ограничения перенапряжений, т.е. $u_{s,opt} = 0$.

Сопротивление неповрежденных фаз ЛЭП $z_{in}(w_0)$ главным образом зависит от степени компенсации зарядной мощности k_c , и эта зависимость носит ярко выраженный резонансный характер (рис. 3, а). При этом наличие на линии повреждения, его вид и местоположение практически не влияют на сопротивление $z_{in}(w_0)$ (кривые 1–4 практически совпадают).

Сопротивление шунтирующего реактора $w_0 L_{SR}$ с ростом степени компенсации зарядной мощности k_c очевидным образом снижается (кривая 5 на рис. 3, а), оставаясь больше входного сопротивления неповрежденных фаз ЛЭП $z_{in}(w_0)$ при изменении k_c от 0 до

0,7. Поэтому коммутация линии при такой степени компенсации не представляет угрозы для выключателя и оптимальная фаза включения должна быть принята исходя из условия смягчения перенапряжений и будет равной $U_{S,opt} = 0$ (рис. 3, б).

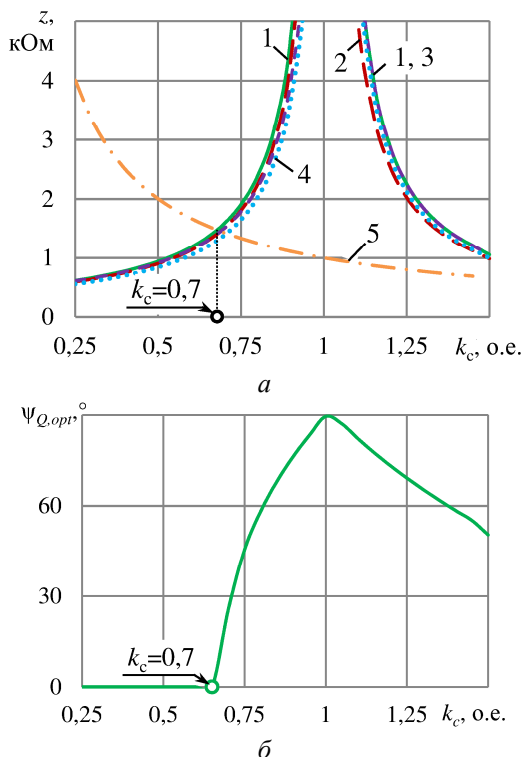


Рис. 3. Входное сопротивление неповрежденной фазы ЛЭП с шунтирующими реакторами $z_{in}(W_0)$ (а) и оптимальная фаза включения ЛЭП $U_{Q,opt}$ (б) при различных значениях коэффициента компенсации зарядной мощности k_c и разных видах повреждений на ЛЭП. Характер изменения $z_{in}(W_0)$ мало зависит от вида повреждения (однофазного (кривая 1), двухфазного (2) и двухфазного на землю (3) коротких замыкания) и аналогичен зависимости сопротивления неповрежденной линии (4). Зависимость оптимальной фазы включения представляет собой результат компромисса требований по безопасности коммутации выключателя и требований по ограничению уровня перенапряжений в сети

При больших коэффициентах компенсации ($k_c > 0,7$) входное сопротивление неповрежденных фаз $z_{in}(w_0)$ начинает преобладать над сопротивлением реактора, что делает коммутацию такой ЛЭП с шунтирующими реакторами опасной для выключателя. Поэтому для снижения уровня апериодической составляющей до безопасно-го уровня должна применяться управляемая коммутация, обеспечивающая включение ЛЭП в оптимальную фазу $U_{S,opt}$. Изменение оптимальной фазы включения $U_{S,opt}$ с ростом компенсирующей мощности шунтирующих реакторов зависит от коэффициента компенсации k_c : до резонансного значения $k_c = 1$ оптимальная фаза $U_{S,opt}$ растет, достигая $\pi/2$ при резонансе в схеме ЛЭП–шунтирующие реакторы, а при $k_c \gg 1$ – снижается (рис. 3, б).

Выводы

1. Опасность повреждения выключателя в процессе непредвиденного отключения ЛЭП с шунтирующими реакторами сразу же после её включения обусловлена подавляющим уровнем апериодической составляющей в токе через выключатель, из-за которого ток через выключатель на стадии его отключения длительное время не имеет точек перехода кривой тока через нуль.

2. Надлежащее снижение уровня апериодической составляющей тока включения возможно благодаря управлению фазой включения линии. Исследования показывают, что для ЛЭП со степенью компенсации зарядной мощности линии выше 0,7 управляемая коммутация является обязательной. Показано, что выбор фазы включения, оптимизирующей уровень коммутационных перенапряжений, должен учитывать отношение сопротивления реактора и входного сопротивления линии.

Литература

1. РД 153-34.3-47.501-2001 Рекомендации по эксплуатации и выбору выключателей, работающих в цепи шунтирующих реакторов. – М.: СПО ОРГРЭС, 2001. – 8 с.

2. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ / И.Е. Наумкин // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 22–32.

3. *Panasetsky D.A.* On the Problem of Shunt Reactor Tripping during Single- and Three-Phase Auto-Reclosing / D.A. Panasetsky, A.B. Osak // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – 2015. – PP. 1–6.

4. *Елифанов А.М.* Возникновение аperiodической составляющей при отключении реактированных ЛЭП и методы борьбы с ней [Электронный ресурс] / А.М. Елифанов, З.Е. Пугаченко, А.А. Коновалов // Электрические сети – 2016: докл, науч.-практ. конф. – Режим доступа: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/5._Pugachenko_Z.E._Vozniknovenie_aperiodicheskoi_sostavljajushchei_pri_otkl_reaktiro_vannykh_LEHP.pdf (дата обращения: 13.04.2020).

5. *Aleksandrova M.I.* A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory / M.I. Aleksandrova, V.A. Naumov, V.I. Antonov, N.G. Ivanov // 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, Russia, 2019. – PP. 1–14.

6. *Александрова М.И.* Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // Электрические станции. – 2020. – № 4. – С. 41–47.

7. *Ivanov N.G.* Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / N.G. Ivanov, V.A. Naumov, V.I. Antonov, E.N. Kadyshchev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 8. – PP. 558–564.

8. *Александрова М.И.* Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 49–54.

9. Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects // CIGRE TB757, Working Group A3.335. – 2019.

10. *Иванов Н.Г.* Анализ переходных процессов в компенсированной ЛЭП СВН в цикле интеллектуального АПВ / Н.Г. Иванов, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: сб. докладов науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 201–211.

Н.Г. Иванов, Е.С. Воробьев, Антонов В.И.,
Наумов В.А., Солдатов А.В.
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

УЧЁТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ)*

Управляемая коммутация является одной из современных технологий смягчения опасных коммутационных перенапряжений и базируется на прецизионном управлении моментом коммутации силового оборудования [1–3]. Снижение уровня перенапряжений при включении оборудования достигается благодаря коммутации его вблизи точки перехода кривой напряжения через нуль, расположенной на интервале времени с минимальным мгновенным значением напряжения на контактах выключателя [3–5]. Однако реальный момент замыкания электрической цепи, как правило, не совпадает с моментом замыкания контактов выключателя из-за электрического пробоя межконтактного промежутка, да и сам момент замыкания контактов может отклоняться от расчётного из-за разброса времени действия механизма привода выключателя. Поэтому выбор расчётного момента замыкания контактов выключателя должен рассматриваться как задача минимизации напряжения на контактах выключателя в момент включения с учётом особенностей электромеханических характеристик выключателя. Решению этой задачи посвящен настоящий доклад.

Изменение электрической прочности межконтактного промежутка выключателя при включении характеризуется скоростью снижения диэлектрической прочности – RDDS (Rate of Decay of Dielectric Strength). Сближение контактов выключателя приводит к снижению электрической прочности межконтактного промежутка. Очевидно, что если напряжение на контактах выключателя превышает величину электрической прочности межконтактного промежут-

* Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15030ГУ/2020).

ка, то происходит его пробой, и ток в цепи начинает течь через дугу ещё до момента замыкания контактов. Эту особенность процесса включения необходимо учитывать при выборе момента коммутации силового оборудования.

Рассмотрим принцип выбора момента коммутации цепи с учётом RDDS. Для придания принципу свойства универсальности примем амплитуду напряжения на контактах выключателя u_Q в качестве базисного значения напряжения. Поэтому далее все напряжения и RDDS приводятся в относительных единицах в базисе амплитуды напряжения u_Q . С этой же целью момент включения отсчитывается в электрических градусах и определяется как фаза включения y_c .

Учитывая, что цепь включения замыкается в момент зажигания дуги, момент коммутации электрической цепи должен рассматриваться как момент превышения абсолютным значением напряжения на контактах выключателя u_Q электрической прочности межконтактного промежутка

$$u_{DS}(y) = | - y RDDS + u_{DS}(0) |, \quad (1)$$

где $y = \omega t$ – текущая фаза напряжения на контактах (рис. 1). Здесь принято, что при сближении контактов выключателя изменение электрической прочности межконтактного промежутка подчиняется линейному закону. Напряжение имеет синусоидальный характер

$$u_Q(y) = \sin y. \quad (2)$$

Тогда для момента коммутации выполняется равенство

$$u_{DS}(y_c) = | u_Q(y_c) |. \quad (3)$$

При $RDDS \geq 1$ электрическая плотность u_{DS} превосходит $|u_Q|$ на всем его полупериоде (рис. 1, а). Поэтому обеспечение коммутации линии или конденсаторной батареи при фазе $y_c = 0$, когда напряжение $u_Q(0) = 0$, и создаются оптимальные условия для коммутации с точки зрения минимизации перенапряжений на ЛЭП или тока включения конденсаторной батареи, не представляет сложности.

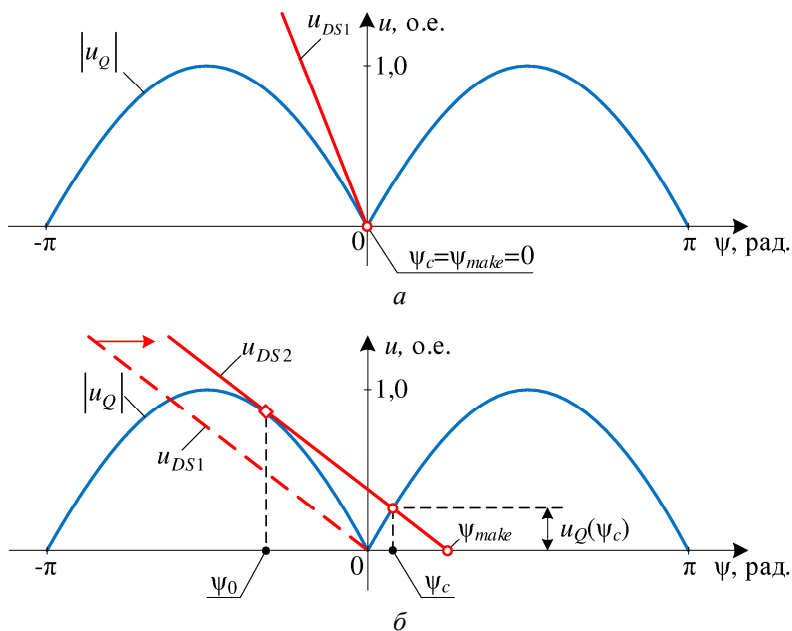


Рис. 1. Иллюстрация выбора оптимального момента замыкания контактов y_{make} выключателя при $RDDS^3 \geq 1$ (а) и $RDDS < 1$ (б) с точки зрения снижения уровня перенапряжений; в случае (а) крутизна линии электрической прочности $u_{DS1} = u_{DS}(y)$ позволяет совместить момент коммутации y_c с моментом замыкания контактов y_{make} ; при невысокой крутизне $u_{DS1} = u_{DS}(y)$ (б) коммутация осуществляется путем смещения линии $u_{DS}(y)$ вправо, и момент коммутации y_c наступает в момент зажигания дуги, т.е. раньше, чем замкнутся контакты в момент y_{make}

Для выключателей с $RDDS < 1$ включение цепи при $y = 0$ в принципе невозможно, поскольку попытка выполнить это условие приведет к появлению на полупериоде $|u_Q|$ интервала, в течение которого напряжение на контактах u_Q превысит её электрическую прочность u_{DS} (линия u_{DS1} на рис. 1, б).

Стратегия управления коммутацией в этом случае будет заключаться в смещении момента включения выключателя на оси

времени вправо (на рис. 1, б показано стрелкой) таким образом, чтобы на текущем полупериоде линия изменения электрической прочности $u_{DS}(y)$ оказалась выше полуволны напряжения $|u_Q|$. Ее минимально возможное положение совпадает с касательной к кривой $u_Q(y)$ в точке с y_0 . Это же положение линии изменения электрической прочности является оптимальным с точки зрения смягчения перенапряжений.

Момент замыкания контактов y_{make} может быть найден из системы уравнений

$$\begin{aligned} u_{DS}(\psi_{make}) &= 0, \\ u_{DS}(\psi_0) &= u_Q(\psi_0), \\ u_{DS}(\psi_0) &= du_Q(\psi_0) / d\psi. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя выражения (1) и (2) в систему (4), получаем фазу замыкания контактов

$$y_{make} = -\arccos(RDDS) - \sqrt{\frac{1}{RDDS^2} - 1}. \quad (5)$$

Фаза коммутации y_c электрической цепи следует из условия (3) с учетом выражения (5) и геометрических соотношений, следующих из рис. 1, б:

$$\sin y_c + y_c RDDS + RDDS \arccos(RDDS) + \sqrt{1 - RDDS^2} = 0.$$

Напряжение на контактах выключателя в момент коммутации, обуславливающее эффективность принятой стратегии управляемой коммутации, определится согласно уравнению (2) как

$$|u_Q(y_c)| = \sin y_c.$$

Выбор оптимальной фазы ψ_{make} замыкания контактов выключателя и определение напряжения на контактах выключателя в момент коммутации $u_Q(\psi_c)$ удобно выполнять графически (рис. 2). Пример графического решения иллюстрирует определение оптимальной фазы ψ_{make} замыкания контактов выключателя и напряжения на контактах выключателя $u_Q(\psi_c)$ для выключателя с $RDDS = 0,5$.

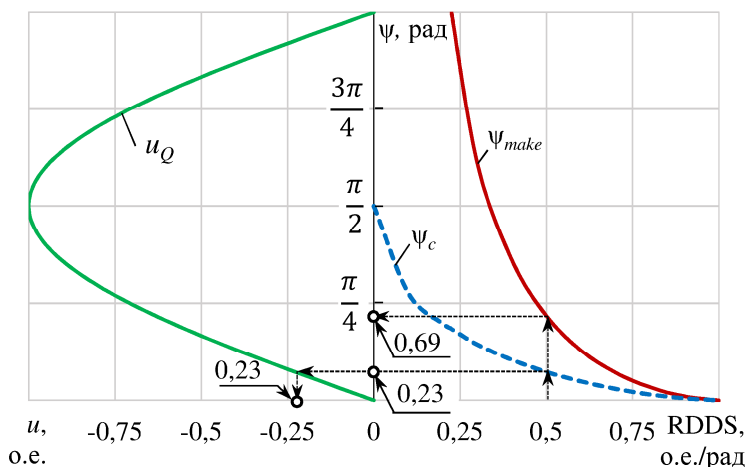


Рис. 2. Определение момента замыкания контактов u_{make} , момента коммутации u_c и величины напряжения на контактах выключателя u_Q в момент коммутации для заданной RDDS

Как видно из рис. 2, снижение RDDS приводит к повышению напряжения в момент коммутации $u_Q(u_c)$ и, следовательно, снижению эффективности управляемой коммутации. При $RDDS < 0,22$ фаза замыкания контактов u_{make} ³ р и управляемое включение становится вовсе невозможным, поскольку линия изменения электрической прочности $u_{DS}(y)$ будет иметь несколько точек пересечения с кривой напряжения на контактах $u_Q(y)$.

Выводы

1. Управляемое включение линии электропередачи (конденсаторной батареи) призвано смягчить перенапряжения (броски тока заряда) за счёт осуществления коммутации в окрестности точки перехода кривой напряжения через нуль. Учитывая, что реальный момент замыкания электрической цепи не совпадает с моментом замыкания контактов выключателя из-за электрического пробоя межконтактного промежутка, необходимо выбор расчётного момента замыкания контактов выключателя осу-

ществлять с учетом скорости изменения электрической прочности контактного промежутка (RDDS).

2. Выключатели со скоростью изменения электрической прочности контактного промежутка, превышающей скорость изменения напряжения ($RDDS > 1$), при любых прочих условиях обеспечивают включение при переходе кривой напряжения через нуль. Для выключателей с электрической прочностью, уступающей скорости изменения напряжения ($RDDS < 1$), момент замыкания контактов выключателя должен лежать на касательной к кривой напряжения, параллельной линии изменения электрической прочности во времени.

Литература

1. *Ivanov N.G. Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / N.G. Ivanov, V.A. Naumov, V.I. Antonov, E.N. Kadyshchev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 8. – PP. 558–564. – DOI: 10.3103/S1068371219080066.*

2. CIGRE WG 13.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers». 1st Part, «ELECTRA», No. 183, April 1999. – PP. 43–73.

3. *Александрова М.И. Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 49–54.*

4. *Александрова М.И. Оптимальные условия управляемого отключения трёхфазного шунтирующего реактора / М.И. Александрова, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // Электрические станции. – 2020. – № 4. – С. 41–47.*

5. *Aleksandrova M.I. A Development of Shunt Reactor Controlled Energizing Theory / M.I. Aleksandrova, V.A. Naumov, V.I. Antonov, N.G. Ivanov // Proceedings – 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2019. – PP. 1–14. – DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958014.*

Н.Г. Иванов, М.И. Александрова, Е.С. Воробьев,
В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АПВ*

Введение

В паузе цикла автоматического повторного включения (АПВ) протяженная ЛЭП с шунтирующими реакторами (ШР) образует высокодобротный колебательный контур, в котором к моменту повторного включения продолжается колебательный разряд распределённой ёмкости ЛЭП через реакторы. Повторное включение «заряженной» линии в произвольный момент времени может привести к опасным для изоляции коммутационным перенапряжениям в сети. Одним из эффективных способов снижения этих перенапряжений является применение технологии интеллектуального АПВ [1, 2, 3]. Идея этой технологии состоит в управлении моментом повторного включения ЛЭП с целью снижения интенсивности электромагнитного переходного процесса, вызывающего перенапряжения.

Теоретические вопросы интеллектуального АПВ подробно рассмотрены в [2] на примере двухпроводной ЛЭП с ШР. В настоящей работе развиваются идеи работы [2] для режима трёхфазного интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с ШР.

Особенности трёхфазного АПВ

Исследование переходных процессов при повторном включении ЛЭП [2] показало, что интенсивность переходного процесса определяется параметрами напряжения на контактах выключателя в момент включения. Это напряжение в паузе АПВ имеет форму биений, и поэтому оптимальной стратегией повторного включения каждой фазы ЛЭП будет включение в момент перехода кривой

* Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15030ГУ/2020).

напряжения на контактах выключателя фазы через нуль вблизи минимума биений (огibaющей) этого напряжения.

Есть ещё одна особенность трёхфазного повторного включения линии. Она заключена в процессах, происходящих при предшествующем АПВ отключении ЛЭП. Необычность этих процессов, вызванных разрядом распределённой ёмкости ЛЭП на шунтирующие реакторы, состоит в несимметричности начальных условия, если отключению предшествует несимметричный режим линии (например, несимметричное короткое замыкание). В этом случае разряд ёмкостей происходит одновременно в схемах всех последовательностей. Поскольку характеристические параметры схем последовательностей различны – параметры схем прямой и обратной последовательности, будучи одинаковыми, отличаются от параметров схемы нулевой последовательности, главным образом из-за разницы в распределённой ёмкости линии, – то комплексные частоты составляющих свободных процессов в этих схемах так же отличаются: частота свободной составляющей нулевой последовательности выше частоты составляющей в схеме прямой последовательности на 4–13 % [4].

Из-за несимметричности напряжения со стороны ЛЭП в момент включения минимумы огibaющих напряжения на контактах выключателя в фазах наступают не одновременно, причем временной интервал между ними может достигать сотен микросекунд. Затягивание процесса включения фаз в цикле АПВ недопустимо по условию сохранения динамической устойчивости и из-за опасности возникновения резонансных перенапряжений в линии в неполнофазных режимах.

Есть ещё один довод в пользу незамедлительного повторного включения остальных фаз ЛЭП сразу же после включения первой фазы. Дело в том, что переходный процесс в линии, возникающий при включении любой из фаз, искажает кривые напряжения ЛЭП в оставшихся фазах. Это нарушает сценарий включения остальных фаз, смещая переходы через нуль кривых напряжений на контактах ещё не включенных выключателей относительно предсказанных в паузе цикла АПВ моментов (рис. 1). Ошибка предсказания растет с увеличением интервала времени между моментами включениями фаз. Попытка учесть влияние переходного процесса от коммутации первой фазы при

предсказании кривых напряжения второй и третьей фазы ЛЭП сильно усложняет процедуру управляемой коммутации, и поэтому разумной стратегией при трёхфазном АПВ считается выбор моментов повторного включения второй и третьей фаз как можно ближе к моменту включения первой фазы [5].

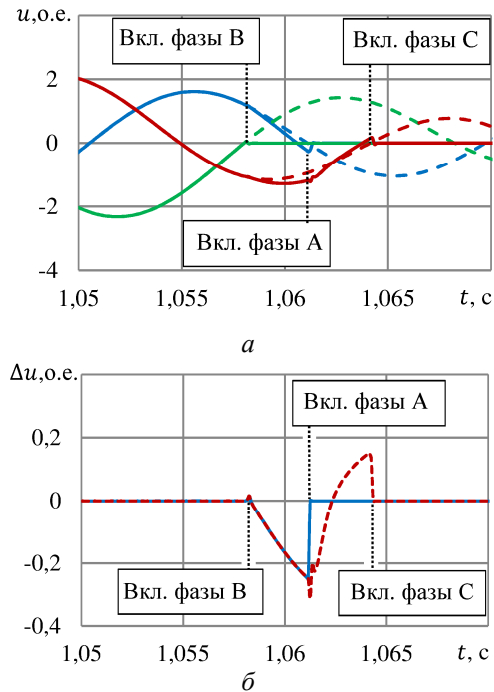


Рис. 1. Предсказанные (пунктирные линии) и фактические (сплошные линии) кривые напряжения на контактах выключателя фаз (а) и ошибки предсказания напряжений фаз А (сплошная линия) и С (пунктирная линия), вызванные поочередным включением фаз (б) в последовательности В-А-С

Стратегия интеллектуального трёхфазного АПВ

Известная стратегия интеллектуального АПВ [5] основана на выборе порядка включения фаз специальным образом. Принимается во внимание, что, с одной стороны, наибольшее отклонение от оптимальности будет при включении третьей фазы, а с другой стороны, – минимальные перенапряжения даже при

отклонении момента включения от оптимального будут в фазе с наименьшим уровнем огибающей напряжения на контактах выключателя. Поэтому сначала по предсказанным кривым напряжений на контактах выключателей фаз находят точку перехода через нуль, соответствующую наименьшей из огибающих всех фаз, и выбирают эту точку за момент включения третьей фазы. За моменты включения двух других фаз выбирают ближайшие моменты перехода соответствующих кривых напряжения на контактах выключателя через нуль, располагающиеся слева на временной оси от момента включения третьей фазы.

Хотя описываемая стратегия позволяет уменьшить взаимное влияние фаз при включении, но в ней не учитываются величины огибающих в первой и во второй включаемых фазах. В то же время величины огибающих в момент включения могут быть значительными, и, согласно [2], даже включение первой и второй фазы строго в точке перехода кривой напряжения на выключателе через нуль всё ещё может вызывать интенсивный переходный процесс и перенапряжения.

Дальнейшее повышение эффективности интеллектуального АПВ невозможно без одновременного учета взаимного влияния фаз при последовательном их включении и уровней огибающей напряжения на контактах выключателя в каждой фазе. В усовершенствованной стратегии трёхфазного интеллектуального АПВ благодаря учету величин огибающей удастся существенно снизить максимальный уровень перенапряжений, особенно в условиях разброса времени действия выключателя.

Результативность новой стратегии исследовалась на модели реальной ЛЭП 500 кВ протяженностью 432 км. Степень компенсации зарядной мощности ЛЭП варьировалась от 0,25 до 1,5, моделировались все виды КЗ.

На ЛЭП, не оснащенной ОПН, уровень коммутационных перенапряжений достигает 3,87 крат от номинального значения, существенно превышая допустимый уровень коммутационных перенапряжений оборудования сети (кривая 1 на рис. 2). ОПН с защитным уровнем 2,0 о.е., установленные по концам линии, позволяют ограничить перенапряжения до 2,38 о.е. (кривая 2).

Технология интеллектуального АПВ демонстрирует лучшую эффективность смягчения перенапряжений на линии по сравнению

с применением для этих же целей ОПН даже в условиях разброса времени действия выключателя (кривые 3, 3', 4 и 4'). Новая стратегия эффективнее стратегии из работы [5] как в случае идеального выключателя (максимальные перенапряжения 1,67 о.е. против 1,75 о.е., кривые 3 и 4 на рис. 2), так и в случае выключателя с разбросом времени действия (максимальные перенапряжения 1,88 о.е. и 2,0 о.е. соответственно, кривые 3' и 4').

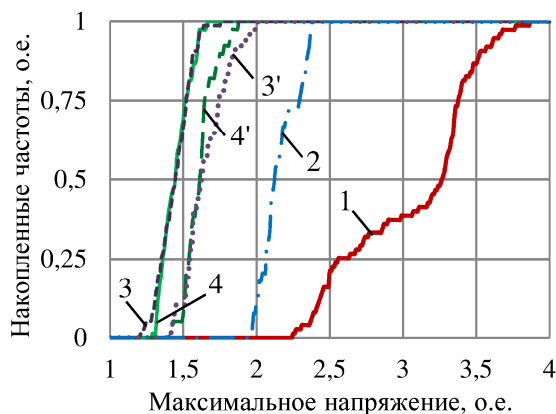


Рис. 2. Кумулятивные кривые максимальных напряжений при трёх-фазном АПВ ЛЭП с ШР (номинальное напряжение 500 кВ, длина 432 км): на максимуме напряжения на контактах выключателя (кривая 1) на ЛЭП без ОПН; на ЛЭП с ОПН с защитным уровнем 2,0 о.е. (кривая 2); при трёхфазном интеллектуальном АПВ по алгоритму из работы [5] (кривые 3 и 3') и по новой стратегии (кривые 4' и 4) с учетом разброса времени действия выключателя в 1 мс и без разброса (номинальное напряжение 500 кВ, длина 432 км)

Выводы

Теоретически лучшей стратегией интеллектуального трёхфазного АПВ ЛЭП с шунтирующими реакторами является последовательное включение фаз в окрестности перехода кривой напряжения включаемой фазы через нуль. Однако включение уже первой фазы приводит к нарушению условий оптимальности включения остальных фаз из-за возникающего переходного процесса в линии. Поэтому при выборе моментов повторного включения фаз в цикле интеллектуального трёхфазного АПВ должен учитываться эффект взаимного влияния фаз при их поочередном включении. Предлага-

емая стратегия трёхфазного интеллектуального АПВ нивелирует влияние переходных процессов от предыдущих коммутации фаз путем выбора момента включения фазы линии с учетом уровней всех огибающих напряжений на контактах выключателей фаз, обеспечивая лучшую эффективность снижения коммутационных перенапряжений даже в случае существенного разброса времени действия выключателя.

