

ISSN 1810-1909

---

---

# Вестник

## ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

---

---

№ 3 2019

**Электротехника и энергетика**

*Научный журнал*

Основан в марте 1995 г.

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

*Главный редактор*

**А.Ю. Александров**, кандидат экономических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

*Заместитель главного редактора*

**Г.А. Белов**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

*Члены редакционной коллегии*

**А.А. Афанасьев**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**В.В. Афанасьев**, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

**А.В. Булычев**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**Л.С. Зимин**, доктор технических наук, профессор (Самара, Россия)

**А.Б. Кувалдин**, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

**С.Л. Кужеков**, доктор технических наук, профессор (Новочеркасск, Россия)

**А.Л. Куликов**, доктор технических наук, доцент (Нижний Новгород, Россия)

**Ю.Я. Лямец**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**В.И. Мелешин**, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

**Ю.М. Миронов**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**А.В. Мокеев**, доктор технических наук, доцент (Архангельск, Россия)

**А.И. Федотов**, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

*Ответственный секретарь*

**Н.И. Завгородняя**

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, в базы данных ВИНТИ РАН, Научную электронную библиотеку (elibrary.ru), электронную библиотеку «Cyberleninka», международную справочную систему «Ulrich's International Periodicals Directory», индексируется в базе данных «Российский индекс научного цитирования».

*Адрес редакции:* 428015, Чебоксары, Московский пр., 15,  
тел. (8352) 45-20-96, 58-33-63 (доб. 2030)  
e-mail: [vestnik210@mail.ru](mailto:vestnik210@mail.ru), [vestnik@chuvsu.ru](mailto:vestnik@chuvsu.ru)  
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

ISSN 1810-1909

---

---

# Vestnik

## CHUVASHSKOGO UNIVERSITETA

---

---

№ 3 2019

**Electrical Technology and Power Engineering**

*Scientific Journal*

Since March, 1995

Founder:  
Federal State Educational Budgetary Institution  
of Higher Education  
the Ulyanov Chuvash State University

*Editor-in-Chief*

**A.Yu. Aleksandrov**, Candidate of Economics, Associate Professor (Cheboksary, Russia)

*Deputy Editor-in-Chief*

**G.A. Belov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

*Editorial Board*

**A.A. Afanasyev**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

**V.V. Afanasyev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Cheboksary, Russia)

**A.V. Bulychev**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

**L.S. Zimin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Samara, Russia)

**A.B. Kuvaldin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Moscow, Russia)

**S.L. Kuzhekov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Novocherkassk, Russia)

**A.L. Kulikov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Nizhny Novgorod, Russia)

**Yu.Ya. Lyamets**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

**V.I. Meleshin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Moscow, Russia)

**Yu.M. Mironov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

**A.V. Mokeev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Arkhangelsk, Russia)

**A.I. Fedotov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)

*Executive Editor*

**N.I. Zavgorodnyaya**

The journal is included in the list of journals which are regarded as academic publications by the State Commission for Academic Degrees and Titles (VAK), in the Abstract Journal and VINITI databases, Ulrich's International Periodicals Directory, Scientific Electronic Library (elibrary.ru), Cyberleninka Electronic Library. The journal is indexed in Russian Science Citation Index.

*Address:* 15, Moskovskiy pr., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russia

Tel. +7(8352)45-20-96, 58-33-63 (2030)

E-mail: [vestnik210@mail.ru](mailto:vestnik210@mail.ru), [vestnik@chuvsu.ru](mailto:vestnik@chuvsu.ru)

<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

УДК 621.313

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ

## РАСЧЁТ МАГНИТНОГО РЕДУКТОРА НА ОСНОВЕ ОСТАТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ СТЕРЖНЕЙ МОДУЛЯТОРА\*

**Ключевые слова:** постоянные магниты, скалярные магнитные потенциалы, магнитные индукции, модулятор, граничные условия, электромагнитные моменты.

Магнитные редукторы можно подразделить на две группы: неуправляемые, выполненные на постоянных магнитах, и управляемые, содержащие кроме магнитов обмотку статора с преобразователем частоты. Первые имеют фиксированный коэффициент магнитной редукции, у вторых он может изменяться благодаря преобразователю частоты.

Предлагаемый полевой аналитический метод расчёта может использоваться для оценки функциональных свойств обоих названных типов этих устройств при помощи двух декартовых координат  $x$  и  $y$ . В каждой из активных областей магнитного редуктора (в воздушных зазорах, магнитах, ярах статора и ротора, роторе со сквозными зубцами и пазами (модуляторе)) искомые переменные – магнитные потенциалы и магнитные индукции – представляются в виде произведения двух функций, первая из которых зависит от координаты  $x$ , другая – от координаты  $y$ . Эти функции также умножаются на некоторые неизвестные постоянные, значения которых находятся из граничных условий магнитного поля на линиях сопряжения активных областей.

Магнитные проницаемости ярем статора и внутреннего ротора предполагаются фиксированными, их значения корректируются по данным расчёта магнитной цепи редуктора. Остаточная индукция стержней модулятора выбирается близкой к типовым значениям этого параметра у электротехнической стали. Такой подход даёт возможность реализовать принцип суперпозиции магнитных полей, созданных, соответственно, источниками ротора и статора. При этом расчёт неизвестных постоянных производится дважды применительно к каждому источнику, так как последние имеют принципиально разные числа полюсов и, следовательно, разный спектр гармонических составляющих МДС.

Рассматриваемый метод даёт возможность решить такие прикладные задачи, как нахождение магнитных индукций в рабочих воздушных зазорах редуктора, определение электромагнитных моментов, действующих на роторы и статор. Полученные результаты подтверждены опытными данными. Для реализации метода достаточно набора функций, имеющихся в математической программе *Mathcad*.

Магнитный редуктор (МР) конструктивно представляет достаточно сложное электромеханическое устройство, содержащее в одноступенчатом исполнении два ротора и два воздушных зазора [4, 8].

Один из роторов со сквозными шихтованными стержнями числом  $z$ , называемый модулятором, затруднителен для аналитического расчёта. В классических электрических машинах такой элемент магнитной цепи отсутствует.

Уточнённое определение функциональных свойств магнитного редуктора обычно производится на основе численного расчёта [3, 6]. Однако, как бу-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета министров Чувашской Республики в рамках научного проекта № 18-48-210004.

дет показано ниже, такой электромеханический объект может достаточно корректно рассчитываться в полевой аналитической форме методом разделения переменных.

**Исходные уравнения магнитного поля магнитного редуктора.** Рассматриваемое магнитное поле в магнитном редукторе с постоянными магнитами потенциально<sup>1</sup> и удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа  $\nabla^2 u = 0$ , которое будем решать методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из семи магнитных сред (рис. 1), стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных [7]. Рассматриваемое ниже решение предполагает, что активные области МР являются бесконечными полосами с прямолинейными параллельными границами.

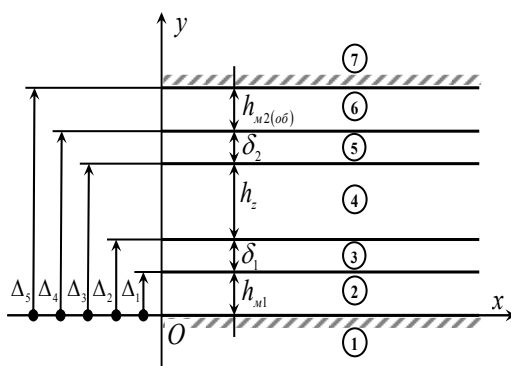


Рис. 1. Активные зоны магнитного редуктора

В каждой из активных областей магнитного редуктора (воздушных зазорах, магнитах, ямах статора и ротора, роторе со сквозными зубцами и пазами (модуляторе)) искомые переменные – магнитные потенциалы и магнитные индукции – представляются в виде произведения двух функций, первая из которых зависит от координаты  $x$ , другая – от координаты  $y$ . Эти функции также умножаются на некоторые неизвестные постоянные, значения которых находятся из граничных условий магнитного поля на линиях сопряжения активных областей.

Магнитные проницаемости ферромагнитных областей предполагаются фиксированными, их значения корректируются по данным расчёта магнитной цепи редуктора. Такой подход дает возможность реализовать принцип суперпозиции магнитных полей, созданных, соответственно, источниками ротора и статора. При этом расчёт неизвестных постоянных производится дважды применительно к каждому источнику магнитного поля (статора или ротора), так как последние имеют принципиально разные числа полюсов и, следовательно, разный спектр основных гармоник, зависящих от координаты  $x$ .

<sup>1</sup> При наличии трёхфазной обмотки на статоре регулируемого редуктора его магнитное поле будет содержать вихревую составляющую, которая локализуется в местах расположения проводников статорной обмотки [5].

Для основных гармоник магнитного поля МР справедливо базовое равенство<sup>1</sup> [1, 8]

$$p_1 + p_2 = z, \tag{1}$$

где  $p_1, p_2$  – числа пар полюсов магнитов (обмотки) внутреннего ротора и статора, соответственно.

**Математическое описание модулятора в функции координаты  $x$ .** Магнитная среда в зоне нахождения модулятора (полоса 4 шириной  $h_z$  на рис. 1) представляется состоящей из  $z$  радиальных участков с размером, равным зубцовому шагу  $t_z$  модулятора, одна часть которых (зубец модулятора шириной  $b_z$ ) имеет остаточную магнитную индукцию  $B_{rz}$ , а у другой части (паз модулятора шириной  $(t_z - b_z)$ ) – эта магнитная индукция равна нулю (рис. 2).

В результате остаточная магнитная индукция в среде 4 будет изображаться периодической функцией  $B_{rz}(x)$ , которая при одинаковых поперечных размерах зубца и паза будет иметь вид

$$B_{rz}(x) = \frac{B_{rz}}{2} + \frac{2}{\pi} B_{rz} \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \cos[(2n-1)\sigma x], \tag{2}$$

где  $\eta_n = \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1}$ ;  $\sigma = \frac{2\pi}{t_z}$ .

При наличии магнитов ротора (статора) эта функция будет модулирована зависимостью (рис. 3)

$$\alpha_{1(2)}(x) = \frac{4}{\pi} s_{1(2)} \sum_{k=1}^{\infty} \eta_k \cos[(2k-1)\sigma_{1(2)}x], \tag{3}$$

где  $s_{1(2)}$  – глубина модуляции магнитного поля ротора (статора);  $\eta_k = \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1}$ ;

$\sigma_{1(2)} = \frac{\pi}{\tau_{1(2)}}$ ,  $\tau_{1(2)}$  – полюсное деление магнитов ротора (статора).

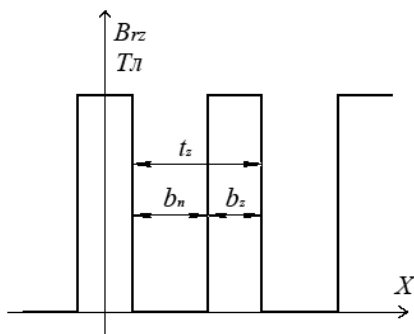


Рис. 2. Зависимость остаточной магнитной индукции стержней модулятора от координаты  $x$

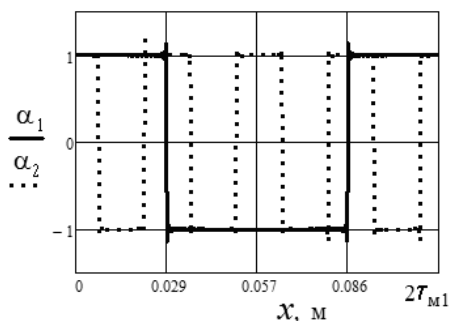


Рис. 3. Модуляционная функция стержней модулятора при  $s_1 = 1$

<sup>1</sup> При его реализации электромагнитные моменты роторов будут действовать встречно, а их скорости вращения – однонаправленно.

В этом случае зависимость магнитной индукции модулятора в функции координаты  $x$  (в зоне 4) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_{1(2)}(x) = B_{rz}(x)\alpha_{1(2)}(x) = \frac{2}{\pi} B_{rz}s_{1(2)} \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \eta_k \cos[(2k-1)\sigma_{1(2)}x] + \right. \\ \left. + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \eta_n \eta_k \cos[(2n-1)\sigma x] \cos[(2k-1)\sigma_{1(2)}x] \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Применительно к магнитным потенциалам всех зон указанная зависимость, в отличие от (4), не будет содержать множителя  $\frac{2}{\pi} B_{rz}$

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_{1(2)}(x) = s_{1(2)} \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \eta_k \cos[(2k-1)\sigma_{1(2)}x] + \right. \\ \left. + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \eta_n \eta_k \cos[(2n-1)\sigma x] \cos[(2k-1)\sigma_{1(2)}x] \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

**Зависимости для скалярных магнитных потенциалов  $u_i(x, y)$  и радиальных составляющих магнитной индукции  $B_{iy}(x, y)$ .** Ищем сначала скалярные магнитные потенциалы и радиальные составляющие магнитной индукции в средах ( $i = 1 - 7$  на рис 2), вызванные магнитами внутреннего ротора:

$$\begin{aligned} u_1(x, y) = \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} A_{1k} e^{(2k-1)\sigma_1 y}, \\ B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) A_{1k} e^{(2k-1)\sigma_1 y}, \quad y \leq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu_p$  – относительная магнитная проницаемость яра внутреннего ротора.

$$\begin{aligned} u_2(x, y) = \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (B_{2k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{2k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y}), \\ B_{2y}(x, y) = \mu_0 \left( -\frac{\partial u_2}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{1k} \right) = \\ = \mu_0 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left[ -(2k-1)\sigma_1 B_{2k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + (2k-1)\sigma_1 C_{2k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} + M_{1k} \right] = \\ = \mu_0 \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{2k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{2k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} + \frac{M_{1k}}{(2k-1)\sigma_1} \right], \quad 0 \leq y \leq h_{m1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $M_{1k}$  – амплитуда  $k$ -й гармоники намагниченности магнитов внутреннего ротора,  $h_{m1}$  – высота магнитов внутреннего ротора;

$$\begin{aligned} u_3(x, y) = \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (B_{3k} e^{(2k-1)y} + C_{3k} e^{-(2k-1)y}), \\ B_{3y}(x, y) = \mu_0 \left( -\frac{\partial u_3}{\partial y} \right) = \mu_0 \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{3k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{3k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right], \quad (8) \\ h_{m1} \leq y \leq h_{m1} + \delta_1, \end{aligned}$$

где  $\delta_1$  – длина внутреннего воздушного зазора с учётом коэффициента этого зазора (коэффициента Картера);



$$\begin{aligned}
 u_4(x, y) &= \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left( B_{4k} e^{(2k-1)y} + C_{4k} e^{-(2k-1)y} \right), \\
 B_{4y}(x, y) &= \mu_0 \left( -\frac{\partial u_4}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{rzk} \right) = \\
 &= \mu_0 \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{4k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{4k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} + \frac{M_{rzk}}{(2k-1)\sigma_1} \right], \\
 h_{m1} + \delta_1 &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где  $M_{rzk} = \frac{B_{rzk}}{\mu_0} = \frac{2}{\pi} \frac{B_{rz}}{\mu_0} \eta_k$  – амплитуда  $k$ -й гармоники остаточной намагниченности стержней модулятора;  $h_z$  – толщина модулятора;

$$\begin{aligned}
 u_5(x, y) &= \lambda_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left( B_{5k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right), \\
 B_{5y}(x, y) &= \mu_0 \left( -\frac{\partial u_5}{\partial y} \right) = \mu_0 \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{5k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right], \\
 h_{m1} + \delta_1 + h_z &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где  $\delta_2$  – длина наружного (от модулятора) воздушного зазора с учётом коэффициента этого зазора (коэффициента Картера);

$$\begin{aligned}
 u_6(x, y) &= \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left( B_{6k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{6k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right), \\
 B_{6y}(x, y) &= \mu_0 \left( -\frac{\partial u_6}{\partial y} \right) = \mu_0 \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{6k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{6k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right], \\
 h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где  $h_{m2}$  – высота магнитов на внутренней поверхности статора;

$$\begin{aligned}
 u_7(x, y) &= \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} A_{7k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y}, \\
 B_{7y}(x, y) &= -\mu_0 \mu_c \frac{\partial u_7}{\partial y} = -\mu_0 \mu_c \sigma_1 \gamma_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) A_{7k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y}, \\
 h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2} &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2} + h_{ac},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где  $\mu_c$  – относительная магнитная проницаемость ярма статора;  $h_{ac}$  – высота ярма статора.

Приравнявая магнитные потенциалы и радиальные магнитные индукции на границах сред, находим из уравнений (6)–(12) равенства, связывающие неизвестные постоянные:

$$A_{1k} - B_{2k} - C_{2k} = 0, \tag{13}$$

$$-B_{2k} + C_{2k} - \mu_p A_{1k} = -m_{1k}, \tag{14}$$

$$B_{2k} e^{(2k-1)\sigma_1 \Delta_1} + C_{2k} e^{-(2k-1)\sigma_1 \Delta_1} - B_{3k} e^{(2k-1)\sigma_1 \Delta_1} - C_{3k} e^{-(2k-1)\sigma_1 \Delta_1} = 0, \tag{15}$$

$$-B_{2k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_1} + C_{2k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_1} + B_{3k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_1} - C_{3k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_1} = -m_{1k}, \quad (16)$$

$$B_{3k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_2} + C_{3k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_2} - B_{4k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_2} - C_{4k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_2} = 0, \quad (17)$$

$$-B_{3k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_2} + C_{3k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_2} + B_{4k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_2} - C_{4k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_2} = m_{rzk}, \quad (18)$$

$$B_{4k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_3} + C_{4k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_3} - B_{5k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_3} - C_{5k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_3} = 0, \quad (19)$$

$$-B_{4k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_3} + C_{4k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_3} + B_{5k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_3} - C_{5k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_3} = -m_{rzk}, \quad (20)$$

$$B_{5k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_4} + C_{5k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_4} - B_{6k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_4} - C_{6k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_4} = 0, \quad (21)$$

$$-B_{5k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_4} + C_{5k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_4} + B_{6k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_4} - C_{6k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_4} = 0, \quad (22)$$

$$B_{6k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_5} + C_{6k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_5} - A_{7k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_5} = 0, \quad (23)$$

$$-B_{6k}e^{(2k-1)\sigma_1\Delta_5} + C_{6k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_5} + \mu_c A_{7k}e^{-(2k-1)\sigma_1\Delta_5} = 0, \quad (24)$$

где  $\Delta_1 = h_{m1}$ ,  $\Delta_2 = h_{m1} + \delta_1$ ,  $\Delta_3 = h_{m1} + \delta_1 + h_z$ ,  $\Delta_4 = h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2$ ,

$$\Delta_5 = h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2(об)}, \quad m_{1k} = \frac{M_{1k}}{(2k-1)\sigma_1}, \quad m_{rzk} = \frac{M_{rzk}}{(2k-1)\sigma_1}.$$

Когда источником магнитного поля в редукторе будут магниты (или обмотка) статора, находящиеся в полосе 5 (рис. 1), система уравнений для магнитных потенциалов и магнитных индукций будут иметь вид, аналогичный системе (6)–(12), только вместо функции  $\gamma_1(x)$  и амплитуд намагниченности магнитов ротора  $M_{1k}$  будем иметь, соответственно, зависимость  $\gamma_2(x)$  и амплитуду намагниченности магнитов статора  $M_{2k}$ . Например, уравнения (6), (10) получают вид

$$u_1(x, y) = \gamma_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} \tilde{A}_{1k} e^{(2k-1)\sigma_2 y},$$

$$B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p \sigma_2 \gamma_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \tilde{A}_{1k} e^{(2k-1)\sigma_2 y}, \quad y \leq 0, \quad (25)$$

$$u_5(x, y) = \gamma_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left( \tilde{B}_{5k} e^{(2k-1)\sigma_2 y} + \tilde{C}_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_2 y} \right),$$

$$B_{5y}(x, y) = \mu_0 \left( -\frac{\partial u_5}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{2k} \right) = \quad (26)$$

$$= \mu_0 \gamma_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} \left[ -(2k-1)\sigma_2 \tilde{B}_{5k} e^{(2k-1)\sigma_2 y} + (2k-1)\sigma_2 \tilde{C}_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_2 y} + M_{2k} \right] =$$

$$= \mu_0 \sigma_2 \beta_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -\tilde{B}_{5k} e^{(2k-1)\sigma_2 y} + \tilde{C}_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_2 y} + \frac{M_{2k}}{(2k-1)\sigma_2} \right], \quad 0 \leq y \leq h_{m1}.$$

Новые постоянные Фурье будут находиться из системы линейных уравнений

$$\tilde{A}_1 - \tilde{B}_2 - \tilde{C}_2 = 0, \quad (27)$$

$$-\tilde{B}_2 + \tilde{C}_2 - \mu_p \tilde{A}_1 = 0, \quad (28)$$

$$\tilde{B}_2 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} + \tilde{C}_2 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} - \tilde{B}_3 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} - \tilde{C}_3 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} = 0, \quad (29)$$

$$-\tilde{B}_2 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} + \tilde{C}_2 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} + \tilde{B}_3 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} - \tilde{C}_3 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_1} = 0, \quad (30)$$

$$\tilde{B}_3 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} + \tilde{C}_3 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} - \tilde{B}_4 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} - \tilde{C}_4 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} = 0, \quad (31)$$

$$-\tilde{B}_3 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} + \tilde{C}_3 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} + \tilde{B}_4 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} - \tilde{C}_4 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_2} = m_{rz k}, \quad (32)$$

$$\tilde{B}_4 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} + \tilde{C}_4 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} - \tilde{B}_5 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} - \tilde{C}_5 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} = 0, \quad (33)$$

$$-\tilde{B}_4 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} + \tilde{C}_4 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} + \tilde{B}_5 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} - \tilde{C}_5 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_3} = -m_{rz k}, \quad (34)$$

$$\tilde{B}_5 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} + \tilde{C}_5 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} - \tilde{B}_6 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} - \tilde{C}_6 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} = 0, \quad (35)$$

$$-\tilde{B}_5 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} + \tilde{C}_5 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} + \tilde{B}_6 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} - \tilde{C}_6 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_4} = -m_{2k}, \quad (36)$$

$$\tilde{B}_6 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} + \tilde{C}_6 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} - \tilde{A}_7 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} = 0, \quad (37)$$

$$-\tilde{B}_6 e^{(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} + \tilde{C}_6 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} + \mu_c \tilde{A}_7 e^{-(2k-1)\sigma_2 \Delta_5} = -m_{2k}, \quad (38)$$

где  $m_{2k} = \frac{M_{2k}}{(2k-1)\sigma_2}$ .

После нахождения постоянных в результате решения системы линейных уравнений (13)–(24) и (27)–(38) можем найти магнитные потенциалы и магнитные индукции во всех активных областях магнитного редуктора. Например, для магнитных индукций в воздушных зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$  будут справедливы выражения

$$B_{3y}(x, y) = \mu_0 \sigma_2 \beta_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -\tilde{B}_{3k} e^{(2k-1)\sigma_2 y} + \tilde{C}_{3k} e^{-(2k-1)\sigma_2 y} \right] + \mu_0 \sigma_1 \beta_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{3k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{3k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right], \quad (39)$$

$$B_{5y}(x, y) = \mu_0 \sigma_2 \beta_2(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -\tilde{B}_{5k} e^{(2k-1)\sigma_2 y} + \tilde{C}_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_2 y} \right] + \mu_0 \sigma_1 \beta_1(x) \sum_{k=1}^{\infty} (2k-1) \left[ -B_{5k} e^{(2k-1)\sigma_1 y} + C_{5k} e^{-(2k-1)\sigma_1 y} \right]. \quad (40)$$

По уравнению (39) на рис. 4 построены кривые радиальных составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре  $\delta_1$ <sup>1</sup>.

На рис. 5 построены кривые электромагнитных моментов тихоходного  $M_m$  и быстроходного  $M_p$  роторов с помощью формулы [5]

$$M = \frac{pDl}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} B_n B_\tau dx. \quad (41)$$

<sup>1</sup> Рассматривается макетный образец магнитного редуктора с параметрами: наружный диаметр модулятора 132 мм, активная длина 115 мм, число стержней модулятора  $z = 19$ , число пар полюсов статора  $p_2 = 16$ , число пар полюсов ротора  $p_1 = 3$ , остаточная индукция магнитов  $B_r = 1$  Тл, – стержней модулятора  $B_{rz} = 0,5$  Тл.