Литература

1. Insulation Coordination for UHV AC Systems // CIGRE TB542, Working Group C4.306. June, 2013. – 289 p.

2. *Ivanov N.G.* Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / *Ivanov N.G., et al.* // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 8. – PP. 558–564.

3. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и её приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 333 с.

4. *Беляков Н.Н.* Способ ограничения перенапряжений при повторных включениях линий электропередач / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес // Электричество. – 1975. – № 2. – С. 22–28.

5. *Pilz G.* An Algorithm for Three-Pole Controlled Auto-Reclose of Shunt Compensated Transmission Lines With a Optimization for The Second and Third Pole / *G. Pilz, et al.* // CIGRE A3-115 Session. – 2004. – PP. 1–8.

В.С. Петров, Алексей О. Фёдоров, В.А. Егоров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

СПОСОБ ОДНОСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Все способы пассивного одностороннего волнового определения места повреждения (ВОМП) основаны на фиксации времени t_1 первого прихода на подстанцию волны, вызванной повреждением, и времени t_3 , при котором данная волна, отразив-

шись сначала от шин подстанции, а затем от повреждения, вновь вернется в место установки устройства ВОМП [1, 2] (рисунок). Зная скорость распространения волны по ЛЭП v , можно определить расстояние до повреждения x_f .

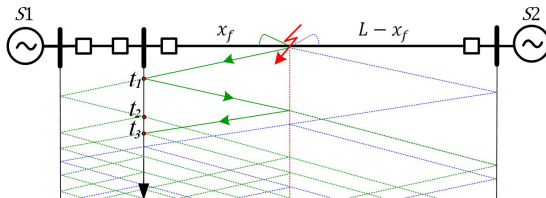


Диаграмма Бьюлей: L – длина ЛЭП

Волна, возникающая в месте КЗ, при распространении по сети претерпевает большое количество отражений в местах неоднородности и затухает (рисунок). Это усложняет выявление среди всей совокупности волн, прибывающих в место установки устройства волны, отраженной от повреждения. Эта проблема решается использованием результатов ОМП менее точных резервных способов ОМП по ПАР [2]: зная погрешность резервного способа можно рассчитать интервал времени, в котором ожидается прибытие волны, отраженной от повреждения, и который подлежит анализу.

На практике погрешность ОМП по ПАР оказывается несколько больше ожидаемой из-за незнания точных длины ЛЭП, её удельных параметров, а также параметров энергосистемы на противоположном конце ЛЭП. Это приводит к невозможности выявления отраженной волны от КЗ и, следовательно, определения места повреждения волновым односторонним методом.

В статье иллюстрируется способ одностороннего ВОМП с повышенной надёжностью выявления отраженной от КЗ волны.

Согласно предлагаемому способу оценка времени прихода волны находится в диапазоне:

$$\hat{t}_{bf} = \frac{\hat{e}2(\hat{x}_f - D_{bf}L/100)}{v}; \frac{2(\hat{x}_f + D_{bf}L/100)}{v} \frac{\dot{u}}{\dot{u}}$$

где \hat{x}_f , D_{bf} – результат расчёта и погрешность ОМП по ПАР.

Требования [3] устанавливают погрешность одностороннего ОМП по ПАР $D_{bf} = 2,5 \%$. Предлагается расширить диапазон

поиска D_{bf} до значения, соответствующего максимальной зоне осмотра, в зависимости от длины ЛЭП [4]: 15 % от длины ЛЭП протяженностью до 50 км; 10 % от длины ЛЭП протяженностью от 50 км до 100 км; 5 % от длины ЛЭП протяженностью от 100 км и более.

Использование расширенного диапазона поиска отраженной от КЗ волны, зависящего от длины ЛЭП, позволяет повысить надёжность одностороннего ВОМП.

Литература

1. *Altay O.* Single end travelling wave fault location on transmission systems using wavelet analysis / O. Altay, E. Gursoy, O. Kalenderli // 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, 2014. – PP. 1–4.

2. *Xinzhou D.* Optimizing solution of fault location / D. Xinzhou, C. Zheng, H. Xuanzhou, et al. // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 2002. – Vol. 3. – PP. 1113–1117.

3. СТО 34.01-4.1-001-2016 Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования.

4. СТО 56947007-29.240.55.159-2013 Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше.

В.В. Карагодин, Н.Е. Пешехонов, Д.В. Рыбаков
(Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЁТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В ближайшей перспективе основным направлением развития систем электроснабжения (СЭС) наземных комплексов (НК) Космических войск, представляющих собой сложные электротехнические системы, видимо станет использование при их создании и модернизации новых цифровых технологий, которые должны придать

СЭС НК черты интеллектуальной электроэнергетической системы. Основанием для такого предположения служит разработанная в 2011 году концепция развития единой энергетической системы (ЕЭС) страны [1]. В ней в качестве приоритетного направления развития электроэнергетической отрасли страны принимается создание Интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), которое аналогично реализации технологии Smart Grid (интеллектуальная сеть), получившей развитие в ряде стран в последние десятилетия.

Центральным звеном развития интеллектуальных электрических сетей можно считать разработку и внедрение цифровых трансформаторных подстанций (ЦТП). Под ЦТП понимается трансформаторная подстанция, оснащенная комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем релейной защиты и автоматики, автоматизированной системы управления трансформаторной подстанцией, регистрацию аварийных событий, учет электроэнергии [2]. Устройства автоматизации ЦТП должны быть подключены к системе диспетчерского управления и сбора информации более высокого уровня. Управление работой ЦТП должно осуществляться в цифровом виде на основе протоколов международной электротехнической комиссии (МЭК), в частности по открытому объектно-ориентированному стандарту МЭК 61850.

Учитывая мнение специалистов [3, 4], можно сформулировать критерии, которым должна соответствовать цифровая трансформаторная подстанция:

- дистанционная наблюдаемость параметров и режимов работы оборудования и систем, необходимых для нормального функционирования без постоянного присутствия оперативного персонала;
- обеспечение телеуправления оборудованием и системами для эксплуатации ЦТП без постоянного присутствия оперативного персонала;
- высокий уровень автоматизации управления оборудованием и системами с применением интеллектуальных систем управления режимами работы оборудования и систем;
- цифровой обмен данными между всеми технологическими системами в едином формате;

- интегрированность в систему управления электрической сетью и наземным комплексом, а также обеспечение цифрового взаимодействия с соответствующими инфраструктурными смежными объектами;

- функциональная и информационная безопасность при цифровизации технологических процессов;

- непрерывный мониторинг состояния основного технологического оборудования и систем в режиме реального времени с передачей необходимого объема цифровых данных, контролируемых параметров и сигналов.

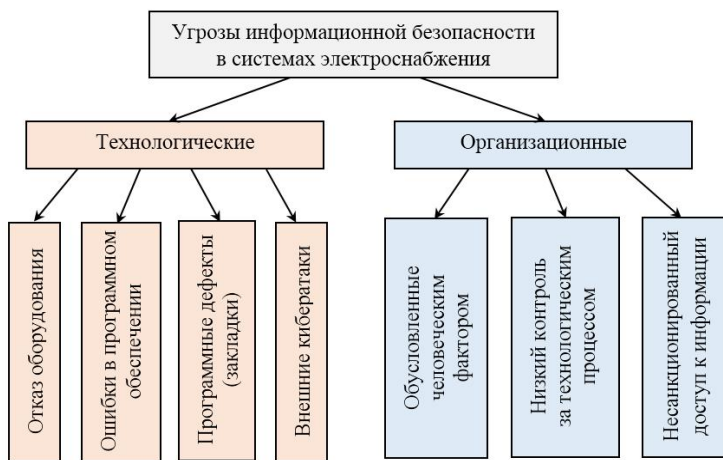
Для обеспечения работы всего комплекса оборудования при создании новых и модернизации существующих трансформаторных подстанций требуются открытые системы связи на основе сетей Ethernet и Internet. Применение открытых систем связи позволяют снизить расходы при построении ЦТП, однако данные системы более уязвимы к кибератакам, чем частные, более закрытые аналоги. Тем не менее, использовать открытую систему связи в интеллектуальных сетях передачи и распределения электрической энергии необходимо.

Учитывая, что объекты Космических войск являются объектами критической информационной инфраструктуры [5], внедрение ЦТП при модернизации и построении СЭС НК с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных показателей, требует принятия мер по обеспечению их информационной безопасности. Применение ЦТП должно сопровождаться оснащением их высокотехнологичными средствами защиты от кибератак в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами Российской Федерации в области информационной безопасности.

Актуальность обеспечения безопасности при эксплуатации систем электроснабжения является очевидной, поскольку любое нарушение их работы влечет за собой риск срыва выполнения наземным комплексом задачи по предназначению, что в современных условиях недопустимо.

Под угрозой информационной безопасности понимается совокупность условий и факторов, создающих опасность нарушения информационной безопасности. Применительно к СЭС НК,

с учетом специфики их построения и эксплуатации, виды угроз информационной безопасности представлены на рисунке.



Виды угроз информационной безопасности в СЭС НК

Для обеспечения надёжности и живучести цифровых трансформаторных подстанций наземных комплексов возможно применение следующих способов защиты:

- разработка и использование закрытых локальных сетей;
- применение современных контроллеров, имеющие узкопрофильную специализацию в отличие от компьютеров;
- дублирование устройств, сетей и каналов связи;
- сегментирование локальной сети с выделением технологического оборудования в отдельный сегмент, к которому каждому пользователю предоставляется особый уровень доступа;
- установка систем с функцией отключения удаленного (дистанционного) управления и перехода на ручное (механическое) управление;
- защита обмена информацией между техническими устройствами с помощью закрытого цифрового ключа;
- функциональное резервирование и декомпозицию исключительно на уровне прикладных электроэнергетических функций, но не на уровне цифровых технологий.

Информационная безопасность будет, в основном, определяться разработанным порядком выполнения предписанных организационных и технических мероприятий и использованием надёжных технических средств защиты.

Важной составляющей при организации информационной безопасности является территориальное расположение электрооборудования. Трансформаторные подстанции и заземлители должны находиться на охраняемой территории наземного комплекса. Должны быть организованы охрана оборудования трансформаторных подстанций и контрольно-пропускной режим, обеспечивающий защиту рабочих мест операторов и сервера от установки несанкционированного программного обеспечения и использования неучтенных носителей информации. Данное требование на объектах Космических войск в силу их специфики можно считать практически реализованным.

Важно при решении задачи по разработке и внедрению ЦТП учитывать информационную безопасность не только как самостоятельную проблему, но также необходимо рассматривать влияние кибербезопасности и надёжности функционирования цифровых подсистем на надёжность электроэнергетической системы в целом.

Переход к цифровым трансформаторным подстанциям позволит: повысить надёжность работы как силового, так и вспомогательного оборудования трансформаторных подстанций СЭС НК; осуществить простую интеграцию распределительных электрических сетей НК в автоматическую систему контроля и учета электроэнергии верхнего уровня; организовать компактность передачи и контроль целостности данных; обеспечить изменение логики работы всего комплекса электрооборудования без изменения схемных решений.

Однако, процесс модернизации распределительных электрических сетей СЭС НК должен быть планомерным и требует комплексного системного подхода. При этом необходимо, прежде всего, определить содержание этого процесса, выработать минимальные и достаточные требования к облику электрических сетей перспективных СЭС НК, имеющих необходимый уровень информационной безопасности.

Литература

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 22.02.2020).

2. МЭК 61850 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.etz-vektor.ru/buklet_MEK_61850.pdf (дата обращения: 20.01.2020).

3. Электрические подстанции: перспективы развития (круглый стол) [Электронный ресурс] / Рынок электротехники. – 2019. – № 3. – Режим доступа: <https://marketelectro.ru/magazine/article/elektricheskie-podstancii-perspektivy-razvitiya-kruglyy-stol> (дата обращения: 25.02.2020).

4. Цифровизация в электроэнергетике: тенденции и перспективы (круглый стол) [Электронный ресурс] / Рынок электротехники. – № 3. – 2019. – Режим доступа: <https://marketelectro.ru/magazine/article> (дата обращения: 25.04.2020).

5. О персональных данных [Электронный ресурс]: Федер. закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. от 29.07.2017). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801 (дата обращения: 14.01.2020).

С.О. Иванов, М.В. Никандров, Л.А. Славутский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

СПОСОБЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ И АНОМАЛИЙ ПРОТОКОЛОВ МЭК 61850

Ключевым элементом цифровизации электроэнергетических подстанций является замена каналов связи на компьютерные сети. Унификация способов передачи информации открыла доступ к системам электроэнергетики широкому кругу злоумышленников, раньше занимавшихся атаками только на информационные системы.

В данной работе рассматриваются слабости промышленных протоколов цифровых подстанций и способы выявления нарушений и аномалий в их сетевом трафике.

Основные протоколы стандарта МЭК-61850 «Сети и системы связи на подстанциях» это Manufacturing Message Specification (MSS) для передачи данных в SCADA-систему и Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) для обмена данными между терминалами. А для обмена данными между устройствами полевого уровня подстанции, предусмотрен протокол Sampled Values (SV).

Наиболее частыми атаками на АСУ ТП являются управление энергетическим объектом и подделка показаний измерительного оборудования и приборов учета [1, 2]. Что объясняется отсутствием контроля целостности трафика и унификацией коммуникационных каналов.

Для борьбы с сетевыми атаками на потоки передачи данных используются системы обнаружения вторжений (СОВ). Однако применение обычных СОВ в цифровых подстанциях затруднено вследствие того, что: во-первых, они работают выше канального уровня, так как большинство современных атак работают на прикладном уровне или используют уязвимости сетевых приложений [3]; во-вторых, используются специфичные протоколы; в-третьих, активный анализ нежелателен или запрещён; в четвёртых, необходима высокая скорость реакции.

Отметим некоторые особенности сетей, которые можно использовать для выявления нарушений и аномалий.

1. Появление в сети уровня процесса или присоединения постороннего трафика протоколов можно считать нарушением.

2. Типичная ситуация: изменение показаний в SV-потоке может привести к возникновению цепочки сигналов GOOSE, после распространения которых новое состояние объекта будет отображено MMS-сообщениями. Следовательно, возникновение ничем не подтверждённых сообщений указывает на аномалию.

3. В работе подстанции можно выявить периоды, когда потребление находится в определённом диапазоне. Следовательно, существует связь между временными метками и значениями. Нарушение этой связи – аномалия.

4. Можно собрать агрегатные параметры сетевого потока: количество пакетов, запросы на определённый адрес, одновременные подключения [4].

Обозначенные выше особенности аномалий в режимах вторичного оборудования электроэнергетики могут достаточно эффективно выявляться методами машинного обучения, в частности, при помощи аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [4]. Для этого может использоваться сам процесс обучения ИНС, поскольку в таких критериях качества обучения, как максимальная ошибка, неизбежно проявляются любые аномалии в информационных потоках.

Литература

1. *Гусев И.* Вопросы информационной безопасности современных систем РЗА [Электронный ресурс] / И. Гусев. – Режим доступа: <http://digital.substation.com/blog/2013/12/16/voprosy-informacionnoj-bezopasnosti-sovremennykh-sistem-rza/> (дата обращения: 21.04.2020).

2. *Назаров И.Г.* Комплекс обеспечения контролируемой деградации системы управления энергообъекта при киберинцидентах / И.Г. Назаров, Д.В. Суслов, М.В. Никандров, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 146–152.

3. Краткий анализ решений в сфере СОВ и разработка нейросетевого детектора аномалий в сетях передачи данных [Электронный ресурс] // Хабрахабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/358200/> (дата обращения: 25.04.2020).

4. *Кощев М.И.* Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики / М.И. Кощев, А.А. Ларюхин, А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 47–58.

А.А. Шемякин, К.Е. Веснин
(Томск, Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Многие компании всё больше зависят от цифровых данных, облачных вычислений и мобильности рабочей силы. С конфи-

циальными бизнес-данными, хранящимися на локальных компьютерах, в корпоративных базах данных и на облачных серверах, взлом данных компаний стал таким же простым, как несанкционированное проникновение к сетям с ограниченным доступом. Большая часть информации о нарушениях данных сосредоточена на периоде с 2005 года по сегодняшний день. Во многом это связано с развитием технологий и распространением электронных данных по всему миру, что делает взлом данных первостепенной проблемой как для предприятий, так и для потребителей. Сегодняшние утечки данных, которые происходят в результате атаки на одну компанию, могут повлиять на миллионы потребителей. «Несмотря на наши опасения и реалии, связанные с использованием данных в Интернете, конфиденциальность данных должна быть достигнута всеми», – пишет «Лаборатория Касперского» [1].

Так, например, в 2014 году Verizon Data Breach Investigation сообщили о 2100 случаях утечки данных, при которых было раскрыто 700 миллионов записей. 21 марта 2019 года Facebook признал, что с 2012 года он должным образом не защищал пароли 600 миллионов пользователей [2]. И это лишь небольшая часть утечек конфиденциальных данных. В связи с этим Всемирный экономический форум признал кибератаки как одну из пяти основных угроз глобальной стабильности.

В связи с постоянно растущим числом угроз безопасности для больших и малых предприятий и личной безопасности защита и предотвращение нарушений данных продвинулись соответственно. Современные решения, которые обеспечивают защиту данных, дают хорошие показатели, но их всегда можно улучшить. Таким образом, защита данных стала одним из наиболее важных приоритетов для бизнеса во всем мире. Именно здесь блокчейн можно использовать как сильного конкурента облачным и серверным платформам.

Блокчейн использует шифрование с использованием открытого и приватного ключей. Пользователь также может сохранить криптографическую подпись документа в блокчейне, что даст гарантии того, что файл не был изменен. Так как данная технология является децентрализованной базой данных, пользователи всегда имеют

возможность проверить подписи файлов всех регистров и узлов. Если же злоумышленник попытается выполнить любые действия с записью, подпись будет считаться недействительной.

Как и было сказано ранее, данная технология является децентрализованной, то есть не существует одного единого центра со всеми данными. Данное свойство делает эту систему более безопасной, так как вместо того, чтобы полагаться на центральный сервер, блокчейн использует протоколы по сети узлов, чтобы производить операции с данными. Так как данные хранятся на большом количестве компьютерных систем, данные будут сохранены даже в том случае, если произойдёт сбой во множестве других компьютеров, пока их общий процент не достигает 50.

Поскольку блокчейн это цепочка блоков, то эти блоки не могут быть изменены с одного компьютера. Они представляют собой децентрализованные и распределённые регистры по одноранговым (P2P) сетям, которые постоянно обновляются и синхронизируются. Каждый блок связан со всеми блоками до и после него. В то время как злоумышленники могут проникнуть в традиционные сети, найти все данные в одном месте и выполнить операции в своих целях при использовании блокчейна становится затруднительным.

Таким образом, можно сделать вывод, что технология блокчейн обладает множеством положительных свойств в качестве альтернативы имеющимся облачным и серверным платформам. Но не стоит забывать о том, что технология не освоена до конца, в том числе, не известны все изъяны данной технологии. С каждым днём появляются новые стартапы с привлечением блокчейна, поэтому не стоит избегать её использования в защите данных.

Литература

1. 10 советов по защите данных в Интернете / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/blog/privacy-ten-tips-2018/20898/> (дата обращения: 03.04.2020).
2. 107 Must-Know Data Breach Statistics for 2020/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.varonis.com/blog/data-breach-statistics/> (дата обращения: 14.04.2020).

В.А. Данилов, К.Р. Валиуллин
(Оренбург, Оренбургский государственный университет)

ВЛИЯНИЕ ГОЛОЛЁДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Образование гололёдно-изморозевых отложений (ГИО) на проводах ЛЭП ухудшает условия передачи сигналов по высокочастотному тракту защит. При этом не только изменяется нагрузка на провод, но снижается скорость распространения сигнал и увеличивается его затухание [1]. Образование гололеда влечет за собой увеличение диэлектрической проницаемости и волнового сопротивления. Все изменения вышеописанных характеристик приводят к ухудшению передачи сигнала.

В работе [3] показано, что при наличии ГИО коэффициент затухания модальной составляющей возрастает на 0,255 дБ/км, а скорость распространения электромагнитных волн падает на 23,76 км/с. С увеличением частоты искажение сигнала растёт. Для защит, использующих в своём составе ВЧ-тракт, это может приводить к увеличению времени срабатывания защиты, либо неселективным срабатываниям.

Для анализа отказов ВЧ тракта релейной защиты и автоматики при образовании гололеда предлагается провести имитационное моделирование ЛЭП 110 кВ и ВЧ тракта.

Для проведения моделирования в среде Simulink параметры линии были приведены к значениям, требуемым для составления модели (табл. 1).

Таблица 1
Параметры линии, принятые для моделирования

Наименование линии	R_0 , Ом/км	L_0 , Г/км	R_1 , Ом/км	L_1 , Г/км	Диаметр провода, мм
ПС КС 16 - ПС Шильдинская	0,299	$5,58 \times 10^{-3}$	0,428	$3,22 \times 10^{-3}$	18,8

С учетом рассчитанных параметров была составлена имитационная модель ЛЭП (рис. 1).

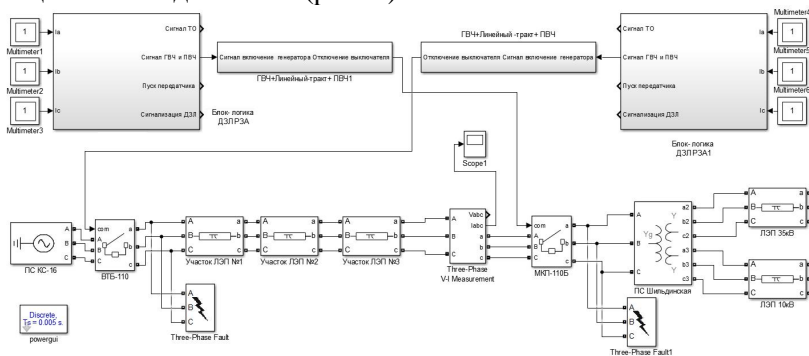


Рис. 1. Общая модель участка энергосистемы с блоками ВЧ-тракта и РЗиА для линии ПС КС-16 ПС Шильдинская

Разработанная модель представляет собой совокупность блоков: источника питания; блоков линии электропередач; высоковольтных выключателей; блоков короткого замыкания; трансформатора и линий электропередач низшего напряжения.

Адекватность модели линии электропередач подтверждена результатами сравнения токов короткого замыкания, полученных в результате моделирования, и токов КЗ, рассчитанных в АРМ ЦСРЗА Оренбургэнерго: погрешность модели не превышает 14 %.

Помимо описанных выше элементов в состав модели входят блоки логики дистанционной защиты линии РЗиА (рис. 2) и блоки ВЧ-обработки.

Блок ВЧ-обработки включает в себя: генератор ВЧ сигнала; линейный тракт с идентичными параметрами ЛЭП; приёмник ВЧ сигнала.

Генератором ВЧ-сигнала выступает блок волнового сигнала из библиотеки SimRF. При коротком замыкании передатчик вводится в работу и генерирует сигнал установленного значения.

Линейный тракт (рис. 3) с соответствующими параметрами ЛЭП моделирует одну фазу линии с задаваемыми параметрами.

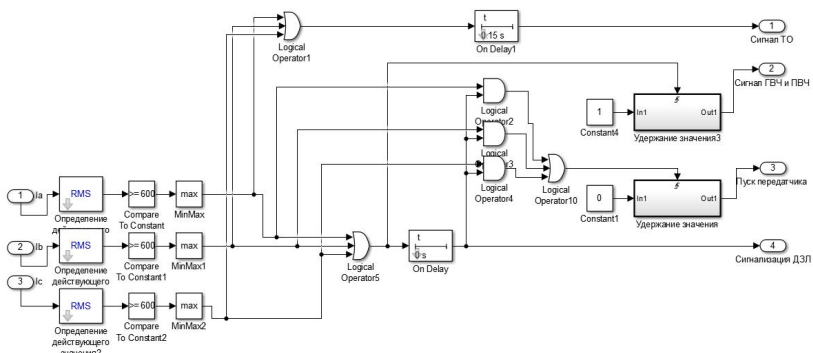


Рис. 2. Блок логики РЗА

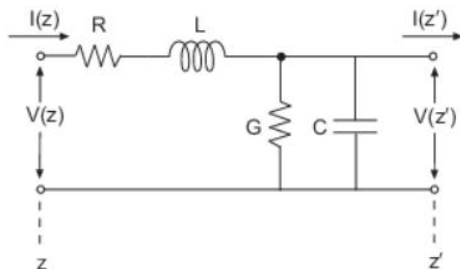


Рис. 3. Схема линейного тракта

Ёмкость C , указанная на схеме, – это ёмкость линии относительно земли. В случае образования гололёдных отложений данная ёмкость увеличивается и искажает сигнал. Указанная ёмкость и другие параметры линейного тракта были рассчитаны по формулам, рассмотренным в [4], и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры линейного тракта

ЛЭП ПС КС-16 – ПС Шильдинская		
	Участок без ГИО	Участок при ГИО
R_l , Ом/км	0,441	0,441
L_l , Г/км	332×10^{-5}	332×10^{-5}
C_l , Ф/км	$8,06 \times 10^{-9}$	$9,729 \times 10^{-7}$
l , км	16	1,447
f , кГц	330	330

Приёмником сигнала является узел сравнения сигнала по току с расчётным значением для конкретной линии. В момент получения сигнала с линейного тракта он выдает сигнал на отключение в случае отклонения параметров от нормируемых.

С использованием разработанной модели было проведено моделирование короткого замыкания на ЛЭП ПС КС-16 – ПС Шильдинская (рис. 4 и 5).



Рис. 4. Момент срабатывания релейной защиты при отсутствии ГИО в линии

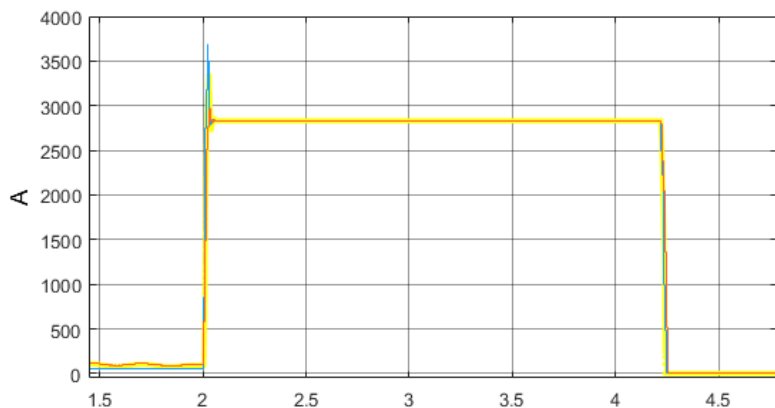


Рис. 5. Момент срабатывания релейной защиты при ГИО в линии

Для всех случаев короткое замыкание происходит через 2 с от начала моделирования, чтобы избежать наложения токов намагничивания от трансформатора в момент включения. На осциллограммах приведено изменение действующего значения тока КЗ при коротком замыкании и срабатывании защиты.

Срабатывание защиты на рис. 4 происходит через 0,525 с с момента возникновения короткого замыкания, что удовлетворяет требованию быстродействия защиты.

Срабатывание защиты на рис. 5 происходит через 2,235 с с момента возникновения короткого замыкания, что не удовлетворяет требованию быстродействия релейной защиты.

Проведенные исследования ещё раз подтверждают опасность образования гололёдно-изморозевых отложений на линии электропередач. Основная опасность заключается в том, что гололед сильно загроубляет временные характеристики срабатывания защит. В некоторых случаях это может привести к непредсказуемым последствиям.

Литература

1. *Касимов В.А.* Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2019. – 390 с.

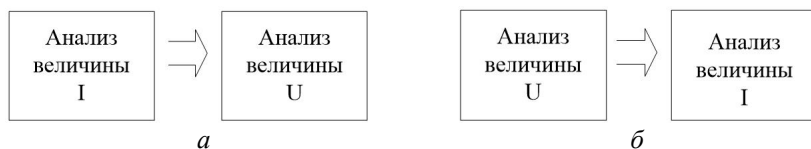
2. *Хакимзянов Э.Ф.* Математическая модель задержки и затухания высокочастотных сигналов в линиях электропередачи с гололёдными образованиями / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Минулин, Р.Г. Мустафин // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 2(22). – С. 24–28.

3. *Шкарин Ю.П.* Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи: брошюра / Ю.П. Шкарин. – М.: Энергетик, 2001. – 98 с.

4. *Хакимзянов Э.Ф.* Расчёт влияния гололёдных образований на условия распространения импульсных сигналов по проводам линий электропередач / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Минулин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 9-10. – С. 167–172.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ ОТ ИНДИКАТОРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЛИЧИЯ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Индикаторы короткого замыкания (ИКЗ) применяются в сетях с изолированной нейтралью и оснащены индуктивными датчиками тока и ёмкостными датчиками напряжения [Лит.]. Установка устройства на каждый провод позволяет оценивать параметры режима каждой фазы, в отличие от стандартных схем установки только 2-х трансформаторов тока, которые чаще всего используются на подстанциях. Этой информации достаточно для определения наличия однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) на участке. При коротком замыкании на линии электропередачи превышаются уставки по току и понижается напряжение на проводе (рисунок, *а*), прибор срабатывает: загораются светодиоды и передается сигнал на диспетчерский пункт (ДП). При ОЗЗ ток не возрастает на большую величину, поэтому индикатор не срабатывает. Поэтому необходимо изменить последовательность определения нарушения нормального режима (рисунок, *б*). Сначала анализируется напряжение на проводе, а потом ток, протекающий по нему.



Последовательность определения вида аварии

Пусть на фазе А разрушился изолятор и провод упал на траверсу, тем самым замкнув фазу на землю. При ОЗЗ в сети происходит снижение напряжения $U_{\text{Аф}}$ до 0 (в идеальном случае), а на целых фазах оно увеличивается до линейного ($U_{\text{Вф}} = U_{\text{Сф}} = U_{\text{л}}$). По методу наложения ток, протекающий по проводу поврежденной фазы, равен сумме тока нагрузки и ёмкостных токов на землю поврежденных фаз (тока утечки) ($I_{\text{А}} = I_{\text{Анг}} = I_{\text{Вем-ф-з}} = I_{\text{Сем-ф-з}}$), а в неповрежденных продолжает протекать ток нагрузки и ёмкостные токи, которые замыкаются по воздушному промежутку.

Следовательно, возможно несколько вариантов условий начала передачи сигнала:

1. При снижении фазного напряжения $U_{\text{Аф}} \leq U_{\text{уст}}$;
2. При повышении фазного напряжения $U_{\text{Вф}} (U_{\text{Сф}}) \geq U_{\text{уст}}$.

Первый вариант наиболее предпочтителен, т.к. для второго необходимо анализировать оба напряжения, чтобы не было ложных срабатываний при ударах молнии.

С началом срабатывания ИКЗ посылает показания на ДП, где в автоматическом режиме происходит анализ токов. При этом наличие ОЗЗ на участке может быть определено по двум условиям:

- по разности тока в начале и в конце участка $I_1 - I_2 > I_{\text{уст}}$;
- по величине составляющей тока утечки на втором комплекте ИКЗ и её отсутствию на первом: $I_{\text{ут}2} > 0, I_{\text{ут}1} = 0$.

Выбор необходимого условия определяется по анализу конфигурации сети (степень разветвленности) и места установки (чем точка ИКЗ дальше от подстанции, тем меньше будет разность токов).

В данном докладе был рассмотрен метод применения индикаторов короткого замыкания для определения наличия однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Также были отражены возможные варианты анализа параметров режима для работы микропроцессорных систем.

Литература

Индикатор короткого замыкания ИКЗ-В21М, ИКЗ-В22М, ИКЗ-В23М 6-35 кВ. Техническое описание / ООО МНПП «Антракс». – Фрядино, 2014. – 15 с.

Т.В. Александрова, А.М. Маслов, А.С. Шалимов
(Чебоксары, НПП «Динамика»)

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЁМКОСТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНО-УПРАВЛЯЕМОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

В сетях высокого и сверхвысокого напряжения, как правило, применяются ёмкостные измерительные трансформаторы напряжения (ЕТН). При электромагнитных переходных процес-

сах в энергосистеме вторичное напряжение ЕТН существенно искажается с учётом свободных составляющих, обусловленных накоплением энергии в элементах ЕТН [1]. Алгоритмы быстродействующих устройств релейной защиты должны обеспечивать правильную работу в аварийных режимах, с учётом особенностей ЕТН, что предполагает соответствующее тестирование при аттестационных и эксплуатационных проверках.

Компьютерно-управляемые испытательные системы типа [2] позволяют выполнять тестирование сложных устройств релейной защиты и автоматики с учётом переходных процессов в первичных преобразователях – измерительных трансформаторах тока и напряжения. Имитация соответствующих режимов может быть обеспечена внутренними математическими моделями испытательных устройств. Далее рассматриваются основные аналитические выражения реализованной модели ЕТН [3, 4] (рис. 1).

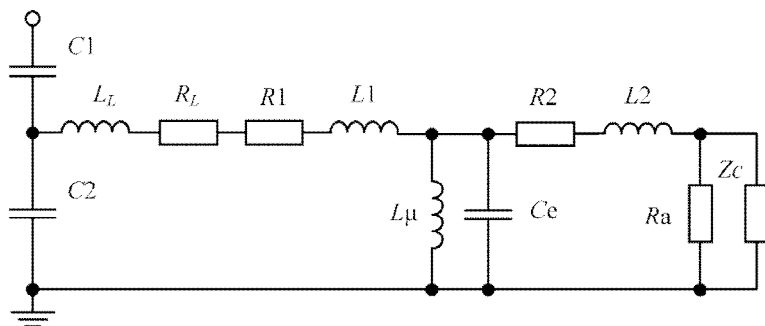


Рис. 1. Эквивалентная схема ЕТН в соответствии с МЭК 60255-121

Для определения переходных характеристик ЕТН в общем случае необходимо решить систему дифференциальных уравнений [5]. Решение обыкновенного линейного дифференциального уравнения состоит из общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения. При этом частное решение позволяет определить принужденную составляющую характеристики (тока или напряжения), а общее решение однородного уравнения – свободную составляющую характеристики [6]. Принужденный режим в данном случае соответствует установившемуся режиму при синусоидальном источнике питания. Для упрощения применим операторный метод расчётов переходных процессов [7].

Данный метод расчёта заключается в следующем:

- 1) определении независимых начальных условий – токов в индуктивностях $i_L(0)$ и напряжений на ёмкостях $u_C(0)$ в момент начала переходного процесса (в соответствии с законами коммутации электрической цепи эти параметры не могут измениться скачком);
- 2) составлении операторной схемы замещения;
- 3) решении полученной схемы любым известным методом относительно выбранной переменной и нахождении изображения этой функции в виде отношения двух полиномов относительно p ;
- 4) определении оригинала для полученной рациональной функции.

В результате всех вычислений получается выражение, описывающее переходный процесс в ЕТН. В обобщенной форме оно выглядит следующим образом:

$$u(t) = \underset{i=1}{\overset{m}{\overset{\circ}{\sum}}} A_i e^{p_i t} + \underset{k=1}{\overset{n}{\overset{\circ}{\sum}}} A_k e^{-d_k t} \sin(\omega_k t + \varphi_k),$$

где m – количество вещественных корней p_i характеристического многочлена; n – количество пар комплексно-сопряжённых корней вида $-\delta_k \pm j\omega_k$ характеристического многочлена; A_i и A_k – амплитуды составляющих напряжения вторичной цепи; ω_k и φ_k – частота и фазовый сдвиг составляющей.

Таким образом, переходный процесс в ЕТН определяется параметрами схемы замещения, которые задают свободные составляющие (затухающие экспоненциальные функции), и синусоидальным напряжением на входе трансформатора, которое задает принужденную составляющую.

В качестве примера рассмотрим частный случай – КЗ на шинах подстанции. До начала переходного процесса на входе ЕТН номинальное напряжение ($U_1 = 500$ кВ), на выходе $U_2 = 100$ В. При снижении напряжения на входе трансформатора с номинального до нуля, изображение напряжения на выходе ЕТН:

$$U_2(p) = \frac{(1/K)(569,6p^4 + 1,1 \times 10^7 p^3 + 6,66 \times 10^7 p^2 + 1,1 \times 10^{12} p + 10^{12})}{1,8p^5 + 2,5 \times 10^3 p^4 + 3,6 \times 10^5 p^3 + 2,5 \times 10^8 p^2 + 1,8 \times 10^{10} p + 1,63 \times 10^{10}},$$

где $K = 194$ – коэффициент эквивалентности промежуточного трансформатора [4]. Многочлен в знаменателе данного выражения – характеристический многочлен исследуемой электрической цепи. Его корни определяют характер переходного процесса.

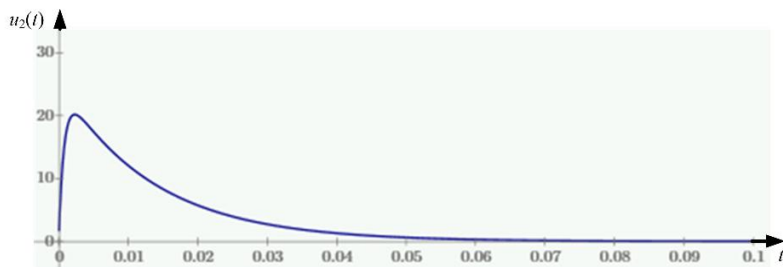


Рис. 2. Переходный процесс $u_2(t)$ при $U_1 = 0$ кВ
и угле возникновения повреждения 0°

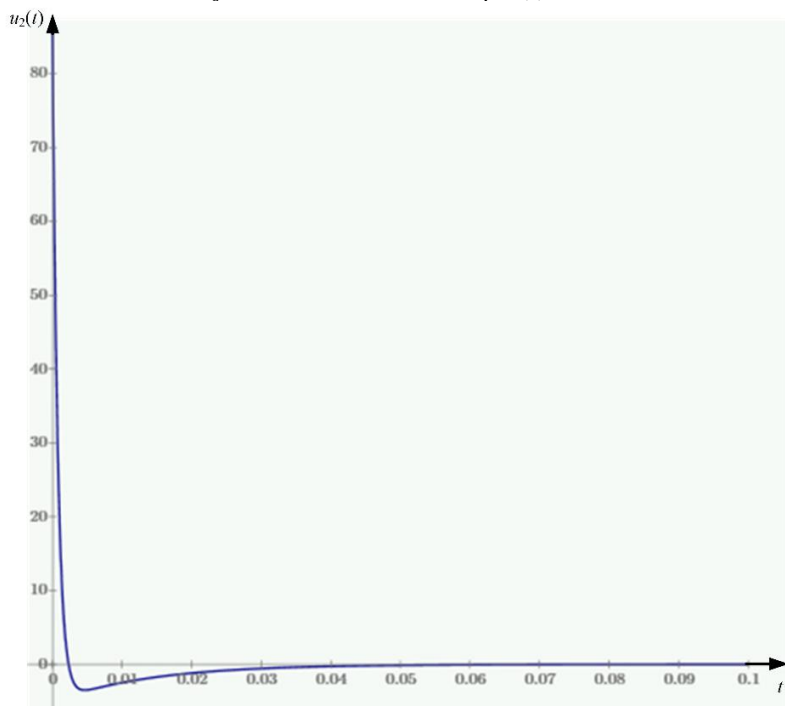


Рис. 3. Переходный процесс $u_2(t)$ при $U_1 = 0$ кВ
и угле возникновения повреждения 90°

Применим обратное преобразование Лапласа к выражению и найдем оригинал интересующей нас характеристики – напряжение на выходе ЕТН в зависимости от времени:

$$u_2(t) = -23,35e^{-1320t} + 25,31e^{-74,16t} + 0,00183e^{-0,94t}.$$

Проведем аналогичные расчёты для угла возникновения повреждения 90° . Получим изображение зависимости:

$$U_2(p) = \frac{(1/K) 3 \times 10^4 p^4 + 2,3 \times 10^4 p^3 + 2,98 \times 10^9 p^2 + 2 \times 10^9 p - 10^{10}}{1,8 p^5 + 2,5 \times 10^3 p^4 + 3,6 \times 10^5 p^3 + 2,5 \times 10^8 p^2 + 1,8 \times 10^{10} p + 1,63 \times 10^{10}},$$

затем оригинал

$$u_2(t) = 91,9e^{-1320t} - 5,18e^{-74,16t} - 0,004e^{-0,94t}.$$

Графики переходных процессов во вторичной цепи ЕТН для углов возникновения повреждения 0° и 90° при снижении напряжения на входе трансформатора (U_1) до нуля, полученные на основе аналитической модели, приведены на рис. 2 и 3 и соответствуют эталонным процессам в соответствии с МЭК 60255-121 [4].

Литература

1. *Шнеерсон Э.М.* Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Комплекс программно-технический измерительный РЕТОМ-71. Руководство по эксплуатации БРГА.441323.035 РЭ. – Чебоксары, 2016.
3. *Маслов А.М.* Моделирование переходных процессов ёмкостного трансформатора напряжения в цепях релейной защиты // А.М. Маслов, А.С. Шалимов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 332–335.
4. IEC 60255-121. Measuring relays and protection equipment – Part 121: Functional requirements for distance protection. International standard. Edition 1.0. 2014-03.
5. *Нейман Л.Р.* Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян; в 2-х т. – Т. 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
6. *Гарднер М.Ф.* Переходные процессы в линейных системах / М.Ф. Гарднер, Дж.Л. Бэрнс. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. – 552 с.
7. *Диткин В.А.* Операционное исчисление / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: Высш. шк., 1966. – 408 с.

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Л.А. Славутский¹, Е.В. Славутская²
(Чебоксары, ¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ²ЧГПУ им. И.Я. Яковлева)

ПРОСТЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ КАК ОСНОВА НАВЫКОВ РАБОТЫ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ

Методы машинного обучения и искусственного интеллекта находят все более широкое применение в самых разных областях [1–3]. Соответствующие дисциплины присутствуют в большинстве учебных программ технических специальностей, связанных с информационными технологиями. При этом методы, основанные на нечёткой логике, достаточно сложны, и для понимания основ их работы требуются наглядные примеры. Большая часть современного программного обеспечения для статистической обработки данных предоставляет возможность построения простых искусственных нейронных сетей (ИНС) и их использования со средствами автоматизированной визуализации результатов.

В настоящей работе приводятся примеры использования простейших нейросетевых алгоритмов на основе ИНС прямого распространения, с обратным распространением ошибки при «обучении с учителем» [4]. Эти примеры с одной стороны позволяют получить результаты при обработке сигналов и данных, с другой стороны – сама процедура получения этих результатов позволяет анализировать особенности функционирования нейросетевых алгоритмов как наиболее распространённого инструмента искусственного интеллекта и методов интеллектуального анализа данных (DATA MINING) [4–6]. Использовано открытое программное обеспечение – аналитическая платформа DEDUCTOR (www.basegroup.ru). Все операции производятся автоматически и оказываются не сложнее, чем использование факторного или регрессионного анализа [4].

На рис. 1 приведен пример структуры ИНС для анализа квазигармонического сигнала со случайной частотой f . В каче-

стве целевой функции на выходе ИНС может выступать также фаза или амплитуда [6]. На входе – дискретные отсчёты сигнала в моменты времени t_i .

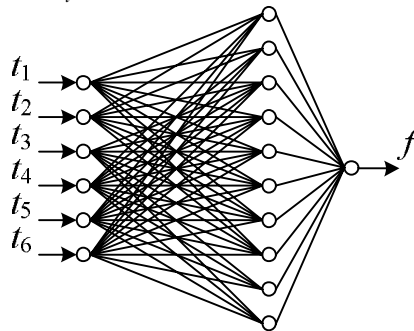


Рис. 1. Структура ИНС для анализа сигнала

Выбор структуры ИНС (количество скрытых слоев и нейронов в каждом слое) должен осуществляться эмпирически на основе качества её обучения. Главное условие – количество связей между нейронами должно быть значительно меньше размера выборки примеров для обучения ИНС. На рис. 2 показан интерфейс программы при обучении ИНС. Погрешность обучения уменьшается с увеличением циклов (эпох) и стабилизируется на определённом уровне. В показанном случае процесс обучения может быть ограничен 300–400 циклами. Уровень ошибок и распознавания связей при обучении ИНС (рис. 2) показан в таблице.

Результаты обучения ИНС

Количество нейронов в скрытом слое	Максимальная ошибка σ_{\max}	Среднеквадратичная ошибка σ_s	Распознавание связей S
2	$6,79 \cdot 10^{-1}$	$2,73 \cdot 10^{-2}$	86,62 %
3	$3,96 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	93,19 %
5	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$6,44 \cdot 10^{-4}$	100 %
10	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	100 %

Приемлемое качество обучения достигается уже при пяти нейронах в скрытом слое. Статистически качество обучения ИНС описывается гистограммой распределения ошибок (рис. 3).

Как видно из рис. 3, для 90 % обучающей выборки погрешность составляет сотые доли процента.

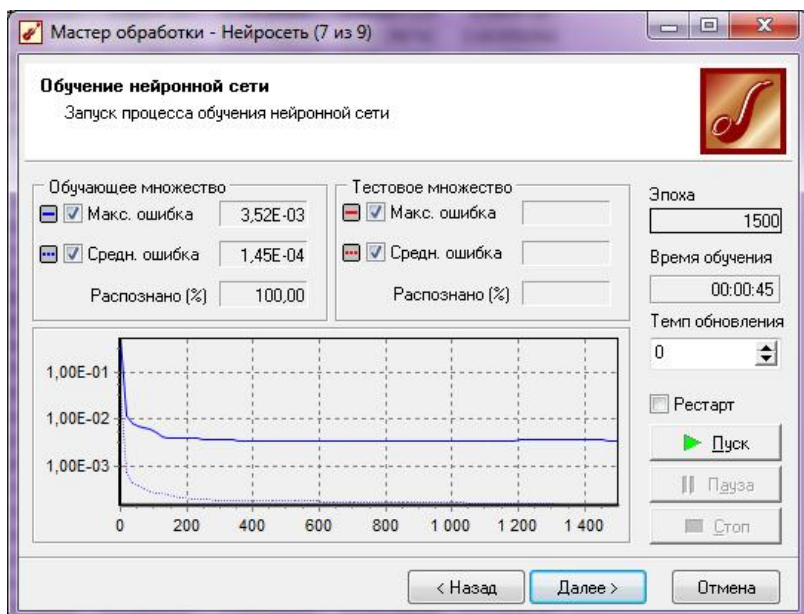


Рис. 2. Интерфейс программы на этапе обучения ИНС

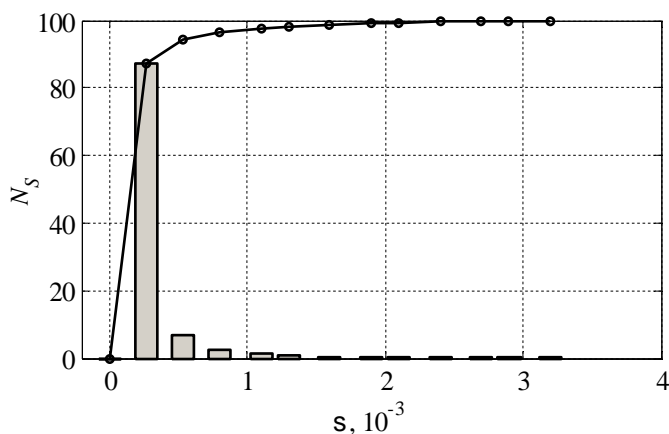


Рис. 3. Гистограмма ошибок при обучении ИНС
(сплошная кривая – сумма с накоплением)

При выборке 6 точек на период квазигармонического сигнала (см. рис. 1) полученная точность определения частоты с использованием ИНС значительно превышает возможности традиционного спектрального анализа.

Таким образом, нейросетевой анализ случайных данных, временных рядов или сигналов с использованием доступного программного обеспечения позволяет на достаточно простых примерах приобретать и закреплять навыки работы со средствами и методами машинного обучения.

Литература

1. *Laruhin A.* Anomalous modes recognizing secondary equipment in electric power industry: adaptive neuro algorithms / A. Laruhin, M. Nikandrov, L. Slavutskii // 2019 International Ural conference on electrical power engineering: Proceedings URALCON 2019. – PP. 399–403.

2. *Slavutskaya E.V.* Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models / E.V. Slavutskaya, L.A. Slavutskii // Society. Integration. Education: Proceedings of the Scientific Conference. – 2018. – Vol. 5. – PP. 455–464. – DOI: 10.17770/sie2018vol1.3348.

3. *Сучков В.О.* Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока на основе искусственной нейронной сети / В.О. Сучков, О.Н. Ядарова, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 207–212.

4. *Славутская Е.В.* Нейросетевой системный анализ уровней психологических характеристик / Е.В. Славутская, В.С. Аbruков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 164–173.

5. *Slavutskaya E.V.* Simple neural network algorithms for evaluating latent links of younger adolescent's psychological characteristics / E.V. Slavutskaya, V.S. Abruков, L.A. Slavutskii // Experimental Psychology (Russia). – 2019. – Vol. 12, No. 2. – PP. 131–144.

6. *Кошечев М.И.* Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кошечев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА

Импульсные преобразователи напряжения обладают высоким коэффициентом полезного действия и приемлемыми массогабаритными показателями, в связи с чем часто применяются в промышленной электронике. Для стабилизации выходного тока или напряжения импульсных преобразователей применяют цепи обратных связей, так что системы рассматриваемого класса являются замкнутыми. Кроме того известно, что такие системы склонны хаотической динамике [1–3] для устранения которой проводится параметрический или структурно-алгоритмический синтез.

Для изучения работы различных алгоритмов управления нелинейными динамическим процессами была разработана схема и создан макет лабораторного стенда для исследования систем управления импульсных преобразователей напряжения.

Предлагаемый стенд позволяет исследовать основные виды модуляции – ОНМ, ОРМ и ДРМ. В качестве импульсных преобразователей могут выступать как их физические модели на основе операционных усилителей, которые полностью повторяют динамику реальных импульсных преобразователей напряжения, так и реальные преобразователи напряжения.

Некоторые алгоритмы управления нелинейными динамическим процессами предъявляют повышенные требования к управляющим микропроцессорным средствам, что потребовало применения одноплатного компьютера BeagleBone Black, на котором расположена система на кристалле AM3358, состоящая из одного ARM ядра и двух ядер PRU-ICSS (The Programmable Real-Time Unit Subsystem – программируемая подсистема реального времени), позволяющих управлять выводами микропроцессора с частотой до 200 МГц. Каждое PRU-ядро оснащено одним модулем eCAP (Enhanced Capture), способным работать в режиме захвата фронта импульса или в режиме генератора ШИМ.

Используя область общей памяти между ARM и PRU-ICSS ядрами, можно обмениваться информацией. Вычислительная мощность ARM ядра и возможности PRU ядер позволяют применять одноплатный компьютер BeagleBone Black для решения сложных задач. В ходе работы была создана программа для одноплатного компьютера BeagleBone Black, реализующая управление однофазным инвертором с синусоидальной двухполярной реверсивной модуляцией (ДРМ). Проведены натурные исследования, которые подтвердили работоспособность предлагаемого лабораторного стенда и его соответствие поставленным задачам.

Предлагаемый лабораторный стенд может использоваться для исследования нелинейной динамики базовых преобразователей постоянного напряжения, а также преобразователей с синусоидальной широтно-импульсной при использовании алгоритмов управления с повышенными требованиями к вычислительным ресурсам управляющего микроконтроллера.

Литература

1. *Жусубалиев Ж.Т.* Бифуркации и хаос в релейных и широтно-импульсных системах автоматического управления / Ж.Т. Жусубалиев, Ю.В. Колоколов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 120 с.

2. *Андрянов А.И.* Модель корректора коэффициента мощности с управлением внутри одного тактового цикла / А.И. Андрянов, А.А. Малаханов // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 1-1 (27). – С. 108–113.

3. *Андрянов А.И.* Математическое моделирование импульсных преобразователей напряжения на базе однополярной реверсивной модуляции / А.И. Андрянов, Г.Я. Михальченко // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2005. – № 1. – С. 11–19.

Н.М. Лазарева, В.М. Яров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Импульсные трансформаторы – это специальные трансформаторы, предназначенные для трансформации периодически повто-

ряющихся импульсов напряжения или тока, длительность которых значительно меньше нулевых пауз между импульсами [1, 2]. Принцип трансформации напряжения и тока в импульсных трансформаторах, как и в трансформаторах, работающих при синусоидальном напряжении, основан на явлении электромагнитной индукции. Однако при передаче импульсными трансформаторами однополярных кратковременных импульсов возникает ряд существенных отличий по сравнению с работой обычных трансформаторов.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Магнитные компоненты электронной техники» студенты исследуют процессы в импульсном трансформаторе на сердечнике с непрямоугольной петлей гистерезиса при периодической подаче от генератора прямоугольных импульсов (ГПИ) на первичную обмотку сигналов, форма которых близка к прямоугольной (рис. 1).