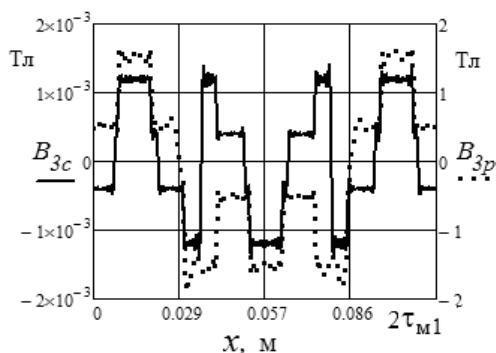


Рис. 4. Магнитная индукция в воздушном зазоре  $\delta_1$  (область 3) на интервале периода магнитов ротора, вызванная магнитами статора (сплошная линия) и магнитами ротора (пунктирная линия)

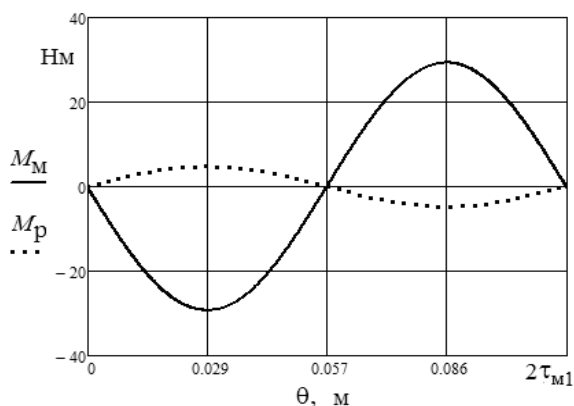


Рис. 5. Электромагнитные моменты магнитного редуктора:  $M_M$  – модулятора,  $M_p$  – быстроходного ротора;  $\Theta$  – линейный сдвиг магнитов статора и ротора

Полученные кривые электромагнитных моментов практически совпадают с аналогичными зависимостями, полученными при испытании макетного образца этого магнитного редуктора [1].

**Выводы.** 1. Рассматриваемый аналитический метод даёт возможность решить такие прикладные задачи, как нахождение магнитных индукций в рабочих воздушных зазорах редуктора, определение электромагнитных моментов, воздействующих на роторы и статор.

2. Для его реализации достаточно набора функций, имеющихся в математической программе Mathcad.

#### Литература

1. Афанасьев А.А. Аналитические и численные методы решения задач электромеханики на основе комплексного магнитного потенциала. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. 430 с.
2. Афанасьев А.А. Высшие гармоники электромагнитных моментов магнитоэлектрического редуктора // Электротехника. 2016. № 12. С. 20–25.

3. Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Никитин В.М. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора // Электричество. 2014. № 4. С. 62–68.
4. Дергачёв П.А., Кирюхин В.П., Кулаев Ю.В., Курбатов П.А., Молоканов О.Н. Анализ двухступенчатого магнитного мультипликатора // Электротехника. 2012. № 5. С. 39–46.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
6. Молоканов О.Н. Разработка методов расчёта и анализ перспективных конструкций бесконтактных магнитных передач: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 19 с.
7. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969. 352 с.
8. Jiabin Wang, Kais Atallah, Carvley S.D. A Magnetic Continuously Variable Transmission Device. *IEEE Transactions on magnetic*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 2815–2818.

---

**АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

---

**A. AFANASYEV  
CALCULATION OF MAGNETIC GEAR BY METHOD  
OF RESIDUAL INDUCTION OF MODULATOR RODS**

**Key words:** permanent magnets, scalar magnetic potentials, magnetic induction, modulator, boundary conditions, electromagnetic moments.

*Magnetic reducers can be divided into two groups: unmanageable made on permanent magnets, and controlled containing, in addition to magnets, the stator winding with a frequency converter. The first one has a fixed coefficient of magnetic reduction. The coefficient of the second group can be changed due to the frequency converter.*

*The proposed field analytical calculation method can be used to evaluate the functional properties of both types of these devices using two Cartesian coordinates. In each of the active regions of the magnetic reducer (air gaps, magnets, yoke of the stator and rotor, rotor with through teeth and grooves (modulator)), the required variables – magnetic potentials and magnetic induction – are represented as a product of two functions, the first of which depends on the coordinate  $x$ , the other – on the coordinate  $y$ . These functions are also multiplied by some unknown constants whose values are calculated from the boundary conditions of the magnetic field on the interface lines of the active regions.*

*The magnetic permeability of the yokes of the stator and the inner rotor are assumed to be fixed, their values being corrected according to the calculation of the magnetic circuit of the reducer. The residual induction of the modulator rods is selected close to the typical values of this parameter in electrical steel. This approach makes it possible to implement the principle of superposition of magnetic fields created by the rotor and stator sources, respectively. In this case, the calculation of the unknown constants is made twice for each source, as the sources have fundamentally different numbers of poles and, consequently, a different spectrum of harmonic components of the MDS.*

*The considered method makes it possible to solve such applied problems as finding magnetic inductions in the working air gaps of the reducer, determining the electromagnetic moments acting on the rotors and the stator. The results were confirmed by experimental data. To implement the method, a set of functions available in the Mathcad mathematical program is sufficient.*

**References**

1. Afanasyev A.A. *Analiticheskie i chislennyye metody resheniya zadach elektromekhaniki na osnove kompleksnogo magnitnogo potentsiala* [Analytical and numerical methods for solving problems of electromechanics based on the complex magnetic potential]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2017, 430 p.

2. Afanasyev A.A. The higher harmonics of the electromagnetic moments of a magneto-electric reducer. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 12, pp. 666–671.
3. Afanasyev A.A., Efimov V.V., Nikitin V.M. *Chislennoe matematicheskoe modelirovaniye odnostupenchatogo magnitnogo reduktora* [Numerical Mathematical Modeling of a Single-Stage Magnetic Reducing Gear]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 4, pp. 62–68.
4. Dergachev P.A., Kiryukhin V.P., Kulaev Yu.V., Kurbatov P.A., Molokanov O.N. *Analiz dvukhstupenchatogo magnitnogo mul'tiplikatora* [Analysis of two-stage magnetic multiplier]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 5, pp. 39–46.
5. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elek-tricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy conversion in electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 312 p.
6. Molokanov O.N. *Razrabotka metodov rascheta i analiz perspektivnykh konstruksii bes-kontaknykh magnitnykh peredach: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of methods of calculation and analysis of promising designs of contactless magnetic transmission: Diss. Abstract]. Moscow, 2017, 19 p.
7. Polivanov K.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Ch. 3. Teoriya elektromagnit-nogo polya* [Theoretical bases of electrical engineering. Part 3: Electromagnetic field theory]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 352 p.
8. Jiabin Wang, Kais Atallah, Carvley S.D. A Magnetic Continuously Variable Transmission Device. *IEEE Transactions on magnetic*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 2815–2818.

---

**AFANASYEV ALEKSANDR – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Афанасьев А.А.* Расчёт магнитного редуктора на основе остаточной магнитной индукции стержней модулятора // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 5–14.

УДК 621.365, 534.22

ББК 31.35

В.В. АФАНАСЬЕВ, В.А. ТАРАСОВ, В.Г. КОВАЛЕВ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ  
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ГАЗИФИКАТОРОВ\***

***Ключевые слова:** электрические режимы, электротермические установки, математическое моделирование, технологии аллотермической газификации, твердые углеродосодержащие материалы, комплексная переработка.*

*Объектом исследования являются электрические режимы электротермических газификаторов для комплексной термохимической переработки твердых углеродосодержащих материалов. Математическим моделированием процессов преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую энергию и экспериментами на лабораторных электротермических установках исследованы электрические режимы процессов пиролиза и газификации твердых углеродосодержащих материалов. Определены основные параметры электрических режимов электродных электротермических установок, которые могут использоваться как регуляторы потребления мощности в энергосистеме. Показано, что электрошлаковые электродные печи позволяют осуществлять комплексную термохимическую переработку твердых углеродосодержащих материалов с получением высококачественного синтез-газа, минеральная часть топлива, находящаяся в шлаке, может быть использована для получения строительных материалов, а восстановленные углеродом оксиды образуют металлический сплав, являющийся ценным металлургическим продуктом.*

**Введение.** В настоящее время актуальной является разработка новых технологий комплексной переработки местных, в том числе возобновляемых, видов твердого топлива с высокой энергетической и экологической эффективностью [5, 7, 11–13]. Технологии электротермической газификации твердых видов топлива позволяют эффективно вовлекать большие объемы дешевого низкокачественного топлива в народное хозяйство и расширять область применения таких видов топлива для различных теплотехнических и энергетических установок, уменьшать загрязнение окружающей среды выбросами вредных веществ, а также получать синтез-газ для химической промышленности [1, 2, 8, 11]. Для реализации таких технологий необходимы исследования процессов преобразования энергии в установках электротермической газификации.

**Основное содержание.** Целью данного исследования является математическое и физическое моделирование основных параметров электрических режимов электротермических газификаторов для термохимической переработки твердых углеродосодержащих материалов.

Базовой технологией в энерготехнологических комплексах является газификация твердых видов топлив. При этом тепловая энергия для поддержания процесса газификации получается за счет сжигания части твердого топлива (автотермический процесс) или за счет подвода внешней энергии (аллотермический процесс) [1, 2]. Автотермические способы пиролиза и газификации в настоящее время достаточно подробно изучены и внедрены в практику

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета министров Чувашской Республики в рамках научного проекта № 18-48-210006.

[8, 11–13]. Аллотермические процессы с применением различных способов электронагрева изучены недостаточно. Резистивный электронагрев в печах сопротивления может быть применен для низкотемпературного пиролиза при температурах от 400°C до 850°C для видов топлива и отходов с высоким содержанием летучих веществ. Для определенных видов неметаллического вторичного сырья (отходы древесины, полиэтилена и пластика) может быть применена высокочастотная электротермическая обработка [3]. В электродных печах, а также в плазменных установках при температурах до 2000°C возможна полная газификация углеродсодержащих твердых топлив и отходов [1, 2]. Высокотемпературная электротермическая переработка позволяет обезвреживать опасные биологические, биохимические, химические продукты, в том числе супертоксианты. Электротермические технологии [1, 2, 10] позволяют получать в рабочем пространстве большие плотности мощности, обеспечивающие интенсификацию всех технологических процессов вследствие высокой температуры и электромагнитного перемешивания жидких фаз. Различные металлургические операции могут осуществляться в окислительной, восстановительной или нейтральной среде.

Установка для электрошлаковой газификации представляет собой высокотемпературный электрохимический реактор (рис. 1).

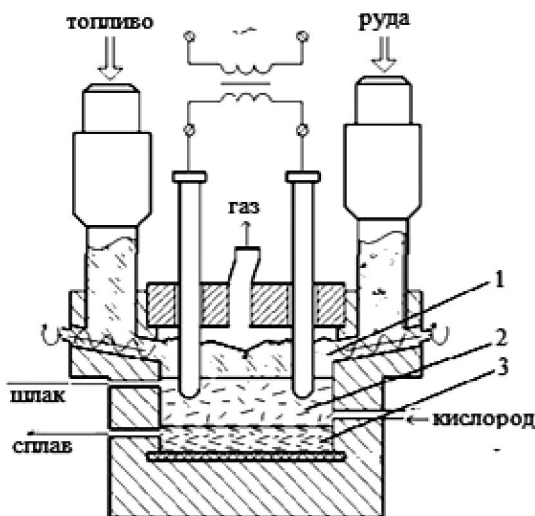


Рис. 1. Схема электродной электрической печи:

1 – слой твердых материалов; 2 – расплавленный шлак; 3 – слой металлического сплава

Перерабатываемое твердое топливо поступает в установку с температурой окружающей среды (порядка 20°C), а продукты реакции (газы и расплавы шлака и металлов) покидают печь с температурой 1400–1600°C. Области максимальных температур находятся около рабочих концов электродов, где имеется высокий градиент напряженности электрического поля. За счет преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую протекают процес-



сы нагревания и плавления минеральной части топлива, пиролиза, полукоксования и газификации, а также восстановления оксидов негорючей части перерабатываемого материала.

Электромагнитное поле в ванне электротермического газификатора описывается уравнениями электродинамики

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \vec{j} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{B} / \mu; \partial \vec{B} / \partial t = -\operatorname{rot} \vec{E},$$

где  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля,  $\vec{j}$  – плотность тока проводимости,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля.

Удельная проводимость твердых материалов и расплавленного шлака ванн электродных установок значительно меньше удельной проводимости металлов, в таких материалах потенциальная составляющая напряженности электрического поля значительно больше вихревой. Поэтому электрическое поле растекания тока по слабопроводящим материалам ванн электродных печей является потенциальным [4] и может быть рассчитано решением уравнения для скалярного потенциала электрического поля

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \Phi) = 0; \vec{E} = -\operatorname{grad} \Phi.$$

Напряженность электрического поля позволяет найти плотность тока проводимости и удельную объемную мощность

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}; p_v = \sigma E^2,$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость среды.

Магнитное поле может быть рассчитано по плотности тока через векторный потенциал

$$\vec{A} = \frac{\mu_a}{4\pi R} \int_V \vec{j} dV.$$

Индукция магнитного поля и плотность тока позволяют найти электромагнитную силу для оценки интенсивности электровихревых течений расплавленного шлака и металла, которые возникают при взаимодействии электрического тока с собственным магнитным полем.

Аналитический расчет электрического поля позволил получить выражения для потенциала в реакционной и шлаковой зонах электродных печей [4], а также формулы для расчета напряженности электрического поля, удельной объемной мощности, плотности тока и распределения мощности в ваннах печей электропечей с любым числом и расположением электродов [4]. Распределение удельной объемной мощности по ванне характеризуется относительной удельной объемной мощностью

$$P_v^* = \frac{P_v}{V_{p3}}.$$

где  $V_{p3}$  – объем рабочей зоны.

Расчет электрического поля позволяет найти поля плотности тока и удельной объемной мощности электропечей с любым числом и расположением

ем электродов [4], а также определить необходимое для расчета параметров электрического режима установки критерияльное сопротивление ванны  $\Gamma$

$$\Gamma = \frac{Rd}{\rho_{pz}},$$

где  $R$  – фазное сопротивление ванны;  $d$  – диаметр электрода;  $\rho_{pz}$  – удельное сопротивление материала реакционной зоны.

Из приведенных на рис. 2 картин линий равных относительных удельных объемных мощностей ванны электродной печи  $p_v^* = \text{const}$  видно, что электрическое поле в рабочей зоне является резко неравномерным: наибольшее выделение мощности происходит вблизи электродов, где достигается достаточно высокая температура для протекания эндотермических реакций процессов газификации твердого топлива и восстановления углеродом оксидов минеральной части перерабатываемого материала.

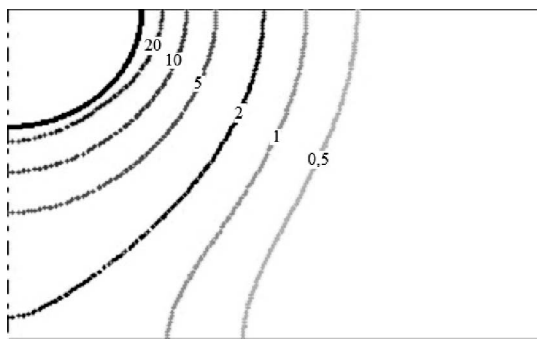


Рис. 2. Распределение поля линий равных относительных удельных объемных мощностей в реакционной зоне электродной печи

Электротермические электродные газификаторы могут быть созданы с использованием конструктивных решений, применяемых в герметичных рудовосстановительных электропечах и печах химической электротермии, мощность которых достигает 70 МВт.

В Чувашском государственном университете [6] разработана аллотермическая технология газификации твердых топлив в шлаковом расплаве электродной установки. По сравнению с плазменной технологией газификации электрошлаковая газификация позволяет использовать неизмельченное топливо, сократить выбросы оксидов серы, восстанавливать оксиды минеральной части сырья. При этом на 1 кВт·ч затраченной на газификацию электрической энергии можно получить до 7 кВт·ч тепловой энергии при сжигании генераторного газа [1, 2].

Энерготехнологический комплекс дает возможность работы электрошлакового газификатора в восстановительном режиме при низкой стоимости электрической энергии в ночные часы суток или выходные, когда дешевая электроэнергия используется для выработки из руды металлических сплавов. В часы максимума энергосистемы газификатор может переходить в режим работы с продувкой кислородом и низким потреблением электрической энер-

гии. Электротермический газификатор как регулируемая нагрузка, позволяет уменьшать потребление электрической энергии в несколько раз без снижения производительности по генераторному газу.

Технологии использования установок плазменного нагрева [11] обеспечивают также газификацию всех видов твердых топлив и отходов, но при этом удельный расход электроэнергии в несколько раз больше, чем при электрошлаковой газификации. Кроме того серьезной проблемой плазменных технологий является ограниченная продолжительность непрерывной работы плазмотронов [9].

На лабораторной одноэлектродной электропечи постоянного тока проведены серии экспериментов по нагреву, полукоксованию и газификации каменного угля [1, 2]. Исследованы режимы резистивного нагрева каменного угля и полукокса без шлака, дугового нагрева и резистивного нагрева с расплавленным шлаком. Определены параметры электрического режима при полукоксовании, газификации и протекании восстановительных процессов. Напряжение на ванне 23–35 В, ток электрода 70–90 А, активная мощность 1610–3150 Вт. Статистической обработкой получены средние значения напряжения на ванне 30 В, тока электрода 80 А, активной мощности 2400 Вт. Результаты физического и математического моделирования позволили определить электрические режимы двухэлектродной опытно-промышленной установки с активной мощностью ванны 100 кВт, включенной по бифилярной схеме (рис. 1). Токи электродов 1360 А, напряжение на ванне 74 В, напряжение на выводах трансформатора 76 В, активная мощность установки 104 кВт, полная мощность 108 кВт.

**Выводы.** Математическим моделированием процессов преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую энергию и экспериментами на электротермических установках исследованы электрические режимы электродных электрических печей, предназначенных для комплексной переработки твердых углеродосодержащих материалов. Определены основные параметры электрических режимов электродных электротермических газификаторов, которые могут использоваться как регуляторы потребления мощности в энергосистеме.

#### Литература

1. *Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Орлов В.Н.* Электротермическая газификация твердых топлив [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/125-19836>.
2. *Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Орлов В.Н., Тарасов В.А.* Исследование физико-химических свойств газификации местных видов топлив [Электронный ресурс] // «Фундаментальные исследования» 2016. № 9, ч. 2. С. 227–232. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/issue>.
3. *Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Филатова С.Н.* Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья // Наука и образование. 2014. № 6. С. 55–63.
4. *Миронов Ю.М., Тарасов В.А., Розенберг В.Л.* Принципы аналитического расчета электрических полей неоднородных ванн многоэлектродных печей // Электричество. 1984. № 5. С. 64–67.
5. *Ольховский Г.Г.* Газификация твердых топлив в мировой энергетике // Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 3–13.
6. Способ газификации углеродосодержащих твердых видов топлива: патент РФ RU 2521638 С2 / В.Г. Ковалев, В.В. Афанасьев, В.А. Тарасов; патентообладатель Чуваш. гос. ун-т. № 2012139762/05; заявл. 17.09.2012; опубл. 10.07.2014 Бюл. № 19.

7. Сучков С.И., Котлер В.Р., Баторшин В.А. Эффективный способ модернизации устаревших угольных ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 23–34.
8. Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Хуснуллин И.И. Современное состояние процесса пирогазетической переработки органических веществ // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 3. С. 169–174.
9. Чередниченко М.В., Сериков В.А., Бутаков Е.Б., Урбах А.Э. Эрозия электродов плазмотронов при использовании различных источников питания // Электротехнология. 2017. № 6. С. 2–7.
10. Karpenko E.I. Messerle V.E., Ustimenko A.B. New Plasma Technologies for Fuels Utilization. Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), September 18–21, 2007.
11. Mingaleeva G.R., Ermolaev D.V., Galkeeva A.A. Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, vol. 18, pp. 297–304.
12. Pechenegov Yu.Ya., Simonov F.V., Semenov B.A., Kosova O.Yu., Mrakin A.N. Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating. *Solid fuel chemistry*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 40–43. DOI: 10.3103/S0361521917010074.
13. Zhang Jianyun, Zhou Zhe, Ma Linwei, Li Zheng, Ni Weidou. Efficiency of wet feed IGCC (integrated gasification combined cycle) systems with coal–water slurry preheating vaporization technology. *Energy*, 2013, vol. 51, pp. 137–145. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.024.

---

**АФАНАСЬЕВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (avvteo@mail.ru).

**ТАРАСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (vladimir\_tarasov@inbox.ru).

**КОВАЛЕВ ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (espp21@mail.ru).

---

### V. AFANASYEV, V. TARASOV, V. KOVALEV ELECTRIC MODES OF ELECTROTHERMAL GASIFIERS

**Key words:** *electric modes, electrothermal installations, mathematical modeling, technologies of allothermic gasification, solid carbon-containing materials, complex processing.*

*The object of the research is the electric modes of electrothermal gasifiers for the thermochemical processing of solid carbon-containing materials. Electrotechnical regimes of the processes of pyrolysis and gasification of solid carbon-containing materials have been investigated using mathematical modeling of processes of conversion of the electromagnetic field energy into thermal energy and experiments in laboratory electrothermal installations. The main parameters of the electric modes of electrode electrothermal gasifiers, which can be used as regulators of power consumption in the power system, are determined. It is shown that the use of electric heating allows the complex thermochemical processing of any kind of solid carbon-containing materials to produce high-quality synthesis gas, the mineral part of the fuels in the slag can be used to produce building materials, and the carbon reduced oxides form a metal alloy, which is a valuable metallurgical product.*

#### References

1. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Tarasov V.A., Orlov V.N. *Elektrotermicheskaya gazifikatsiya tverdykh topliv* [Electrothermal gasification of solid fuels]. *Modern problems of science and education. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/125-19836>.

2. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Orlov V.N., Tarasov V.A. *Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoystv gazifikatsii mestnykh vidov topliv* [Investigation of the physicochemical properties of gasification of local types of fuels]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 9, part 2, pp. 227–232. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/issue>.
3. Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. *Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного syr'ya* [High-frequency electrothermal processing of non-metallic secondary raw materials]. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 6, pp. 55–63.
4. Mironov Yu.M., Tarasov V.A., Rozenberg V.L. *Printsipy analiticheskogo rascheta elektricheskikh polei neodnorodnykh vann mnogoelektroodnykh pechei* [Principles of analytical calculation of the electric fields of inhomogeneous baths of multielectrode furnaces]. *Elektrichestvo*, 1984, no. 5, pp. 64–67.
5. Ol'khovskii G.G. *Gazifikatsiya tverdykh topliv v mirovoi energetike* [Gasification of solid fuels in the global energy sector]. *Teploenergetika*, 2015, no. 7, pp. 3–13.
6. Kovalev V.G., Afanasyev V.V., Tarasov V.A. *Sposob gazifikatsii uglerodosoderzhashchikh tverdykh vidov topliva* [Method of gasification of carbon-containing solid fuels]. Patent RF, 2521638 C2, 2014.
7. Suchkov S.I., Kotler V.R., Batorshin V.A. *Effektivnyi sposob modernizatsii ustarevshikh ugol'nykh TETs* [An effective way to modernize outdated coal-fired power plants]. *Teploenergetika*, 2016, no. 12, pp. 23–34.
8. Timerbaev N.F., Safin R.G., Khusnullin I.I. *Sovremennoe sostoyanie protsessa pirogenicheskoi pererabotki organicheskikh veshchestv* [The current state of the process of pyrogenic processing of organic substances]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 169–174.
9. Cherednichenko M.V., Serikov V.A., Butakov E.B., Urbakh A.E. *Eroziya elektrodov plazmotronov pri ispol'zovanii razlichnykh istochnikov pitaniya* [Erosion of plasma torch electrodes using different power sources]. *Electrometallurgy*, 2017, no. 6, pp. 2–7.
10. Karpenko E.I. Messerle V.E., Ustimenko A.B. *New Plasma Technologies for Fuels Utilization. Proc/ of the 3<sup>rd</sup> Int/ Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC)*, September 18-21, 2007.
11. Mingaleeva G.R., Ermolaev D.V., Galkeeva A.A. *Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels. Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, vol. 18, pp. 297–304.
12. Pechenegov Yu.Ya., Simonov F.V., Semenov B.A., Kosova O.Yu., Mrakin A.N. *Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating. Solid fuel chemistry*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 40–43.
13. Zhang Jianyun, Zhou Zhe, Ma Linwei, Li Zheng, Ni Weidou. *Efficiency of wet feed IGCC (integrated gasification combined cycle) systems with coal–water slurry preheating vaporization technology. Energy*, 2013, vol. 51, pp. 137–145. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.024.