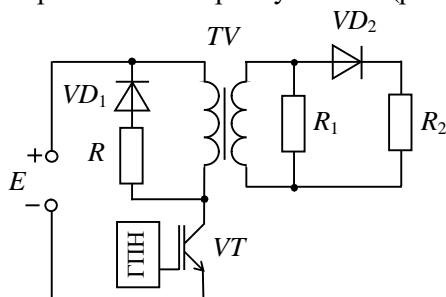


Рис. 1. Исследование процессов в импульсном трансформаторе

На физическом макете снимаются осциллограммы токов и напряжений без подключенной цепи RD и включенной, на основе которых определяются паразитные параметры импульсного трансформатора L_s и C [3]. На основе опытов холостого хода и короткого замыкания определяются параметры трансформатора [5] и сравниваются со значениями параметров, определёнными по осциллограммам.

Во второй части исследования выполняется имитационное моделирование работы импульсного трансформатора в Simulink Matlab с различными параметрами трансформатора [6]. В Simulink-модели (рис. 2) резистор R в отличие от физической модели перенесен в цепь первичной обмотки трансформатора, что снижает выброс тока при включении транзистора, а в случае

сбоя системы управления исключает режим короткого замыкания транзистора VT . Индуктивность L , включенная последовательно с резистором R , моделирует индуктивность соединительных проводов. Так как в SPS-модели трансформатора не предусмотрены ёмкостные паразитные параметры, то они представлены внешними конденсаторами C_1 – C_3 , параметры которых определены по расчётным соотношениям для физической модели.

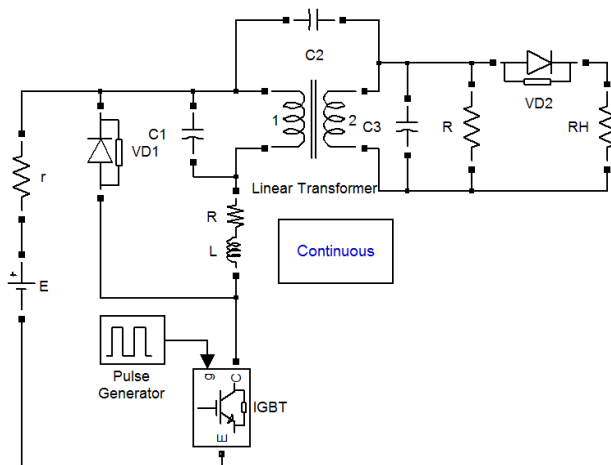


Рис. 2. Simulink-модель для исследования импульсных трансформаторов

В процессе моделирования исследуется влияние только индуктивных компонентов при постоянстве ёмкостных параметров. На рис. 3 приведены совмещенные переходные процессы изменения выходного напряжения для различных значений индуктивностей рассеяния при $L_m = \text{const}$, а на рис. 4 – при изменении индуктивности намагничивания L_m при $L_s = \text{const}$.

Наибольшее влияние на форму трансформируемого импульса оказывают индуктивности рассеяния. Индуктивность намагничивания практически не влияет на передний фронт и спад импульса и определяет в основном спад вершины. Это подтверждает принятое в [1–3] разделение длительности импульса на три интервала: формирование фронта, вершины и спад импульса и позволяет получить значения паразитных параметров трансформатора по упрощенным выражениям.

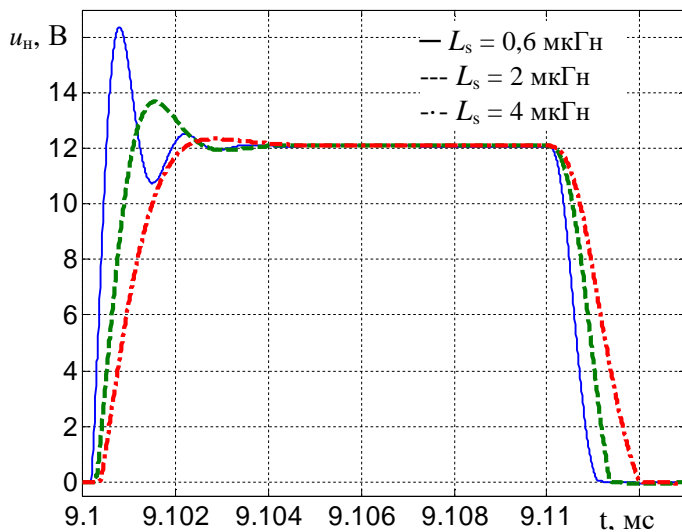


Рис. 3. Влияние индуктивности рассеяния обмоток трансформатора на напряжение нагрузки

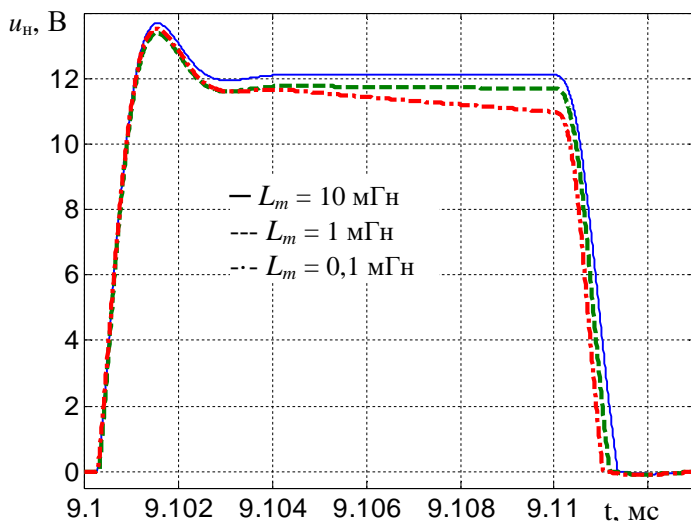


Рис. 4. Влияние индуктивности намагничивания трансформатора на напряжение нагрузки

Если импульсный трансформатор применяется для управления транзисторными преобразователями, то необходимо учесть тот факт, что при увеличении длительности импульса его амплитуда уменьшается (рис. 5).

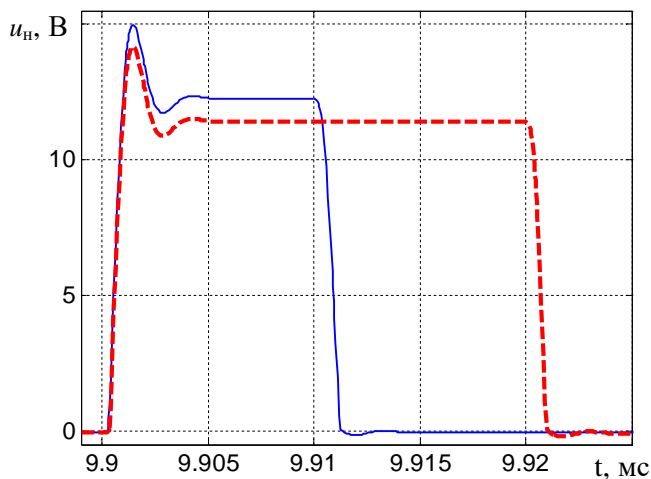


Рис. 5. Изменение амплитуды импульса в нагрузке в зависимости от его длительности

В процессе выполнения лабораторной работы исследуются различные варианты снижения зависимости амплитуды импульса от его длительности [7].

Характер переходного процесса при включении трансформатора зависит и от того, повышающий он или понижающий.

Литература

1. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
2. Матханов П.Н. Расчёт импульсных трансформаторов / П.Н. Матханов, Л.З. Гоголицын. – Л.: Энергия, 1980. – 112 с.
3. Балбашова Н.Б. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках / Н.Б. Балбашова. – М.: Энергия, 1976. – 120 с.
4. Горский А.Н. Расчёт электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский, Ю.С. Русин, Н.Р. Иванов, Л.А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 175 с.

5. *Быков К.В.* Определение параметров схемы замещения трансформатора / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международ. науч.-практ. конф. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2019. – С. 253–257.

6. *Лазарева Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 408 с.

7. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи. Семейства характеристик и применение / П.А. Воронин. – М.: Додэка, 2001. – 384 с.

Н.М. Лазарева, В.М. Яров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП В MULTISIM

Применение средств компьютерного моделирования при подготовке бакалавров электротехнических профилей стало неотъемлемой частью учебного процесса. Программные комплексы особенно востребованы в рамках дистанционного проведения занятий. Они являются единственно возможным инструментом при выполнении студентами лабораторных работ в условиях карантинной изоляции. Пользователю предоставляется широкий спектр пакетов прикладных программ от систем компьютерной математики, таких как MathCAD [1], до специализированных профессионально ориентированных комплексов, таких как Simulink Matlab [2].

Multisim фирмы National Instruments – одна из немногих программ, которая позволяет изучать характеристики и выполнять компьютерное моделирование схем с электронными лампами [3]. Интуитивно понятный интерфейс Multisim, простота использования компонентов, привычный вид и знакомые правила подключения измерительных приборов создают комфортную среду для проведения виртуальных исследований.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника» бакалавры направления подготовки «Электроника и наноэлектроника» исследуют в Multisim характеристики и определяют параметры электронных ламп. База данных программы содержит большой набор виртуальных моделей – триодов, тетродов, пентодов – являющихся электронными аналогами реальных ламп.

Для снятия и построения семейства статических анодных $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ и анодно-сеточных $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ характеристик достаточно собрать схему эксперимента, приведенную на рис. 1.

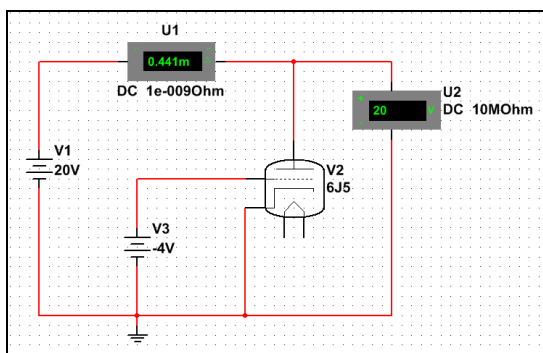


Рис. 1. Снятие анодных характеристик триода

Multisim предоставляет возможность проводить моделирование как в интерактивном режиме, при котором пользователь вручную задает значения напряжений источников и фиксирует показания приборов, а затем по точкам строит графики характеристик, так и в режиме автоматического изменения параметров и отображения графиков интересующих зависимостей (рис. 2).

По семейству анодных (или анодно-сеточных) характеристик (рис. 3) можно определить параметры электронной лампы: внутренне сопротивление переменному току

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \gg \frac{DU_a}{DI_a}, \text{ при } U_c = \text{const};$$

статический коэффициент усиления

$$m = - \frac{dU_a}{dU_c} \gg \frac{DU_a}{DU_c} \text{ при } I_a = \text{const};$$

крутизну анодно-сеточной характеристики

$$S = \frac{di_a}{dU_c} \gg \frac{Di_a}{DU_c} \text{ при } U_a = \text{const}.$$

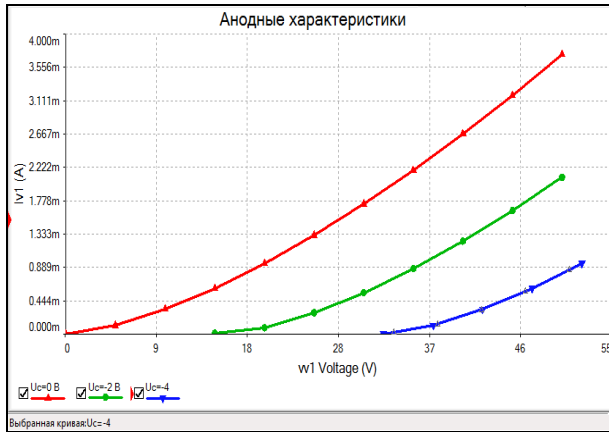


Рис. 2. Семейство анодных характеристик триода, полученное в режиме автоматического изменения параметров

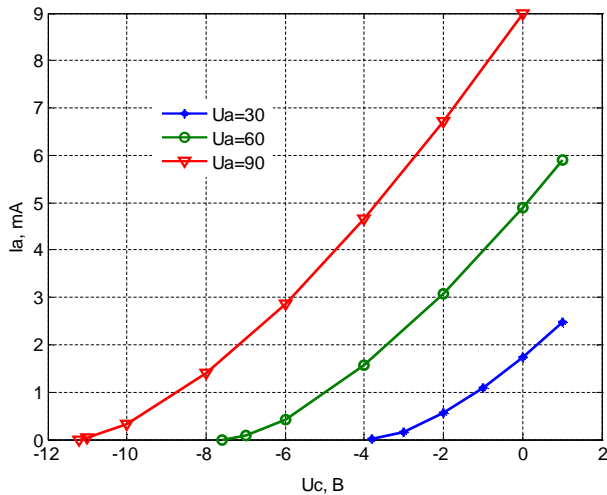


Рис. 3. Семейство анодно-сеточных характеристик триода, полученное при интерактивном моделировании

Литература

1. *Лазарева Н.М.* Пакеты математического моделирования. MathCAD / Н.М. Лазарева. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 184 с.
2. *Лазарева Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.
3. *Хернитер М.Е.* Электронное моделирование в Multisim / М.Е. Хернитер. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 488 с.

Д.А. Коренков, В.О. Ревякин
(Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева)

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КИНЕТИКИ ВАКУУМНО-ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКИ

Высокочастотные электротермические технологии с использованием частот более 1 МГц имеют большое значение для отечественной и мировой промышленности. Их дальнейшее внедрение в различные отрасли экономики и производства, связанные с нагревом диэлектриков, обусловлено существенным повышением производительности технологических процессов. Исключением не являются и процессы сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов, особенно древесины.

Традиционно для сушки пиломатериалов используются газопаровые камеры, в которых реализуется конвективная технология нагрева. В зависимости от режима и толщины сортамента длительность сушки может превышать месяц. При равных условиях применение диэлектрического нагрева совместно с понижением давления в рабочей камере обеспечивает сокращение этого показателя до 10 раз. Однако полный переход на данную технологию ещё не совершен по ряду причин, описанных в работе [1]. К их числу можно отнести вопросы автоматизации вакуумно-высокочастотных комплексов, что в свою очередь связано с необходимостью прогнозирования скорости протекания процесса.

Данная задача решается на основе математического моделирования. Исследованию вакуумно-высокочастотной сушки по-

священо множество работ отечественных и зарубежных учёных. Результатом этих исследований являются, в том числе, модели описывающие динамику процесса [2, 3]. Указанные модели представляют собой различные вариации системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса А.В. Лыкова и поэтому требуют задания множества физических свойств высушиваемого материала, основными из которых являются коэффициенты температуропроводности a_t , влаготеплопроводности a_m , конвективной фильтрационной диффузии a_p и критерий фазового превращения ξ . Указанные свойства не постоянны, а являются функциями температуры t , влагосодержания u и давления P . Вид этих функций либо установлен для ограниченного ряда пород и узких диапазонов Δt , Δu и ΔP , либо не установлен вовсе. Этот факт, а также сложность самих моделей ограничивают их применимость для оптимизации процесса и построения с их помощью систем автоматического управления.

Для этого необходимы более эффективные модели, один из возможных подходов к построению которых предлагается в данной работе. За основу берутся исходные уравнения тепломассопереноса и принимается ряд допущений: все процессы в материале протекают равномерно (отсутствуют градиенты $\tilde{N}t$, $\tilde{N}u$, $\tilde{N}P$); ввиду отсутствия градиентов локальная скорость сушки равна средней и определяется удельной мощностью внутренних источников теплоты Q_V [4]:

$$\frac{\tilde{N}u}{\tilde{N}\tau} = \frac{\tilde{N}\bar{u}}{\tilde{N}\tau} = -\xi(t, u) \frac{Q_V(t, u)}{\rho_0 r(T)}, \quad (1)$$

$$Q_V(t, u) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(t, u) \operatorname{tg} \delta(t, u) E^2, \quad (2)$$

где τ – время; ρ_0 – плотность сухого материала; r – удельная теплота парообразования; f , E – частота и напряженность электрического поля; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε и $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрические свойства материала.

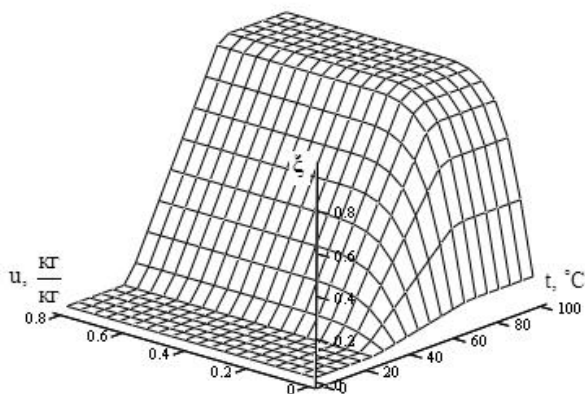
Для полного описания кинетики процесса необходимо учесть изменение температуры, которое с учетом допущений подчиняется уравнению

$$\frac{\tilde{N}t}{\tilde{N}\tau} = \frac{Q_V(t, u)}{c(t, u)\rho_0} [1 - \xi(t, u)] \quad (3)$$

и начальные условия: $t = t_0$, $u = u_0$ при $\tau = 0$, где c – удельная теплоёмкость материала.

Совокупность уравнений (1)–(3) представляет собой математическую модель процессов нагрева и сушки в вакуумно-высокочастотных комплексах. Влияние давления в рабочей камере на протекающие процессы косвенно учитывается зависимостью от него температуры кипения влаги и температурной зависимостью критерия фазового превращения.

Наилучшая сходимость с результатами экспериментов обеспечивается при функциональной зависимости $\xi(t, u)$, показанной на рисунке.



Зависимость критерия фазового превращения
от температуры и влагосодержания

Литература

1. Качанов А.Н. Повышение энергоэффективности камер для вакуумно-диэлектрической сушки / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: лекции II Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – С. 84–92.
2. Koumoutsakos A. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model / A. Koumoutsakos, S. Avramidis, S.G. Hatzikiakos // Drying technology. – 2001. – Vol. 19(1). – PP. 65–84.

3. Jia X. Radio frequency vacuum drying of timber. Mathematical model and numerical analysis / X. Jia, J. Zhao, Y. Cai // BioResources. – 2015. – Vol. 10(3). – PP. 5440–5459.

4. Синютин Е.В. Автоматизированная система управления оптимальным режимом сушки древесины в высокочастотном электрическом поле / Е.В. Синютин, Ю.П. Юленец // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 8. – С. 1–7.

И.Ю. Бутарев
(Брянск, БГТУ)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА В МАТЛАВ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ

При измерении и тестировании силовых модулей одним из важнейших их параметров являются время и заряд обратного восстановления диода. Когда силовой диод быстро переключается из проводящего состояния в закрытое, возникает процесс обратного восстановления. Этот процесс проявляется из-за накопления неосновных носителей в обеих областях диода – базе и эмиттере при прямом протекании тока через диод (плюс приложен к аноду (p -область), минус к катоду (n -область)). В базе (n -область) накапливаются дырки, в эмиттере (p -область) накапливаются электроны. После смены полярности напряжения на обратное (плюс на катоде, минус на аноде), накопленные неосновные носители в областях диода начинают двигаться навстречу, создавая короткий выброс обратного тока (рис. 1). Длительность выброса тока зависит от заряда накопленных неосновных носителей и барьерной ёмкости перехода [1]. Время обратного восстановления диода является важным динамическим параметром, к которым относятся также амплитуда тока обратного восстановления и заряд обратного восстановления [2]. Эти параметры всегда представлены в листах данных для диодов. В высокочастотных цепях применяются диоды с как можно меньшим зарядом восстановления [3].

Для измерения времени и заряда обратного восстановления для силовых модулей, выпускаемых АО Группа Кремний ЭЛ был раз-

работан специальный тестер. Он позволяет измерять основные параметры диодов и определять процент брака в изготовленной партии. При проектировании первой версии устройства были применены недорогие комплектующие для контактных соединений устройства с силовыми модулями, имеющие высокие паразитные параметры. Так как устройство работает при достаточно больших напряжениях (до 800 В) и токах (до 200 А) и их изменение происходит на высокой частоте, то влияние паразитных ёмкостей и индуктивностей привело к ошибочным результатам расчётов заряда и времени обратного восстановления.

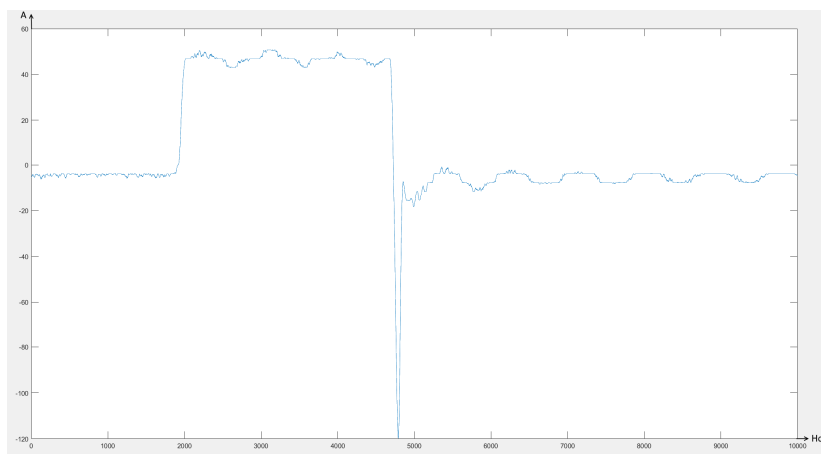


Рис. 1. Осциллограмма тока через силовой диод при токе задания 50 А

Так как графический интерфейс пользователя, математические операции и обработка сигналов в тестере реализованы на языке программного комплекса Matlab, то было решено для аппроксимации данных и получения адекватных осциллограмм динамических процессов в силовых модулях использовать встроенные средства программного комплекса Matlab. Был написан алгоритм поиска и устранения низкочастотных помех, представленный на рис. 2.

Алгоритм реализует следующие операции. Полученная с АЦП осциллограмма тока диода обрабатывается и находится момент начала возникновения помехи при подаче тока на диод (t_{start_up}) и момент отключения подачи тока на диод (t_{end_up}). Далее алгоритм работает с частью сигнала, ограни-

ченной во временном промежутке $[t_{start_up}; t_{end_up}]$. Производится поиск низкочастотного колебания и нахождение его периода T . В сигнале выделяется его переменная составляющая, которая обрабатывается цифровым ФВЧ в Matlab (используется команда `filter`) с учётом значения найденного периода низкочастотной помехи. Полученный результат сохраняется, затем аналогично находятся моменты возникновения низкочастотного колебания при завершении процесса обратного восстановления (t_{start_down}) и до окончания замера на (t_{end_down}). Аналогично ищется период низкочастотной помехи и находится переменная составляющая сигнала. Происходит обработка участка сигнала $[t_{start_down}; t_{end_down}]$ с помощью ФВЧ и полученный результат сохраняется. Затем происходит замена участков с помехой в сигнале I_d на отфильтрованные участки и результат передается основной программе. Сигнал до фильтрации и после представлен на рис. 3 для тока 50 А и на рис. 4 для тока 200 А.



Рис. 2. Алгоритм поиска и устранения низкочастотных помех

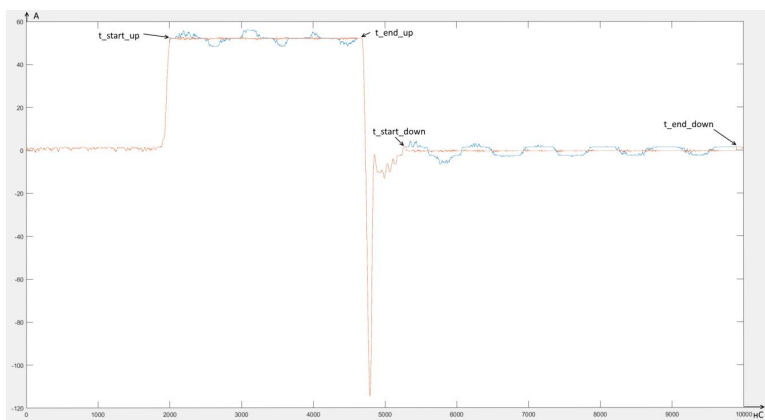


Рис. 3. Применение фильтрации к сигналу тока через диод при токе 50 А

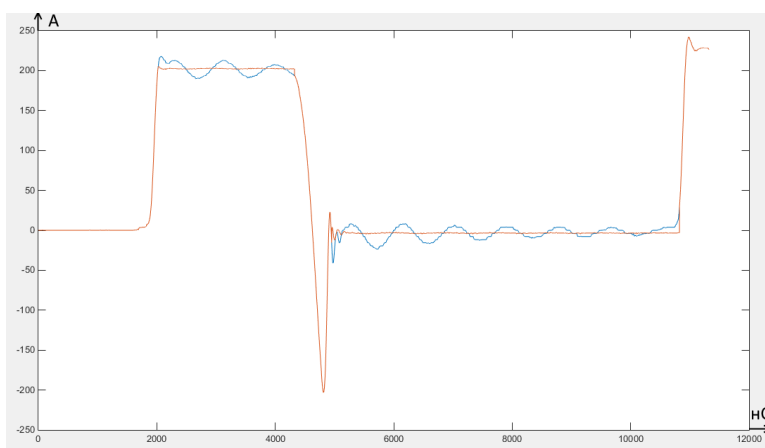


Рис. 4. Применение фильтрации к сигналу тока через диод при токе 200 А

Представленный алгоритм адаптируется к различным параметрам заданного напряжения и тока к силовому модулю и позволяет получить приемлемую осциллограмму, описывающую динамическое поведение модуля, а также провести программную фильтрацию низкочастотных помех. Использование данного алгоритма снижает требования к контактирующему устройству, а соответственно и стоимость устройства для тестирования динамических модулей в целом.

Литература

1. *Oppenheim A.V.* Discrete-Time Signal Processing / A.V. Oppenheim, W.S. Ronald, R.B. John // Upper Saddle River. – NJ: Prentice-Hall, 1999. – 864 p.
2. *Millman J.* Microelectronics: Digital and Analog Circuits and Systems / J. Millman. – McGraw Hill, p42, 1979. – 189 p.
3. *Polenov D.* The Influence of Turn-Off Dead Time on the Reverse-Recovery Behaviour of Synchronous Rectifiers in Automotive DC/DC-Converters / D. Polenov, et al. // EPE. – 2009. – PP. 1–8.
4. *Аваев Н.А.* Электронные приборы: учеб. для вузов / Н.А. Аваев, Г.Г. Шишкин. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 540 с.

В.А. Варфоломеев, Т.В. Мясникова
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЁТА, ОПТИМИЗАЦИИ И АНАЛИЗА УСТАНОВИВШИХСЯ, АВАРИЙНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ «RASTRWIN3» В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Современные зарубежные и отечественные разработки электротехнического оборудования для энергетики так или иначе связаны с идеями создания «Интеллектуальной электроэнергетики» [1]. При этом реализация новых технических решений, заменяющих применяемые технологии, может вызвать существенные проблемы, в том числе и проблемы подготовки высококвалифицированных кадров по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Для реализации образовательной программы по данному направлению подготовки предусмотрено выполнение курсового проекта по дисциплине «Электроснабжение потребителей и режимы». Курсовое проектирование как форма учебной работы занимает особое место в системе высшего технического образования, давая возможность обучающимся сформировать новые профессиональные компетенции. В рамках курсового проектирования реализуют-

ся разнообразные цели: научная, познавательная, учебная, методическая, которые проявляются через конкретные задачи [2].

Автоматизированный расчёт режимов электрической сети является базовой задачей курсового проектирования. Расчёты режимов электрических сетей выполняются для определения: загрузки элементов сети, соответствия пропускной способности сети ожидаемым потокам мощности; сечений проводов и кабелей и мощностей трансформаторов и автотрансформаторов; уровня напряжений в узлах и элементах сети и мероприятий, обеспечивающих поддержание напряжения в допустимых пределах, потерь мощности и электроэнергии для оценки экономичности работы сети и эффективности способов снижения потерь; уровня токов КЗ, соответствия существующей или намечаемой к установке аппаратуры ожидаемым токам КЗ, мероприятий по ограничению токов КЗ; пропускной способности сети по условиям устойчивости.

Схемы электроснабжения разнообразны, в связи с этим ручной расчёт режимов становится очень трудоёмким. Особая внимательность требуется даже в небольших схемах. В случае малейшей ошибки будет необходимо произвести полный анализ расчёта, поиск ошибки и пересчёт.

Для расчёта режимов может быть использован программный комплекс «RastrWin3», что существенно облегчает расчёт. Электрические расчёты возможно выполнить для определения электрических параметров сети во всех возможных режимах работы: нормальных, аварийных, послеаварийных, утяжелённых и т.д.

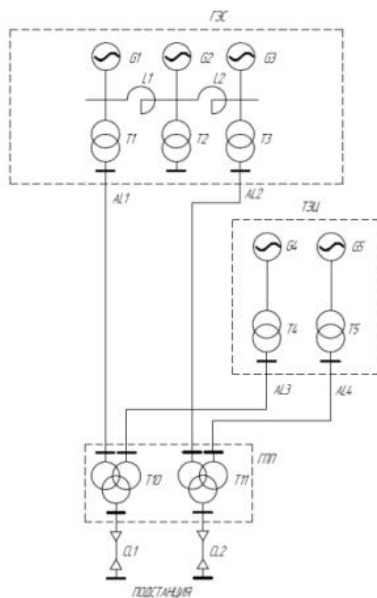
В качестве примера приведём расчёт режима короткого замыкания (КЗ) для схемы, представленный на рисунке [2].

Расчёт в программе «RastrWin3» последователен и интуитивно понятен. При проведении расчёта необходимо задать узлы каждого элемента однолинейной схемы (генератора, трансформатора, линии электропередач, реактора и др.) и его параметров. В соответствии с заданными параметрами тип узла (генератор, нагрузка) будет выбран автоматически. В примере за базисный узел выбран генератор G1 [3].

Далее необходимо задать ветви, что включает в себе установку связей между узлами. Задав сопротивления и коэффициенты, автоматически определяется тип ветви (трансформатор или ЛЭП). При этом иные параметры рассчитываются автоматически.

В случае правильного расчёта обучающийся получает схему режима электрической сети с указанием всех параметров, а в случае ошибки – сообщение об отклонениях в каком-либо из его узлов.

В результате применения программного комплекса «RastrWin3» в рамках курсового проектирования у обучающихся формируется рациональное сочетание «виртуального» и «реального», что особенно важно в реалиях цифровой трансформации в энергетике. Кроме того, внедрение программных комплексов на этапе курсового проектирования играет немаловажную роль в становлении и развитии электротехнического и энергетического сектора, поэтому уровень подготовки специалистов является одним из важнейших критериев для востребованности на рынке труда.



Однолинейная схема
для расчёта токов КЗ

Литература

1. Мясникова Т.В. Уровни мотивации к овладению творческой компетентностью в области «Интеллектуальной электроэнергетики» / Т.В. Мясникова // Интеллектуальные энергосистемы: тр. V Междунар. молод. форума; в 3-х т. – Т. 3. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017 – С. 184–188.

2. Миронова А.Н. Электроснабжение потребителей и режимы: учеб.-метод. пособие / А.Н. Миронова, Т.В. Мясникова, Э.Л. Львова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 152 с.

3. Программный комплекс «RastrWin3» // Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rastrwin.ru/download/Files/HELP_RastrWin3_29_08_12.pdf (дата обращения: 06.04.2020).

СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Физиологические сигналы человека могут использоваться для диагностики состояния организма и выявления проблем со здоровьем на ранних стадиях. Современные достижения в области медицины показывают возможность построения соответствующих автономных систем. Одним из примеров таких систем является разработка систем распознавания эмоций, основанных на физиологических сигналах с удаленным доступом, для обеспечения работоспособности которых требуется информация о ряде физиологических параметров, таких как пульс, температура, электромиограммы и другие.

В последнее время персональные медицинские устройства для мониторинга физиологических сигналов и мгновенной обратной связи с пользователями стали востребованы. Ряд этих систем был разработан с целью дистанционного мониторинга состояния здоровья. «Smart Vest» – система мониторинга физиологических сигналов, в которой используются сигналы ЭКГ [1]. Была выпущена в продажу рубашка под названием «LifeShirt», использующая систему из нескольких датчиков для записи и мониторинга физиологических сигналов [2]. Вивек Пардеши разработал систему мониторинга здоровья на основе технологии интернет вещей, которая осуществляет контроль артериального давления, температуры тела, частоты сердечных сокращений, а также сигналов ЭКГ и позволяют обнаруживать аномалии в состоянии здоровья и передавать информацию о них посредством сотовых линий связи или сети интернет [3].

В этом докладе рассматривается вопрос построения системы сбора данных и платформы для обработки физиологических сигналов, которые будут поддерживать удаленный доступ. Программное обеспечение обеих систем разрабатывалось на основе языка Python и библиотеки для создания серверных приложений Python Flask. Предлагаемая система состоит из нескольких основных модулей.

Модуль сбора данных, состоящий из датчиков физиологических сигналов, прикрепленных к телу человека, микропроцес-

сорной системы и беспроводного интерфейса. В разработанном прототипе используются датчики температуры, влажности и ЭКГ и микропроцессорный модуль Adafruit Trinket M0, поддерживающий программирование на языке microPython, а также модуль беспроводной передачи данных по протоколу Bluetooth.

Базовый модуль, отвечающий за прием информации с модуля сбора данных, визуализацию, управление режимами работы и передачу данных на веб-сервер. В нашем случае функции этого модуля выполняются телефоном с соответствующим программным обеспечением. Приложение для телефона было создано на платформе dart flutter, чтобы обеспечить наилучшую общую производительность при минимальном времени запуска приложения.

Предлагаемая система нацелена на достижение высокой степени точности распознавания эмоций, основанной на физиологических сигналах, как это делалось во многих смежных работах, прежде всего ориентируясь на то, чтобы сделать эту систему полностью удаленной и простой в использовании. Для этой цели мы подумали о разработке программного обеспечения, чтобы оно было совместимо с IoT, что и было достигнуто благодаря разработке приложения и веб-сервера.

Литература

1. *Pandian P.S.* Smart Vest: Wearable multi-parameter remote physiological monitoring system / P.S. Pandian, et al. // *Med Eng Physics*. – 2008. – Vol. 30(4). – PP. 466–477.

2. *Halin N.* The LifeShirt system for wireless patient monitoring in the operating room / N. Halin, et al. // *J. of Telemedicine and Telcare*, 2005. – Vol. 11. – PP. 41–43.

3. *Pardeshi V.* Health Monitoring System using IoT and Raspberry Pi-A Review / V. Pardeshi, et al. // *International Conference on Innovative Mechanism for Industry Application (ICIMIA 2017)*. – PP. 134–137.

С.А. Мишин, Н.А. Галанина
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

РАЗРАБОТКА ДИСПЕТЧЕРА ЗАДАЧ

Благодаря развитию робототехники появилась возможность решения задач, упрощающих или автоматизирующих разработку технических систем. Робот должен оценивать многочислен-

ные изменяющиеся параметры, влияющие на его поведение в реальных условиях. К таким параметрам можно отнести данные с сенсоров, обеспечивающих обратную связь. Результаты расчётов на основе данных с датчиков также могут влиять на поведение робота. На контроллеры возлагается множество задач, такие как сбор данных с аналого-цифровых преобразователей, считывание или отправка данных по различным интерфейсам связи (UART, CAN, SPI) [2]. Поэтому организация слаженной работы всей программы является непростой задачей.

Цель данной работы состоит в анализе принципов построения многозадачного программного обеспечения и нахождении решения для реализации проектов, которые не требуют сложной архитектуры взаимодействия процессов между собой при условии сохранения ресурсов микроконтроллера.

Зачастую в проектах используется более половины функций микроконтроллера, начиная от простого управления вводом/выводом и заканчивая приёмом большого объёма данных через различные интерфейсы и их обработкой. Если не использовать системы реального времени, то возникает большая вероятность задержки реакции на различные события, которая в дальнейшем может привести к нарушению навигации робота или неверным расчётам.

Эта проблема может быть решена путем применения популярной многозадачной операционной системы реального времени для встраиваемых систем FreeRTOS [3]. Её большое преимущество состоит в том, что она портирована на 35 микропроцессорных архитектур и активно поддерживается разработчиками. Но существенным недостатком этой системы является ограниченность в функционале на микроконтроллерах с небольшим объемом оперативной памяти. Система реального времени OSA поддерживает только микроконтроллеры фирмы Microchip, AVR, STM8 и уже давно не получала обновлений. К сожалению, бесплатных легковесных систем реального времени, не огранивающих возможности микроконтроллеров с небольшим объемом оперативной, флеш-памяти и поддерживающих популярные платформы, не существует. Решением является создание своего диспетчера задач, который не будет требовать большого объема оперативной памяти, а также не будет ограничивать возможно-

сти микроконтроллера. Ещё одно его преимущество состоит в возможности несложной адаптации для различных платформ.

Разрабатываемый диспетчер задач должен: выполнять задачи от начала до конца; поддерживать работу очереди задач и сервиса таймера; обладать возможностью отложенного запуска задач и их циклического автозапуска.

Условно диспетчер задач можно разделить на две части: сервис, отвечающий за время, и диспетчер запуска задач. Сервис времени – это генератор прерываний через равные промежутки времени, то есть таймер. Диспетчер запуска задач должен отслеживать флаги запуска задач и, если таковые присутствуют, запускать их в приоритете от первого до последнего.

Используя такой подход можно сэкономить существенный объём оперативной и флеш-памяти. Для сравнения были взяты два проекта на микроконтроллере STM32 [3] с равным количеством задач. В первом проекте использовалась система FreeRTOS; потребовалось 8,77 Кбайт оперативной памяти и 21,57 Кбайт флеш-памяти, что составляет 43,87 % и 32,93 % соответственно. Во втором проекте, где использовался разработанный нами диспетчер задач, потребовалось 1,79 Кбайт оперативной памяти и 12,57 Кбайт флеш-памяти, что составляет 8,95 % и 19,64 % соответственно. Таким образом, сокращение оперативной памяти в 5 раз, а флеш-памяти более, чем в 1,5 раза, позволяет расширить объём памяти под нужды проекта.

Литература

1. Мишин С.А. Иерархическая система управления роботом / С.А. Мишин, Н.А. Галанина // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 399–400.

2. Real-time operating system for microcontrollers // FreeRTOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freertos.org> (дата обращения: 25.04.2020).

3. STM32F103CB. Mainstream Performance line, ARM Cortex-M3 MCU with 128 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103cb.html#resource> (дата обращения: 25.04.2020).

С.А. Заголило, А.С. Семёнов
(Мирный, Политехнический институт (филиал)
СВФУ им. М.К. Аммосова)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ MATLAB: ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В SIMPOWERSYSTEMS

В последнее время наблюдается преобладание программ компонентного моделирования в процессах проектирования технических объектов и систем. Они практически полностью ориентированы на численные эксперименты и могут считаться универсальными. Среди таких программ, не ориентированных на конкретные прикладные области, можно выделить пакет MatLab [1].

Достаточно в большом количестве научно-методических работ рассматриваются вопросы, посвященные моделированию различных видов технических систем в пакете программ MatLab [2]. Но именно физическому моделированию посвящено мало качественных работ [3–5]. Это может быть связано со значительными сложностями при разработке и реализации таких моделей. Физическую модель можно разработать с помощью приложения SimPowerSystems библиотеки блоков Simulink.

Таким образом, в докладе будут представлены особенности физического моделирования двигателя постоянного тока (ДПТ) в MatLab. Будут рассмотрены следующие вопросы: разработка физической модели и описание блоков библиотеки Simulink/SimPowerSystems; расчёт дополнительных параметров ДПТ; получение результатов в виде графиков временных зависимостей основных координат ДПТ; анализ и сопоставление результатов; определение погрешности моделирования.

Воспользуемся приложением Simulink, а именно подкаталогом библиотеки блоков SimPowerSystems пакета программ MatLab, для создания физической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Для создания модели будут использоваться блоки, расположенные в различных библиотеках: 1) SimPowerSystems: DC Machine – блок двигателя постоянного тока; DC Voltage Source – источник постоянного напряжения; Ground – заземлитель; Powergui – блок графического интерфейса (обеспечивает хранение эквивалентной

Simulink-модели в пространстве состояний); 2) Simulink/Sources: Constant – источник постоянного значения (имитирует номинальную нагрузку на валу двигателя); 3) Simulink/Signal and routing: Bus selector – шина-селектор (обеспечивает выбор необходимых параметров для измерения); 4) Simulink/Sinks: Scope – осциллограф (используется для отображения результатов в функции времени); XY Graph – графопостроитель (используется для отображения результатов в функции $y(x)$).

После того как все блоки добавлены в модель, соединяем их между собой в необходимой последовательности и получаем готовую физическую модель, показанную на рис. 1.

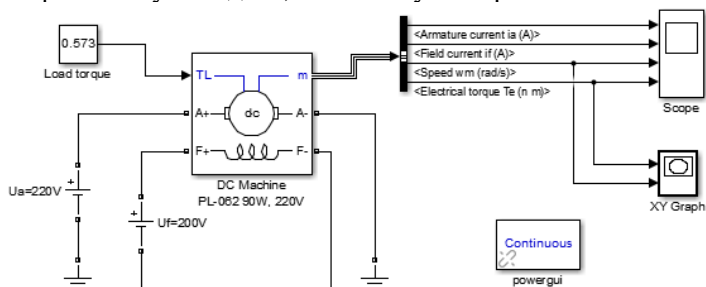


Рис. 1. Физическая модель двигателя постоянного тока

Для дальнейшего моделирования и получения результатов рассчитаем дополнительные параметры ДПТ НВ. Определению будут подлежать следующие параметры: сопротивление и индуктивность обмотки якоря; сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения; взаимоиндукция; момент инерции. Для расчёта будут использованы методики, представленные в [6, 7]. Паспортные характеристики исследуемого двигателя и искомые рассчитанные величины сведём в табл. 1.

Для проведения процесса моделирования в главный блок DC Machine подставим паспортные данные двигателя и рассчитанные выше параметры из табл. 1. В блоках DC Voltage Source (U_a и U_f) установим значение напряжения для якоря и обмотки возбуждения соответственно. В блок Constant подставляем номинальный момент двигателя. Полученные при моделировании графические зависимости представлены на рис. 2. Блок XY Graph позволяет получить механическую характеристику двигателя постоянного тока.

Таблица 1

Паспортные характеристики и рассчитанные параметры двигателя

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Марка двигателя	ПЛ-062 УХЛ 4
2	Мощность, Р	90 Вт
3	Напряжение на якоре, U_a	220 В
4	Напряжение на обмотке возбуждения, U_f	200 В
5	Ток якоря, I_a	0,76 А
6	Ток обмотки возбуждения, I_f	0,16 А
7	Электромагнитный момент, М	0,573 Н*м
8	КПД двигателя, η	0,575
9	Частота вращения, п	1500 об/мин
10	Режим работы	S1
11	Скорость вращения (угловая), ω	157 рад/с
12	Соппротивление обмотки якоря, R_a	61,51 Ом
13	Индуктивность якорной цепи, L_a	1,802 Гн
14	Соппротивление обмотки возбуждения, R_f	1250 Ом
15	Индуктивность цепи возбуждения, L_f	183,1 Гн
16	Взаимоиндукция, L_{af}	4,712 Гн
17	Момент инерции, J	0,00135 кг*м ²

Произведем анализ результатов моделирования по показателям качества переходного процесса. Наибольшее внимание обратим на скорость вращения двигателя. В установившемся режиме работы получили значение скорости вращения 230 рад/с (рис. 2, в). Время переходного процесса составило 0,4 с. Наблюдается отсутствие перерегулирования в переходном процессе, поэтому его характер является аperiодическим (бесколебательным). Сопоставим результаты моделирования с номинальными значениями двигателя постоянного тока. Во время сопоставления вычислим абсолютную и относительную погрешности (табл. 2).

В результате проделанного моделирования наблюдаем недопустимое отклонение величины скорости вращения двигателя, несмотря на то, что остальные параметры практически полностью совпадают с номинальными значениями двигателя. Для получения корректных результатов моделирования технических систем погрешность не должна превышать 15 %. В то же время продолжительность и характер переходного процесса при моделировании показали оптимальные значение быстродействия и аperiодичность. По мнению авторов, такое отклонение скорости вращения двигателя

ля может быть связано с невозможностью модели в полной мере воспроизвести нагрузку и, по сути, осуществляется моделирование на холостом ходу, о чём изложено в [8].

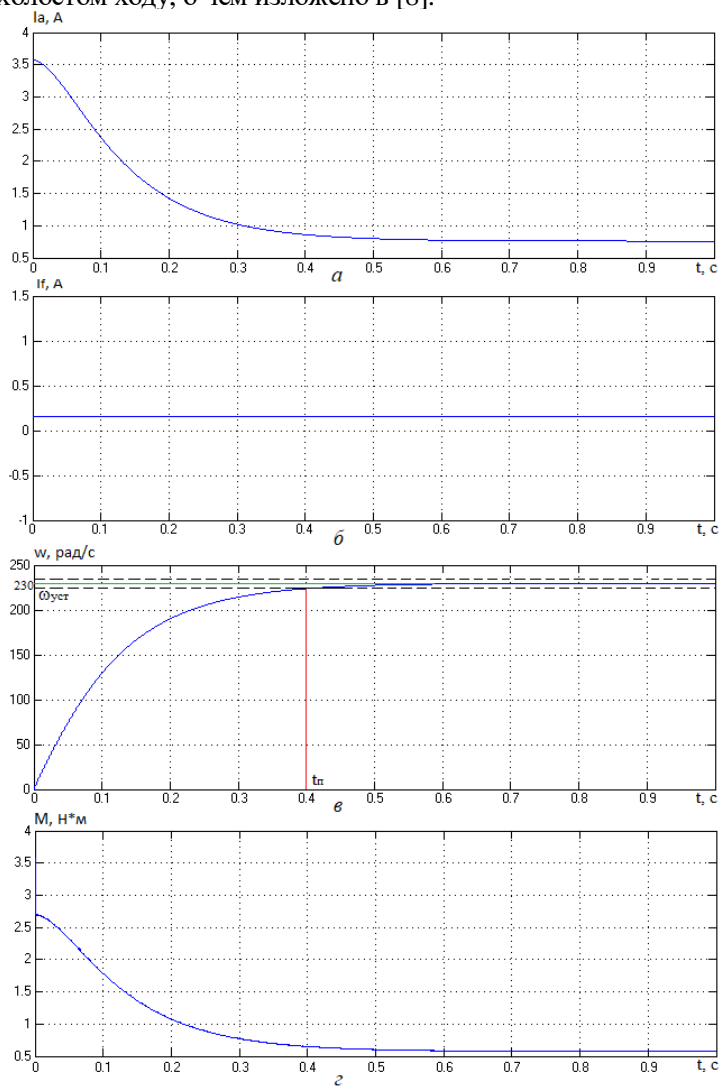


Рис. 2. Результаты моделирования двигателя постоянного тока: токи якоря (a) и обмотки возбуждения (b), скорость вращения ($в$), электромагнитный момент ($г$)

Таблица 2

Сопоставление результатов моделирования

№ п/п	Параметр	Физич. модель	Пасп. / расч. данные	Абсол. погреш. Δ	Относ. погреш. ε (%)
1.	Ток якорной цепи, А	0,761	0,76	0,01	1,3
2.	Ток обмотки возбуждения, А	0,16	0,16	0	0
3.	Скорость вращения, рад/с	230	157	73	31,7
4.	Электромагнитный момент, Н·м	0,5733	0,573	0,003	0,5

В заключение отметим, что физическое моделирование с помощью приложения SimPowerSystems является более сложным методом оценки технических систем по сравнению с другими способами, например, математическим или структурным. В то же время физическое моделирование раскрывает весь физический смысл процессов, протекающих в электромеханической системе, и позволяет получить и проанализировать большое количество физических (в нашем случае электрических) параметров [9, 10].

Литература

1. Семёнов А.С. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.
2. Семёнов А.С. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB / А.С. Семёнов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 232–236.
3. Gnezdov N.E. Structural and parametric synthesis of positioning systems of electromechatronic modules / N.E. Gnezdov, S.K. Lebedev, A.R. Kolganov // 9th Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS). – IEEE, 2016. – No. 7756725. – PP. 1–6.
4. Гасияров В.Р. Моделирование трёхуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник / В.Р. Гасияров,

А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 4–9.

5. Шевырёв Ю.В. Исследование электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода буровой установки и источника электроэнергии соизмеримой мощности / Ю.В. Шевырёв, Д.А. Моргачёв // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 25–33.

6. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + SIMULINK 5/6/7. Основы применения: учеб. пособие / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.

7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink: учеб. пособие / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

8. Bolgov I. Detailed simulation model of the two-phase brushless DC motor designed for VFD integration / I. Bolgov, V. Bolgova // 57th Int. Sci. Conf. on Power and Electrical Engineering (RTUCON). – IEEE, 2016. – No. 7763154. – PP. 1–5.

9. Бебихов Ю.В. Анализ методов моделирования технических систем в среде MATLAB / Ю.В. Бебихов, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 3 (26). – С. 12.

10. Semenov A.S. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise / A.S. Semenov, M.N. Semenova, Yu.V. Bebikhov // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2019. – No. 8867704. – PP. 1–5.

Л.В. Ахметвалеева, Н.Р. Галимуллин
(Казань, КГЭУ)

ВОЗМОЖНОСТИ РЕЖИМА ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ДИСТАНЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Под влиянием стремительного технологического прогресса многие производственные этапы переходят в автоматизированный режим работы. Однако некоторые автоматизированные процессы

невозможно обеспечить полностью автономным оборудованием, необходимо участие человека. Научные разработки в технической сфере как раз направлены на минимизацию участия человека.

Дистанционное управление – представляет собой передачу управляющего сигнала от оператора к управляемому объекту, который находится на расстоянии.

Одним из устройств, где необходим постоянный контроль, является электродвигатель, который находит свое применение не только абсолютно в любом производственном процессе, но и в быту. Дистанционное управление электродвигателем представляет собой самую популярную систему управления. Помимо действий старт и стоп зачастую необходимо ещё и регулировать частоту вращения электродвигателя. Изменение скорости вращения происходит посредством прерывистой или постоянной подачи напряжения на обмотки, так называемым режимом широтно-импульсной модуляции сигналов (ШИМ).

ШИМ – процесс управления мощностью методом пульсирующего включения и выключения прибора [1]. Существует два способа реализации ШИМ: аппаратный и программный. Программный способ осуществляется на базе микроконтроллера. Для организации ШИМ-режима микроконтроллер в обязательном порядке должен включать в себя цифровой компаратор, модуль сравнения, захвата и ШИМ, процессор событий.

Выводы микроконтроллера настраиваются на данный режим, при совпадении показаний регистра таймера/счётчика и регистра данных канала, в котором хранится константа ШИМ, формирует начало импульса, а по достижении счётчиком максимального значения завершает импульс и начинает новый период ШИМ, чем достигается гибкость, универсальность управления.

В ходе наших исследований был проведен сравнительный анализ программного метода реализации ШИМ режима и аппаратного метода. Аппаратный метод исследовался на базе регулятора MP4511 [1], программный – на современном микроконтроллере PIC18 [2]. Главной отличительной особенностью этих способов является многофункциональность и удобство в эксплуатации.

Хотелось бы отметить, что при аппаратной реализации ШИМ исключено дистанционное управление, что в свою очередь позволяет применить его только в узконаправленных обла-

стях. Для того чтобы регулировать ширину импульса, необходимо непосредственно прямой контакт с устройством. Это является существенным недостатком.

Реализация программного метода на базе микроконтроллера позволяет, помимо управления ШИМ режимом, осуществлять регулирование ширины импульса любым дистанционным способом, самым распространенным из которых является применение инфракрасного пульта дистанционного управления. Программный метод ШИМ является более универсальным, поскольку позволяет избежать точно закреплённых мест управления величиной импульса.

Литература

1. *Донской Н.В.* Двухфазная широтно-импульсная модуляция в автономных инверторах напряжения / Н.В. Донской, К.А. Чубуков // *Нелинейный мир*. – 2009. – № 9. – С. 684–688.
2. *Васильев А.Е.* Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений / А.Е. Васильев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 304 с.

М.Н. Семёнова, И.А. Якушев
(Мирный, Политехнический институт (филиал)
СВФУ им. М.К. Аммосова)

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ МАТЛАВ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРАКТИВНОГО ОБОЗРЕВАТЕЛЯ

Математическое моделирование представляет собой сложный процесс, целью которого является создание представления о поведении той или иной системы при вариациях её параметров [1]. Под математическим моделированием на практике понимают адекватную замену исследуемого технического устройства или процесса соответствующей математической моделью и её последующее изучение известными методами [2]. Конечно, модель не является точной копией объекта или системы, и моделирование подразумевает пренебрежение какими-либо процессами, происходящими в реаль-

ности. Однако математическое моделирование широко применяется для изучения основных процессов [3]. Кроме того, замена реального объекта его математической моделью дает большие преимущества для исследования [4].

Так называемые «классические» программы математического моделирования, такие как Mathematica, Maple, MathCAD, хорошо приспособлены к выполнению расчётов в дисциплинах естественнонаучного цикла, когда модель задается в аналитической форме [5]. В этих случаях программирование заключается в написании сравнительно небольших по объему программ, состоящих в основном только из макрооператоров [6]. Для оценки и анализа результатов математического моделирования сложных технических систем широкое применение получил пакет программ MatLab [7].