---

**AFANASYEV VLADIMIR – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Heat Power Plants Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (avvteo@mail.ru).**

**TARASOV VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, of Heat Power Plants Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (Vladimir\_tarasov@inbox.ru).**

**KOVALEV VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Power Industry Department named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (espp21@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Афанасьев В.В., Тарасов В.А., Ковалев В.Г. Электрические режимы электротермических газификаторов // Вестник Чувашикого университета. – 2019. – № 3. – С. 15–21.*

УДК 621.316.925

ББК 31.211

А.А. БЕЛЯНИН, А.Н. МАСЛОВ,  
И.В. СМЕРНОВА, М.Ю. ШИРОКИН**МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ  
ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ  
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА,  
ПРОИСХОДЯЩИХ НА ФОНЕ ВНЕШНИХ**

*Ключевые слова:* метод локализации, короткое замыкание, однофазное замыкание на землю, двойное замыкание на землю, распознающая способность, дифференциальная защита трансформатора.

*Данная статья посвящена развитию области применения метода локализации. Метод представляет собой обобщенный подход к определению повреждения в контролируемом объекте и предполагает его полное наблюдение, т.е. со всех сторон измеряются токи и напряжения. Наблюдаемые величины разделяются на две части. Первая часть используется для активации неповрежденной модели защищаемого объекта, а вторая – для сравнения с полученной реакцией модели. Наибольшее распространение получил вариант, в котором в качестве источников воздействия на неповрежденную модель используются напряжения, а сравнение происходит по токам. Токи, определяемые как разность между наблюдаемыми токами и соответствующими реакциями модели неповрежденного объекта, были названы локальными. Алгоритмы с использованием локального тока нашли достаточно широкое применение в задачах защиты линий электропередачи и локализации повреждений. В рамках данного исследования метод локализации использован для распознавания внутреннего повреждения силового трансформатора, происходящего на фоне внешнего. Рассматриваются два случая. В первом в качестве внутреннего повреждения выступает междуфазное короткое замыкание (КЗ), а в качестве внешнего – трёхфазное КЗ. Во втором случае рассматривается внутреннее однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) одной фазы, возникающее на фоне внешнего ОЗЗ другой фазы.*

Силовые трансформаторы являются ключевым структурным и важнейшим функциональным звеном современных электроэнергетических систем. Разнообразие возможных режимов работы, высокая стоимость и значимость трансформаторов влекут за собой постоянное увеличение требований, предъявляемых к защите данных объектов. Вследствие этого используемые защиты трансформаторов должны быть чувствительны ко всем видам повреждений. Проведённые ранее исследования [2] показали недостаточную чувствительность различных принципов торможения (торможение максимальным током, торможение суммой, направленное торможение) дифференциальной токовой защиты (ДТЗ) трансформатора в режимах наложения, когда внутреннее короткое замыкание (КЗ) происходит на фоне внешнего повреждения.

В данной статье рассматривается применение метода локализации повреждений [5] для повышения чувствительности защиты к рассматриваемому виду повреждений. Согласно данному методу любой наблюдаемый режим, можно представить в виде наложения нормального режима, создаваемого наблюдаемыми напряжениями, и локального режима, создаваемого источником

тока в месте повреждения. Принцип реализации данного метода заключается в следующем:

1) согласно рис. 1, а измеряются все токи ( $I_{набл}$ ) и напряжения ( $U_{набл}$ ) со всех сторон защищаемого объекта, в котором рассматривается повреждение с переходным сопротивлением  $R_f$ ;

2) в соответствии с принципом компенсации наблюдаемые напряжения ( $U_{набл}$ ) заменяются источниками ЭДС, а ветвь с повреждением заменяется источником тока  $I_f$ , что показано на рис. 1, б;

3) как показано на рис. 1, в, нормальные токи ( $I_{норм}$ ) определяются как реакция неповреждённой модели объекта на приложенные источники ЭДС;

4) согласно рис. 1, г вектор локальных токов рассчитывается по формуле

$$I_{лок} = I_{набл} - I_{норм} \quad (1)$$

Локальный ток по природе своего существования является идентификатором повреждения. Его отсутствие свидетельствует о неповреждённом состоянии объекта, а его появление явно указывает на наличие повреждения в защищаемой зоне.

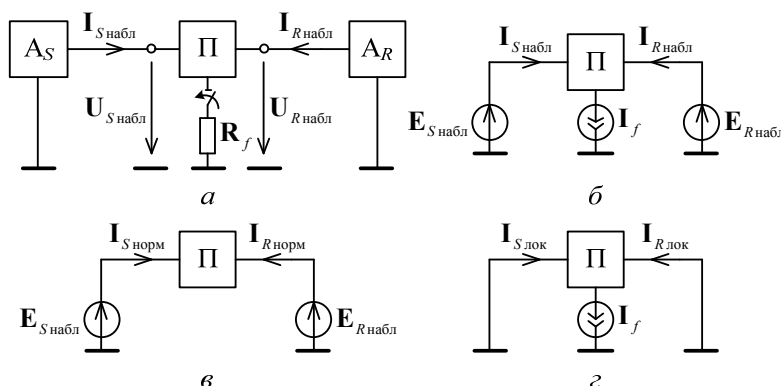


Рис. 1. Наблюдаемый, нормальный и локальный режимы в пассивной части цепи: а, б – наблюдаемый режим; в – нормальный режим; г – локальный режим

Для проверки работоспособности метода локализации в режимах наложения повреждений и последующего корректного сопоставления с существующими алгоритмами ДТЗ была рассмотрена имитационная модель (ИМО) сети 110 кВ, изображённая на рис. 2. Воспроизводится режим возникновения внутреннего повреждения в точке  $K_1$  на фоне существующего внешнего повреждения в точке  $K_2$ . Параметры модели приведены в таблице.

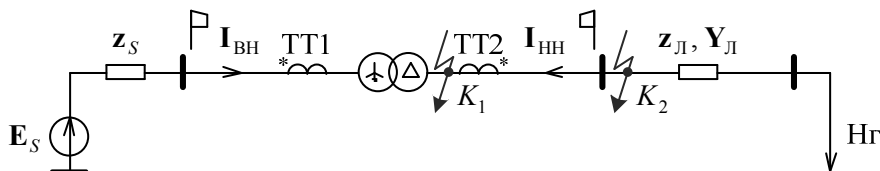


Рис. 2. Схема исследуемой сети

Таблица 1

## Параметры модели

Объект	Параметр		
	наименование	обозначение	значение
Система	Номинальное напряжение, кВ	$E_{S\text{ ном}}$	110
	Сопротивление прямой последовательности, Ом	$\underline{z}_{S1}$	$j12$
	Сопротивление нулевой последовательности, Ом	$\underline{z}_{S0}$	$j5.6$
Трансформатор ТДН-16000/110	Номинальная мощность, МВА	$S_{\text{ ном}}$	16
	Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	$U_{\text{ ВН}}$	115
	Номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ	$U_{\text{ НН}}$	11
	Напряжение КЗ, %	$U_{\text{ к}}$	10.5
	Потери КЗ, кВт	$P_{\text{ к}}$	85
	Потери холостого хода, кВт	$\Delta P_{\text{ х}}$	19
	Ток холостого хода, %	$I_{\text{ х}}$	0.7
Трансформаторы тока (ТТ)	Коэффициент трансформации стороны ВН	$k_{\text{ ТТ1}}$	200/1
	Коэффициент трансформации стороны НН	$k_{\text{ ТТ2}}$	1000/1
Линия	Удельное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	$\underline{z}_1^0$	$0.14 + j0.16$
	Удельное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км	$\underline{z}_0^0$	$0.67 + j1.41$
	Удельная проводимость прямой последовательности, мкСм/км	$Y_1^0$	0.12
	Удельная проводимость нулевой последовательности, мкСм/км	$Y_0^0$	0.13
	Длина линии, км	$l$	20
Нагрузка	Номинальная мощность, МВА	$S_{\text{ Нг}}$	5.3
	Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0.8

Ниже представлены результаты моделирования при зафиксированных значениях активных переходных сопротивлений ( $R_f$ ) междуфазного КЗ фаз  $A$  и  $B$  на выводах трансформатора  $R_{f\text{ ВНВД}} = 8$  Ом и внешнего трёхфазного КЗ  $R_{f\text{ внеш}} = 3$  Ом. На рис. 3,  $a$  изображены наблюдаемый и нормальный токи на выводах трансформатора стороны НН, на рис. 3,  $b$  – локальный ток, рассчитанный по формуле (1).

Графики условно разделены на три участка, причем видно, что на первых двух участках – в нагрузочном режиме и режиме внешнего КЗ – наблюдаемый и нормальный токи совпали по значению и по фазе, а локальный ток отсутствовал. В то же время режим наложения КЗ сопровождается появлением значительного уровня локального тока, что свидетельствует о наличии повреждения в защищаемой зоне. Результаты исследования демонстрируют, что метод локализации позволяет определить внутреннее повреждение на фоне существующего внешнего.

Для оценки чувствительности предложенного решения была построена зависимость действующего значения локального тока ( $I_{\text{лок}}$ ) от значения  $R_{f\text{ внутр}}$  при том же значении  $R_{f\text{ внеш}} = 3$  Ом. Данная зависимость приведена на рис. 4.



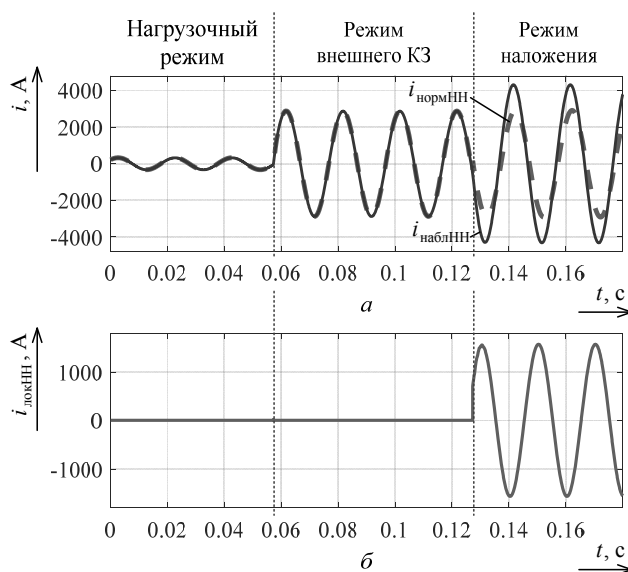


Рис. 3. Токи стороны НН: а – наблюдаемый и нормальный; б – локальный

Из представленного графика следует, что режим наложения при любом значении  $R_{f\text{внутр}}$  сопровождается появлением локального тока, что свидетельствует о потенциально высокой чувствительности метода к внутренним повреждениям. Однако есть ряд возможных причин появления локального тока в режимах, не связанных с внутренними повреждениями, например: погрешности измерительных ТТ и/или их насыщение, погрешность алгоритмического моделирования и т.п., которые в конечном счёте могут ограничить чувствительность рассматриваемого метода. Анализ указанных причин и способов минимизации их влияния даст возможность определить оптимальное значение уставки по локальному току для отстройки от неселективного срабатывания защиты.

Для более наглядного представления результатов на рис. 5 сопоставлены графики зависимостей  $R_{f\text{внутр}}$  от  $R_{f\text{внеш}}$  при использовании как метода локализации, так и ДТЗ с различными принципами торможения при возникновении внутреннего междуфазного КЗ на фоне внешнего трёхфазного КЗ [2]. При этом в качестве уставки по локальному току упрощенно было взято значение 200 А, равное 20% от первичного номинала ТТ стороны НН. Данный график показывает величину внутреннего переходного сопротивления в точке  $K_1$ , при котором удаётся выявить повреждение в трансформаторе в зависимости от величины переходного сопротивления внешнего повреждения в точке  $K_2$ .

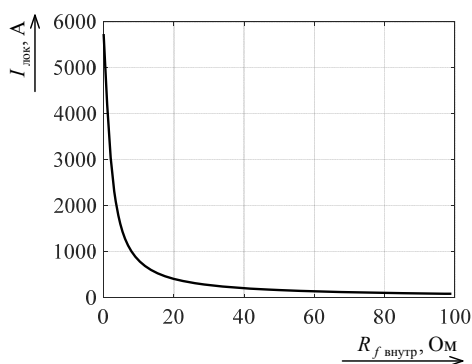


Рис. 4. Зависимость  $I_{\text{лок}}$  от значения  $R_{f\text{внутр}}$

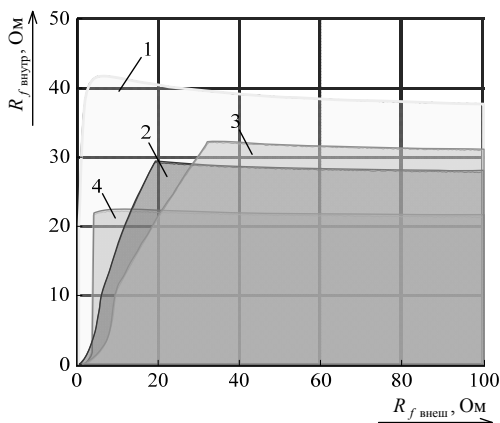


Рис. 5. Оценка распознающей способности при междуфазном внутреннем замыкании на фоне внешнего трехфазного:  
 1 – метода локализации; 2 – ДТЗ с торможением максимальным током;  
 3 – ДТЗ с торможением суммой, 4 – ДТЗ с направленным торможением

Среди режимов наложения можно выделить особый случай – однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) в точке  $K_1$ , которое возникает на фоне ОЗЗ в точке  $K_2$  [1]. По отдельности данные повреждения не приводят к протеканию значительных токов, так как в месте ОЗЗ протекает только ёмкостный ток, и не требуют действия на отключение. В то же время в совокупности они представляют собой новый вид повреждения – двойное замыкание на землю, сопровождающееся протеканием токов, уровень которых сопоставим с током междуфазного короткого замыкания [4].

На рис. 6 для данного вида повреждения построена характеристика, аналогичная представленной на рис. 5.

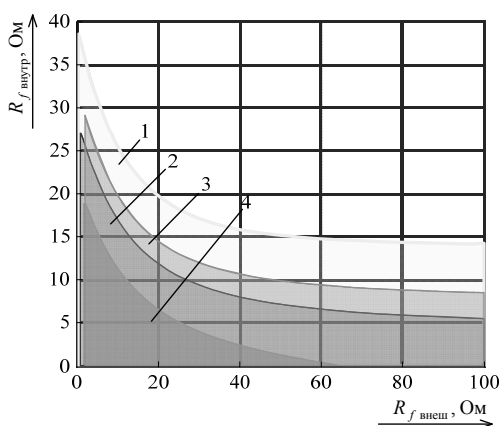


Рис. 6. Оценка распознающей способности при внутреннем замыкании на землю на фоне внешнего замыкания на землю:  
 1 – метода локализации; 2 – ДТЗ с торможением максимальным током;  
 3 – ДТЗ с торможением суммой, 4 – ДТЗ с направленным торможением

Из рис. 6 следует, что к данному виду повреждения метод локализации также показывает наивысшую чувствительность во всём диапазоне переходных сопротивлений внешнего повреждения.

Таким образом, метод локализации является эффективным инструментом для выявления факта возникновения повреждения в пределах защищаемой зоны. Метод является универсальным и может применяться как для защиты линий [3], так и для защиты силовых трансформаторов. Кроме того, представленные в статье исследования показывают, что метод локализации обладает высокой распознающей способностью в режимах наложения независимо от значения  $R_{f\text{внеш}}$ .

#### Литература

1. *Белянин А.А., Лямец Ю.Я.* Распознавание двойных замыканий на землю по методу локализации // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 366–369.
2. *Белянин А.А., Маслов А.Н., Смирнова И.В., Широкин М.Ю.* Исследование чувствительности дифференциальной токовой защиты трансформатора к внутренним коротким замыканиям на фоне внешних // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 304–308.
3. *Белянин А.А.* Релейная защита и локация повреждений в распределительных сетях // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 64–67.
4. *Куликов Ю.А.* Переходные процессы в электрических системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 284 с.
5. *Лямец Ю.Я., Белянин А.А.* Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети // Электротехника. 2016. № 10. С. 40–44.

---

**БЕЛЯНИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий сектором, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (belyanin\_aa@relematika.ru).

**МАСЛОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ** – инженер-исследователь 3-й категории, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (maslov\_an@relematika.ru).

**СМИРНОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА** – инженер-исследователь 3-й категории, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (smirnova\_av@relematika.ru).

**ШИРОКИН МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ** – заведующий отделом, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (shirokin\_mu@relematika.ru).

---

**A. BELYANIN, A. MASLOV, I. SMIRNOVA, M. SHIROKIN**

**LOCALIZATION METHOD FOR RECOGNITION  
OF INTERNAL DAMAGES OF A POWER TRANSFORMER  
THAT HAPPEN TO THE BACKGROUND OF EXTERNAL ONES**

**Key words:** localization method, short circuit, single-phase short circuit to earth, double short circuit to ground, recognition ability, transformer differential protection.

*The work is devoted to the development of the field of application of the localization method. The method is a generalized approach to determining damage in a controlled object and assumes its full observation, i.e. currents and voltages are measured on all sides. The observed values are divided into two parts. The first part is used to activate the intact model of the protected object, the second one being used for comparison with the obtained model response. The most widespread variant is that in which voltages are used as*

sources of influence on the intact model, and the comparison occurs over currents. The currents, defined as the difference between the observed currents and the corresponding responses of the model of an intact object, were called local. Algorithms using local current are widely used in the protection of power lines and the location of damage. In the framework of this study, the localization method was used to recognize the internal damage of a power transformer occurring against an external background. Two cases are considered. In the first one, interfacial short circuit acts as an internal fault, and a three-phase short circuit acts as an external fault. In the second case, an internal single-phase short-circuit to earth of one phase arising on the background of an external single-phase short-circuit to earth of another phase is considered.

#### References

1. Belyanin A.A., Lyamets Yu.Ya. *Raspoznavanie dvoynykh zamykaniy na zemlyu po metodu lokalizatsii* [Recognition of double earth faults using the localization method]. *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XI Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc of 11<sup>th</sup> Russ. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2015, pp. 366–369.
2. Belyanin A.A., Maslov A.N., Smirnova I.V., Shirokin M.Yu. *Issledovanie chuvstvitel'nosti differentsial'noi tokovoi zashchity transformatora k vnutrennim korotkim zamykaniyam na fone vneshnykh* [Investigation of the sensitivity of the differential current protection of a transformer to internal short circuits against external]. *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc of 13<sup>th</sup> Russ. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2019, pp. 304–308.
3. Belyanin A.A. *Releynaya zashchita i lokatsiya povrezhdeniy v raspredelitel'nykh setyakh* [Relay protection and fault location in distribution networks]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy I Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 1<sup>st</sup> Int. Sci. Conf. «Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2017, pp. 64–67.
4. Kulikov Yu.A. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transients in electrical systems]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2006, 284 p.
5. Lyamets Yu.Ya., Belyanin A.A. *Sostavlyayushchie tokov korotkogo zamykaniya v nablyudaemoi elektricheskoi seti* [Components of short circuit currents in the observed electrical network]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering], 2016, no. 10, pp. 40–44.

---

**BELYANIN ANDREI** – Candidate of Technical Sciences, Sector Manager, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (belyanin\_aa@relematika.ru).

**MASLOV ALEXANDER** – Engineer, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (maslov\_an@relematika.ru).

**SMIRNOVA IRINA** – Engineer, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (smirnova\_av@relematika.ru).

**SHIROKIN MAKSIM** – Head of Department, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (shirokin\_mu@relematika.ru).

---

**Формат цитирования:** Белянин А.А., Маслов А.Н., Смирнова И.В., Широкин М.Ю. Метод локализации для распознавания внутренних повреждений силового трансформатора, происходящих на фоне внешних // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 22–28.

УДК 621.316.925

ББК 31.211

А.А. БЕЛЯНИН, А.Н. МАСЛОВ,  
И.В. СМЕРНОВА, М.Ю. ШИРОКИН**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА  
К СЛОЖНЫМ ВИДАМ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

**Ключевые слова:** дифференциальная токовая защита, трансформатор, короткое замыкание, однофазное замыкание на землю, двойное замыкание на землю, торможение, распознающая способность.

Статья посвящена оценке чувствительности дифференциальной токовой защиты трансформатора к внутренним повреждениям, происходящим на фоне внешних. В качестве объекта исследования рассматривается дифференциальная защита с различными принципами торможения: торможение максимальным током, торможение суммой и направленное торможение. Для наглядного сравнения предложено использовать области срабатывания на плоскости переходных сопротивлений. Данные области отображают соответствие всех значений переходного сопротивления внутреннего повреждения при определенной величине переходного сопротивления внешнего замыкания, при которых защита оказывается способной распознать повреждение. Построение данных областей рассматривается на примере упрощенной модели сети, состоящей из системы, трансформатора, линии электропередачи и нагрузки. На нижней стороне трансформатора моделируется внутреннее повреждение на выводах и внешнее на шинах. Для рассматриваемого трансформатора рассчитаны уставки (параметры срабатывания) дифференциальной защиты с различными принципами торможения и построены тормозные характеристики. С помощью данных характеристик определяются значения переходных сопротивлений внутреннего междуфазного и внешнего трехфазного повреждений, при которых замер защиты попадает в зону срабатывания. Затем все полученные таким образом значения сопротивлений отображаются в виде искомым областей срабатывания. Дополнительно в работе рассматривается случай наложения повреждений, принципиально отличающийся характером протекающих процессов. Так, при наличии в сети однофазного замыкания на землю появление второй точки замыкания на землю сопровождается значительным увеличением тока в поврежденных фазах. Если само по себе однофазное замыкание на землю не является коротким, не требует отключения и несет опасность для оборудования в основном из-за возникающего перенапряжения в здоровых фазах, то двойное повреждение более опасно и требует немедленного отключения одной из точек повреждения. Для представленного случая аналогичным образом получены области срабатывания дифференциальной защиты. Представленные результаты в виде областей срабатывания позволяют упростить оценку качества работы защиты в данных режимах, сделать выводы о её чувствительности и достаточности.

При эксплуатации трансформаторов встречаются режимы работы, в которых современные устройства релейной защиты могут работать некорректно. В качестве таких режимов выступают витковые короткие замыкания [2], режимы броска намагничивающего тока [4], а также режимы внутренних коротких замыканий (КЗ), возникающих на фоне внешних повреждений (далее по тексту режим наложения).

В данной работе оценивается распознающая способность дифференциальной токовой защиты (ДТЗ) трансформатора с использованием различных принципов торможения в режимах наложения.

В программном комплексе MatLab/Simulink была собрана имитационная модель (ИМО) сети с односторонним питанием, приведенная на рис. 1, и реализован упрощенный алгоритм ДТЗ с торможением. Дифференциальный ток определяется как модуль векторной суммы токов плеч, определенных с учетом компенсации группы соединения и цифрового выравнивания. Расчет тормозного тока зависит от принципа торможения:

а) при торможении максимальным током – рассчитывается как наибольший из приведенных к базису относительных единиц токов плеч всех трех фаз;

б) при торможении суммой – рассчитывается как сумма модулей токов плеч;

в) при направленном торможении – рассчитывается в зависимости от углового соотношения между токами плеч.

ИМО была построена со следующими допущениями: использовались идеальные модели трансформаторов тока (ТТ) без учета влияния насыщения магнитопровода, а силовой трансформатор моделировался без учета нелинейной характеристики намагничивания.

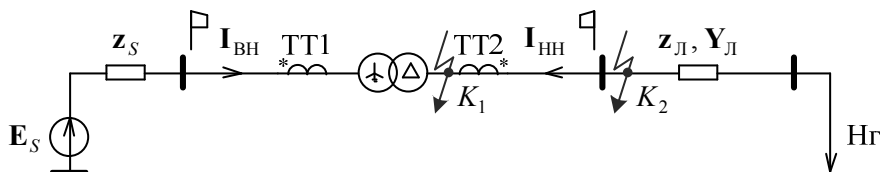


Рис. 1 Схема исследуемой сети

Параметры модели приведены в таблице.

#### Параметры модели

Объект	Параметр		
	наименование	обозначение	значение
Система	Номинальное напряжение, кВ	$E_{S \text{ ном}}$	110
	Сопrotивление прямой последовательности, Ом	$\underline{z}_{S1}$	$j12$
	Сопrotивление нулевой последовательности, Ом	$\underline{z}_{S0}$	$j5.6$
Трансформатор ТДН-16000/110	Номинальная мощность, МВА	$S_{\text{ном}}$	16
	Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	$U_{\text{ВН}}$	115
	Номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ	$U_{\text{НН}}$	11
	Напряжение КЗ, %	$U_{\text{к}}$	10.5
	Потери КЗ, кВт	$P_{\text{к}}$	85
	Потери холостого хода, кВт	$\Delta P_{\text{х}}$	19
	Ток холостого хода, %	$I_{\text{х}}$	0.7
Трансформаторы тока (ТТ)	Коэффициент трансформации стороны ВН	$k_{\text{ТТ1}}$	200/1
	Коэффициент трансформации стороны НН	$k_{\text{ТТ2}}$	1000/1

Окончание таблицы

Объект	Параметр		
	наименование	обозначение	значение
Линия	Удельное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	$\underline{z}_1^0$	0.14 + j0.16
	Удельное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км	$\underline{z}_0^0$	0.67 + j1.41
	Удельная проводимость прямой последовательности, мкСм/км	$\gamma_1^0$	0.12
	Удельная проводимость нулевой последовательности, мкСм/км	$\gamma_0^0$	0.13
	Длина линии, км	$l$	20
Нагрузка	Номинальная мощность, МВА	$S_{Нг}$	5.3
	Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0.8

При помощи ИМО воспроизводился режим наложения внутреннего повреждения в точке  $K_1$  на внешнее повреждение в точке  $K_2$ . Согласно руководящим указаниям по расчёту уставок<sup>1</sup> [1] для рассматриваемого трансформатора был произведён расчёт параметров срабатывания дифференциальной токовой защиты трансформатора с различными принципами торможения.

На рис. 2 приведены замеры ДТЗ по фазе А на различных ТХ для случая междуфазного КЗ фаз А и В на выводах трансформатора на фоне внешнего трехфазного КЗ. При этом значение переходного сопротивления ( $R_f$ ) внешнего КЗ было зафиксировано ( $R_{f\text{внеш}} = 20$  Ом), а значение  $R_f$  внутреннего КЗ ( $R_{f\text{внутр}}$ ) варьировалось. На рис. 2 стрелками указано направление движения годографа при увеличении значения  $R_{f\text{внутр}}$ .

Из приведённых графиков видно, что при торможении максимальным током ДТЗ срабатывает при значениях  $R_{f\text{внутр}}$  до 29,3 Ом, при торможении суммой – до 21,2 Ом, при направленном торможении – до 22 Ом.

Аналогичные замеры были получены для различных  $R_{f\text{внеш}}$ , а результаты представлены на рис. 3 в виде областей срабатывания ДТЗ. Закрашенные области соответствуют значениям внутренних переходных сопротивлений  $R_{f\text{внутр}}$ , при которых ДТЗ способна отключить рассматриваемое повреждение, в зависимости от значений переходных сопротивлений внешнего повреждения  $R_{f\text{внеш}}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что каждый вид торможения имеет свои преимущества в определенных диапазонах  $R_{f\text{внеш}}$ . Так, например, большей чувствительностью при небольших значениях  $R_{f\text{внеш}}$  обладает направленное торможение, но и оно оказывается практически нечувствительным при  $R_{f\text{внеш}}$  менее 4 Ом.

Стоит отметить, что бывают случаи, когда повреждения в разных точках сети оказывают друг на друга ощутимое влияние, кардинально меняющее характер повреждения. Одним из таких случаев является переход однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в двойное замыкание на землю (ДЗЗ) при появлении второй точки повреждения. Если ОЗЗ не сопровождается протеканием

<sup>1</sup> Рекомендации по расчету уставок АИПБ.656122.011-002 РРУ v16.2. Чебоксары, 2016, 122 с.; Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.031 РЭ. Чебоксары, 2016, 144 с

значительных токов и не требует немедленного отключения, то в случае ДЗЗ токи находятся на уровне междуфазных КЗ и требуют оперативных воздействий. При помощи представленной ранее ИМО был рассмотрен режим возникновения замыкания на землю фазы  $A$  в точке  $K_1$  на фоне внешнего ОЗЗ фазы  $B$  в точке  $K_2$ . На рис. 4 для данного вида повреждения изображены области срабатывания ДТЗ, аналогичные, приведённым на рис. 3.

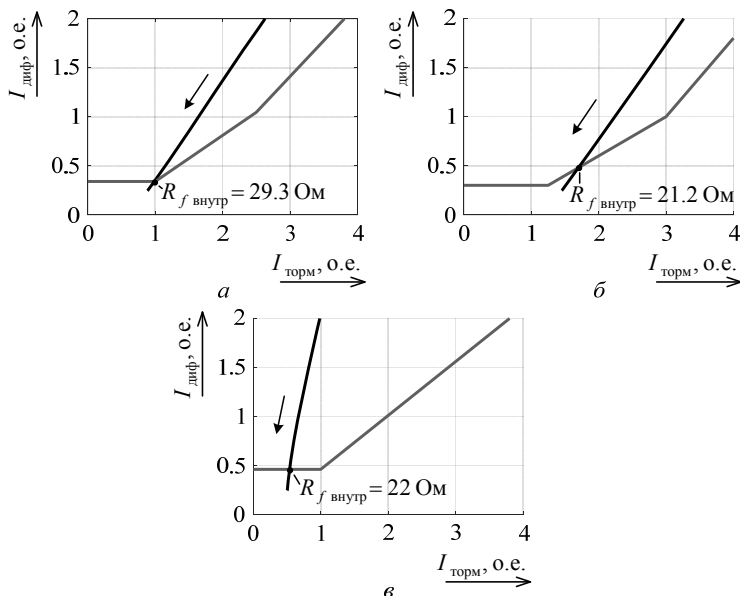


Рис. 2. Замеры ДТЗ на тормозной характеристике:  
 а – торможение максимальным током; б – торможение суммой;  
 в – направленное торможение

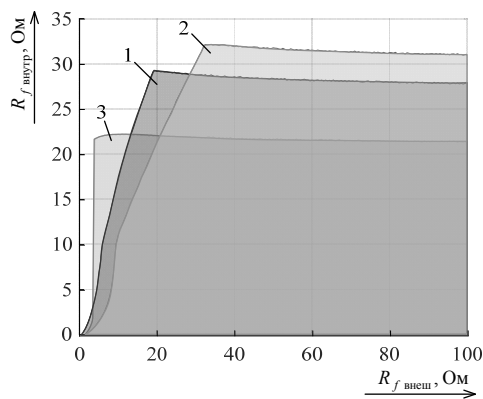


Рис. 3. Оценка распознающей способности ДТЗ при междуфазном замыкании на фоне внешнего трёхфазного:  
 1 – торможение максимальным током; 2 – торможение суммой;  
 3 – направленное торможение



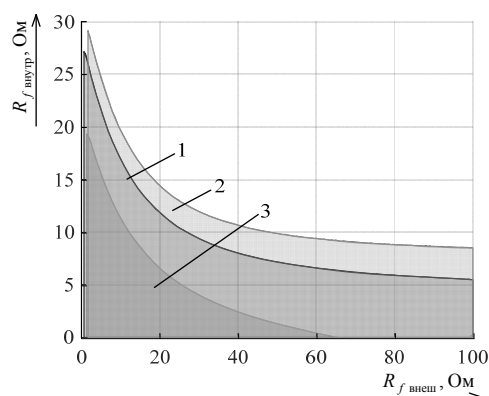


Рис. 4. Оценка распознающей способности ДТЗ при внутреннем замыкании на землю на фоне внешнего замыкания на землю:

- 1 – торможение максимальным током; 2 – торможение суммой;  
3 – направленное торможение

Из анализа приведённых областей срабатывания ДТЗ видно, что все рассмотренные принципы торможения ДТЗ показали высокую чувствительность при малых значениях внешних переходных сопротивлений  $R_{f\text{внеш}}$ . Но она резко снижается уже при незначительном увеличении  $R_{f\text{внеш}}$ , в то время как для ОЗЗ характерны переходные сопротивления вплоть до 1000 Ом [3], при которых ДТЗ может оказаться нечувствительной.

Таким образом, установлено, что ДТЗ не может гарантировать надежного отключения внутренних КЗ в режиме наложения ввиду недостаточной чувствительности при внешних КЗ, близких к металлическим, что обусловлено значительным уровнем тормозного тока. Кроме того, распознающая способность ДТЗ может оказаться недостаточной при возникновении двойных замыканий на землю, когда одна из повреждённых фаз оказывается вне защищаемой зоны, а другая внутри неё. На сегодняшний день обозначенная проблема может быть решена лишь действием резервных защит, что не обеспечивает необходимого быстродействия.

#### Литература

1. Аржанников Е.А., Аржанникова А.Е., Антонов Д.Б. О методике выбора параметров срабатывания микропроцессорных терминалов защиты понижающих трансформаторов // Вестник ИГЭУ. 2006. № 2. С. 83–85.
2. Белянин А.А., Широкин М.Ю. Новый подход к защите трансформатора // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Международ. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 67–71.
3. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения // Новости электротехники. 2005. № 6(36). С. 52–55.
4. Широкин М.Ю., Лукина К.В., Воронов П.И. Быстрое распознавание бросков намагничивающего тока при включении трансформатора // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики: материалы XIV Республ. конф. молодых специалистов «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика». Чебоксары, 2018. № 1. С. 37–39.

---

БЕЛЯНИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, заведующий сектором, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (belyanin\_aa@relematika.ru).

МАСЛОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ – инженер-исследователь 3-й категории, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (maslov\_an@relematika.ru).

СМИРНОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА – инженер-исследователь 3-й категории, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (smirnova\_av@relematika.ru).

ШИРОКИН МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ – заведующий отделом, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (shirokin\_mu@relematika.ru).

---

A. BELYANIN, A. MASLOV, I. SMIRNOVA, M. SHIROKIN

STUDY OF SENSITIVITY OF DIFFERENTIAL CURRENT PROTECTION  
OF TRANSFORMER TO COMPLEX TYPES OF DAMAGE

**Key words:** differential current protection, transformer, short circuit, single phase short circuit to earth, double short circuit to earth, braking, recognition ability.

The work is devoted to assessing the sensitivity of the differential current protection of a transformer to internal damage occurring against the background of external ones. The object of the research is differential protection with different principles of braking: braking with maximum current, braking with sum and directional braking. For a visual comparison, it was proposed to use the trigger areas on the plane of transient resistances. These areas represent the correspondence of all values of internal resistance to internal damage at a certain value of external contact resistance, at which the protection is able to recognize the damage. The construction of these areas is considered by presenting a simplified network model consisting of a system, transformer, transmission line, and load. On the lower side of the transformer, internal damage at the terminals and external at the tires is simulated. For the transformer under consideration, the settings (response parameters) of the differential protection with different principles of braking were calculated and the braking characteristics were constructed. With the help of these characteristics, the values of the transient resistance of the internal interphase and external three-phase damage are determined, at which the protection measurement falls into the zone of operation. Then, all the obtained resistance values are displayed in the form of the sought response areas. In addition, the work deals with the case of overlapping damage, which is fundamentally different in the nature of the proceeding processes. So, if a single-phase circuit is not in the ground, the appearance of the second point of the earth fault is accompanied by a significant increase in the current in the damaged phases. If the single-phase short circuit to earth itself is not short, if it does not require disconnection and is dangerous for equipment mainly due to overvoltage in healthy phases, double damage is more dangerous and requires immediate disconnection of one of the points of damage. For the case presented, the areas of operation of the differential protection are obtained in a similar way. The presented results in the form of triggering areas allow to simplify the assessment of the quality of protection work in these modes and draw conclusions about its sensitivity and sufficiency.

References

1. Arzhannikov E.A., Arzhannikova A.E., Antonov D.B. *O metodike vybora parametrov srbatyvaniya mikroprotsessornykh terminalov zashchity ponizhayushchikh transformatorov* [About methodology for calculating the settings of microprocessor-based protection terminals for step-down transformers]. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2006, no. 2, pp. 83–85.

2. Belyanin A.A., Shirokin M.Yu. *Novyi podkhod k zashchite transformatora* [A new approach to transformer protection]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotehniki i energo-*

*effektivnosti: materialy I Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2017, pp. 67–71.

3. Shalin A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-35 kV. *Napravlennye zashchity. Kharakteristiki, osobennosti primeneniya* [Earth faults in 6-35 kV networks. Directional protection. Characteristics, application features.]. *Novosti elektrotehniki* [Electrical Engineering News], 2005, no. 6(36), pp. 52–55.

4. Shirokin M.Yu., Lukina K.V., Voronov P.I. *Bystroe raspoznavanie broskov namagnichivayushchego toka pri vklyuchanii transformatora* [Quick recognition of magnetizing current surges when the transformer is turned on]. *Trudy Akademii elektrotekhnicheskikh nauk Chuvashskoi Respubliki: materialy XIV Respubl. konf. molodykh spetsialistov «Elektrotehnika, elektroenergetika, elektromekhanika»* [Proc of 14<sup>th</sup> Chuvash conf «Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electromechanics»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2018, № 1, pp. 37–39.

---

**BELIANIN ANDREI – Candidate of Technical Sciences, Sector Manager, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (belyanin\_aa@relematika.ru).**

**MASLOV ALEXANDER – Engineer, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (maslov\_an@relematika.ru).**

**SMIRNOVA IRINA – Engineer, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (smirnova\_av@relematika.ru).**

**SHIROKIN MAKSIM – Head of Department, Ltd «Relematika», Russia, Cheboksary (shirokin\_mu@relematika.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Белянин А.А., Маслов А.Н., Смирнова И.В., Широкин М.Ю.* Исследование чувствительности дифференциальной токовой защиты трансформатора к сложным видам повреждений // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 29–35.

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

А.В. БУЛЫЧЕВ, Д.С. ВАСИЛЬЕВ, Д.Н. СИЛАНОВ

## ДВУХУРОВНЕВАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА 110/35/10 кВ

*Ключевые слова:* цифровая подстанция, распределительные сети, релейная защита, отказы, резервирование.

*Подстанции класса 110/35/10(6) кВ по стороне низшего напряжения, как правило, оборудуются одним микропроцессорным терминалом релейной защиты и автоматики (РЗА) на каждое присоединение. При отказе основного комплекта РЗА теряются все функции защиты и системы управления соответствующего присоединения, а установка второго комплекта защит экономически нецелесообразна. Так выход из строя или отказ защиты отходящего фидера приведет к отключению вводного выключателя и прекращению энергоснабжения потребителей всей секции шин. Разработанная инновационная архитектура построения ЦПС с использованием централизованного резервирования терминалов защит методом замещения. Предложенное техническое решение позволяет за счет «цифровизации» подстанции получить существенное улучшение основных свойств релейной защиты: надежность, быстрдействие, селективность.*

**Введение.** Особенности технологии электроэнергетики во многом определяют требования к качеству управления электроэнергетическими системами (ЭЭС). В мире, пожалуй, нет другой такой технической системы, где регулирование и управление осуществлялись бы с такой же высочайшей точностью в течение десятилетий, как в электроэнергетической системе. Так, отклонение частоты в российской энергосистеме, установленное нормативными документами, не превышает  $\pm 0,4\%$  номинальной.

**Место релейной защиты в общей системе управления электроэнергетическими системами.** В зависимости от характера режима управление ЭЭС осуществляется разными методами и техническими средствами<sup>1</sup>:

- в нормальных режимах реализуется плановое изменение режимов средствами оперативно-диспетчерского управления;
- при сильных возмущениях (например, при внезапном изменении схемы, изменении нагрузки) в условиях электромеханических переходных процессов (процессы, протекающие за время от нескольких секунд до нескольких минут) управление осуществляет противоаварийная автоматика;
- при повреждениях элементов в условиях электромагнитных переходных процессов (процессы, протекающие за время от долей секунды до нескольких секунд) действует релейная защита, осуществляющая быстрое вы-

<sup>1</sup> Правила устройства электроустановок / Минэнерго России. 7-е изд. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003; ГОСТ 34045-2017. Электроэнергетические системы: Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. М.: Стандартиформ, 2017.

явление и отделение поврежденного элемента электроэнергетической системы от исправной ее части с целью обеспечения работоспособности исправной части ЭЭС [1].

В каждом виде управления используются особые методы и технические средства, своеобразие которых обусловлено условиями применения управляющих воздействий (режимами), целью управляющих воздействий и динамикой процессов в которых реализуются управляющие воздействия (табл. 1). Особенности применения каждого вида управления, в свою очередь, предполагают использование своеобразных моделей ЭЭС.

В оперативно-диспетчерском управлении используются специальные многоэлементные модели установившихся стационарных режимов ЭЭС, по которым ведется расчет потоков электрической энергии, определяются токи в ветвях и напряжения в узлах электрической системы. В средствах противоаварийного управления, действующих в условиях электромеханических переходных процессов, используются другие модели (менее громоздкие), позволяющие анализировать электромеханические процессы в ЭЭС, вызванные возмущающими воздействиями, и находить варианты управляющих воздействий для перевода ЭЭС в новый установившийся режим. В релейной защите, действующей в условиях электромагнитных переходных процессов, используются особые модели нестационарных процессов, позволяющие быстро получить данные о месте повреждения. Каждая модель из перечисленных построена для решения специфичной задачи управления ЭЭС, и все модели невозможно реализовать совместно в каком-то одном вычислительном комплексе с приемлемыми показателями по точности, динамике и надежности [2].

Таблица 1

Сравнение различных видов управления в ЭЭС

Вид управления	Условия применения управляющих воздействий	Цель управляющих воздействий
<b>Оперативно-диспетчерское управление</b> (до нескольких часов)	Нормальные и утяжеленные режимы ЭЭС	Плавный плановый переход от одного режима к другому
<b>Противоаварийное управление</b> (до нескольких минут)	Сильные возмущения, аварийные режимы, электромеханические переходные процессы, риск развития аварийной ситуации	Прекращение или ослабление аварийных режимов. Обеспечение перехода к новому установившемуся режиму
<b>Релейная защита</b> (доли секунды)	Повреждения отдельных элементов ЭЭС (короткие замыкания, обрывы и др.)	Отделение поврежденных элементов от исправной части ЭЭС

В этой связи релейную защиту, как особый вид управления ЭЭС, необходимо реализовывать с помощью отдельных программно-аппаратных комплексов, обладающих высокой степенью автономности [3].

К релейной защите предъявляются особенно жесткие требования по динамике управления, и их надо учитывать при разработке цифровых систем

управления объектами ЭЭС. Управление при повреждениях элементов ЭЭС связано с особенностями, обусловленными неизбежным дефицитом времени для анализа режима, и имеет особый статус. Отчасти поэтому процесс массовой замены традиционных устройств РЗА, выполненных на электромеханической базе, на цифровые устройства (цифровые терминалы), к сожалению, сопровождается снижением надежности РЗА. Но и в этих условиях нельзя допустить возникновения аварий, развитие которых может привести к катастрофическим последствиям. В этой связи совершенствование средств управления ЭЭС в аварийных режимах, в частности, релейной защиты представляет собой важнейшую и актуальнейшую научно-практическую задачу.

В ходе «цифровизации» необходимо не только построить цифровую сеть управления электроэнергетическими объектами, но и улучшить качество управления электрическими системами и получить так называемый дополнительный системный эффект.

С учетом огромных объемов работ по «цифровизации» ЭЭС и неоднозначности известных технических решений необходим поэтапный перевод наиболее массовых подстанций класса 35-110 кВ на полное цифровое управление. Причем решения здесь должны быть бюджетными, соответствующими классу напряжений.

«НПП Бреслер» в настоящее время по заказу ПАО «Россети» выполняет несколько научно-исследовательских работ (НИОКР), направленных на создание «цифровых» подстанций (ЦПС) с разными структурами и уровнями напряжения, а также отдельных элементов этих подстанций.

При разработке приняты следующие базовые условия «цифровизации» подстанций класса напряжений 110/35/10 кВ:

- требования и рекомендации, изложенные в концепции «Цифровая трансформация 2030» и нормативных документах ПАО «Россети»;
- массовость подстанций класса напряжения 110/35/10 (их более 10 тысяч);
- решения должны быть бюджетными, соответствующими классу 110 кВ (универсальные терминалы, которые могут выполнять несколько функций, упрощенные сегментированные двухуровневые структуры цифровой сети, отсутствие постоянного дежурного персонала);
- улучшение управляемости подстанций от достигнутого уровня, а также соблюдение условия «не навредить» подстанции в целом в части надежности электроснабжения (десятки лет работы без отказов);
- улучшение основных свойств релейной защиты за счет «цифровизации» (селективность, быстродействие, чувствительность и надежность, более точное определение места повреждения).

На основе этих исходных условий разработана двухуровневая структура цифровой системы управления подстанцией, которая может быть реализована в два этапа.

**Двухуровневая цифровая система управления подстанцией.** Электрическую подстанцию условно разделяют на силовые узлы, в каждом из которых соединяются несколько электрических присоединений, так можно вы-

делить секцию шин низшего класса напряжения или трансформатор и соответствующую секцию шин высшей стороны. Двухуровневая структура управления подстанции, формируемая из базового (первого) уровня и централизованной цифровой надстройки (второго уровня) для каждого силового узла, может быть поэтапно реализована на объекте.

Первый этап предполагает создание базовой части системы релейной защиты (РЗ) и управления подстанции на основе терминалов РЗА, установленных на элементах подстанции, в соответствии с традиционными принципами. Эта базовая часть системы РЗ и управления монтируется, налаживается и вводится в эксплуатацию по традиционным методикам. Таким образом, создается базовая платформа системы управления подстанции, достаточная по функциональным возможностям для ввода подстанции в работу.

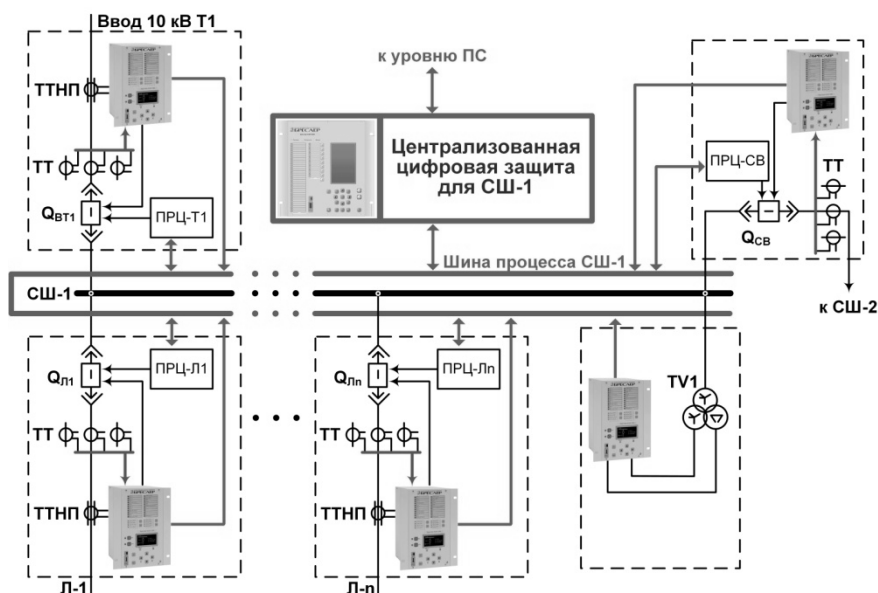


Рис. 1. Структурная схема организации связей узла ЦПС: шины низшего напряжения

Во втором этапе создаются локальные цифровые системы управления узлов подстанции (на основе технологии шины процесса IEC 61850-9-2) и общеподстанционная цифровая система управления (шина подстанции IEC 61850-8-1). На рис. 1 и 2 показаны структурные схемы организации системы управления узла цифровой подстанции для низшего и высшего класса напряжения с использованием технологии шины процесса IEC 61850-9-2 и централизованных систем управления. Каждая централизованная система управления узла цифровой подстанции работает независимо от остальных узлов системы управления, но в совокупности они формируют единую систему управления всей подстанцией, как показано на рис. 3 [5, 7].