В докладе будет произведена оценка результатов моделирования двигателя постоянного тока (ДПТ) в MatLab при помощи интерактивного обозревателя LTview. Для этого будут рассмотрены следующие вопросы: выведение дифференциальных уравнений; перевод полученных уравнений в операторную форму; расчёт временных постоянных двигателя; получение результатов и их оценка; анализ результатов и проверка передаточной функции на устойчивость.

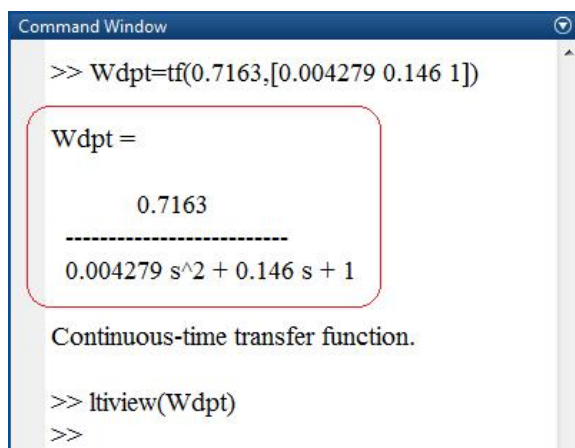
Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) является распространенной электромеханической системой, служащей для приведения в движение технологических установок, благодаря простоте регулирования координат. Систему ДПТ НВ можно условно разделить на три составляющих части: якорь, обмотка возбуждения, механическая часть двигателя. Уравнения этих укрупненных составляющих частей записываются на основании второго закона Кирхгофа и уравнения движения двигателя. В операторной форме записи их можно увидеть в [8].

Для создания математической модели переведем операторную форму системы уравнений в единую передаточную функцию. В этом случае передаточная функция ДПТ НВ будет выглядеть, как показано в [9].

Для реализации математической модели необходимо рассчитать параметры двигателя по методикам, представленным в [10, 11]. Также необходимо рассчитать следующие постоянные времени и коэффициенты ДПТ:

- 1) моментная постоянная двигателя;
- 2) конструктивная постоянная двигателя;
- 3) электромагнитная постоянная времени;
- 4) электромеханическая постоянная времени.

После выполнения всех необходимых расчётов и получения дополнительных параметров двигателя можно приступить к моделированию. Вводим полученную передаточную функцию непосредственно в MatLab в окно Command Window, подставляя рассчитанные ранее коэффициенты и постоянные времени. Передаточная функция ДПТ НВ, рассчитанная для выполнения математического моделирования, будет иметь вид, показанный на рис. 1.



```

Command Window

>> Wdpt=tf(0.7163,[0.004279 0.146 1])

Wdpt =

      0.7163
-----
0.004279 s^2 + 0.146 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> ltiview(Wdpt)
>>
  
```

Рис. 1. Передаточная функция двигателя постоянного тока

Проведем исследования передаточной функции ДПТ на устойчивость по различным критериям при помощи интерактивного обозревателя LTView. Анализируя полученные результаты (рис. 2) согласно методике в [12], можно сделать вывод о полной устойчивости исследуемой передаточной функции.

При умножении единичного ступенчатого воздействия (числителя передаточной функции) на значение входящего сигнала (напряжение якоря), равную 220, получим характеристику переходного процесса угловой скорости вращения двигателя постоянного тока (см. рис. 3).

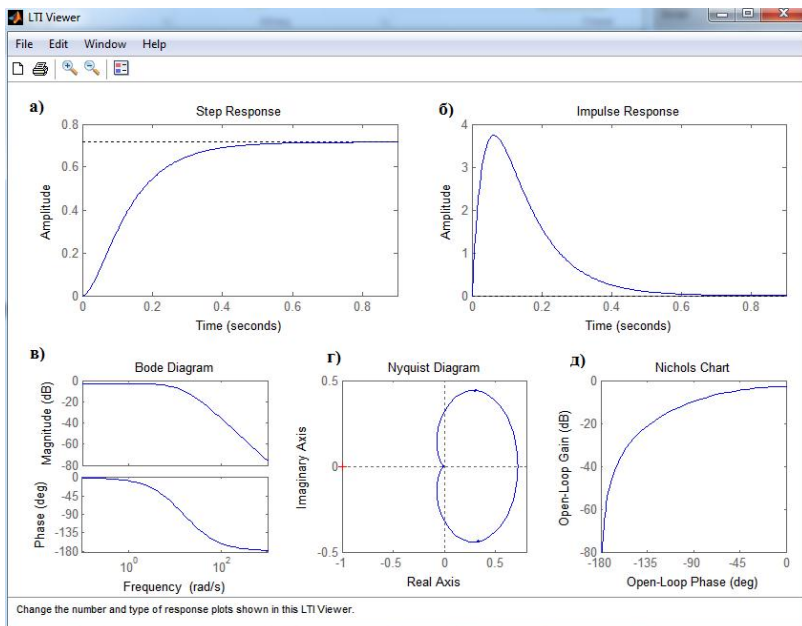


Рис. 2. Результаты анализа передаточной функции на устойчивость: реакция на единичное ступенчатое воздействие (а), реакция на единичное импульсное воздействие (б), логарифмические амплитудочастотная и фазочастотная характеристики (в), диаграмма для оценки устойчивости по Найквисту (г), годограф Николса (д)

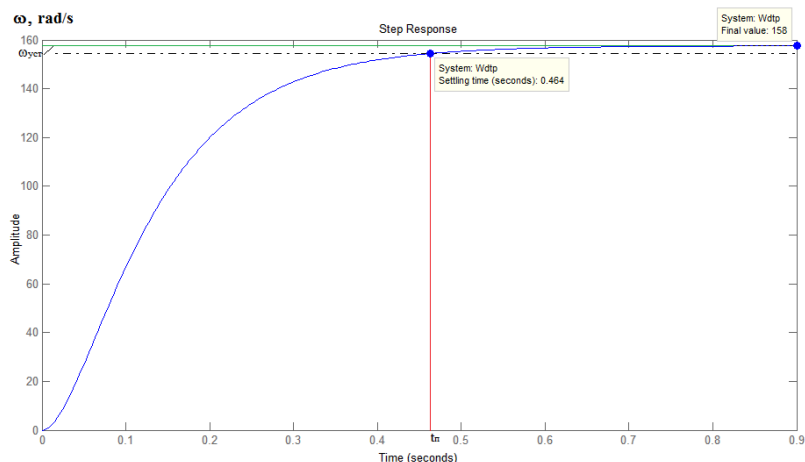


Рис. 3. Оценка переходного процесса угловой скорости двигателя

Произведем оценку переходного процесса угловой скорости ДПТ НВ по ряду показателей качества линейных непрерывных систем, обуславливающих динамику переходного процесса и точность системы, а именно время переходного процесса, перерегулирование и число колебаний [13]. В результате математического моделирования получаем угловую скорость вращения в установившемся режиме работы, равную 158 рад/с, что с точностью 99,4 % совпадает с исходными данными. Продолжительность переходного процесса составляет 0,46 с. Перерегулирование в переходном процессе отсутствует. Характер переходного процесса – аperiodический, колебания отсутствуют.

В заключение следует отметить, что математическое моделирование показывает наилучшие результаты по точности и быстродействию исследуемой электромеханической системы по сравнению со структурным и физическим моделированием [14]. Время переходного процесса и погрешность имеют очень маленькие значения, что говорит о возможностях точной настройки всех параметров модели. Аperiodический характер переходного процесса говорит об отсутствии перерегулирования и колебаниях, которые не допустимы для инерционных систем [15].

Литература

1. *Бebихов Ю.В.* Применение математического моделирования для решения линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений / Ю.В. Бebихов, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 4. – С. 29–36.
2. *Семёнов А.С.* Внедрение пакета программ MATLAB в учебную и научную работу студентов технических специальностей / А.С. Семёнов, Н.Н. Кугушева, В.М. Хубиева, Г.А. Матул // Естественные и технические науки. – 2014. – № 3 (71). – С. 165–171.
3. *Семёнов А.С.* Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB / А.С. Семёнов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 232–236.
4. *Бebихов Ю.В.* Анализ методов моделирования технических систем в среде MATLAB / Ю.В. Бebихов, А.С. Семёнов,

М.Н. Семёнова, И.А. Якушев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 3 (26). – С. 12.

5. *Егорова А.А.* Применение программ математического моделирования при изучении дисциплин естественнонаучного и профессионального циклов у технических специальностей / А.А. Егорова, А.С. Семёнов, М.Н. Петрова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 840.

6. *Семёнов А.С.* Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.

7. *Семёнов А.С.* Особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий / А.С. Семёнов, А.Н. Егоров // Каротажник. – 2018. – № 11 (293). – С. 85–99.

8. *Семёнов А.С.* Математическое моделирование статических и динамических режимов двигателя постоянного тока в пакете программ MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, Я.С. Харитонов // Пром-Инжиниринг: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Челябинск, 2018. – С. 381–385.

9. *Семёнов А.С.* Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523–528.

10. *Семёнов А.С.* Моделирование автоматизированного электропривода / А.С. Семёнов. – М.: Спутник+, 2012. – 60 с.

11. *Семёнов А.С.* Программа MATLAB / А.С. Семёнов. – М.: Спутник+, 2012. – 40 с.

12. *Semenov A.S.* Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB / A.S. Semenov, V.M. Khubieva, Y.S. Kharitonov // Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). – IEEE, 2018. – No. 8501666. – PP. 1–5.

13. *Кугушева Н.Н.* Математическое моделирование сложных электрических цепей в среде MATLAB / Н.Н. Кугушева, А.С. Семёнов, И.А. Якушев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 409–411.

14. Семёнов А.С. Математическое моделирование систем электроснабжения в пакете программ MATLAB / А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 412–415.

15. Kim D.C. Characteristic tracer for measurement of family of I-V characteristics of bipolar transistors / D.C. Kim, A.S. Semenov, P.S. Tatarinov // 14th Int. Sci.-Tech. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2018. – No. 8545730. – PP. 77–81.

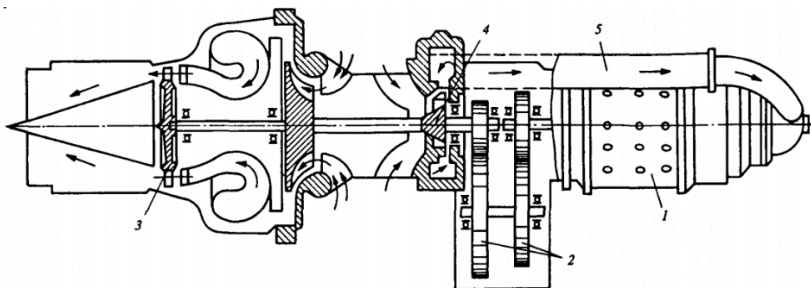
В.И. Курир, Р.А. Катранов, В.Н. Олейников
(Казань, КНИТУ-КАИ)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАПУСКА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

На современных летательных аппаратах (ЛА) широкое применение находят газотурбинные вспомогательные силовые установки (ВСУ), предназначенные для пуска основных двигателей, питания сжатым воздухом системы кондиционирования, привода генераторов и другого вспомогательного оборудования. В полёте ВСУ может быть использован в качестве аварийного источника энергии, что повышает безопасность полёта [1].

В систему запуска ВСУ входят агрегаты и устройства, обеспечивающие предварительную раскрутку ротора ВСУ с установленными на роторе стартер-генератором, редуктором, компрессором, турбиной, а также агрегаты обеспечения подачи топлива и воспламенения горючей смеси в камере сгорания, устройства, обеспечивающие стабильную устойчивую работу двигателя в процессе запуска, устройства, создающие необходимую последовательность и автоматичность работы системы запуска [2].

Общая схема ВСУ представлена на рисунке.



Типовая конструкция ВСУ

В типовой конструкции ВСУ (рисунок) вращающий момент на валу генератора 1 передаётся от турбины 3 через редуктор 2. Охлаждение генератора воздушное, при этом воздух поступает от крыльчатки вентилятора 4 в шланг 5, который соединён с патрубком генератора.

При раскрутке ВСУ обычно используются электростартеры, турбостартеры, пневмостартеры.

В работе рассматривается механизм запуска ВСУ с применением электростартеров.

В состав установки ВСУ входят: 1) газотурбинный двигатель (ГТД); 2) стартер-генератор постоянного тока (ответственный за начальную раскрутку ГТД); 3) генератор переменного тока; 4) система запуска ВСУ.

Процесс электрозапуска ВСУ состоит из 4-х основных этапов [3].

1. Запуск ВСУ при помощи электростартера-генератора постоянного тока с применением реостата в цепи якоря электростартера при пониженном напряжении ($4 \div 5$ В), подаваемом на стартер-генератор из цепи постоянного тока ЛА. Продолжительность этапа ($t = 0 \div 2$ с). Одновременно производится запуск компрессора ГТД.

2. Работа электростартера в режиме, близком к рабочему (напряжение на выводах электростартера $20 \div 30$ В). Ток возбуждения варьируется регулятором тока по закону, обратно пропорциональному скорости вращения вала электростартера. Время данного этапа составляет $t = 2 \div 8$ с.

3. На третьем этапе в раскручивании вала ВСУ принимает участие турбина ГТД. Суммарный механический момент, созда-

ваемый на валу ДПТ электростартером и на валу ГТД турбиной, превосходит значение момента, создаваемого на валу ГТД компрессором, и значение момента, создаваемого силами трения в системе запуска установки. В конце этого этапа происходит запланированное отсоединение стартер-генератора для последующего его перевода в режим генератора. Время действия 3-го этапа $t = 8 \div 32$ с. Скорость вращения вала ВСУ достигает 45 % от скорости вращения вала в рабочем режиме.

4. Раскрутка ВСУ турбиной ГТД. Выход на рабочий режим работы ВСУ $t = 32 \div 45$ с.

Математическая модель, описывающая динамику раскрутки ВСУ, представлена ниже.

Первый этап. Электромеханические процессы, протекающие в электростартере – двигателе постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением в период его работы, опишем системой уравнений, полученной на основе модели обобщённой электрической машины постоянного тока [4]:

$$u = L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + r_{\text{в}} i_{\text{в}}, \quad u = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + (r_{\text{я}} + r_{\text{доп}}) i_{\text{я}} + e_{\text{я}},$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_{\text{н}}, \quad e_{\text{я}} = k_E \omega_m F_{\text{в}}, \quad F_{\text{в}} = k_{\text{ф}} i_{\text{в}}, \quad (1)$$

$$M = k_M i_{\text{в}} F_{\text{в}}, \quad M_{\text{н}} \gg M_{\text{компр}} = k_{\text{компр}} (\omega_2)^2 / \eta \times i_R, \quad \omega_2 = \omega_m / i_R.$$

Здесь u - напряжение, подаваемое в цепь якоря и обмотки возбуждения, В; $i_{\text{я}}, i_{\text{в}}$ - токи в цепи якоря и в обмотке возбуждения, А; $L_{\text{я}}, L_{\text{в}}$ - индуктивности обмотки якоря и обмотки возбуждения, Гн; $r_{\text{я}}, r_{\text{доп}}, r_{\text{в}}$ - сопротивления цепи якоря, дополнительного резистора в цепи якоря, обмотки возбуждения, Ом; $e_{\text{я}}$ - ЭДС вращения якоря, В; J - момент инерции ДПТ, редуктора и вала с компрессором и турбиной, приведённый к валу ДПТ, кг·м²; ω_m, ω_2 - угловые скорости вращения вала ДПТ и вала ГТД, рад/сек; $M, M_{\text{н}}$ - электромагнитный момент ДПТ и момент, создаваемый силами трения при вращении ВСУ, а также развиваемый компрессором ГТД, приведённые к валу ДПТ, н·м; $F_{\text{в}}$ - магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения ДПТ, Вб; η - КПД редуктора; i_R - передаточ-

ное отношение редуктора, расположенного между стартер-генератором и ГТД.

В период первого этапа запуска на якорь и обмотку возбуждения ДПТ подаётся ослабленное напряжение $u = 4 \div 5$ В. В обмотку якоря встроены дополнительный резистор.

Соответственно, в качестве начальных условий запуска ВСУ примем:

$$u = u_0, \quad i_{\text{я}} = i_{\text{в}} = 0, \quad \omega_m = \omega_2 = 0 \quad (t = 0).$$

Второй этап. Извлечение из цепи якоря дополнительного сопротивления. Подача в цепь якоря и в обмотку возбуждения напряжения $u = 20 \div 30$ В. После окончания переходного процесса, протекающего в ДПТ, производится регулирование угловой скорости вращения ДПТ посредством постоянного уменьшения во времени тока в обмотке возбуждения (магнитного потока) согласно уравнению:

$$n = \frac{u_{\text{я}} - r_{\text{я}} i_{\text{я}}}{c_E F},$$

где $c_E = 2\pi k_E$ [5]. После окончания переходного процесса первое уравнение в системе (1) заменяется на уравнение вида

$$i_{\text{в}} = i_{\text{в0}} (\omega_{0m} / \omega_m),$$

где $i_{\text{в0}}$, ω_{0m} – ток в обмотке возбуждения и угловая скорость вращения вала ДПТ к концу переходного процесса в ДПТ.

Третий этап. Третий этап связан с выходом на рабочий режим турбины ГТД.

В связи с этим, третье уравнение системы (1) примет вид

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_{\text{дв}} + M_{\text{турб}} - M_{\text{компр}},$$

где

$$M_{\text{турб}} - M_{\text{компр}} = \frac{M_{\text{турб}} - k_{\text{компр}} (\omega_m / i_R)^2}{\eta i_R}$$

– моменты, создаваемые турбиной и компрессором на валу ГТД, приведённые к валу ДПТ.

Четвёртый этап. На этом этапе происходит заключительная раскрутка вала ГТД под действием момента сил на валу ГТД, создаваемого турбиной и компрессором. Модель, описывающая данный этап, содержит только преобразованное третье уравнение системы (1)

$$J_{\text{к.-т.}} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{турб}} - M_{\text{компр}} = M_{\text{турб}} - k_{\text{компр}} \omega_2^2,$$

где $J_{\text{к.-т.}}$ – суммарный момент инерции турбины с компрессором, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$. В качестве модели ВСУ принят двигатель ТА-6А. Стартером служит стартер-генератор ГС-12ТО. После выхода ВСУ на рабочий режим происходит подключение к системе генератора ГС-12ТО в качестве генератора постоянного тока. Производится подключение генератора переменного тока ГТ40ПЧ6.

Численный расчёт модели запуска ВСУ предполагается проводить в пакете MATLAB последовательно (этап за этапом). За начальные значения переменных величин второго, третьего и четвёртого этапов запуска ВСУ примем их конечные значения к концу первого, второго и третьего этапов.

За контрольные точки для проверки адекватности модели следует принять время достижения ГТД 45 % рабочей скорости вращения (32 с), время достижения ГТД 100 % рабочей скорости вращения (45 с), экспериментальные данные работы [6].

Основная цель работы – введение в практику подготовки бакалавров-дипломников по направлению обучения 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехнологии» элементов научного исследования.

Литература

1. Поляков А.М. Авиационные газотурбинные вспомогательные силовые установки / А.М. Поляков, Ю.И. Шальман, В.И. Кришакин и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
2. Павловский Н.И. Вспомогательные силовые установки самолётов / Н.И. Павловский. – М.: Транспорт, 1977. – 240 с.
3. Кац Б.М. Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей / Б.М. Кац, Э.С. Жаров, В.К. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1976. – 220 с.

4. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

5. *Касаткин А.С.* Электротехника и электроника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 544 с.

6. *Чечулин А.Ю.* Методика учёта мощности, затрачиваемой на вращение ротора авиационного двигателя, в нелинейной динамической модели запуска авиационного газотурбинного двигателя / А.Ю. Чечулин, И.А. Кривошеев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 81–94.

Б.М. Валеев
(Казань, КНИТУ-КАИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ЁМКОСТИ МЕЖДУ ПЛАСТИНОЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И ЦИЛИНДРОМ

Развитие современных высокоточных измерений требует оценки расстояния с высокой точностью [1]. Ёмкостные датчики обладают достаточной чувствительностью для оценки крайне малых расстояний до десятков микрон с чувствительностью до десятых долей микрона [2]. Для перехода от оценки ёмкости между телами к единицам расстояния необходима математическая модель, которая свяжет эти величины [3]. В случае, если поверхность тел обладает геометрией, отличной от рассматриваемой в воздушном конденсаторе, необходимо сформулировать интегральное выражение, которое будет описывать зависимость ёмкости от расстояния между телами [4]. В работе исследуется ёмкость между цилиндром и пластиной сложной формы и формируется математическая модель для оценки расстояния между ними.

Для датчика выбрана топология круга, где круг является электродом. Датчик прикладывается к стенке цилиндра для оценки ёмкости. Схема измерений представлена на рис. 1.

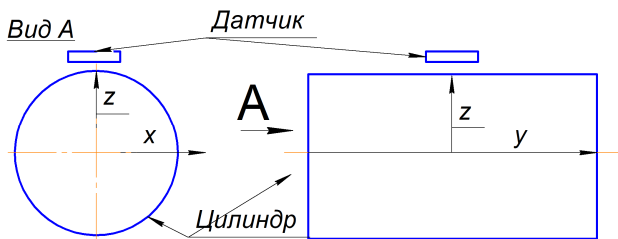


Рис. 1. Схема измерений

В ходе расчётов получено, что математическая модель для измерительной системы описывается следующим выражением:

$$C(r) = 4\epsilon_0\epsilon_r \int_0^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \Big/ \left(R + L - \sqrt{R^2 - x^2} \right),$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость; z, x – координаты по осям; R – радиус цилиндра, L – расстояние до цилиндра, r – радиус датчика.

Для оценки качества полученной математической модели использована приведенная ко входу ошибка. Результаты представлены на рис. 2. При уменьшении ёмкости ошибка возрастает, однако на практике это ведет к уменьшению ошибки при уменьшении расстояния, так как расстояние входит в выражение в отрицательной степени.

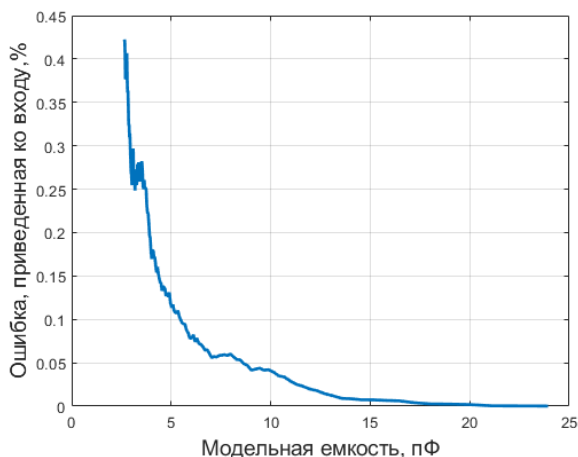


Рис. 2. Результат моделирования

Литература

1. *Валеев Б.М.* Моделирование измерения расстояния ёмкостным датчиком / Б.М. Валеев, Р.К. Сагдиев // Новые технологии. Материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во КАИ, 2018. – С. 59–62.

2. *Валеев Б.М.* Математическая модель системы измерений высокоскоростного вращающегося вала / Б.М. Валеев, Р.К. Сагдиев // Материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во КАИ, 2018. – С. 53–58.

3. *Евдокимов Ю.К.* Алгоритм измерений биений и овальности вращающегося шпиндельного узла / Ю.К. Евдокимов, Б.М. Валеев // Методы моделирования: тр. республ. науч. семинара. – Казань: ФЭн, 2019. – С. 75–83.

4. *Евдокимов Ю.К.* Оценка ёмкости плоского конденсатора с учетом шероховатости поверхности электродов / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, Р.К. Сагдиев, Б.М. Валеев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2019. – № 4(44). – С. 67–75.

Е.А. Шаповалов

(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Транзисторы оконечного каскада усилителя низкой частоты (УНЧ), являются самыми энергетически нагруженными узлами, т.к. они работают на низкоомную нагрузку акустической системы.

В работе [1] показано, что нагрузка динамической головки акустических систем является комплексной и при очень быстром нарастании входного сигнала на УНЧ напряжение на выходных транзисторах может быстро стать больше напряжения пробоя.

Для исследования процессов в усилителях используются современные пакеты компьютерного моделирования [2–5]. Оценку влияния эквивалента нагрузки динамической головки 75 ГДН-1 на

двухтактный каскад проведём с помощью программы моделирования переходных процессов в пакете MultiSim (рис. 1).

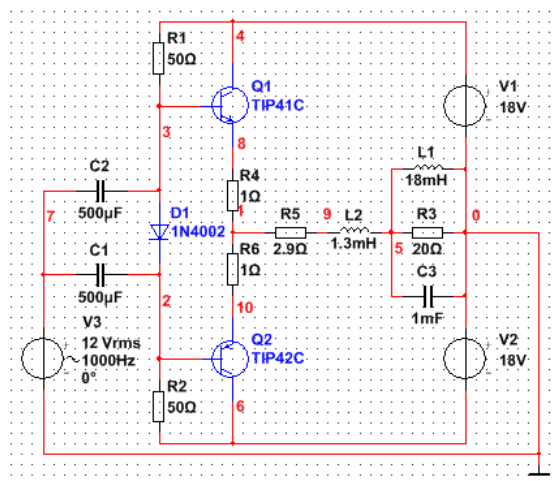


Рис. 1. Выходной каскад

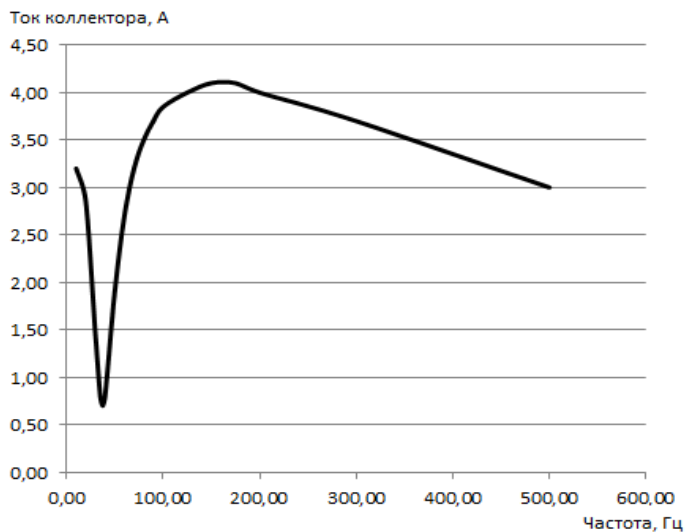
Эквивалент нагрузки состоит из элементов: R3, R5, L1, L2, C3. Зависимости амплитудных значений тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер транзистора Q1 от частоты показаны на рис. 2.