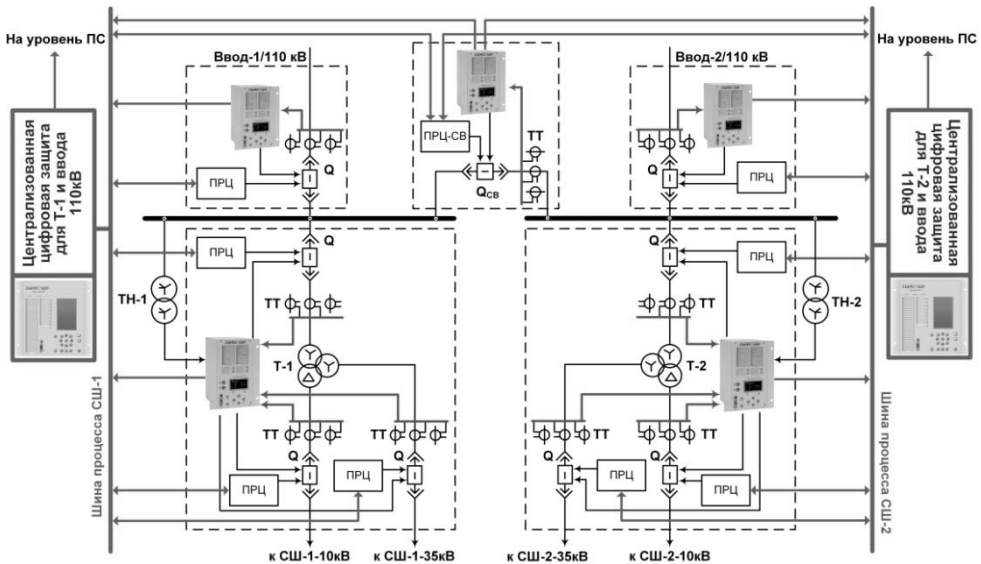


Рис. 2. Структурная схема организации связей узла ЦПС: трансформатор и шины высшего напряжения

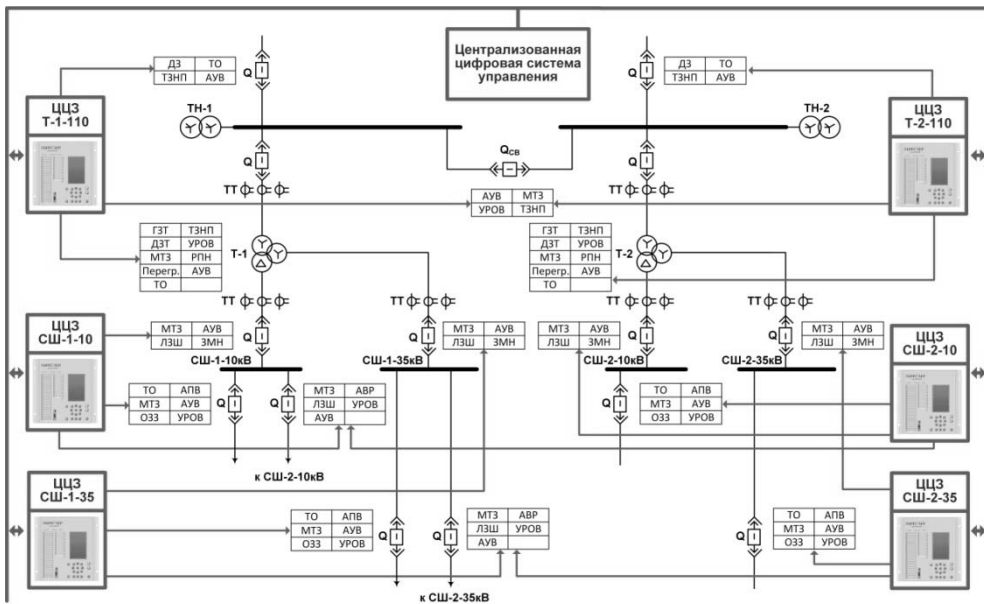


Рис. 3. Структурная схема организации связей единой системы управления подстанцией

Монтаж и наладка централизованной части цифровой системы управления могут осуществляться в условиях эксплуатации подстанции с сохранением главной функции подстанции – электроснабжения потребителей. Этот двухэтапный план реализации может быть эффективен не только при строительстве новых подстанций, но и при модернизации существующих действующих объектов с целью перевода их в класс «цифровых» подстанций.



**Двухуровневая цифровая система релейной защиты.** Одним из наиболее важных преимуществ технологии ЦПС является возможность расширения состава функций РЗА без увеличения количества оборудования, при этом необходимые данные уже существуют в шине процессов. Для повышения надежности работы РЗА без существенного увеличения затрат используется инновационная архитектура ЦПС с применением комплекса резервной централизованной цифровой защиты.

Комплекс резервной централизованной цифровой защиты выполнен в виде двухуровневой структуры. Первый уровень состоит из локальных многофункциональных терминалов РЗА, которые обеспечивают автономное выполнение всех функций РЗ, предусмотренных нормативными документами.

Второй уровень комплекса резервной централизованной цифровой защиты содержит терминалы РЗА с цифровыми портами связи с шиной процесса, преобразователи релейные цифровые (ПРЦ) и терминалы централизованных цифровых защит. Базовые терминалы РЗА обеспечивают выполнение функций защит, а также функций оцифровки и передачи информации в шину процесса. При этом терминал защиты не является полноценным участником в шине процесса, а только источником, что позволяет оградить его от многих негативных эффектов и процессов в шине [6].

Терминал централизованной цифровой защиты выполняет функции резервирования защиты и автоматики как при нормальной работе базовых терминалов РЗА первого уровня, так и при сбое любого базового терминала РЗА. Принцип резервирования отображен на рис. 4. Под сбоем терминала понимается любое его состояние, при котором он не способен выполнять свои функции (потеря питания, несрабатывание контактов реле, блокировка функций РЗА при обнаружении внутренних неисправностей системой самодиагностики терминала и прочее). Терминал централизованной цифровой защиты выполняет централизованное резервирование защит всех присоединений силового узла подстанции.

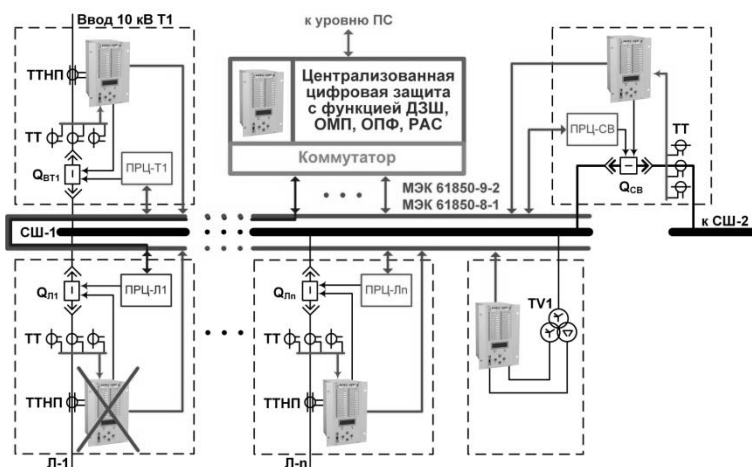


Рис. 4. Принцип централизованного резервирования терминалов защит методом замещения

Модули ПРЦ интегрированы в схему управления выключателем или другого управляемого силового оборудования и, в частном случае, воздействуют непосредственно на электромагниты выключателя. Все управляющие сигналы передаются от централизованных цифровых защит через шину процесса. Количество ПРЦ определяется числом управляемых силовых агрегатов. Модули ПРЦ являются многофункциональными интеллектуальными устройствами, которые начинают выполнять функции автоматики управления силовым оборудованием при сбое соответствующего базового терминала РЗА. Также ПРЦ собирают и передают необходимые для работы централизованных цифровых защит дискретные сигналы (положения ключей, состояние оборудования, технологические сигналы).

Дистанционное управление коммутационными аппаратами может быть реализовано через базовый терминал защиты и автоматики управления коммутируемого выключателя, а также через централизованный терминал. Централизованный терминал принимает команду управления от верхнего уровня, обрабатывает ее 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.

Модули ПРЦ позволяют добиться полного замещения функций, вышедшего из строя базового терминала. Однако если полное замещение не требуется, то для функционирования двухуровневой системы релейной защиты необходимо и достаточно продублировать сигналы на отключение. В данных условиях возможен вариант реализовать воздействие непосредственно от централизованного цифрового устройства или же в качестве ПРЦ можно использовать любое другое интеллектуальное устройство, которое способно принимать сигналы от централизованного цифрового терминала по протоколу МЭК 61850-8-1 и воздействовать на выключатель. В качестве примера разберем набирающую популярность тенденцию построения цифровой подстанции, где на каждое присоединение устанавливается по два устройства: устройство РЗА и устройство контроллера присоединения, которое совмещает в себе функции КП, ОБР, ТС, ТУ, ТИ. Для создания двухуровневой системы необходимо добавить в устройство РЗА функцию преобразователя аналоговых сигналов, а воздействие продублировать через контроллер.

**Опытный образец цифровой системы релейной защиты.** Специалистами ООО «НПП Бреслер» в рамках НИОКР по заказу ПАО «Тюменьэнерго» на основе изложенного подхода разработана и реализована цифровая система релейной защиты для подстанции класса напряжения 110/35/6 кВ. Разработана аппаратная часть системы защиты, алгоритмы и программы, реализующие функции релейной защиты. Опытный образец разработанной систе-

мы релейной защиты установлен на действующей подстанции «Аганская» и введен в эксплуатацию в декабре 2018 г. [4].

Опытный образец выполнен в виде двухуровневой структуры. Первый уровень содержит локальные централизованные цифровые защиты узлов (сегментов) подстанции и терминалы защиты присоединений (защиты для отходящих линий, вводов, межсекционных соединений, трансформаторов и вводов 110 кВ), которые могут автономно выполнять все функции релейной защиты, предусмотренные нормативными документами. Этот первый уровень был реализован в первой очереди строительно-монтажных и пусконаладочных работ.

Централизованная цифровая защита выполнена на трех терминалах. 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 трансформаторов, установленных на стороне высшего напряжения. Второй и третий терминалы централизованных цифровых защит выполняют централизованное резервирование защит всех присоединений первой и второй секций шин среднего напряжения. Терминалы являются приемниками значений тока от базовых терминалов по протоколу МЭК 61850-9-2. Управляющие воздействия выполняются через дополнительные модули ПРЦ, связь с которыми организована по протоколу МЭК 61850-8-1. На подстанции удалось достичь полное замещение функций, при этом вход 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 пусконаладочные работы по переводу ее в разряд «цифровых» подстанций за 6 месяцев.

**Выводы.** Предложенный двухэтапный принцип организации строительно-монтажных и пусконаладочных работ позволяет создавать новые «цифровые» подстанции и переводить действующие подстанции в разряд «цифровых» подстанций с минимальными затратами времени.

Разработанный проект обеспечивает улучшение основных свойств релейной защиты (надежности, селективности, быстродействия и чувствительности) за счет системного эффекта и замещающего централизованного резервирования основных защит.

Предложенная двухуровневая структура централизованной цифровой системы РЗ обеспечивает автономность работы базового уровня и живучесть всей системы РЗА на подстанции в целом.

#### Литература

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. М.: Энергия, 1980. 568 с.

2. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.

3. Чернобровов, Н.В. Релейная защита. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 680 с.

4. Булычев А.В., Васильев Д.С., Козлов В.Н., Силанов Д.Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1. С. 70–76.

5. Шевцов М.В. Передача дискретных сигналов между УРЗА по цифровым каналам связи // Релейщик. 2009. № 1. С. 60–63.

6. Anombem U.B., Crossley H., Li P., Zhang R., McTaggart C., Process bus architectures for substation automation with life cycle cost consideration. Proc. of 10<sup>th</sup> IET Int. Conf. on Developments in Power System Protection (DPSP), 2010.

7. Ward S., Gwyn B., Antonova G., Apostolov A. et al. Redundancy considerations for protective relaying systems. Proc. of 63<sup>rd</sup> Annual Conf. for Protective Relay Engineers, College Station, 2010, TX, pp. 1–10. DOI: 10.1109/CPRE.2010.5469478.

**БУЛЫЧЕВ АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор, Чувашский государственный университет; технический директор, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (bav@bresler.ru).

**ВАСИЛЬЕВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ** – кандидат технических наук, начальник отдела РЗА, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (vds@bresler.ru).

**СИЛАНОВ ДИМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – магистр технических наук, инженер отдела РЗА, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (silanov\_dn@bresler.ru).

A. BULYCHEV, D. VASILEV, D. SILANOV

**TWO-LEVEL DIGITAL CONTROL AND RELAY PROTECTION SYSTEMS  
OF SUBSTATION OF FACILITIES  
OF DISTRIBUTION GRIDS 110/35/10(6) KV**

*Key words: digital substation, distribution grids, relay protection system, failures of relay protection, reserved relay protection.*

*Typically 110/35/10(6) kV substations are equipped with one microprocessor relay protection assembly for each feeder of medium and low voltage. In case of failure of the main protection assembly, all the protection and control of the feeder is lost, use of additional protection assembly being economically inefficient. Thus, failure of the feeder protection assembly leads to further busbar section tripping. The developed innovative architecture of building a digital substation with the use of a centralized protection complex improves reliability due to centralized back-up protection using the substitution method. The proposed technical solution allows, due to the “digitalization” of the substation, to obtain a significant improvement in the basic properties of relay protection: reliability, high-speed operation, selectivity.*

References

1. Anderson P., Fuad A. Upravlenie energosistemami i ustoichivost' [Power system control and stability]. Moscow, Energiya Publ., 1980.

2. Fedoseev A.M. Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh system [Relay protection systems of the power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992.

3. Chernobrovov N.V. Releynaya zashchita [Relay protection]. Moscow, Energiya Publ., 1974.

4. Bulychev A.V., Vasil'ev D.S., Kozlov V.N., Silanov D.N. Releynaya zashchita v raspredelitel'nykh setyakh 110/35/10 kV v usloviyakh tsifrovoy transformatsii elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection in distribution networks 110/35/10 kV in the conditions of digital transformation of electric power systems]. Releynaya zashchita i avtomatizatsiya, 2019, no. 1, March, pp. 70–76.

5. Shevcov M.V. *Peredacha diskretnykh signalov mezhdu URZA po cifrovym kanalam svyazi* [Transfer of discrete signals between IEDs on digital communication channels]. *Relejschchik*, 2009, no. 1, pp. 60–63.

6. Anombem U.B., Crossley H., Li P., Zhang R., McTaggart C., Process bus architectures for substation automation with life cycle cost consideration. Proc. of 10<sup>th</sup> IET Int. Conf. on Developments in Power System Protection (DPSP), 2010.

7. Ward S., Gwyn B., Antonova G., Apostolov A. et al. Redundancy considerations for protective relaying systems. Proc. of 63<sup>rd</sup> Annual Conf. for Protective Relay Engineers, College Station, 2010, TX, pp. 1–10. DOI: 10.1109/CPRE.2010.5469478.

---

**BULYCHEV ALEKSANDR – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chuvash State University, Technical Director, «NPP Bresler» LLC, Russia, Cheboksary (bav@bresler.ru).**

**VASILEV DMITRIY – Candidate of Technical Sciences, Chief of the Relay Protection Department, «NPP Bresler» LLC, Russia, Cheboksary (vds@bresler.ru).**

**SILANOV DIMITRIY – Master of Technical Sciences, Relay Protection Engineer, «NPP Bresler» LLC, Russia, Cheboksary (silanov\_dn@bresler.ru).**

---

**Формат цитирования:** Булычев А.В., Васильев Д.С., Силанов Д.Н. Двухуровневая цифровая система управления и релейной защиты для объектов распределительного сетевого комплекса 110/35/10 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 36–45.

УДК 621.311:621.314.22.08

ББК 123.34

В.К. ВАНИН, И.В. ВАНИН, М.Г. ПОПОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

*Ключевые слова:* трансформатор напряжения, ток намагничивания, ток потерь, снижение погрешности, вихревые токи, восстановление первичного напряжения.

*В статье рассматривается новый способ снижения погрешности измерений фазных напряжений путем фильтрации тока намагничивания и воспроизведения первичных сигналов напряжения двухобмоточных измерительных трансформаторов. Погрешности измерительных трансформаторов напряжения в стационарных и переходных процессах обуславливаются в первую очередь нелинейностью характеристик намагничивания сердечников и активными сопротивлениями обмоток, нагрузки и их индуктивностями, а в отдельных случаях и емкостью. По сути, погрешности являются методическими и ограничивают использование трансформаторов во многих практических приложениях из-за невозможности обеспечения требуемого класса точности. Поэтому для повышения точности измерения первичного напряжения нужно решить, прежде всего, задачу его воспроизведения путем устранения методических и инструментальных погрешностей в нестационарных режимах электрооборудования и увеличения диапазона измерения напряжения. В статье представлен способ воспроизведения первичного напряжения, базирующийся на численном решении системы нелинейных уравнений, отражающих реальные физические электромагнитные процессы в трансформаторе с учетом особенностей гистерезисных характеристик намагничивания.*

Повышение точности измерения первичных величин трансформаторов напряжения и тока в энергетических системах всегда является актуальной задачей, так как позволяет научно обоснованно проектировать, создавать средства противоаварийного управления, повышать качество измерительных процессов, экономичность и безопасность производства и распределения электрической энергии [3, 4, 7]. В этой связи в статье рассматриваются методические вопросы повышения точности воспроизведения первичного напряжения двухобмоточных электромагнитных измерительных трансформаторов напряжения в энергосистемах разного класса напряжения. Полученные результаты могут быть использованы и для других разновидностей этих трансформаторов в трехфазных системах высокого напряжения. Традиционно такие трансформаторы описываются с помощью линейных, электрических схем замещения [1, 2, 6, 7], что приводит к большим, недопустимым погрешностям при анализе и контроле различных переходных и установившихся процессов в трансформаторном оборудовании и схеме энергосистемы. Погрешности измерительных трансформаторов напряжения в указанных переходных, а также в стационарных процессах обуславливаются в первую очередь нелинейностью характеристик намагничивания электротехнической стали сердечников и, кроме того, активными сопротивлениями обмоток, нагрузки и их индуктивностями, а в отдельных случаях и емкостью. По сути дела, погрешности являются методическими и во многих практических приложениях ограничивают использование различных трансформаторов из-за невозможности обеспечения требуемого класса точности.

Поэтому с целью дальнейшего повышения точности измерения первичного напряжения необходимо решить задачу его воспроизведения путем устранений (или значительного уменьшения) методических и инструментальных погрешностей в переходных и установившихся режимах оборудования энергосистемы, а также увеличения линейного диапазона измерения напряжения. Большое значение имеет и расширение функциональных возможностей измерительных трансформаторов для различных практических приложений, например, для средств релейной защиты, противоаварийной автоматики, измерений.

Решения поставленных задач можно достичь дальнейшим уточнением описания физических процессов в трансформаторном оборудовании с учетом нелинейности его параметров, особенностей самого процесса трансформации напряжения, согласования с нагрузкой, чему и посвящается настоящая статья.

Предлагается для описания трансформатора следующее нелинейное уравнение:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{L_{s1} di_1}{dt} + \frac{d\psi_{\text{нам}}}{di'_{\text{нам}}} \frac{di'_{\text{нам}}}{dt} + i'_{\text{нам}} R_{1\text{п}}, \quad (1)$$

которое может быть последовательно преобразовано к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_{\text{нам}} R_1 + \frac{L_{s1} di_{\text{нам}}}{dt} + M_{\text{диф}} \frac{di'_{\text{нам}}}{dt} + i'_{\text{нам}} R_{1\text{п}}, \\ u_1 &= i_{\text{нам}} R_1 + L_{s1} \frac{di_{\text{нам}}}{dt} + u'_1, \\ u_1 &= M_{\text{диф}} \frac{di'_{\text{нам}}}{dt} + i'_{\text{нам}} R_{1\text{п}} + (i'_{\text{нам}} + i_n) R_1 + L_{s1} \frac{d(i'_{\text{нам}} + i_n)}{dt}, \\ u'_1 &= u_2 \frac{w_1}{w_2} = u_2 n, \\ \frac{d\psi_{\text{нам}}}{dt} + i'_{\text{нам}} R_n &= i_{\text{нам}} R_n, \\ i_{\text{нам}} &= i'_{\text{нам}} + i_n, \\ i_1 w_1 &= Hl; \quad i'_{\text{нам}} = \frac{Hl}{W_1} \\ \frac{p\psi_{\text{нам}}}{R_{\text{п}}} &= i_n, \\ i'_{\text{нам}} &= f(\psi_{\text{нам}}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u'_1$  – первичное напряжение трансформатора, обусловленное потокоцеплением обмотки;  $u_1$  и  $u_2$  – первичное и вторичное напряжения трансформатора;  $\psi_{\text{нам}}$  – потокоцепление первичной обмотки, обусловленное потоком намагничивания;  $i_1 = i_{\text{нам}}$  – ток первичной обмотки трансформатора (он же и ток намагничивания);  $i'_{\text{нам}}$  – ток намагничивания, создающий потокоцепление намагничивания  $\psi_{\text{нам}}$  в сердечнике;  $R_n$  – сопротивление потерь  $i_n$  на гистерезис и вихревые токи;  $i_n$  – составляющая тока намагничивания, обуславливающая потери в сердечнике трансформатора;  $M_{\text{диф}} = \frac{d\psi_{\text{нам}}}{di'_{\text{нам}}}$  – дифференциальная индуктивность намагничивания;  $i'_{\text{нам}} = f(\psi_{\text{нам}})$  – основная нелинейная характеристика намагничивания;  $L_{s1}$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки;  $H$  – напряженность магнитного поля в сердечнике;  $l$  – длина средней магнитной линии сердечника;  $w_1$  – число витков первичной обмотки;  $w_2$  – число витков вторичной обмотки;  $n = \frac{w_1}{w_2}$  – коэффициент трансформации.

Последовательность выполнения измерительных и вычислительных операций согласно приведенной системе уравнений и назначение элементов отображены на рис. 1.

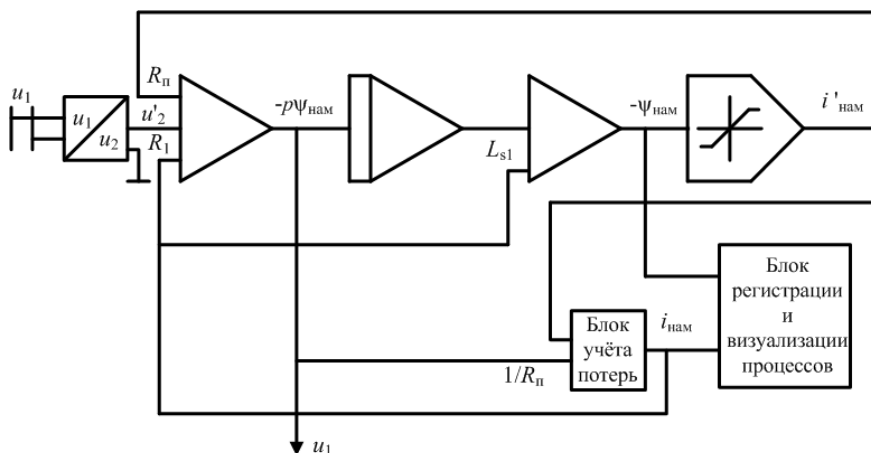


Рис. 1. Структурная схема воспроизведения первичного напряжения

На рис. 2 и 3 приведены наиболее характерные осциллограммы процессов восстановления первичного напряжения измерительного трансформатора напряжения. В частности, на рис. 2, а и б показаны осциллограммы тока намагничивания  $i'_{\text{нам}}$  (рис. 2, а), создающего поток в нестационарном режиме, и тока потерь  $i_n$  (рис. 2, б) в этом же режиме. Осциллограмма результирующего тока намагничивания  $i_{\text{нам}}$  в нестационарном режиме отображена на рис. 3, а. В свою очередь, на рис. 3, б показана осциллограмма потокосцепления первичной обмотки трансформатора напряжения для процесса подключения его к сети при отсутствии нагрузки, т.е. при нулевом вторичном токе, что является особенностью решения задачи воспроизведения первичного напряжения  $u_1$ .

Характеристика намагничивания в процессе включения трансформатора показана на рис. 4. Осциллограмма входного  $u_1$  и выходного напряжений  $\left(\frac{d\psi}{dt}\right)$  от момента начала процесса до установившегося режима ( $\sim 0,075$  с) изображена на рис. 5.

Исследование предлагаемого решения была проведена путем математического моделирования в программной среде Simulink.

Основными элементами конструкции рассматриваемой модели двухобмоточного измерительного трансформатора напряжения и его параметрами являются магнитопровод на основе электротехнической стали 1512, 3414, первичные и вторичные обмотки на основе провода марки ПЭЛ, первичное номинальное напряжение  $6,3/\sqrt{3}$  кВ, вторичное номинальное напряжение  $100/\sqrt{3}$  В, число витков первичной обмотки  $w_1 = 6300$ , число витков вторичной обмотки  $w_2 = 100$ , коэффициент трансформации  $n = 63$ , максимальная индукция  $B_m = 1,0$  Тл.



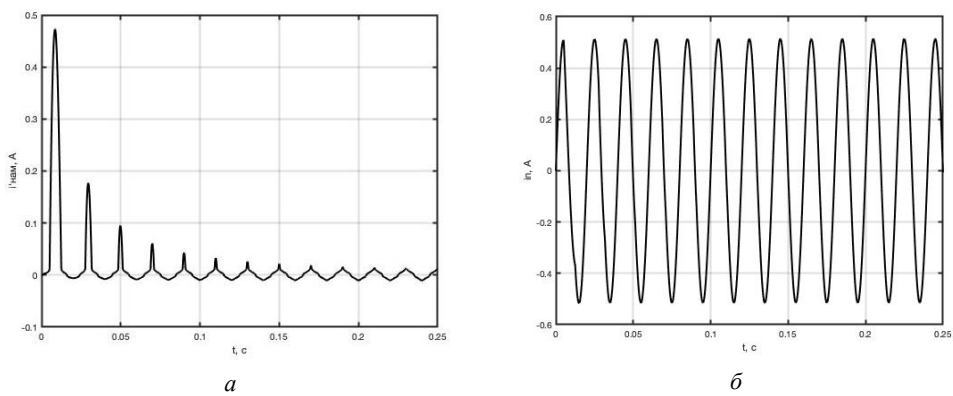


Рис. 2. Осциллограммы тока намагничивания  $i'_{\text{нам}}$  (а), создающего поток, и тока потерь  $i_n$  (б) в нестационарном режиме

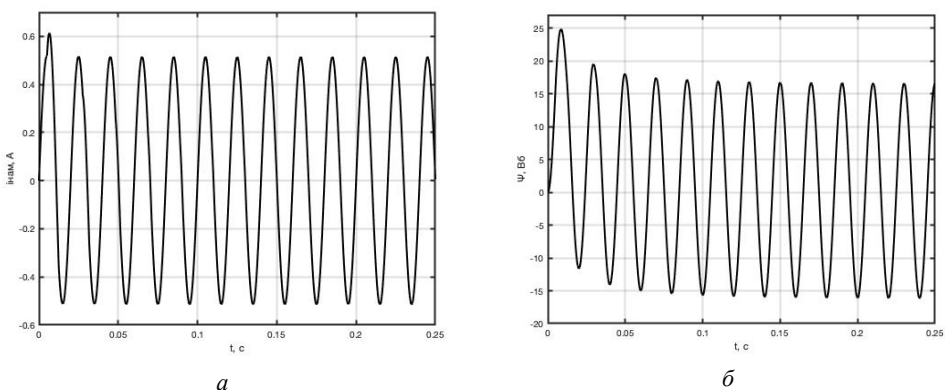


Рис. 3. Осциллограммы результирующего тока намагничивания  $i_{\text{нам}}$  (а), создающего поток, и потокосцепления  $\Psi$  (б) в нестационарном режиме

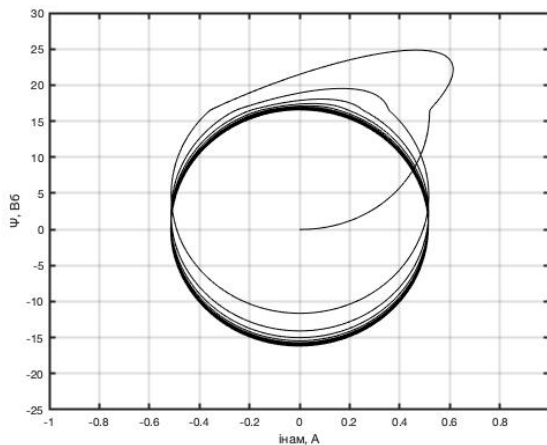


Рис. 4. Характеристики намагничивания в режиме включения трансформатора напряжения

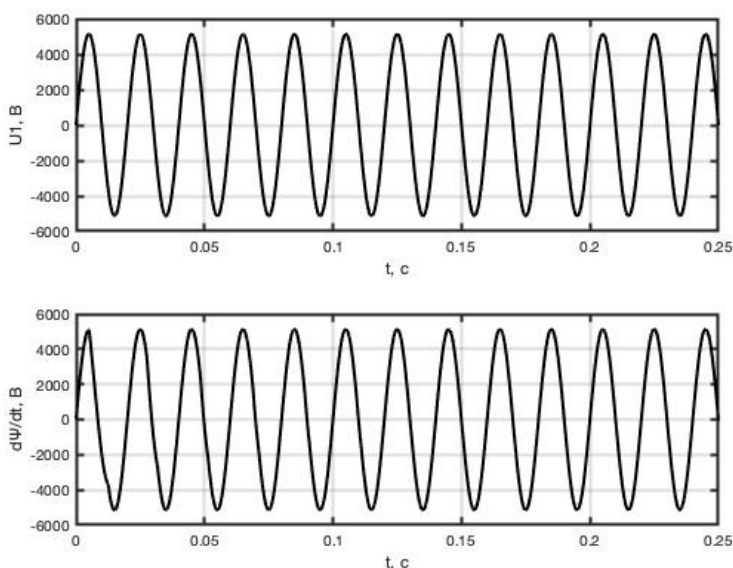


Рис. 5. Осциллограммы входного ( $u_1$ ) и выходного ( $d\Psi/dt$ ) напряжений от момента включения до момента начала установившегося режима ( $\sim 0,075$  с)

В вычислительном эксперименте использовалась начальная кривая намагничивания стали 1512 с толщиной листа 0,3 мм, обмоточный провод с сечением 0,0177 м<sup>2</sup>. При этом исследования проводились с целью оценки влияния на погрешность воспроизведения первичного напряжения  $u_1$  погрешности воспроизведения дифференциальной взаимной индуктивности  $M_{\text{диф}}$ , тока намагничивания  $i_{\text{нам}}$  и его составляющих: тока потерь  $i_n$  и тока намагничивания  $i'_{\text{нам}}$ , создающего магнитный поток  $\Phi_{\text{нам}}$  и соответствующее потокоцепление  $\Psi_{\text{нам}}$ , и параметров первичной обмотки  $R_1$  и  $L_{S1}$ , вызывающих аддитивные составляющие результирующей погрешности воспроизведения первичного напряжения  $u_1$  согласно уравнению (2). С учетом сложности аналитического описания результирующей погрешности в статье приведены соответствующие осциллограммы изменения отдельных составляющих процесса воспроизведения первичного напряжения и конечный результат его воспроизведения (рис. 2–5), которые демонстрируют особенности нестационарных и стационарных процессов воспроизведения и положительный результат решения задачи (рис. 5).

Требуемая инструментальная точность и функциональные возможности способа обеспечиваются правильным выбором технических характеристик аналоговых и цифровых средств, которые реализуют различные математические операции, используемые при решении задачи.

К ним в первую очередь относятся разрядность и скорость преобразования с учетом частоты дискретизации во времени и точности исходной информации, предоставляемой заводом-изготовителем трансформаторного оборудования.

## Литература

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969. 424 с.
2. Ванин В.К., Забоин В.Н., Попов М.Г., Сиренко Н.В., Хабаров А.А. Воспроизведение токов и напряжений измерительных трансформаторов тока // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 4(33). С. 42–45.
3. Ванин В.К., Попов М.Г. Анализ процессов с силовых и измерительных трансформаторах и коррекция их описания для различных приложений // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 1(30). С. 39–45.
4. Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичных токов многообмоточных силовых трансформаторов: пат. 2684169 РФ / Ванин В.К., Попов М.Г.; заявитель Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого. № 2017123292; заявл. 30.06.2017; опубл. 04.04.2019, Бюл. №10.
5. Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О. Моделирование фильтров тока намагничивания и воспроизведение вторичных токов силовых трансформаторов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. С. 268–269.
6. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 528 с.
7. Popov M.G., Abounekirah S.S., Goriachevskii K.S., Sinianskii I.V. Dynamic Identification of Electromagnetic Parameters for Adaptive Protection Devices. Proc. of 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (January 28–30, 2019). St. Petersburg, 2019. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8656689>.

---

**ВАНИН ВАЛЕРИЙ КУЗЬМИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций и автоматизации энергетических систем, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург ([Vanin@eef.spbstu.ru](mailto:Vanin@eef.spbstu.ru)).

**ВАНИН ИГОРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ** – ассистент кафедры электрических станций и автоматизации энергетических систем, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург ([vanin\\_iv@spbstu.ru](mailto:vanin_iv@spbstu.ru)).

**ПОПОВ МАКСИМ ГЕОРГИЕВИЧ** – доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических станций и автоматизации энергетических систем, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург ([PopovMG@eef.spbstu.ru](mailto:PopovMG@eef.spbstu.ru)).

---

V. VANIN, I. VANIN, M. POPOV

**IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENT  
OF THE PRIMARY VOLTAGE IN POWER SYSTEMS**

**Key words:** voltage transformer, magnetization current, current loss, error reduction, eddy currents, primary voltage recovery.

*The paper studies a qualitatively new way of reducing the measuring error of phase voltages to solve the problem of filtering the magnetization current and the reproduction of the primary voltage signals of two-winding measuring transformers. Errors of voltage measuring transformers in these transient and stationary processes are primarily due to the nonlinearity of the magnetization characteristics of electrical steel cores and, in addition, the active resistance of windings, the load and their inductances, in some cases capacity as well. In fact, being methodical, in many practical applications the errors limit the use of various transformers because of the inability to provide the required accuracy class. Therefore, for further improvement in the accuracy of the primary voltage measurement, first, it is essential to solve the problem of its reproduction by eliminating methodological and instrumental errors in non-stationary modes of electrical equipment, as*

well as by increasing the linear range of voltage measurement. It can be achieved through the studied method of primary voltage reproduction based on the numerical solution of a system of nonlinear equations reflecting real physical electromagnetic processes in a transformer with hysteresis characteristics of magnetization.

### References

1. Atabekov G.I. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of theory of circuits]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 424 p.
2. Vanin V.K., Zaboin V.N., Popov M.G., Sirenko N.V., Khabarov A.A. *Vosproizvedenie tokov i napryazhenii izmeritel'nykh transformatorov toka* [Reproduction of currents and voltages of measuring current transformers]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2018, no. 4(33), pp. 42–45.
3. Vanin V.K., Popov M.G. *Analiz protsessov s silovyykh i izmeritel'nykh transformatorakh i korrektsiya ikh opisaniya dlya razlichnykh prilozhenii* [Analysis of processes of power and instrument transformers, and correction of descriptions for a variety of applications]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2018, no. 1(30), pp. 39–45.
4. Vanin V.K., Popov M.G. *Sposob fil'tratsii toka namagnichivaniya i vosproizvedeniya vtorichnykh tokov mnogoobmotochnykh silovyykh transformatorov* [A method for filtering the magnetization current and reproduction of secondary currents of multi-winding power transformers]. Patent RF, no. 2684169, 2019.
5. Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O. *Modelirovanie fil'trov toka namagnichivaniya i vosproizvedenie vtorichnykh tokov silovyykh transformatorov* [Simulation of magnetization current filters and reproduction of secondary currents of power transformers]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy X Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 10<sup>th</sup> Russ. Sci. Conf. «Information technology in electrical and electrical engineering»]. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2016. S. 268–269..
6. Fedoseev A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem. Releynaya zashchita setei* [Relay Protected of Electric Power Systems. Protected of Electrical Grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 528 p.
7. Popov M.G., Abounekirah S.S., Goriachevskii K.S., Sinianskii I.V. Dynamic Identification of Electromagnetic Parameters for Adaptive Protection Devices. Proc. of 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (January 28–30, 2019). St. Petersburg, 2019. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8656689>.

---

**VANIN VALERY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Power Plants and Power Automation Department, Peter Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (vanin@eef.spbstu.ru).**

**VANIN IGOR – Assistant of Power Plants and Power Automation Department, Peter Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (vanin\_iv@spbstu.ru).**

**POPOV MAXIM – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Power Plants and Power Automation, Peter Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (PopovMG@eef.spbstu.ru).**

---

**Формат цитирования:** Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г. Повышение точности измерения первичных напряжений в энергосистемах // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 46–52.

УДК 621.3  
ББК 31.261.2

Н.И. ГОРБАЧЕВСКИЙ, С.Н. СИДОРОВ,  
И.Ф. АФЛЯТУНОВ, Е.Н. ГАВРИЛОВ

## АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА ЗАПИРАЕМЫХ ТИРИСТОРАХ НА СЕТЕВОМ ВХОДЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Ключевые слова:* активный выпрямитель, тиристорный выпрямитель, фазовое управление, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость.

*С развитием запираемых полупроводниковых вентилях и появлением на их базе активных выпрямителей актуальным является разработка способов управления такими выпрямителями, позволяющих использовать на практике все их преимущества. Рассмотрены активные выпрямители, работающие на сравнительно низкой частоте переключений. Предложен энергетически эффективный способ управления активным выпрямителем на основе запираемых тиристоров. Новизна рассматриваемого способа автономного регулирования активной и реактивной составляющих сетевого тока активным выпрямителем вытекает из возможности изменения не только углов включения ( $\alpha_1$ ), но и выключения ( $\alpha_2$ ) запираемых тиристоров в течение каждой полуволны выпрямленного напряжения. Показана возможность осуществления векторной широтно-импульсной модуляции на основной частоте. Векторное управление активным выпрямителем возможно организовать аналогично векторному управлению автономным инвертором напряжения, осуществляя переключение вентиляхных пар в моменты перехода задающего вектора тока из одного сектора круговой векторной диаграммы в другой сектор. Решена задача синтеза передаточной функции контура регулирования активного тока. Получены выражения переходных характеристик контура тока.*

В настоящее время освоено производство запираемых полупроводниковых вентилях, характеристики которых позволяют реализовать на практике активный выпрямитель (АВ), особенностью которого является способность активного влияния на энергетический баланс преобразователя частоты с питающей сетью [2, 6, 8, 11]. Целью разработки АВ служит поддержание электромагнитной совместимости преобразователя с питающей сетью. Это предполагает частичное или даже полное устранение в составе мощности сетевого входа реактивную мощность основной гармоники и мощность искажения, создаваемую высшими гармониками потребляемого тока. Данные меры означают минимизацию потребляемого тока, так как в энергетическом балансе сетевого входа полностью компенсированного преобразователя остается лишь активная составляющая мощности первой гармоники [3]. Усредненное за период сети интегральное значение активной мощности АВ может быть положительного знака – в выпрямительном режиме или отрицательного знака – в инверторном режиме работы преобразователя. При необходимости функциональные возможности АВ позволяют не только устранять, но и генерировать пассивные составляющие мощности с целью компенсации аналогичных составляющих других нагрузок в общей сети.

Существование того или иного энергетического режима зависит от принятого алгоритма переключений в схеме АВ, разработка которых должна исходить из конечного быстрого действия и частотных свойств запираемых вентилях.

Рассмотрим решения, предполагающие работу АВ на сравнительно низкой (основной) частоте переключений, определяемой пульсностью выпрямителя  $\omega_n = m_1 \omega_1$ . Примером использования рассматриваемых алгоритмов могут служить АВ на основе запираемых тиристоров типа GTO, GCT, IGCT (рис. 1), отличающихся от силовых транзисторов меньшей частотной полосой пропускания [6].

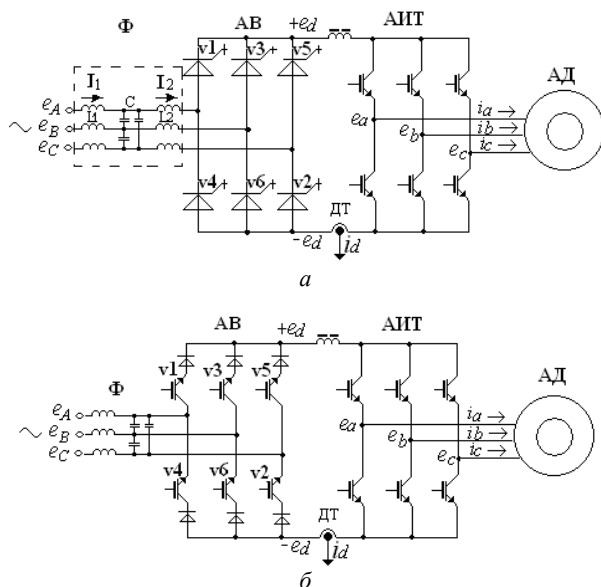


Рис. 1. Вариант исполнения АВ на двухоперационных тиристорах в составе двухзвенного преобразователя частоты с автономным инвертором тока

Выбор энергетически эффективного способа управления АВ должен учитывать способность вентильных элементов искажать форму сетевого тока, а в случае соизмеримости мощностей преобразователя и сети эти искажения распространяются и на сетевое напряжение. Известно, что в электроприводе минимальное токопотребление задается идущим на создание электромагнитного момента выпрямленным током нагрузки  $I_H = I_d$ . Приведенный к сетевому входу этот ток может служить критерием сравнительного анализа алгоритмов переключений в схеме АВ по признаку токопотребления. В этой связи более приемлемым показателем энергетической эффективности алгоритма следует считать коэффициент использования тока  $K_i = I_1 / I_d$  в виде отношения действующего значения потребляемого тока сетевого входа к средневыврямленному току нагрузки [5].

В условиях традиционного импульсно-фазового регулирования выпрямителей изменения угла управления  $\alpha = 0 \div \pi/2$  сопровождаются одинаковыми относительными изменениями  $E_d(\alpha)$  и коэффициента мощности  $K_M(\alpha)$ , в результате коэффициент использования тока тиристорных выпрямителей при фазовом регулировании сохраняется неизменным  $K_i = \text{const}$ . В частности, для трехфазной

мостовой схемы выпрямления, работающей в условиях  $\alpha = \text{var}$ ,  $I_d = \text{const}$ , получаем известное значение  $K_i = \sqrt{2/3}$ . Постоянство  $K_i$  свидетельствует о том, что достигаемое при  $\alpha \rightarrow \pi/2$  уменьшение выпрямленной ЭДС и активной мощности происходит при постоянстве тока и, соответственно, полной мощности сетевого входа. Причина недостатка фазового способа регулирования состоит в том, что реакция активной и реактивной составляющих сетевого тока на изменения угла управления  $\alpha = \text{var}$  происходит во взаимно противоположных направлениях. Иными словами, уменьшение активной составляющей тока сетевого входа выполняется увеличением его реактивной составляющей. Данный вывод свидетельствует о невозможности повышения  $K_i$  в условиях традиционного фазового способа регулирования тиристорных выпрямителей.

Новизна рассматриваемого способа автономного регулирования активной и реактивной составляющих сетевого тока АВ вытекает из возможности изменения не только углов включения ( $\alpha_1$ ), но и выключения ( $\alpha_2$ ) ГТО в течение каждой полуволны выпрямленного напряжения.

Представленные на рис. 2 результаты компьютерного моделирования позволяют сравнить токопотребление вентильного электропривода в пусковом режиме при традиционном (рис. 2, а) и модифицированном (рис. 2, б) алгоритмах переключения вентилей.

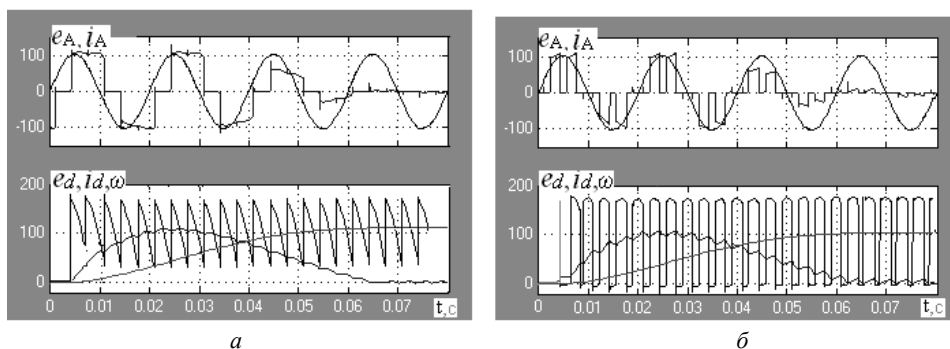


Рис. 2. Диаграммы входных  $e_A$ ,  $i_A$  и выходных  $e_d$ ,  $i_d$  значений напряжения и тока АВ, а также скорости вала двигателя  $\omega(t)$  в пусковом режиме при традиционном (а) и модифицированном (б) способах переключения вентилей

Как видно из рис. 2, б, модифицированный способ состоит в чередующем с основной частотой подключении нагрузки к сетевому источнику и последующем шунтировании ее противофазными вентилями мостовой схемы АВ. В целях корректности сравнение кривых потребляемого тока в фазе А сети  $i_1(t) = i_A(t)$  ведется при одинаковых бросках пускового тока якоря  $i_d(t)$  и установившейся скорости вала  $\omega(t)$ . Рассмотрение показывает, что периодические шунтирования нагрузки в случае рис. 2, б способствуют устранению реактивной составляющей в сетевом токе, проявляющемся в уменьшении амперсекундных площадей под кривой этого тока  $i_A(t)$ . Известно, что площадь под кривой тока характеризует его действующее значение. Визуальная оценка представленных кривых показывает, что уменьшение действующего значения

потребляемого тока  $I_1$  при модифицированном управлении ключами АВ следует ожидать не менее чем на (30–50)%. Выполнение АВ на запираемых тиристорах типа ГТО ограничивает возможную частоту переключений на сравнительно низком уровне (не более сотен Гц) [5]. В целях синхронизации переключения удобно проводить на основной частоте выпрямителя, кратной частоте сети. Работа на основной частоте может приводить к заметным искажениям потребляемого тока, для устранения которых на сетевом входе устанавливается так называемый синусоидальный фильтр ( $\Phi_1$ ) (см. рис. 1).

Рассмотрим процессы, происходящие в системе «сетевой фильтр – АВ – нагрузка» в предположении, что отыскание моментов переключений происходит методом векторной ШИМ [2, 4, 9, 10].

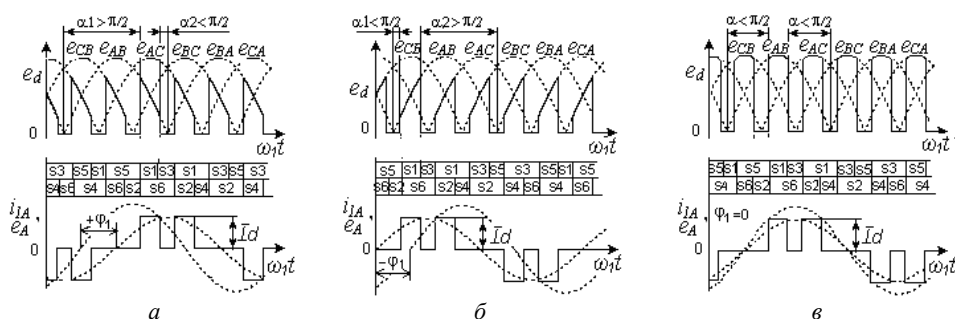


Рис. 3. Диаграммы выпрямленного напряжения  $e_d$ , переключающих функций  $s_1, s_2, \dots, s_6$ , а также кривых сетевого фазного напряжения  $e_A$ , тока  $i_A$  и его основной гармоники в режимах потребления (а), генерирования (б) и отсутствия реактивной мощности сдвига на сетевом входе АВ (в)

Покажем возможность осуществления векторной ШИМ на основной частоте, для чего получим выражения обобщенного вектора (ОВ) тока  $I_2$  и противо-ЭДС  $E_n$  на входных зажимах трехфазного моста (см. рис. 1). В предположении постоянства выпрямленного тока  $I_d = \text{const}$  и противо-ЭДС двигателя  $E_2 = \text{const}$  искомые переменные запишутся

$$I_2 = \Phi_n \cdot I_d; E_n = \Phi_n \cdot E_2, \quad (2)$$

где  $\Phi_n = [\Phi_{nA} \Phi_{nB} \Phi_{nC}]^T$  – переключающая вектор-функция:  $\Phi_{nA} = \{S1; S4\}$ ;  $\Phi_{nB} = \{S3; S6\}$ ;  $\Phi_{nC} = \{S5; S2\}$  – система трехфазных переключающих функций.

Будем считать, что реализация векторного управления происходит в условиях попарной работы вентилей моста. Из общего числа возможных сочетаний работающих вентилей  $C_6^2 = \frac{6!}{2!(6-2)!} = 6 = 9$  получаем 6 базовых векторов, активизация которых чередуется с активизацией одного из трех возможных нулевых векторов, приводящих к шунтированию нагрузки и обнулению тока на входе моста  $I_2(k) = 0$ .

Характер перемещений результирующего вектора на комплексной плоскости определяется общим выражением базового вектора в любом из указанных состояний при  $k = 0, 2, 4, \dots, 10$

$$I_2(k) = 2 \cdot 3^{-0,5} I_d \exp\left(j\left(\frac{\pi k}{3} - \frac{\pi}{6}\right)\right). \quad (3)$$



Из уравнения (3) видно, что каждое подключение к сети сопровождается дискретным поворотом вектора  $I_2(k)$  против часовой стрелки на угол  $\pi/3$ . Получаемая картина во многом аналогична той, которую можно наблюдать при векторном управлении автономным инвертором напряжения (АИН) [4, 11]. Данный вывод позволяет организовать векторное управление АВ аналогичным образом, осуществляя переключение вентильных пар в моменты перехода задающего вектора тока из одного сектора круговой векторной диаграммы в другой сектор.