При работе транзисторов Q1 и Q2 на активное сопротивление 4 Ома при амплитудном значении входного напряжения 16,8 В (12 В действующее) амплитудное значение выходной мощности на нагрузке равно 26 Вт, амплитуда тока коллектора 1,8 А и амплитудное значение мощности рассеивания на коллекторе 6,3 Вт.

Как видно из рис. 2, при работе усилителя на реактивную нагрузку зависимости тока коллектора и рассеиваемой мощности на коллекторе сильно зависят от частоты. На рис. 2, а показано, что на частоте 160 Гц ток коллектора достигает 4,1 А, что в 1,2 раза выше номинального значения. На рис. 2, б видно, что на частотах 10 Гц и 160 Гц рассеиваемая мощность на транзисторе возрастает в 3,8 раза выше номинального значения.

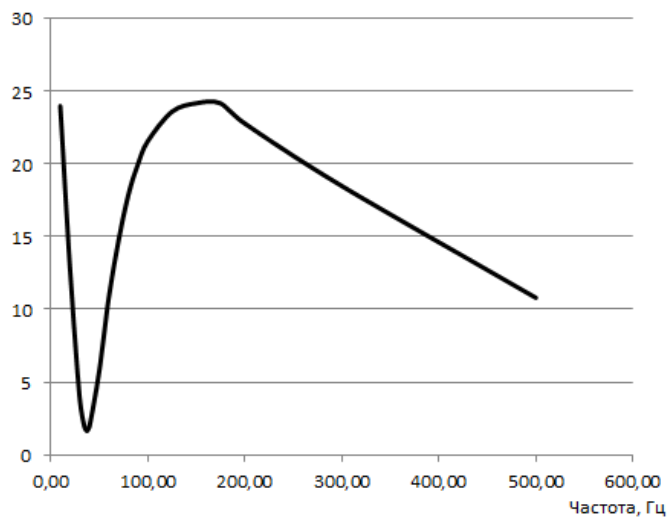
Таким образом, при работе усилителя низкой частоты на динамическую головку, которая является комплексной нагрузкой, в выходных транзисторах между током коллектора и напряжением коллектор – эмиттер на определённых частотах возникают значительные фазовые сдвиги, что приводит к значительному возраста-

нию тока коллектора и рассеиваемой мощности на коллекторе транзистора. Эти факторы и приводят к пробое транзистора.



a

Мощность рассеиваемая на коллекторе, Вт



б

Рис. 2. Зависимости тока коллектора (*a*) и мощности рассеивания на коллекторе (*б*) от частоты

Литература

1. *Шкритек П.* Справочное руководство по звуковой схемотехнике / П. Шкритек. – Пер. с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с.
2. *Чумаров С.Г.* Моделирование импульсных усилителей тока в среде Altium Designer / С.Г. Чумаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 439–441.
3. *Чумаров С.Г.* Моделирование высокочастотных усилителей для современных радиосистем / С.Г. Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 325–327.
4. *Охоткин Г.П.* Режим пробоя коллекторной цепи транзистора в ключевых генераторах с внешним возбуждением / Г.П. Охоткин, А.Г. Чертановский, Н.В. Павлов и др. // Нигматуллинские чтения – 2018: сб. тр. Междунар. конф. – Казань, 2018. – С. 205–208.
5. *Чертановский А.Г.* Режим внутреннего обрыва в транзисторе при работе в ключевых генераторах с внешним возбуждением / А.Г. Чертановский, Г.П. Охоткин // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем: материалы III Междун. науч.-практ. конф., посв. 110-летию со дня рожд. акад. Н.А. Пилюгина. Часть II. – Елец: Елецкий гос. ун-т им. И.А. Бунина, 2019. – С. 108–112.

К.С. Гладнев
(Казань, КНИТУ-КАИ)

ОБЗОР КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

На сегодняшний день в калориметрии применяется чрезвычайно большое количество методов измерений и типов аппаратуры, поскольку решение каждой конкретной задачи зависит от исследуемого процесса. Калориметрические измерения, как правило, состоят в наблюдении за изменением температуры калориметрической системы во время опыта.

Проведя анализа работ по калориметрии установлено, что классификацию калориметрических методов можно построить на основе измеряемой переменной [1–3]. Чаще всего измеряются следую-

щие величины: температура калориметрической системы T_c ; температуры оболочки T_o , окружающей калориметрическую систему; количества теплоты L , выделяемой в калориметре в единицу времени (тепловой мощности). В связи с этим можно выделить следующие типы калориметрических методов: 1) адиабатический; 2) изотермический; 3) диатермический; 4) теплопроводящий; 5) проточный; 6) дифференциальный сканирующий.

В **адиабатическом** калориметре отсутствует обмен между камерой, в которой проходит тепловая реакция, и окружающей средой (или обмен минимальный). В калориметрах данного типа внутренняя и внешняя оболочки изолированы и отделены друг от друга, а теплота Q , выделяемая в калориметре, идёт на нагревание содержимого калориметрической ячейки. Таким образом, температура калориметра в конце эксперимента становится выше начальной на ΔT . Соответственно, измеряя температуру, вычисляется теплота, так как $Q = C\Delta T$, где C – теплоёмкость калориметра. С целью минимизации теплообмена пространство между камерой, в которой проходит реакция, а внешней оболочкой калориметра вакуумируют. Адиабатические калориметры обладают относительно большой инерцией и функционируют при температуре, меняющейся в течение опыта.

В **изотермических** калориметрах теплопроводность калориметра велика и теплота переходит во внешнюю среду. Из названия ясно, что разность температур между внутренней оболочкой калориметрического сосуда и его внешней оболочкой постоянна и очень мала $\Delta T \rightarrow 0$, а её измерение затруднено и не представляет интереса. В калориметрах данного типа измеряют величины, пропорциональные потоку выделяемой теплоты, а количество теплоты, выделенное в ходе реакции, определяют по количеству вещества, изменившего свое агрегатное состояние. Чаще всего изотермические калориметры используются для определения тепловых эффектов длительных процессов.

В **диатермических** (с переменной температурой) калориметрах измеряется температура калориметрической системы и в последующем определяется количество теплоты. В калориметрах данного типа измерительная ячейка обычно размещается в гнезде, которое находится в среде с регулируемой температурой. Другой способ реализации состоит в том, что калориметриче-

скую систему окружают регулируемые экранами, таким образом образуется оболочка калориметра. Диатермические калориметры также разделяются на калориметры с изотермической оболочкой (изопериболические) и калориметры с адиабатической оболочкой. К данному классу калориметров также можно отнести и дифференциальные сканирующие калориметры (ДСК), но в связи с высокой распространённостью сегодня ДСК обособляют в отдельный тип калориметрических устройств.

Теплопроводящие калориметры, также известные как калориметры Кальве, принято рассматривать в качестве особого типа калориметрических установок. В установках данного типа измерительные камеры (две или три) окружены измерительными термобатареями. Работа калориметра основана на измерении термо-ЭДС, возникающей в термобатареях при прохождении через неё теплового потока от реакционной камеры к массивному металлическому калориметрическому блоку термостата калориметра, или наоборот.

Проточные калориметры предназначены для исследования жидких и газообразных веществ, а определение тепловых эффектов осуществляется по удельной теплоёмкости и массе газа (жидкости), которые заранее известны и выносят тепло из калориметрической ячейки.

В **дифференциальной сканирующей калориметрии** теплота определяется через тепловой поток. Тепловой поток вычисляется по разнице температур в двух точках измерительной системы в один и тот же момент времени. Конструкция дифференциального сканирующего калориметра предполагает наличие двух калориметрических ячеек в измерительной системе. Первая ячейка содержит исследуемый образец, а вторая пустая или содержит эталонный образец. Экспериментально измеряя временную зависимость разницы температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения, рассчитывается тепловой поток.

Выбор методики, конструкции и типа калориметра определяется характером и продолжительностью изучаемого процесса, диапазоном температур, в котором проводят измерение, количеством измеряемой теплоты и требуемой точностью. Современные калориметры охватывают диапазон температур от 0,1 до 4000 К и позволяют измерять количество теплоты от десятых до нескольких тысяч Дж [4].

Литература

1. Колесов В.П. Основы термохимии / В.П. Колесов. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 205 с.
2. Хеммингер В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене. – М.: Химия, 1989. – 176 с.
3. Альмяшев В.И. Комплексный термический анализ: учеб. пособие / В.И. Альмяшев, А.К. Василевская, С.А. Кириллова и др. – СПб.: Лема, 2017. – 194 с.
4. Попов М.М. Термометрия и калориметрия / М.М. Попов. – М.: МГУ, 1954. – 943 с.

Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин
(Казань, КНИТУ-КАИ)

ОДНОСЛОЙНЫЙ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК

В настоящее время существуют различные виды квазираспределённых резистивных датчиков. Основное применение таких датчиков заключается в измерении поля физических величин, т.е. определении распределения значений физической величины по поверхности.

Квазираспределённые резистивные датчики в основном выполняются в матричном виде, в котором одиночные чувствительные элементы объединены в матричную структуру [1]. Достоинства таких датчиков заключаются в простоте считывания данных с каждого отдельного чувствительного элемента, т.к. к каждому чувствительному элементу можно получить отдельный доступ с помощью проводников линий строк и столбцов. Недостаток таких датчиков состоит в том, что для их реализации необходима многослойная структура во избежание пересечения проводников линий строк и столбцов.

Другим видом структур, по которой могут быть реализованы квазираспределённые резистивные датчики, является сеточная структура [2], в которой одиночные резистивные элементы соединены в сеточную структуру. Достоинства таких датчиков состоят в том, что они могут быть изготовлены однослойными и использованы в системах, где для подключения измерительного оборудования

доступны только внешние выводы квазираспределённого резистивного датчика. Недостаток таких датчиков в том, что при увеличении размеров квазираспределённого резистивного датчика увеличивается сложность вычислений и растёт погрешность измерения значений сопротивлений чувствительных элементов. Погрешность определения сопротивлений для каждого чувствительного элемента зависит от его места расположения в структуре квазираспределённого резистивного датчика.

Для использования достоинств каждого датчика (простота считывания данных с каждого чувствительного элемента в структуре квазираспределённого резистивного датчика и возможность изготовления однослойным) и исключения их недостатков (многослойная структура, увеличение сложности вычислений и рост погрешности определения сопротивлений чувствительных элементов с ростом их количества в структуре квазираспределённого резистивного датчика) необходимо создание новой структуры квазираспределённого резистивного датчика.

Предлагаемый квазираспределённый резистивный датчик представляет из себя набор электрически соединённых резистивных чувствительных элементов, соединены в древовидную структуру с возможностью измерения сопротивления отдельного датчика по методу «вольтметра-амперметра» с обеспечением различных путей протекания токов зондирующего и измерительного сигналов.

За счёт использования древовидной структуры устраняются пересечения проводников, характерные для матричных структур. Поэтому квазираспределённый резистивный датчик, выполненный по древовидной структуре, может быть выполнен однослойным. На погрешность измерения сопротивлений чувствительных элементов при использовании древовидной структуры не будут влиять размеры квазираспределённого резистивного датчика, т.к. ток, протекающий по измерительной цепи, будет намного меньше зондирующего тока и влияние измерительной цепи при измерениях будет незначительным.

Литература

1. *Bo Zhou*. Resistive Pressure Force Sensor Matrix for Wearable and Ubiquitous Computing / Zhou Bo // Master Thesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2013. – 72 p.

2. Denisov E. Quasi-distributed resistive sensor for steady-state field measurements / E. Denisov, et al. // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, 2016. – PP. 1–5.

В.Г. Захаров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ПРИМЕНЕНИЕ БИЕНИЙ ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ

Биения двух близких частот можно использовать в качестве носителя информации по аналогии с периодическими импульсами в амплитудно-импульсном способе модуляции [1].

При разложении суммы двух гармонических сигналов с близкими угловыми частотами ω_1, ω_2 ,

$$\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t = 2 \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \cos \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t$$

возникают низкочастотные биения, заполненные высокой частотой с чередующейся фазой (рис. 1).

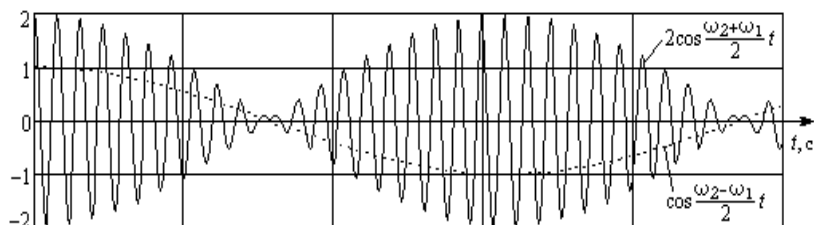


Рис. 1. Биения двух гармонических сигналов с близкими частотами ω_1, ω_2

Предлагается способ модуляции радиосигнала, отличающийся тем, что в качестве носителя информации используются биения двух близких частот, на основе которых осуществляется кодирование информации, при этом полусумма двух близких частот может быть использована в качестве несущей частоты радиосигнала [2].

Блок-схема амплитудного модулятора на биениях состоит из сумматора Σ , модулятора М1, фильтра Ф, настроенного на полусумму двух близких частот, и модулятора М2 с более высокой несущей круговой частотой $\omega_{\text{нес}}$ (рис. 2).

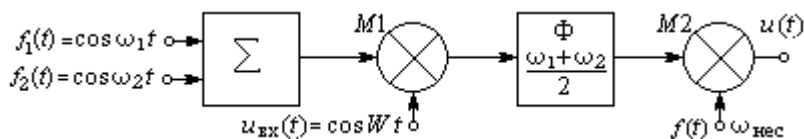


Рис. 2. Блок-схема модулятора на биениях

Сигнал с амплитудной модуляцией на биениях

$$u(t) = (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \cos Wt,$$

реализован по схеме на рис. 3 в программе Electronics WorkBench 5.12). Результаты моделирования представлены на рис. 4. Сигналы генераторов $u_1(t)$, $u_2(t)$ с близкими круговыми частотами ω_1 , ω_2 после суммирования на резисторе R_3 поступают через резистор R_4 на анод смесительного диода VD ; на этот же вход поступает модулирующий сигнал $u_{вх}(t)$ с круговой частотой W . На выходе получаем амплитудно-модулированный сигнал $u(t)$ на биениях.

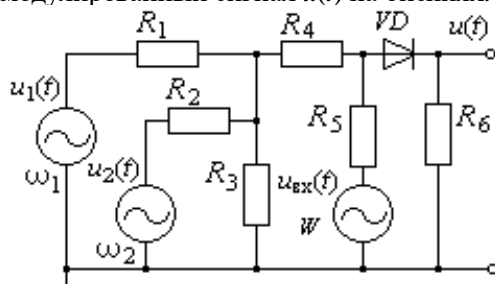


Рис. 3. Схема моделирования

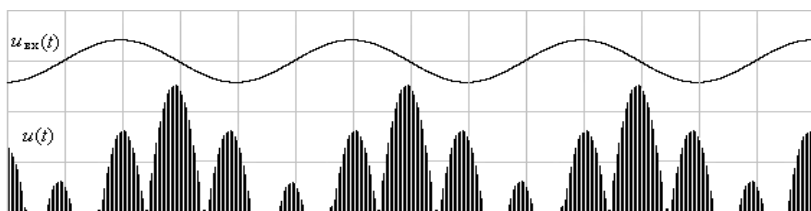


Рис. 4. Диаграммы моделирования ($\omega_1 = 20000$, $\omega_2 = 20200$, $W = 314$ рад/с)

Как видно из рис. 4, выходное напряжение $u(t)$ отстает по фазе от модулирующего сигнала $u_{вх}(t)$, что обусловлено огибающей биений. Частота биений, как и в амплитудно-

импульсном способе модуляции, выбирается в два раза выше максимальной частоты в спектре передаваемого сигнала.

Литература

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

2. Захаров В.Г. Применение теории биений для формирования частотно-манипулированного радиосигнала / В.Г. Захаров // Информационные технологии в электротехнике и в электроэнергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 450–451.

А.Г. Чертановский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА ТОКА ВЕТВИ БЫСТРЫМ МЕТОДОМ КИРХГОФА

В стандартных пакетах компьютерного моделирования радиоэлектронных цепей, которые, например, применили в работах [1–3] используется метод узловых потенциалов, однако этот метод требует решения системы линейных уравнений. В быстром методе Кирхгофа [4–7] расчётное выражение формируется непосредственно из схемы радиоэлектронной цепи.

Алгоритм расчёта тока ветви, обусловленного источниками ЭДС:

1. Найдем контурный определитель любым методом.
2. Выделим из контурного определителя все слагаемые, для которых сопротивление j -й ветви является множителем.
3. Найдем все контуры в схеме, в которые замыкаются через сопротивление j -й ветви, и запишем их суммарные ЭДС.
4. Выделенные слагаемые сгруппируем по единственным и общим контурам [4–6].
5. Запишем выражение тока ветви, обусловленного источниками ЭДС, согласно формуле (1) в работе [6].

Алгоритм расчёта тока ветви обусловленного источниками тока:

1. Найдем контурный определитель любым методом.

2. Выделим из контурного определителя все слагаемые, для которых сопротивление j -й ветви не является множителем.

3. Найдем все наложения токов в схеме, которые образуются источники тока через сопротивление j -й ветви, и запишем суммы их токов.

4. Выделенные слагаемые сгруппируем по единственным и общим наложениям токов [7].

5. Запишем выражение тока ветви, обусловленного источниками тока, согласно формуле (1) в работе [7].

Применение алгоритмов быстрого метода Кирхгофа позволяет исключить решение системы линейных алгебраических уравнений, а также сократить время на формирование символического выражения тока ветви, т.е. избежать дубликаций и сократить трудоёмкость расчёта.

Литература

1. Чумаров С.Г. Моделирование импульсных усилителей тока в среде Altium Designer / С.Г. Чумаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 439–441.

2. Чумаров С.Г. Моделирование высокочастотных усилителей для современных радиосистем / С.Г. Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 325–327.

3. Охоткин Г.П. Режим пробоя коллекторной цепи транзистора в ключевых генераторах с внешним возбуждением / Г.П. Охоткин, А.Г. Чертановский, Н.В. Павлов и др. // Нигматуллинские чтения – 2018: сб. тр. Междунар. конф. – Казань, 2018. – С. 205–208.

4. Чертановский А.Г. Теоремы быстрого метода Кирхгофа / А.Г. Чертановский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 319–321.

5. Чертановский А.Г. Свойства теоремы Кирхгофа / А.Г. Чертановский // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 263–267.

6. *Чертановский А.Г.* Быстрый метод Кирхгофа. Формула тока ветви обусловленного источниками ЭДС / А.Г. Чертановский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 355–357.

7. *Чертановский А.Г.* Быстрый метод Кирхгофа. Формула тока ветви, обусловленного источниками тока / А.Г. Чертановский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 432–424.

А.Г. Чертановский
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

БЫСТРЫЙ МЕТОД КИРХГОФА. ФОРМУЛА НАПРЯЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ИСТОЧНИКАМИ ЭДС

Современные пакеты компьютерного моделирования радиоэлектронных цепей, которые например, применили в работах [1, 2], базируются на методе узловых потенциалов. Метод узловых потенциалов требует решения системы линейных уравнений. Известен метод «Модифицированных правил Кирхгофа» [3], в котором не требуется решения этих систем.

Согласно следствию 5 [3] из контурного определителя, требуется выделить слагаемые, содержащие сомножителями сопротивления r, s, \dots, q ветвей схемы с источниками ЭДС, и для нахождения всех суммарных ЭДС пути требуется обойти все создаваемые пути, что в свою очередь приводит к дубликциям.

Формула напряжения j -й ветви, обусловленного источниками ЭДС, представляет собой выражение

$$U_j = \frac{\sum_{f=1}^F \Delta_z Z_f E_f + \sum_{p=F+1}^P \Delta_z^p Z_{l_p} E_p}{D_z},$$

где Δ_z – контурный определитель; Z_f – слагаемое контурного определителя, причём для него в схеме образуется единственный путь; Z_{l_p} – слагаемое контурного определителя, причём для него в схеме

образуется общий путь; L_p – количество слагаемых контурного определителя, для которых в схеме образуется один и тот же общий путь; F – общее количество единственных путей; P – общее количество всех путей; E_f, E_p – путевые ЭДС.

Доказательство: Согласно следствию 5 [3] при удалении сомножителей слагаемого из схемы образуется путь, при этом числитель выражения напряжения между j -м и базисным узлом будет суммой произведений слагаемых контурного определителя, умноженного на суммарную ЭДС этого пути. Из доказательства теорем [4–6] создаваемые пути в схеме могут быть единственными или общими, причём общий путь образуется для нескольких слагаемых, и при этом для этих путей будет одна и та же суммарная ЭДС.

Заключение. Применение быстрого метода Кирхгофа позволяет сократить время на формирование символьного выражения напряжения, обусловленного источниками ЭДС, избежать дубликаций и сократить трудоёмкость расчёта.

Литература

1. Чумаров С.Г. Моделирование импульсных усилителей тока в среде Altium Designer / С.Г. Чумаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 439–441.
2. Чумаров С.Г. Моделирование высокочастотных усилителей для современных радиосистем / С.Г. Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 325–327.
3. Захаров В.Г. Расчёт электрических цепей по модифицированным правилам Кирхгофа: учеб. пособие / В.Г. Захаров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2006. – 128 с.
4. Чертановский А.Г. Теоремы быстрого метода Кирхгофа / А.Г. Чертановский // Информационные технологии в электро-технике и электроэнергетике: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 319–321.
5. Чертановский А.Г. Свойства теоремы Кирхгофа / А.Г. Чертановский // Проблемы и перспективы развития энергетики, элек-

тротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 263–267.

6. *Чертановский А.Г.* Некоторые теоремы быстрого метода Кирхгофа / А.Г. Чертановский // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319–321.

С.В. Янкевич¹, В.А. Афанасьев¹, Г.В. Малинин²

(¹Москва, ООО «НПП «ДЖЕНЕРУС»;

²Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова)

ТЕХНОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОСОЛА РЫБНОЙ И МЯСНОЙ ПРОДУКЦИИ

Посол как способ консервирования известен около 2000 лет, но разработка теории посола началась сравнительно недавно. Независимо от способа посола (сухой, смешанный, тузлучный) через некоторое время образуется система из двух фаз: рыбы и тузлука (при сухом и смешанном посоле кристаллическая соль растворяется в воде и образует тузлук). Между рыбой и тузлуком происходит массообмен, результатом которого является просаливание рыбы. Процесс просаливания представляет собой диффузию молекул NaCl из тузлука в мясо рыбы и диффузионно-осмотический перенос воды из тканей рыбы в раствор соли – самопроизвольное выравнивание концентрации соли во всем объеме системы под влиянием теплового движения молекул и ионов [1]. Этот процесс продолжается до полного выравнивания концентрации соли. Изучение закономерностей диффузии соли в мясе рыбы и влияния на этот процесс различных параметров представляет наибольший интерес.

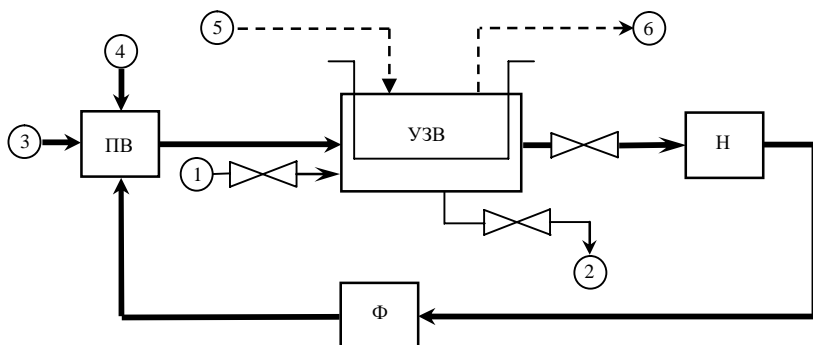
В настоящее время для ускорения просаливания рыбной и мясной продукции в пищевой промышленности используют инъекционный посол, который осуществляет прямой впрыск тузлука в толщу мяса рыбы специальным устройством – игольчатым инъектором [2]. Введение тузлука непосредственно в толщу мяса рыбы значительно ускоряет процесс посола. Однако


говорить о том, что такое шприцевание ведет к равномерному распределению соли по всей мышечной ткани рыбы неверно.

Основные недостатки технологии инъекционного посола состоят в следующем. Во-первых, неравномерное распределение соли по всей мышечной ткани рыбы ведет к производству низкокачественного продукта. Во-вторых, в процессе инъектирования мышечная ткань рыбы подвергается механической деформации и дополнительно тендеризуется, что искусственно увеличивает выход готовой продукции на 10–20 % от начальной массы рыбы за очень короткое время. В-третьих, высокая цена на инъекционное оборудование для посола, а также большая стоимость монтажа и демонтирования такого оборудования. В-четвертых, большой расход воды и электроэнергии. Из положительных моментов рассматриваемой технологии можно выделить только высокую производительность – 1–15 т/час. Очевидно, что перекладывая дополнительные расходы на конечного потребителя и нежелание применять новые, более дешевые технологии, технология инъекционного посола ещё долго будет востребована на этом рынке.

Компании ООО «НПП «ДЖЕНЕРУС» удалось провести эксперимент по ускорению посола рыбы, используя ультразвук. При прочих равных условиях скорость посола мышечной ткани одной и той же рыбы была значительна: за 10 минут воздействия высокоинтенсивным ультразвуком удалось просолить 90 % мышечной ткани рыбы. Имеются положительные отзывы компании ОАО «Рыбообрабатывающий комбинат № 1», которая применяет технологию ультразвукового посола рыбы.

Из полученных экспериментальных данных по посолу рыбы и минимальной производительности поточного инъектора (1 т/час) компанией ООО «НПП «ДЖЕНЕРУС» спроектирована технологическая линия по ультразвуковому посолу рыбы и мяса производительностью 120 кг/час. Функциональная схема такой линии в общем виде представлена на рисунке. При посоле филе крупной деликатесной рыбы необходимы 8 таких линий, которые в сумме дают производительность одного поточного инъектора. Стоимости 8 ультразвуковых линий посола в сумме оказывается дешевле одного инъектора в 2–2,5 раза, а потребление энергии из сети (с учётом всех насосов) – в 2,3 раза меньше потребления одного инъектора.



Общая функциональная схема технологической линии ультразвукового посола: УЗВ – ультразвуковая ванна, где происходит посол рыбы или мяса; Н – насос для обеспечения циркуляции тузлучной жидкости; Ф – фильтр для очистки тузлучной жидкости; ПВ – промежуточная ванна для заполнения циркулирующей тузлучной жидкости и добавления необходимого количества соли и воды; 1 – подача нового тузлучного раствора; 2 – слив использованного тузлучного раствора; 3 – подача свежей воды; 4 – подача соли; 5 – загрузка несоленой рыбы; 6 – выгрузка просоленной рыбы;  – вентили.