Тождественность выражений (2) позволяет считать, что расположение базовых векторов тока  $\bar{I}_2(k)$  и противо-ЭДС  $\bar{E}_\Pi(k)$  на комплексной плоскости будет одинаковым.

При анализе электромагнитных процессов воспользуемся допущением идеальности вентилях и симметричности трехфазных токов и напряжений в символической универсальной форме записи:  $\bar{V}(V_A, V_B, V_C)$  при  $V_A + V_B + V_C = 0$ . Парная работа вентилях не меняет структуры токоведущих цепей трехфазной мостовой схемы, в связи с чем конфигурация этих цепей при любом  $k = 0, 2, \dots$  остается неизменной. Тогда уравнения баланса напряжений схемы во вращающейся с произвольной скоростью двухфазной системе координат запишутся:

$$\begin{cases} \bar{E}_1 = \bar{I}_1 r + L \frac{d\bar{I}_1}{dt} + j\omega_k L \bar{I}_1 + \bar{U}_C; \\ \bar{E}_\Pi = \bar{I}_2 r + L \frac{d\bar{I}_2}{dt} + j\omega_k L \bar{I}_2 + \bar{U}_C; \\ C \frac{d\bar{U}_C}{dt} = \bar{I}_1 - \bar{I}_2 - j\omega_k C \bar{U}_C; \\ I_d = \frac{3}{2E_d} \bar{E}_\Pi \bar{I}_2, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  – результирующие векторы сетевого тока и входного тока преобразователя, соответственно.

Отвечающую данным уравнениям структурную схему АВ удобно представить в виде сигнального графа. Принятые допущения и координатные преобразования в синхронную систему координат  $(x, y)$ , ориентированную по вектору напряжения сети  $\bar{E}_1$  [2, 11], позволили получить граф непрерывной двухканальной системы с возможностью отдельного регулирования активной  $I_{1X}$  и реактивной  $I_{1Y}$  составляющих тока на сетевом входе преобразователя (см. рис. 4).

Каждый из каналов представлен интегрирующими и двумя инерционными звеньями с постоянными времени  $T_1 = r_1/L_1, T_2 = r_2/L_2$ , на входы которых кроме сетевой ЭДС  $E_1$  поступают сигналы перекрестных обратных связей по напряжению конденсаторов фильтра  $\Phi_1$  и проекциям фазных токов. Управляющими воздействиями каналов могут служить ортогональные проекции противо-ЭДС сетевого входа  $E_{\Pi X}, E_{\Pi Y}$ , величины которых однозначно задаются углами включения  $\alpha_1$  и выключения  $\alpha_2$  тиристоров. Выходными координатами модели кроме выпрямленной ЭДС  $E_d$  служат соответствующие проекции обобщенного вектора сетевого тока  $I_{1X}, I_{1Y}$ . Если тем или иным способом

свести к минимуму влияние перекрестных связей [7, 10], то, задавая  $E_{\text{ПХ}}$ ,  $E_{\text{ПУ}}$ , можно независимо управлять активной  $I_{1X}$  и реактивной  $I_{1Y}$  составляющими тока на сетевом входе АВ.

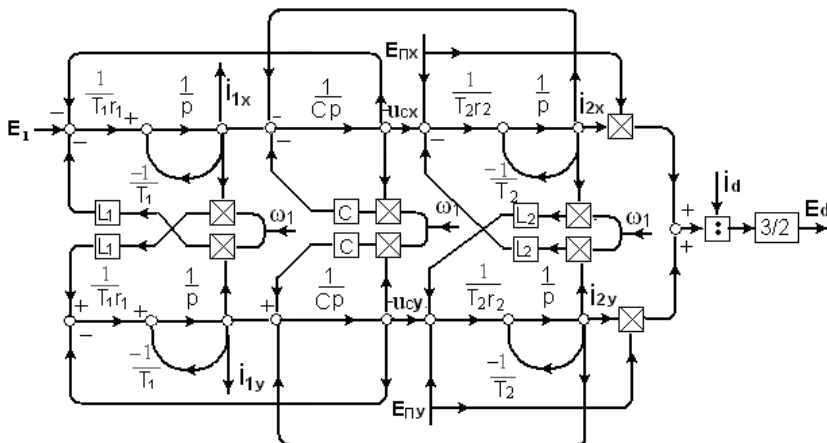


Рис. 4. Сигнальный граф системы «Ф-АВ-Н»

Исходя из данного положения, получим передаточную функцию контура регулирования активного тока. Как следует из рис. 4, граф этой части схемы имеет один прямой путь  $K(p)$  от входной координаты  $E_{\text{ПХ}}$  к выходной координаты  $I_{1X}$ , касающийся двух замкнутых контуров  $K_1(p)$  и  $K_2(p)$ . следовательно, передаточная функция данного канала, согласно формуле Мейсона [4], запишется

$$W_{iX}(p) = \frac{I_{1X}(p)}{E_{\text{ПХ}}(p)} = \frac{K(p)}{1 - K_1(p) - K_2(p)} =$$

$$= \frac{\frac{1/r_2 \cdot \frac{1}{Cp} \cdot \frac{1/r_1}{1+T_1p}}{1 + \frac{1}{Cp} \cdot \frac{1/r_1}{1+T_1p} + \frac{1/r_2}{1+T_2p} \cdot \frac{1}{Cp}}}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}, \quad (5)$$

где

$$a_3 = \frac{L_1L_2C}{r_1 + r_2}; \quad a_2 = \frac{C(L_1r_2 + L_2r_1)}{r_1 + r_2}; \quad a_1 = \frac{C(r_1r_2)^2 + L_1 + L_2}{r_1 + r_2}; \quad a_0 = 1.$$

Записывая характеристическое уравнение контура тока с единичной обратной связью

$$a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 + 1/(r_1 + r_2) = 0, \quad (6)$$

применим для анализа устойчивости полученной системы критерий Гурвица  $a_2 \cdot a_1 \geq a_3 \cdot (a_0 + 1/(r_1 + r_2))$ . Раскрывая данное выражение, получим необходимое для сохранения работоспособности АВ семейство зависимостей емкости фильтра от эквивалентной индуктивности сетевого входа  $C(L_1)$  при постоянстве остальных параметров схемы  $L_2, r_1, r_2 = \text{const}$  (см. рис. 5, а):

$$C \geq \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot (r_1 + r_2)}{(L_1r_2 + L_2r_1)((r_1r_2)^2 + L_1 + L_2)}. \quad (7)$$

Экстремальный вид полученных зависимостей позволяет оценить индуктивность  $L_1$ , при которой емкость конденсатора фильтра имеет максимальное значение

$$\frac{d}{dL_1} \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot (r_1 + r_2)}{(L_1 r_2 + L_2 r_1)((r_1 r_2)^2 + L_1 + L_2)} = \frac{(L_2 r_1^3 r_2^2 + r_1 L_2^2 - r_2 L_1^2)(r_1 + r_2)L_2}{(r_2 L_1 + r_1 L_2)^2 (L_1 + L_2 + r_1^2 r_2^2)^2} = 0. \quad (8)$$

Откуда

$$L_1 = \sqrt{\frac{L_2 r_1^3 r_2^2 + r_1 L_2^2}{r_2}}$$

в частности при  $L_2 = 0,01$  Гн,  $r_1 = r_2 = 1$  Ом получаем  $L_1 = 0,1$  Гн.

Для решения задач синтеза представим передаточную функцию рассматриваемого контура тока (5) в форме Вышнеградского [1, 10]

$$W_{iX}^*(s) = \frac{1}{s^3 + As^2 + Bs + 1'} \quad (9)$$

где  $s = p \cdot m_t$  – модифицированный оператор;  $m_t = (a_0/a_3)^{1/3}$  – масштабный коэффициент времени;  $A = \frac{a_2}{a_0} \cdot m_t^2$ ;  $B = \frac{a_1}{a_0} m_t$  – коэффициенты Вышнеградского.

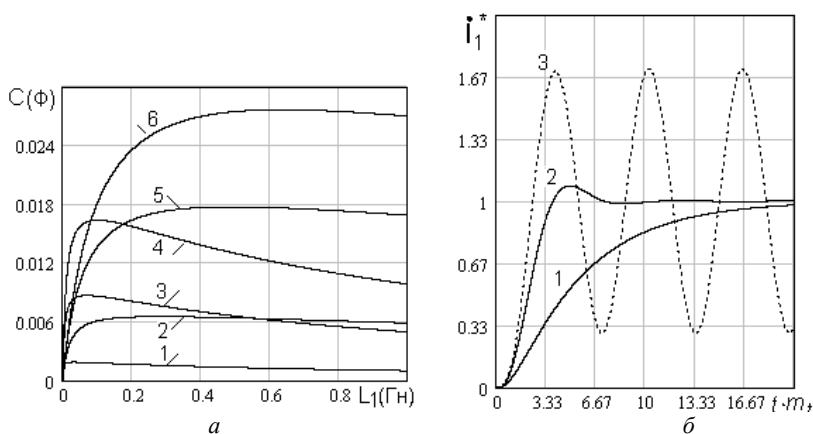


Рис. 5. Кривые зависимости  $C(L_1)$  при постоянстве параметров (а):  
 1 –  $L_2 = 0,001$  Гн,  $r_1 = r_2 = 1$  Ом; 2 –  $L_2 = 0,01$  Гн,  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом;  
 3 –  $L_2 = 0,005$  Гн,  $r_1 = r_2 = 1$  Ом; 4 –  $L_2 = 0,01$  Гн,  $r_1 = r_2 = 1$  Ом;  
 5 –  $L_2 = 0,03$  Гн,  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом; 6 –  $L_2 = 0,05$  Гн,  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом;  
 кривые переходного процесса в контуре активного тока при:  
 1 –  $A = B = 6$ ; 2 –  $A = B = 2$ ; 3 –  $A = B = 1$  (б)

Переход от операторного изображения тока  $I(s) = L^{-1}\{W_{iX}^*(s)/s\}$  к оригиналу позволяет получить выражения переходных характеристик контура тока  $i(t \cdot m_t)$  для различных  $A$  и  $B$ . Для примера на рис. 5, б приведены кривые переходного процесса в устойчивом (при  $A = B = 6$ ;  $A = B = 2$ ) и неустойчивом (при  $A = B = 1$ ) состояниях работы активного выпрямителя.

## Литература

1. Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов Н.И. Основы теории автоматического регулирования и управления. М.: Высш. шк., 1977. 519 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: Корона, 2001. 320 с.
3. Горбачевский Н.И., Сидоров С.Н., Ганиев Р.Н. Активный корректор коэффициента мощности на основе демпфирующего конденсатора // Вестник Чувашского университета. 2018. № 1. С. 36–43.
4. Дорф Р., Бишон Л. Современные системы управления / пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. 832 с.
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. 3-е изд. Новосибирск: НГТУ, 2004. 652 с.
6. Иванов А.Г. Запираемые тиристоры и их применение в силовой электронике. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. 136 с.
7. Иванов А.Г., Арзамасов В.Л., Сергеев А.Г. Управляемый выпрямитель, работающий на активно-индуктивную нагрузку // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. С. 140–148.
8. Иванчин И.И. Применение активного выпрямителя в электроэнергетических системах // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: Ивановский гос. энергет. ун-т, 2017. С. 346–350.
9. Кологрив К.А., Ефимов А.А. Обзор современных и наиболее перспективных алгоритмов управления активным выпрямителем тока // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2018. № 2(4). С. 34–39.
10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 265 с.
11. Шевырева Н.Ю. Моделирование частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем // Главный энергетик. 2015. № 8. С. 69–74.

---

**ГОРБАЧЕВСКИЙ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятия, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (aer-nk@mail.ru).

**СИДОРОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Ульяновский государственный технический университет, Россия, Ульяновск (sidorov\_ulstu@mail.ru).

**АФЛЯТУНОВ ИЛЬДАР ФААТОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятия, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (aif\_69@inbox.ru).

**ГАВРИЛОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (noble-86@mail.ru).

---

N. GORBACHEVSKY, S. SIDOROV, I. AFLYATUNOV, E. GAVRILOV  
ACTIVE RECTIFIER WITH FULLY CONTROLLED THYRISTORS  
ON NETWORK INPUT OF ELECTRIC DRIVE

*Key words:* active rectifier, thyristor rectifier, phase control, pulse width modulation, electromagnetic compatibility.

*With progress of the lockable semiconductor valves and emergence on their base of active rectifiers, development of the ways of control of such rectifiers allowing to use all their advantages in practice is relevant. Active rectifiers operating at a relatively low switching frequency are considered. An energy-efficient method for controlling an active rectifier based on fully controlled thyristors is proposed. The novelty of the reviewed way of autonomous regulation of active and reactive components of network current by the active rectifier comes from the possibility of changing not only the angles of inclusion ( $\alpha_1$ ), but also the angles of switching off ( $\alpha_2$ ) lockable thyristors during each half-wave of the rectified voltage. The possibility of vector pulse width modulation at the fundamental frequency is shown. It is possible to organize vector control of an active rectifier similarly to the vector control of an autonomous voltage inverter by switching the thyristors pairs at the moments when the driving vector of the current switches from one sector of the pie vector diagram to another. The problem of synthesis of the transfer function of the control circuit of the active current is solved. Expressions for transient characteristics of the current loop are obtained.*

### References

1. Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Fundamentals of the theory of automatic regulation and control]. Moscow, Higher School Publ., 1977, 519 p.
2. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg, Korona Publ., 2001, 320 p.
3. Gorbachevsky N.I., Sidorov S.N., Ganiyev R.N. *Aktivnyy korrektor koeffitsiyenta moshchnosti na osnove dempfiruyushchego kondensatora* [Active power coefficient corrector on basis of damping capacitor]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 36–43.
4. Dorf R.C. *Modern Control Systems* Upper Saddle River. Prentice Hall, 2001 (Russ. ed.: *Sovremennyye sistemy upravleniya* (translated from english by B.I. Kopylov). Moscow, Basic Knowledge Laboratory Publ., 2002, 832 p.
5. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, 2004, 652 p.
6. Ivanov, A.G. *Zapirayemyye tiristory i ikh primeneniye v silovoy elektronike* [Lockable thyristors and their use in power electronics]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2012, 136 p.
7. Ivanov A.G., Arzamasov V.L., Sergeev A.G. *Upravlyayemyy vypryamitel', rabotayushchiy na aktivno-induktivnyuyu nagruzku* [Managed rectifier operating on the active-inductive load]. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 9<sup>th</sup> Rus. Sci. Conf. «Information technology in electrical engineering and electric power industry»]. Cheboksary, 2014, pp. 140–148.
8. Ivanchin I.I. *Primeneniye aktivnogo vypryamitelya v elektroenergeticheskikh sistemakh* [The use of an active rectifier in electrical power systems]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XIX benardosovskiyeh chteniya): materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Int. Sci. Conf. «State and prospects for the development of electrical and heat technologies (XIX Benardos readings)»]. Ivanovo, 2017, pp. 346–350.
9. Kologriv K.A., Efimov A.A. *Obzor sovremennykh i naiboleye perspektivnykh algoritmov upravleniya aktivnym vypryamitelem toka* [Review of modern and most promising control algorithms for an active current rectifier]. *Problemy i perspektivy studencheskoy nauki*, 2018, no. 2(4), pp. 34–39.
10. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem* [AC electric drives with frequency regulation]. Moscow, Academy Publ., 2006, 265 p.
11. Shevyreva N.Yu. *Modelirovaniye chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda s aktivnym vypryamitelem* [Simulation of a frequency-controlled electric drive with an active rectifier]. *Glavnyy energetik*, 2015, no. 8, pp. 69–74.

**Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (aep-nk@mail.ru).**

**SIDOROV SERGEY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Electrical Drive and Automation of Industrial Plants Department, Ulyanovsk State Technical University, Russia, Ulyanovsk (sidorov\_ulstu@mail.ru).**

**AFLYATUNOV ILDAR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (aif\_69@inbox.ru).**

**GAVRILOV EVGENY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (noble-86@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Горбачевский Н.И., Сидоров С.Н., Афлятунов И.Ф., Гаврилов Е.Н.* Активный выпрямитель на запираемых тиристорах на сетевом входе электропривода // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 53–62.

УДК 621.3.027.3:621.315.56  
ББК 324:Л252

И. А. ГУЦИН  
**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ  
ПОСЛОЙНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА  
ТОКАМИ МОЛНИИ**

**Ключевые слова:** импульсный ток молнии, проводящий композиционный материал, схема замещения углепластика, разрушение углепластика, молниезащита.

*Интерес к проводящим композиционным материалам не утратил актуальность до настоящего времени вследствие их высоких прочностных характеристик и малого удельного веса. Однако уязвимость изделий из таких материалов токами молнии по сравнению с цельнометаллическими конструкциями заставляет разработчиков искать перспективные пути повышения молниестойкости композитов и эффективных средств молниезащиты. Появление новых материалов с заданными и изменяемыми электрофизическими характеристиками требует проведения теоретических исследований растекания токов молнии по анизотропно-проводящим материалам и построения динамики разрушения. В данной работе на основании двух моделей разрушения углепластика токами молнии проведен теоретический анализ его деструкции. Динамика послойного разрушения рассмотрена на основе схемы замещения углепластика. Учтена сильная анизотропия материала, приводящая к выделению полной энергии в первом слое. Разрушение верхнего слоя изменяет распределения токов по остальным слоям. Приведены результаты численного моделирования послойного разрушения углепластика для пяти слоев. Наглядно показан процесс разрушения при действии больших импульсов тока. Получены и уточнены критерии разрушения для различных степеней анизотропии материала. Сделан вывод о применении критериев для прогнозирования последствий воздействия молнии и оптимизации молниезащиты на стадии проектирования летательного аппарата.*

Исследования поведения проводящих композиционных материалов при протекании по ним больших импульсных токов не утратили свою актуальность по настоящее время. Конструкторов летательных аппаратов привлекает высокая прочность и малый удельный вес этих материалов, но высокая уязвимость их токами молнии значительно снижает безопасность полетов по сравнению с цельнометаллическими конструкциями [1, 3–6]. Требование повышенной молниестойкости изделий из проводящих композитов типа углепластиков делает крайне необходимыми исследования растекания токов по материалу и его разрушения. В работе [2] рассмотрены модели растекания токов молнии по проводящему композиционному материалу. Если в модели сплошной среды с анизотропно-проводящими свойствами распределения токов находились из уравнения Лапласа, то в модели слоистой структуры для нахождения токов использовалась схема замещения углепластика с дискретной проводимостью. Обе модели позволили получить результаты, хорошо совпадающие с экспериментом при тех же исходных данных, но не дали возможности исследовать динамику разрушения.

Цель настоящей работы – проведение анализа динамики разрушения проводящего композиционного материала и разработка критериев разрушения на различных стадиях деструкции материала.

Только после определения электрофизических характеристик углепластика (проводящих свойств и удельной энергии разрушения) [2] и анализа

процессов растекания токов молнии в радиальном и поперечном направлениях становится возможным анализ разрушения самого материала под действием токов молнии.

Сильная анизотропия приводит к тому, что почти вся энергия выделяется только в первом слое до момента его разрушения. После разрушения первого слоя распределение токов по слоям изменяется, так что значительная часть тока ответвляется в разрушенный слой, а остальная распределяется по оставшимся неразрушенным слоям.

Процесс послойного разрушения моделируется с помощью схемы замещения углепластика [2], если считать, что в первую очередь разрушается участок, моделируемый сопротивлением под каналом  $\Delta R_z$ . На рис. 1 приведены результаты численного моделирования послойного разрушения углепластика при  $n_{\text{сл}} = 5$  и  $\rho_z / \rho_r = 10^4$ .

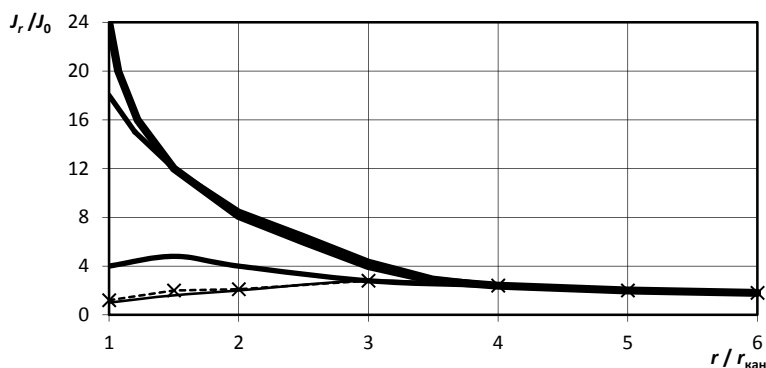


Рис. 1. Распределение радиальной плотности тока по радиусу  $r/r_{\text{кан}}$  при разрушении 1-го слоя

Анализ результатов позволил построить следующую схему разрушения материала. После разрушения первого слоя, вызванного значительным энерговыделением в месте контакта канала разряда с углепластиком, ток в основном растекается по двум слоям. Как следует из рис. 1, плотность тока уменьшается вдвое. Если удельная энергия разрушения достигает критического значения, наступает разрушение второго слоя и ток растекается по трем слоям. При разрушении всех слоев плотность тока одинакова в каждом слое (рис. 2). Это видно и из схемы замещения рис. 3, которая при сквозном разрушении становится симметричной.

Наглядно процесс послойного разрушения в динамике схематично показан автором на рис. 4. Здесь  $\Delta x$  – толщина слоя,  $t_1 - t_4$  – промежутки времени, соответствующие протеканию тока по 1-му – 4-му слоям.

Представленная схема послойного разрушения позволяет провести теоретический анализ процесса разрушения углепластика. Этот анализ включал следующие положения:

- сильная анизотропия приводит к растеканию тока по первому слою;
- у канала разряда происходит наибольшее энерговыделение;



$$W_1 = \frac{\int_0^{t_1} \rho_r I^2 dt}{(2\pi r_{\text{кан}} \Delta)^2},$$

где  $\rho_r$  – удельное сопротивление материала в радиальном направлении;  $I$  – ток разряда в любой момент времени;  $\Delta$  – толщина слоя;

– зависимость удельного сопротивления от тока и тока от времени представлены в виде

$$\rho_r = \rho_m I_m n_p / I, \quad I = I_m \exp(-t / \tau),$$

где  $\rho_m$  – удельное сопротивление углепластика в максимуме тока  $I_m$ ;  $n_p$  – число разрушенных слоев.

После достижения выделившейся энергии критического значения ( $W_1 = W_{\text{кр}2}$ ) 1-й слой разрушается. Канал начинает контактировать с двумя слоями, и плотность тока уменьшается в 2 раза. После разрушения 2-го слоя плотность тока уменьшается в 3 раза и т.д.