Экономическая целесообразность технологии ультразвукового посола очевидна по сравнению с технологией инъекционного посола: качество продукта улучшается, а потребитель не переплачивает за привес готового продукта. При этом под воздействием ультразвука уничтожается и вся имеющаяся в рыбе гнилостная микрофлора, что позволяет снизить требования к условиям хранения готовой продукции.

Принцип действия предлагаемой технологической линии ультразвукового посола следующий. Очищенная и распотрошенная свежая или размороженная рыба загружается (5) на дно ультразвуковой ванны (УЗВ) и прижимается сеткой. Тузлучная жидкость будет выталкивать рыбу на поверхность, поэтому необходимо использовать сетку. Затем в УЗВ происходит подача свежего тузлука (1) и включается ультразвуковой генератор (на схеме не показан) на время 10–30 мин. Под действием ультразвука мышечная ткань рыбы просаливается, и генератор отключается. Просоленная рыба выгружается (6) для дальнейшей переработки, а тузлук начинает циркулировать под действием насоса (Н) в промежуточную ванну

(ПВ), где в тузлук должна добавляться соль (4) и вода (3) для компенсации диффузии и поддержания солености раствора. При каждой циркуляции тузлук должен фильтроваться в фильтре (Ф) от примесей, грязи, чешуи, которая появляется вследствие предыдущего этапа ультразвуковой обработки рыбы. Затем процесс повторяется с той лишь разницей, что новая партия рыбы будет помещаться в УЗВ, уже наполненную тузлуком. По мере ухудшения и загрязнения тузлучной жидкости она должна полностью сливаться (2) в очистные сооружения.

Главный вопрос, который может возникнуть у технологов такого производства, – за счёт каких физических процессов происходит посол рыбы при использовании ультразвуковой технологии? Ведь известно, что при растворении в воде соль вытесняет молекулы газа из воды и тузлучная жидкость становится плотной, газовых пузырьков в ней уже нет и соответственно процесс кавитации там не может происходить. Положительный эффект ультразвуковой технологии проявляется благодаря вихревому движению тузлучной жидкости: за счёт силы вихря тузлук будет проникать в толщу мяса рыбы. Чем выше интенсивность ультразвукового генератора, тем больше сила вихря. Очевидно, что процесс посола мяса будет происходить так же с единственной разницей во времени посола за счёт более плотного строения ткани мяса животных.

Полученные результаты позволяют рекомендовать технологию ультразвукового посола рыбы и мяса для использования на предприятиях малого бизнеса и в сетевых торговых компаниях. Предлагаемая технология посола показывает целесообразность проектирования и изготовления соответствующего оборудования и преимущества по сравнению с технологией инъекционного посола.

Литература

1. *Димова В.В.* Исследования кинетики и динамики просаливания рыбы / В.В. Димова, А.М. Ершов, В.А. Гроховский // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9, № 4. – С. 703–706.
2. *Сницарь Д.Г.* Технология инъекционного посола рыбной продукции / Д.Г. Сницарь // Производство рыбной продукции: проблемы, новые технологии, качество: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Светлогорск, 2007. – С. 211–212.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ	3
<i>Корнеев А.П.</i> Система управления объектом с распределёнными параметрами	3
<i>Ильгачёв А.Н.</i> Идентификация объектов управления методом площадей	5
<i>Афанасьев А.А., Генин В.С.</i> Математическая модель регулируемого электромагнитного редуктора с трёхфазной обмоткой статора	9
<i>Дымов И.С., Котин Д.А.</i> Расчёт адаптивного регулятора тока системы устранения радиальных отклонений ротора	11
<i>Дементьев Н.И., Андриянов А.И.</i> Разработка системы диагностики и управления для информирования оператора при управлении строительно-дорожной техникой	13
<i>Ильин М.В., Алямкин А.В.</i> Программное обеспечение для системы управления функционального источника тока	14
<i>Павлов Е.С., Калинин Д.И., Петрушин Д.Е.</i> Система мониторинга запасов устойчивости	22
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ	26
<i>Никишин Т.П., Денисов Е.С., Евдокимов Ю.К.</i> Микропроцессорная система обработки данных для диагностики водородных топливных элементов по релаксационным характеристикам	26
<i>Чумышкин В.А., Галанина Н.А.</i> Преимущества реализации КИХ-фильтров в системе счисления в остаточных классах	28
<i>Семенов В.И., Чучкалов С.И., Шурбин А.К.</i> Многократное уменьшение времени обратного непрерывного вейвлет-преобразования при одновременном увеличении точности реконструкции сигнала	30
<i>Лебедев А.А., Завьялов Д.В., Казина Е.М., Журавлева А.С.</i> Аугментация базы эндоскопических изображений для системы поддержки принятия решений в колоноскопии	36

<i>Ляшева М.М.</i> Анализ значимости коэффициентов вейвлет-преобразования для сжатия изображений	40
<i>Ляшева М.М., Ляшева С.А., Шлеймович М.П.</i> Сжатие изображений на основе вейвлет-преобразования Хаара и адаптивного метода Хаффмена	42
<i>Раупов Р.Р., Афанасьев В.В.</i> Статистические характеристики 3D сигналов многолепестковой системы по схеме Jerk	44
<i>Бычкова И.Ю., Самсонов А.И.</i> Корреляционный анализ ультразвуковых сигналов при двухлучевом контроле: временное разрешение	46
<i>Давыдов В.Г., Афанасьев В.В.</i> Корреляционная обработка шумоподобных сигналов дискретной системы Дмитриева–Кислова	49
<i>Колесников А.М.</i> Цифровой модуль контроля и управления	51
<i>Белов Д.Н., Галанина Н.А.</i> Разработка и исследование методов обработки видеоизображений для определения уровня концентрации внимания водителя	53
<i>Антонова О.С., Матвеев Д.В., Седов А.Г., Тихомиров А.А.</i> Разработка алгоритмов оценки качества изображений в задачах распознавания	55
<i>Григорьев А.В.</i> Адаптивная фильтрация яркостей точек групповых точечных объектов	58
<i>Фарфоровский Д.Б.</i> Сравнение эффективности свёрточных и турбо-кодов в Matlab	60
<i>Соболев Н.В., Тихомиров А.А.</i> Влияние скорости изменения амплитудных значений сигнала на точность фильтрации	63
<i>Ларионов Р.В., Павлов В.А., Ронзина Е.С.</i> Сегментация вырубок лесных массивов на спутниковых изображениях	65
<i>Бычков А.В., Григорьев В.Г.</i> Вибрации в разных диапазонах частот: особенности активного ультразвукового контроля	69
<i>Иркагалиева И.И., Кузьмин И.Л., Хузяшев Р.Г.</i> Алгоритм определения существенных признаков сигнала переходного процесса	72
<i>Буткевич Ю.Р., Афанасьев В.В.</i> Цифровой коррелятор сигналов динамических систем Дуффинга–Холмса с хаотической динамикой	74

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ	76
<i>Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В.</i>	
Управление теплоснабжением зданий и сооружений	76
<i>Табаков И.А., Славутский А.Л., Славутский Л.А.</i>	
Моделирование и нейросетевой анализ случайных сигналов для волнового метода определения места повреждения	78
<i>Иванов А.Ф., Аbruков В.С.</i> Нейросетевое моделирование технологического процесса ультразвуковой очистки элементов электроники	
	81
<i>Степанова Д.А., Федотов А.Ю., Наумов В.А., Антонов В.И.</i> Нейросетевой алгоритм скоростного изменения режима солнечной фотоэлектрической станции	
	86
<i>Коцеев М.И., Славутский Л.А.</i> Оценка параметров переходных процессов при помощи нейронной сети	
	94
<i>Мамоничев М.Е., Митяшин Н.П., Миргородская Е.Е.</i> Безопасный источник питания для квазинепрерывных лазерных сборок	
	98
<i>Лыкова М.П.</i> Использование иммунных интеллектуальных систем в ОАО «РЖД»	
	101
<i>Бебихов Ю.В., Кугушева Н.Н.</i> Структурное моделирование технических систем в Matlab/Simulink	
	103
<i>Тяпин А.А., Кинев Е.С.</i> Численный анализ режимов индукционной установки по параметрическим моделям	
	107
<i>Гольшиев Н.В., Моторин С.В., Гольшиев Д.Н., Клименко С.Ф.</i> Математическая модель, не требующая аналитических выражений для расчёта шумовых параметров первичных преобразователей	
	112
<i>Черемухин Д.А.</i> Исследование прямоугольного волновода	
	116
<i>Гольшиев Н.В., Моторин С.В., Гольшиев Д.Н., Клименко С.Ф.</i> Программное обеспечение расчёта шумовых параметров первичных преобразователей	
	121
<i>Макаров А.В., Макарова Т.В., Макаров В.Г., Степанов Е.М.</i> Моделирование активного фильтра высших гармоник тока для системы электроснабжения дуговой сталеплавильной печи	
	125
<i>Полуянович Н.К., Азаров Н.В., Огреничев А.В.</i> Нейросетевая система прогнозирования ресурса силовых кабельных линий	
	127

<i>Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Кордубайло А.О.</i> Разработка системы питания и управления имитационной модели электромагнитного привода виброисточника	129
<i>Гайсин Н.Р., Денисов Е.С.</i> Нейросетевая модель для диагностики критических режимов работы водородного топливного элемента	131
<i>Корытченкова Е.Е.</i> Моделирование переходных процессов в микрогрид с топливными элементами	132
<i>Степанов Е.М., Макаров А.В., Макарова Т.В., Макаров В.Г.</i> Моделирование выпрямителя с функцией активного фильтра высших гармоник тока для системы электропитания летательного аппарата	135
<i>Бердонос В.Д., Журавлёв Д.О.</i> Разработка корпоративной системы предотвращения столкновений БПЛА между собой	137
<i>Корнеева А.А., Никитина Г.В., Денисов Е.С.</i> Микропроцессорная реализация метода диагностики литиевых аккумуляторов по переходным характеристикам	140
<i>Лысенко Д.С., Данилушкин И.А.</i> Моделирование котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети	142
<i>Харитонов К.В., Федоров А.А., Понамарев Е.А.</i> Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей для моделей RTDS	145
<i>Богачев А.М., Крылов В.П.</i> Моделирование частотных скачков интегральных схем	149
<i>Пешехонов Н.Е., Рыбаков В.В., Жирков И.С.</i> Обоснование значения коэффициента спроса для электронных вычислительных машин	151
<i>Магнитский В.А.</i> Перспективы применения 5G в промышленных и инновационных процессах	156
<i>Петров А.Н., Славутский А.Л.</i> Применение стандартов программирования ПЛК в разработке контроллеров для цифровой подстанции	158
<i>Захаров В.Г., Санатуллоа И.Р.</i> Повышение быстродействия и помехоустойчивости передачи цифровой информации	162

СИСТЕМЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 164

<i>Белов Г.А., Малинин Г.В.</i> Методика расчёта переходных процессов в резонансном преобразователе постоянного напряжения	164
<i>Жигальцов Д.А.</i> Разработка импульсного преобразователя напряжения для измерителя сопротивления изоляции	172
<i>Беспалов Н.Н., Ваничкин А.Д., Герман О.Ю., Смирнов Д.П.</i> Моделирование многоуровневых инверторов напряжения	174
<i>Андрянов А.И.</i> Комбинированный алгоритм управления нелинейными динамическими процессами в импульсных преобразователях постоянного напряжения	178
<i>Быков К.В., Лазарева Н.М., Павлов Ю.В., Яров В.М.</i> Сдвоенные однотактные конверторы	180
<i>Лазарева Н.М., Яров В.М.</i> Экспериментальное определение параметров выходного фильтра инвертора	186
<i>Быков К.В., Лазарева Н.М., Павлов Ю.В., Яров В.М.</i> Комбинированные однотактные конверторы	190
<i>Донской Н.В., Сергеев А.Г.</i> Режим самозапуска высоковольтного частотно-регулируемого электропривода	195
<i>Денисов Е.С., Демидов А.М.</i> Автоматизированная система диагностики солнечных панелей и аккумуляторов в составе солнечной энергоустановки с использованием облачной системы вычислений	199
<i>Школин А.Н., Дракин А.Ю.</i> Частотный анализ при моделировании импульсных преобразователей напряжения	201
<i>Коллэ Р.В.</i> Инновационные улучшения эксплуатационных характеристик зарядно-выпрямительных устройств большой мощности для цифровых подстанций	205
<i>Абрамов С.В., Никонов Д.В.</i> Моделирование повышающего преобразователя с системой управления на микросхеме МС34063	209
<i>Абрамов С.В., Викторов А.А., Игнатова Н.А., Веселов В.Л.</i> Проектирование импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике	214
<i>Абрамов С.В., Никитина О.О.</i> Расчёт параметров LC-фильтра высоковольтного генератора синусоидальных сигналов	220

УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ	225
<i>Федотов А.И., Мисбахов Р.Ш., Бахтеев К.Р.</i>	
Электрохимический накопитель энергии в составе электростанции с газопоршневыми установками	225
<i>Булычев А.В., Бычков Ю.В., Грибков М.А.</i> Способ селективного отключения поврежденной линии по данным цифровой системы определения места повреждения	228
<i>Булычев А.В., Силанов Д.Н.</i> Параметры срабатывания защит, интегрированных в цифровую систему управления подстанции распределительных сетей	232
<i>Попов М.Г., Ванин В.К., Бобко Ю.А., Чжиной Л., Павлов Н.Г.</i> Модернизация автоматики ступенчатого пуска двигателей в автономных системах электроснабжения	240
<i>Ванин В.К., Попов М.Г., Ванин И.В., Кузнецов Л.С.</i> Повышение точности измерения первичного напряжения трансформаторов и расширение функциональных возможностей их защиты	244
<i>Ворошилов А.А., Шарыгин М.В., Куликов А.Л.</i> Автоматика отключения силовых трансформаторов для снижения потерь холостого хода	248
<i>Веснин К.Е., Шемякин А.А.</i> Информационная безопасность городских энергосистем	249
<i>Булычев А.В., Чернышев И.В.</i> Управление электрооборудованием с превентивным выявлением повреждений	251
<i>Бредихин А.С.</i> Проблемы оценки эффективности работы систем компенсации ёмкостных токов замыкания на землю	260
<i>Грбчак Е.П., Логинов Е.Л.</i> Цифровые технологии поддержания стабильных характеристик технического состояния функциональных узлов оборудования атомных и тепловых электростанций	264
<i>Базаррагчаа А., Баязитов И.Р., Медведев В.Г., Петров М.И.</i> О выпучивании магнитного поля в реакторах с плавным регулированием немагнитного зазора	266
<i>Карагодин В.В., Рыбаков Д.В.</i> Математическая модель оптимизации мощности и мест установки компенсирующих устройств в распределительных электрических сетях	268

<i>Воронин А.Е., Пешехонов Н.Е.</i> Математическая модель определения количественных значений показателей надёжности систем электроснабжения объектов	272
<i>Абдуллин Л.И., Абдуллазянов А.Ф., Хабибуллин М.Н., Вагапов Г.В.</i> Выделение режима однофазного замыкания на землю в сети 6-10 кВ на основе интеллектуальной системы учета электроэнергии	276
<i>Абдуллин Л.И., Абдуллазянов А.Ф., Хабибуллин М.Н.</i> Расширение диагностических возможностей систем электроснабжения на основе интеллектуальных систем учета электроэнергии	279
<i>Авсеев А.И., Двинин В.А., Колосов С.Д.</i> Терминология распределённой генерации для энергетических систем малой мощности	282
<i>Мисбахов Рин.Ш.</i> Система волоконно-оптического мониторинга накопителей энергии децентрализованных мини-ТЭЦ. Постановка задачи	284
<i>Мисбахов Рин.Ш., Казаров В.Ю.</i> Волоконно-оптические датчики мониторинга температуры и деформаций пакетированных литий-ионных накопителей энергии	288
<i>Мисбахов Рин.Ш., Казаров В.Ю., Морозов О.Г.</i> Волоконно-оптические датчики мониторинга показателя преломления литий-ионных батарей	291
<i>Мисбахов Рин.Ш., Васёв А.Н.</i> Принципы построения комбинированных волоконно-оптических и беспроводных многосенсорных сетей мини-ТЭЦ	294
<i>Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И., Аввакумов М.В.</i> Влияние размеров и местоположения дефектов на изменение характеристик частичных разрядов	296
<i>Незевак В.Л., Сидоров О.А., Филиппов В.М.</i> Развитие архитектуры управления электроэнергетических систем	299
<i>Рыбаков Л.М., Канюгин О.И.</i> Пути повышения надёжности работы распределительных сетей 10 кВ	301
<i>Шалухо А.В., Веселов Л.Е., Федорчатенко В.И.</i> Алгоритм управления комбинированной системой генерирования на основе твёрдооксидных топливных элементов	303
<i>Быковская Л.В., Маслов В.А.</i> Учёт расщепления фазы при расчёте электрического поля ЛЭП 500 кВ	305

<i>Валиуллин К.Р., Тушев С.И.</i> Моделирование зависимости тока короткого замыкания от нагрева одножильного кабеля в сетях 0,4 кВ	308
<i>Шихина А.В., Коченгин А.Е., Шихин В.А.</i>	
Комбинированные математические модели в задачах прогнозирования цены электроэнергии	311
<i>Малафеев С.И., Малафеев С.С., Игнатов А.Ю.</i> Регулятор тиристорно-реакторного компенсирующего устройства	313
<i>Алюнов А.Н., Вяткина О.С.</i> Применение систем проактивной диагностики как метод снижения ущербов при повреждениях в обмотках силовых трансформаторов	317
<i>Ефимова А.Р., Василенко С.А.</i> Анализ проблем автоматизации утилизационной ТЭЦ металлургического завода	319
<i>Шалухо А.В., Эрдили Н.И., Власов А.С.</i>	
Мультиагентная система управления микросетью с распределённой генерацией	321
<i>Макаров А.Д., Хисматулина З.С., Хованская Ю.С., Якимов Р.А., Денисов Е.С.</i> Облачная система обработки данных для системы мониторинга энергопотребления	323
<i>Макаров А.Д., Хисматулина З.С., Хованская Ю.С., Якимов Р.А., Денисов Е.С.</i> Устройство для измерения электропотребления с дистанционным доступом	325
<i>Соснина Е.Н., Иванов А.В.</i> Проектирование электротехнических комплексов в условиях цифровой экономики	327
<i>Соснина Е.Н., Шумский Н.В., Шрамко П.А.</i>	
Обучение распределённой системы управления энергоузелом на базе нейронной сети	328
<i>Фролов С.С., Шатилов Д.А.</i> Зависимости степени искажений синусоидальности тока рекуперации в сеть от параметров процесса при управлении принудительным разрядом в сеть аккумуляторных батарей сигналом с ООШИМ-2	330
<i>Егорова Н.Г., Кузьмин И.Л., Хузяшев Р.Г.</i> Энергетические параметры сигналов переходных процессов	334
<i>Егорова Н.Г., Кузьмин И.Л., Хузяшев Р.Г.</i> Алгоритм обнаружения сигнала переходного процесса	336
<i>Лазаревич М.М.</i> Моделирование электроэнергетических сетей с автоматическими выключателями	338

Атаманов М.Н., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М.

Развитие мультисервисной распределительной сети 0,38–10 кВ на основе применения самонесущих изолированных проводов со встроенным оптоволоконном	340
<i>Рахимов О.С., Тоиходжаева М.И.</i> Распределённая генерация на основе возобновляемых источников энергии и перспективы их применения	345
<i>Волков Д.К.</i> Описание моделей электрических сетей и методов их расчёта	349
<i>Катков В.И.</i> Основные дефекты в твёрдых диэлектрических материалах, используемых в конструкциях линейных изоляторов	351
<i>Варганова А.В., Анисимова Н.А.</i> Построение уточненных техничко-экономических моделей котлоагрегатов с использованием метода линейного программирования	354
<i>Егоров А.Ю., Понамарев Е.А.</i> Разработка цифровой модели электростанции для испытаний комплекса устройств САУ ГА	356
<i>Указова А.Ю., Иванов А.Н., Понамарев Е.А.</i> Моделирование процессов включения БСК для испытания защит БСК-110 кВ на цифровой динамической модели энергосистемы RTDS	359
<i>Емельяненко Р.И.</i> Термостат для электротехнических шкафов	363
<i>Петров О.А.</i> Проектирование и расчёт электромагнитных коммутационных аппаратов повышенной механической устойчивости	364
<i>Аскаров А.Б., Рубан Н.Ю., Андреев М.В.</i> Экспериментальное исследование влияния установки СТАТКОМ на протекание асинхронного режима	369
<i>Александров Н.М., Хренников А.Ю.</i> Интерпретация результатов анализа состояния обмоток силовых трансформаторов методом частотного отклика	371
<i>Александрова Л.Э., Казакова Е.Ю.</i> Применение программного комплекса для управления послеаварийными режимами электрической системы	374
<i>Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.</i> Схема диагностики устройств РЗА на основе данных расчёта алгоритма определения места повреждения	377

<i>Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.</i> Разработка программного комплекса анализа и диагностики функций защит устройств РЗА на основе определения места повреждения	379
<i>Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.</i> Разработка программного комплекса диагностики централизованной системы РЗА	383

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ	386
--	------------

<i>Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.</i> Применение локальных составляющих наблюдаемого процесса для целей локации места повреждения в линиях электропередачи	386
<i>Макашкин Ф.А., Ашмарин А.О.</i> Применение дифференциального органа в функции БАВР для повышения чувствительности и улучшения быстродействия	392
<i>Дементий Ю.А., Шорников Е.В.</i> Обучаемый модуль параметрической идентификации сигнала	395
<i>Белянин А.А., Гордеев А.В., Смирнова И.В., Широкин М.Ю.</i> Устройство регулирования напряжения под нагрузкой как источник локального режима	398
<i>Никитина А.Н., Петров В.С., Наумов В.А., Антонов В.И.</i> Выбор оптимальных уставок АЛАР при промежуточном отборе мощности на ЛЭП	402
<i>Убасева М.В., Петров В.С., Наумов В.А., Антонов В.И.</i> Определение мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью	407
<i>Иванов Н.Г., Воробьев Е.С., Александрова М.И., Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В.</i> Предотвращение повреждения выключателя при коммутации малонагруженной ЛЭП с шунтирующими реакторами	414
<i>Иванов Н.Г., Воробьев Е.С., Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В.</i> Учёт электромеханических характеристик высоковольтных выключателей в алгоритмах управляемой коммутации линий электропередачи (конденсаторных батарей)	423
<i>Иванов Н.Г., Александрова М.И., Воробьев Е.С., Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В.</i> Оптимальная стратегия трёхфазного интеллектуального АПВ	429

<i>Петров В.С., Фёдоров Алексей О., Егоров В.А.</i> Способ одностороннего волнового определения места повреждения	434
<i>Карагодин В.В., Пешехонов Н.Е., Рыбаков Д.В.</i> Совершенствование систем электроснабжения наземных комплексов с учётом обеспечения информационной безопасности	436
<i>Иванов С.О., Никандров М.В., Славутский Л.А.</i> Способы выявления нарушений и аномалий протоколов МЭК 61850	441
<i>Шемакин А.А., Веснин К.Е.</i> Использование технологии блокчейн в качестве защиты конфиденциальных данных	443
<i>Данилов В.А., Валиуллин К.Р.</i> Влияние гололёдных отложений на функционирование ответственных систем релейной защиты	446
<i>Моисеенкова Ю.В., Образцов С.А.</i> Использование информации, поступающей от индикаторов короткого замыкания, для определения наличия замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью	451
<i>Александрова Т.В., Маслов А.М., Шалимов А.С.</i> Аналитическая модель ёмкостного трансформатора напряжения в компьютерно-управляемой испытательной системе	452
 НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ	457
 <i>Славутский Л.А., Славутская Е.В.</i> Простые нейросетевые алгоритмы как основа навыков работы с искусственным интеллектом	457
<i>Андрянов А.И., Баранчиков М.В.</i> Лабораторный стенд для исследования нелинейной динамики импульсных преобразователей напряжения на основе одноплатного компьютера	461
<i>Лазарева Н.М., Яров В.М.</i> Исследование режимов работы импульсного трансформатора	462
<i>Лазарева Н.М., Яров В.М.</i> Исследование характеристик электронных ламп в Multisim	467
<i>Коренков Д.А., Ревякин В.О.</i> Подход к моделированию кинетики вакуумно-высокочастотной сушки	470

<i>Бутарев И.Ю.</i> Использование цифрового фильтра в Matlab при аппроксимации данных измерения динамических параметров силовых модулей	473
<i>Варфоломеев В.А., Мясникова Т.В.</i> Программный комплекс расчёта, оптимизации и анализа установившихся, аварийных и переходных режимов энергосистем «RastrWin3» в решении задач курсового проектирования	477
<i>Аль Уатик Хассан, Денисов Е.С.</i> Система для дистанционного мониторинга физиологических сигналов	480
<i>Мишин С.А., Галанина Н.А.</i> Разработка диспетчера задач	481
<i>Загоило С.А., Семёнов А.С.</i> Моделирование технических систем в среде Matlab: особенности разработки физической модели в SimPowerSystems	484
<i>Ахметвалеева Л.В., Галимуллин Н.Р.</i> Возможности режима широтно-импульсной модуляции в дистанционных системах управления	489
<i>Семёнова М.Н., Якушев И.А.</i> Оценка результатов математического моделирования технических систем в пакете программ Matlab при помощи интерактивного обозревателя	491
<i>Курпр В.И., Катранов Р.А., Олейников В.Н.</i> Анализ процесса запуска вспомогательных силовых установок летательного аппарата	497
<i>Валеев Б.М.</i> Исследование математической модели изменения ёмкости между пластиной сложной формы и цилиндром	502
<i>Шаповалов Е.А.</i> Влияние комплексной нагрузки на характеристики усилителя низкой частоты	504
<i>Гладнев К.С.</i> Обзор калориметрических методов исследования и их классификация	507
<i>Денисов Е.С., Шафигуллин И.Д.</i> Однослойный квазираспределённый резистивный датчик	510
<i>Захаров В.Г.</i> Применение биений для модуляции радиосигналов	512
<i>Чертановский А.Г.</i> Алгоритмы расчёта тока ветви быстрым методом Кирхгофа	514
<i>Чертановский А.Г.</i> Быстрый метод Кирхгофа. Формула напряжения, обусловленного источниками ЭДС	516
<i>Янкевич С.В., Афанасьев В.А., Малинин Г.В.</i> Технология ультразвукового посолоа рыбной и мясной продукции	518

Научное издание

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции

Материалы публикуются в авторской редакции.

*Ответственность за достоверность цитат, имён, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов
об интеллектуальной собственности
несут авторы представленных статей*

Отв. за выпуск *А.В. Серебрянников*

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 30.06.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 31,04. Уч.-изд. л. 30,71. Тираж 300 экз. Заказ № 498.

Отпечатано в соответствии с представленным оригинал-матетом
в типографии Чувашского государственного университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15