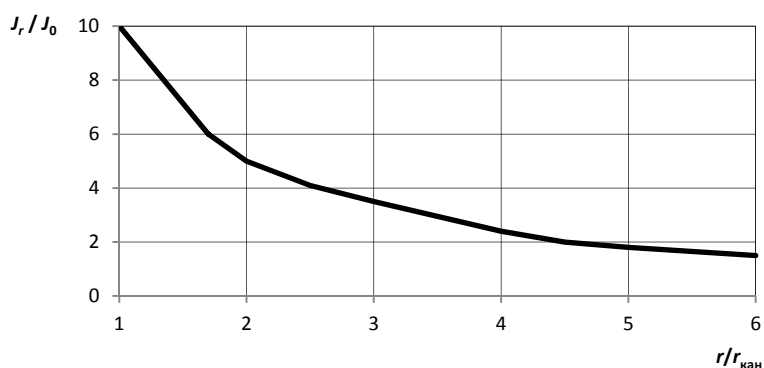


Рис. 2. Распределение радиальной плотности тока  $j_r/j_0$  по радиусу  $r/r_{\text{кан}}$  при разрушении всех слоев

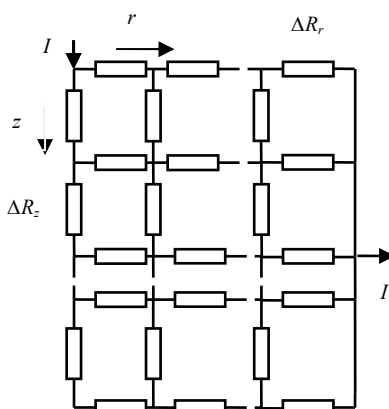


Рис. 3. Последовательно-параллельная схема замещения углепластика

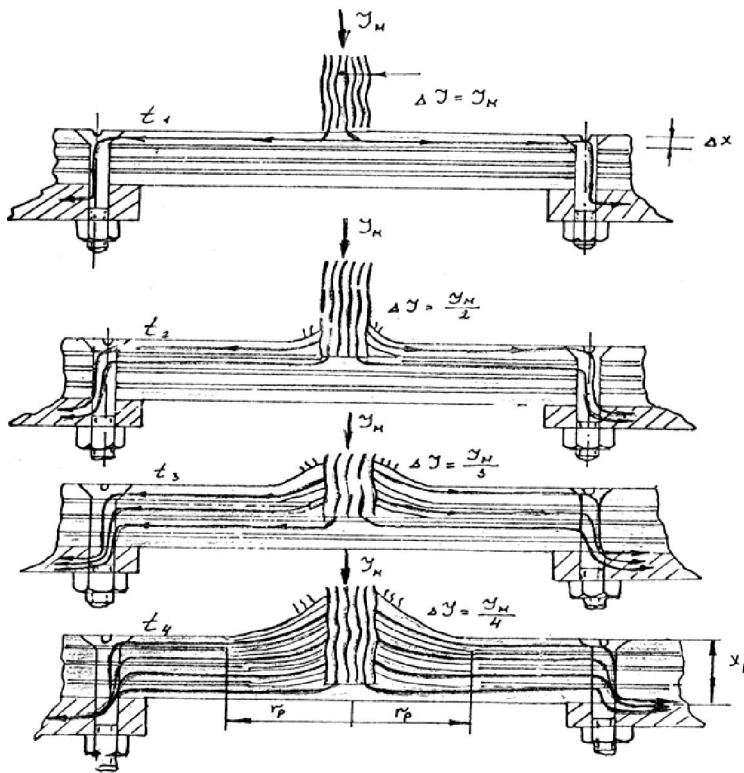


Рис. 4. Процесс разрушения углепластика при действии больших импульсов тока в интерпретации автора

Легко показать, что при разрушении любого  $n$ -го слоя в промежутке времени  $t_{n-1} - t_n$  справедливо равенство

$$\exp(-t_n/\tau) = 1 - W_{\text{кр}2} (2\pi r_{\text{кан}} \Delta)^2 (1 + 2 + \dots + n) / (2A \rho_m).$$

Для разрушения  $n$  слоев под действием полного импульса тока необходимо, чтобы интеграл действия был равен

$$A = n_p (n_p + 1) (\pi r_{\text{кан}} \Delta)^2 W_{\text{кр}2} / \rho_m. \quad (1)$$

При достаточно большом числе слоев глубина разрушения принимает вид

$$z_p = n_p \Delta = [A \rho_m / (W_{\text{кр}2} (\pi r_{\text{кан}})^2)]^{0.5}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) являются критериями сквозного разрушения, если приравнять число разрушенных слоев  $n_p$  к числу слоев материала. Радиус расслоения верхнего слоя углепластика  $r_p$  находится из условия достижения энергии  $W_r$  в конце импульса на любом значении радиуса  $W_{\text{кр}1}$  и учета, что при разрушении каждого слоя в первом слое на радиусе канала выделяется одна и та же энергия  $W_{\text{кр}2}$

$$W_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho_r I^2 dt}{(2\pi r \Delta)^2}, \quad r_p = r_{\text{кан}} [W_{\text{кр}2} n_p / W_{\text{кр}1}]^{0.5}. \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что при контакте молнии с поверхностью ток растекается только по одному верхнему слою. Следует учесть, что при наличии поперечной проводимости ток может течь и в глубине материала (по следующим слоям).

Определенная в [2] эквивалентная глубина разрушения  $z_3$  позволяет уточнить расчетные выражения (1)–(3) для нахождения степени разрушения углепластика. Если  $z_3 > \Delta$ , то в этих выражениях вместо  $\Delta$  следует подставить величину  $z_3$ . На самом деле на радиусе канала  $r_{\text{кан}}$  при  $\rho_z / \rho_r \geq 10^4$  относительная глубина энерговыделения  $z_3 / \Delta \rightarrow 1$ . Степень разрушения выражается формулами (1) и (2). Однако выражение (3) оказывается весьма приближенным и требует уточнения. Энерговыделение на радиусе  $r > 1,5r_{\text{кан}}$  происходит уже не в одном слое, и выражение (3) принимает вид

$$(r_p / r_{\text{кан}})^3 + (r_p / r_{\text{кан}})^2 = 2 W_{\text{кр}2} n_{\text{сл}} / W_{\text{кр}1}. \quad (4)$$

При сравнительно малой степени анизотропии  $\rho_z / \rho_r \leq 10^3$  критерий сквозного разрушения материала (1) приобретает вид

$$A = N_p (N_p + 1) (\pi r_{\text{кан}} z_3)^2 W_{\text{кр}2} / \rho_m, \quad (5)$$

где  $N_p = z_p / z_3$ .

Представленные уточнения играют существенную роль при невысокой степени анизотропии. Например, при отношении  $\rho_z / \rho_r \leq 10^3$  выражение (1) отличается от выражения (5) не более чем на 10 %. При отношении  $\rho_z / \rho_r \geq 10^4$  это отличие несущественно.

Полученные формулы содержат величины, которые воспроизводятся в эксперименте. Как показано в [1], результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом.

Таким образом, основываясь на двух моделях растекания тока по проводящему композиционному материалу, удалось рассмотреть динамику послойного разрушения во времени и найти критерии разрушения. Полученные выражения позволяют прогнозировать последствия воздействия молнии на изделия из углепластиков и оптимизировать молниезащиту на стадии проектирования летательного аппарата. Правомочность применения полученных критериев для оценки разрушения проводящих материалов будет рассмотрена в последующих работах.

#### Литература

1. Авруцкий В.А., Бизяев А.С., Гуцин И.А., Прохоров Е.Н., Сергеевская И.М. Разрушение изделий из углепластика под действием токов молнии // Электричество. 1993. № 2. С. 28–33.
2. Гуцин И.А. Сравнение моделей разрушения углепластика токами молнии // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 53–59.
3. Karch C., Metzner C. Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics. 33<sup>rd</sup> Int Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, Sept. 25–30.
4. Krogh T., Bertelsen K., Madsen S. Infrared detection of thermal heat development of isotropic and anisotropic materials during impuls current testing. ICLP, 2010.
5. Madsen S.F., Carloni L. Lightning exposure of Carbon Fiber Composites in wind turbine blades. Journal of Lightning Research. 2<sup>4th</sup> Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics, Technical University of Denmark, Copenhagen, 2015, pp. 105–110.
6. Sonehara T., Kusano H., Tokuoka N., Hirano Y. Visualization of Lightning Impulse Current Discharge on CFRP Laminate, ICLP, 2014, Oct. 11–18.

---

ГУЩИН ИГОРЬ АРДАЛЬЕНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elpardon@gmail.com).

---

I. GUSHCHIN

ANALYSIS OF DYNAMICS OF LAYER-BY-LAYER FRACTURE  
OF CFRP BY LIGHTNING CURRENTS

**Key words:** impulse lightning current, conductive composite material, equivalent circuit of CFRP, CFRP destruction, lightning protection.

*Interest in conducting composite materials has not lost its relevance to the present time due to their high strength characteristics and low relative weight. However, the vulnerability of products made of such materials by lightning currents in comparison with all-metal structures makes developers look for promising ways to increase the lightning resistance of composites and effective lightning protection. The emergence of new materials with specified and measured electrophysical characteristics requires theoretical studies of the spreading of lightning currents on anisotropic-conducting materials and the construction of fracture dynamics. In this paper, theoretical analysis of destruction of carbon fiber is carried out on the basis of two models of its fracture by lightning currents. The dynamics of layer-by-layer destruction is considered on the basis of carbon fiber substitution scheme. The strong anisotropy of the material leading to the release of total energy in the first layer is taken into account. The destruction of the upper layer leads to a change in the distribution of currents in the remaining layers. The results of numerical simulation of layer-by-layer fracture of carbon fiber for five layers are presented. The process of destruction under the action of large current pulses is clearly shown. Fracture criteria for different degrees of anisotropy of the material are obtained and refined. The paper concludes on the application of criteria for predicting the effects of lightning and lightning protection optimization at the aircraft design stage.*

References

1. Avrutskii V.A., Bizyaev A.S., Gushchin I.A., Prokhorov E.N., Sergievskaya I.M. *Razrushenie izdelii iz ugleplastika pod deistviem tokov molnii* [Destruction of products from carbon fiber by the action of lightning currents]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1993, no. 2, pp. 28–33.
2. Gushchin I.A. *Sravnienie modelei razrusheniya ugleplastika tokami molnii* [Comparison of models of destruction of CFRP by lightning current]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 3, pp. 53–59.
3. Karch C., Metzner C. Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics. 33<sup>rd</sup> Int Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, Sept. 25–30.
4. Krogh T., Bertelsen K., Madsen S. Infrared detection of thermal heat development of isotropic and anisotropic materials during impuls current testing. ICLP, 2010.
5. Madsen S.F., Carloni L. Lightning exposure of Carbon Fiber Composites in wind turbine blades. Journal of Lightning Research. 24<sup>th</sup> Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics, Technical University of Denmark, Copenhagen, 2015, pp. 105–110.
6. Sonehara T., Kusano H., Tokuoka N., Hirano Y. Visualization of Lightning Impulse Current Discharge on CFRP Laminate, ICLP, 2014, Oct. 11–18.

---

GUSHCHIN IGOR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elpardon@gmail.com).

---

**Формат цитирования:** Гушчин И.А. Анализ динамики послойного разрушения углепластика токами молнии // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 63–68.

УДК 62-531.7  
ББК 31.291-01

И.С. ДЫМОВ, Д.А. КОТИН, Ю.В. ПАНКРАЦ

## АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ ПО СОСТОЯНИЮ

*Ключевые слова:* активная стабилизация, балансировка, сигнально-адаптивный регулятор, микроэлектропривод.

*Статья посвящена разработке и исследованию адаптивной системы автоматического управления стабилизацией радиальных отклонений ротора электрической машины с активными магнитными подшипниками. Предлагается новый подход к решению проблемы стабилизации вращающейся части электрической машины, основанный на активной текущей стабилизации его пространственного положения. Разработка алгоритма автоматического управления производится методом функции Ляпунова. Приводятся описание способа конструктивной реализации подхода, методика структурного синтеза закона управления, а также результаты имитационного моделирования, подтверждающие перспективность проведенного исследования. Практическое внедрение разработанной системы способствует увеличению параметрической надежности электрического оборудования различного назначения.*

Развитие современного электрооборудования неразрывно связано с повышением требований в части устранения любых возникающих механических колебаний, которые являются причиной недопустимой работы по снижению их точности. Особенно остро стоит проблема с прецизионным оборудованием, в состав которых входят электрические двигатели постоянного или переменного тока. Основным источником возникающих механических колебаний в электроустановках является вращающийся ротор применяемой электрической машины [4]. Разработки принципиально новых видов опор, в которых для создания соответствующих реакций используются магнитные и электрические поля, позволяют улучшить эксплуатационные возможности и сократить количество брака. Одними из таких подвесов являются активные магнитные подшипники (АПМ), которые применяются для бесконтактного удержания и центрирования роторов электрических машин при их эксплуатации [1]. По принципу действия АПМ являются системой автоматического управления с главной обратной связью по положению и представляют собой комплект электромагнитов и блоков датчиков положения ротора, устанавливаемых непосредственно на валу машины, а также системой управления, обеспечивающей устойчивость радиального положения оси вращения [7].

Существующие на сегодняшний день АПМ подразделяются на осевые и радиальные. Осевой электромагнитный подшипник состоит из двух неподвижных цилиндров с уложенной обмоткой возбуждения, которые зафиксированы на стенках электродвигателя, расположенных по разным сторонам от

сплошного диска, устанавливаемого непосредственно на вращающуюся часть электрической машины. Радиальные электромагнитные подшипники состоят из неподвижных многополюсных пакетов во взаимно перпендикулярных осях, которые образуют зоны электромагнита и вращающейся части, установленной непосредственно на ротор электродвигателя [3, 6]. Именно последние целесообразно устанавливать в механизмах, к которым предъявляются ультрапрецизионные требования к точности выполнения технологического процесса.

Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных электроустановок путем применения новых способов синтеза систем управления становится первоочередным требованием к развитию лазерных приборов, токарных и фрезероальных станков, систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Поэтому основной задачей будет являться исследование адаптивного регулятора системы активной стабилизации по состоянию пространственного положения ротора электрической машины.

**Способ активной стабилизации радиальных отклонений.** Применение способа активной стабилизации радиальных отклонений позволяет стабилизировать ротор электрической машины, введя в контуры регулирования звенья с требуемыми коэффициентами демпфирования и жёсткости. Положение ротора в зазоре между частями АМП оценивается датчиками положения. Датчики вырабатывают сигналы в зависимости от отклонения ротора от центрального положения. Автоматическая система управления, оперируя сигналами датчиков, отправляет задающие воздействия на соответствующие объекты управления (ОУ) и при протекании токов в обмотках электромагнитов возникают силы магнитного взаимодействия, которые препятствуют отклонению ротора машины [5].

Функциональная схема конструкции и системы управления процессом активной стабилизации представлена на рис. 1.

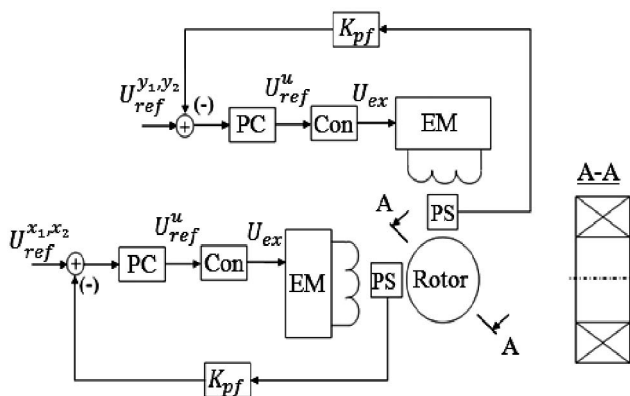


Рис. 1. Функциональная схема, иллюстрирующая способ активной стабилизации ротора

Для описания функциональной схемы приведены следующие обозначения:

$U_{ref}^{x_1, x_2, y_1, y_2}$  – сигналы задания на требуемое радиальное отклонение в плоскости  $X$  и  $Y$ , соответственно, В;

РС – регуляторы пространственного положения;

Соп – управляемый преобразователь (УП);

$U_{ref}^u$  – сигнал задания на напряжение УП, В;

$U_{ex}$  – выходное напряжение УП (напряжение возбуждения электромагнита), В;

ЕМ – электромагнит возбуждения;

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  $Y$ .

**Алгоритм адаптивного управления по состоянию.** Если записать математическую модель ОУ в общем виде

$$a_0 y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_n y^{(n)}(t) = u(t), \quad (1)$$

где  $y(t)$  – выходная координата;  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $a_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) – неизвестные параметры, но знак  $a_0$  известен, тогда эталонная модель представляет собой уравнение

$$y_m^{(n)}(t) + a_1 y_m^{(n-1)}(t) + \dots + a_n y_m(t) = \beta_0 g(t), \quad (2)$$

где  $y_m(t)$  – выходная координата;  $a_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) и  $\beta_0$  – известные положительные постоянные;  $g(t)$  – задающее воздействие.

Адаптивные системы управления являются нелинейными, поэтому основным методом их исследования является метод функции Ляпунова. Запишем уравнение Ляпунова

$$PA + A^T P = -Q, \quad (3)$$

где  $Q$  – положительно определенная матрица;  $A$  –  $n \times n$  – матрица, вида

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{pmatrix},$$

где в последней строчке матрицы  $A$  стоят коэффициенты уравнения эталонной модели.

Если взамен  $Q$  принять матрицу  $qI_n$  (где  $q$  – положительный коэффициент,  $I_n$  – единичная матрица  $n$ -го порядка), то без нарушения общности можно при записи уравнения (3) выбрать  $q = 1$ , тем самым преобразуя в уравнение вида

$$PA + A^T P = -I_n. \quad (4)$$

Алгоритмом адаптивного управления, обеспечивающим глобальную устойчивость и сходимость ошибки регулирования  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  и стремящимся к нулю при  $t \rightarrow \infty$  [2], является:

$$u(t) = \hat{k}_{00}g(t) + \hat{k}_{01}y^{(n-1)} + \dots + \hat{k}_{0n}y = \hat{k}^T v, \quad (5)$$

$$\dot{\hat{k}} = -\text{sign}(a_0) \Gamma v B^T P x,$$

где  $\hat{k} = (\hat{k}_{00} \quad \hat{k}_{01} \quad \dots \quad \hat{k}_{0n})^T$  – вектор изменяемых параметров регулятора;

$v = (g^{(n-1)} \quad y \quad \dots \quad y)^T$  – вектор сигналов;  $\Gamma$  – произвольная положительная

определенная  $(n+1) \times (n+1)$  – матрица,  $x = (e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)})^T$  – вектор состояния,  $P$  –  $n \times n$  – матрица, которая является решением (4);  $B$  –  $(n-1) \times 1$  – матрица, которая имеет следующий вид:

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

**Результаты эксперимента.** Проведем математическое моделирование системы устранения радиальных отклонений ротора электрической машины. Общая структурная схема системы адаптивного управления по состоянию только одним электромагнитом представлена на рис. 2.

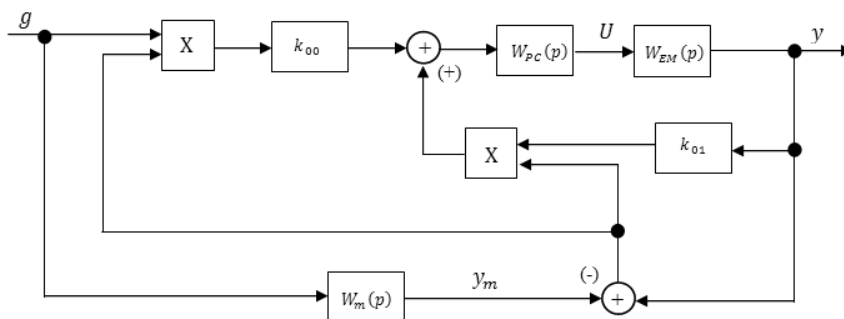


Рис. 2. Общая структурная схема системы адаптивного управления по состоянию

Для описания структурной схемы приведены следующие обозначения:

$g$  – сигнал задания на требуемое радиальное отклонение, В;

$W_{PC}(p)$  – передаточная функция регулятора радиального отклонения;

$W_{EM}(p)$  – передаточная функция ОУ;

$W_m(p)$  – передаточная функция эталонной модели;



$U$  – подаваемое напряжение на ОУ, В;

$k_{00}, k_{01}$  – варьируемые параметры.

Математическая модель электромагнитных процессов в катушке управления электромагнита представляет собой следующее дифференциальное уравнение:

$$U = \left( Ri - L \frac{di}{dt} \right) K_1 - f, \quad (6)$$

где  $i$  – ток возбуждения электромагнита;  $R$  – активное сопротивление электромагнита, Ом;  $L$  – индуктивность электромагнита, Гн.

Для синтеза структурная схема подсистемы ОУ представлена на рис. 3.

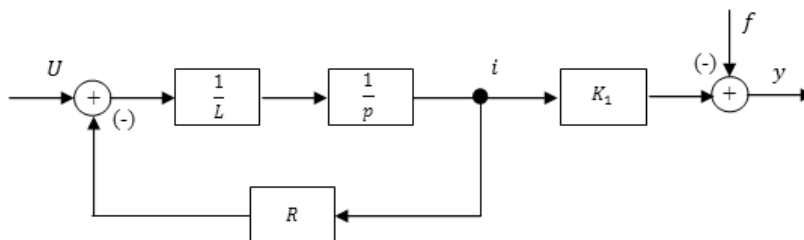


Рис. 3. Структурная схема подсистемы ОУ

Для описания структурной схемы приведены следующие обозначения:  $f$  – возмущающее воздействие, м.

Пусть уравнение математической модели имеет следующий вид

$$g = \left( K_{2m} x - K_{1m} \frac{dx}{dt} \right) K_{3m}, \quad (7)$$

где  $K_{1m}, K_{2m}, K_{3m}$  – коэффициенты эталонной модели.

Структурная схема подсистемы эталонной модели представлена на рис. 4.

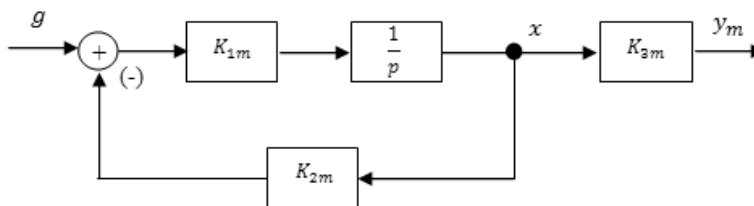


Рис. 4. Структурная схема подсистемы эталонной модели

Исходя из порядка уравнения рассматриваемой эталонной модели, матрица  $A$  из выражения (4) принимает вид

$$A = -K_{2m}.$$

Тогда решением уравнения Ляпунова (4) будет являться

$$P = \frac{1}{-K_{2m}}.$$

Отсюда для алгоритма адаптивного управления в соответствии с (5) получим

$$U = \hat{k}_{00}g + \hat{k}_{01}y;$$

$$\begin{pmatrix} \hat{k}_{00} \\ \hat{k}_{01} \end{pmatrix} = -\frac{\gamma e}{K_{2m}} \begin{pmatrix} g \\ y \end{pmatrix},$$

где  $\gamma$  – произвольная положительная константа.

Решение задачи нахождения передаточной функции адаптивного регулятора имеет особенность, обусловленную необходимостью обеспечения идеального слежения за выходом эталонной модели. Поэтому для существующей передаточной функции ОУ и передаточной функции эталонной модели должно выполняться равенство

$$W_m(p) = \frac{W_{PC}(p)W_{EM}(p)}{1 + W_{PC}(p)W_{EM}(p)}. \quad (8)$$

Решив это уравнение относительно передаточной функции адаптивного регулятора положения, получим

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{W_{EM}(p)} \frac{W_m(p)}{1 - W_m(p)}. \quad (9)$$

Структурная схема подсистемы адаптивного регулятора положения представлена на рис. 5.

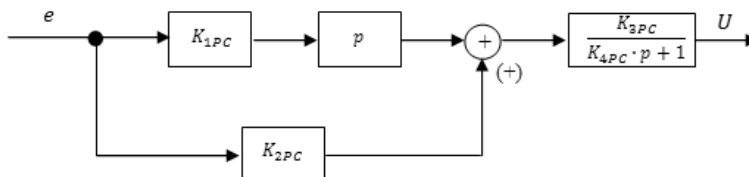


Рис. 5. Структурная схема подсистемы адаптивного регулятора положения

Для описания структурной схемы приведены следующие обозначения:  $K_{1PC}, K_{2PC}, K_{3PC}, K_{4PC}$  – коэффициенты структурной схемы, причем

$$K_{1PC} = L \cdot K_{3m}; \quad K_{2PC} = R \cdot K_{3m};$$

$$K_{3PC} = \frac{1}{K_1(K_{2m} - K_{3m})};$$

$$K_{4PC} = \frac{1}{K_{1m}(K_{2m} - K_{3m})}.$$

Результатами цифрового моделирования являются переходные процессы по отклонению при обязательном условии подачи ненулевого задающего сигнала, причем возмущающее воздействие, которое имитирует ступенчатый наброс момента сопротивления нагрузки на вал электродвигателя, сопровождающийся микрометровым отклонением его центральной оси вращения, при каждом моделировании подается в момент времени  $t = 3$  с (см. рис. 6 и 7).

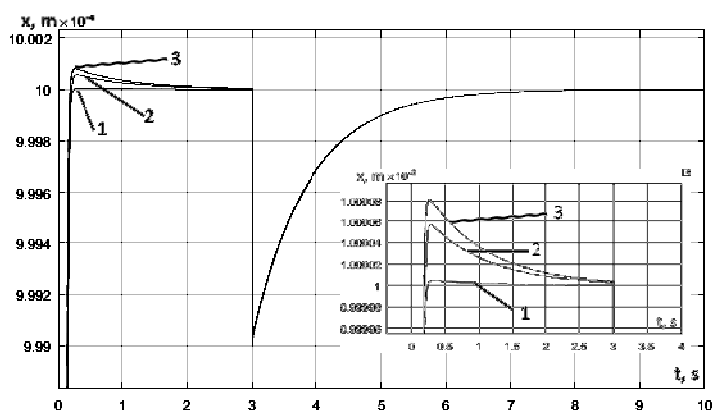


Рис. 6. Переходный процесс по отклонению при изменении физических параметров ОУ:  
 1 – неизменные физические параметры ОУ;  
 2 – увеличенные в 10 раз физические параметры ОУ;  
 3 – уменьшенные в 10 раз параметры ОУ

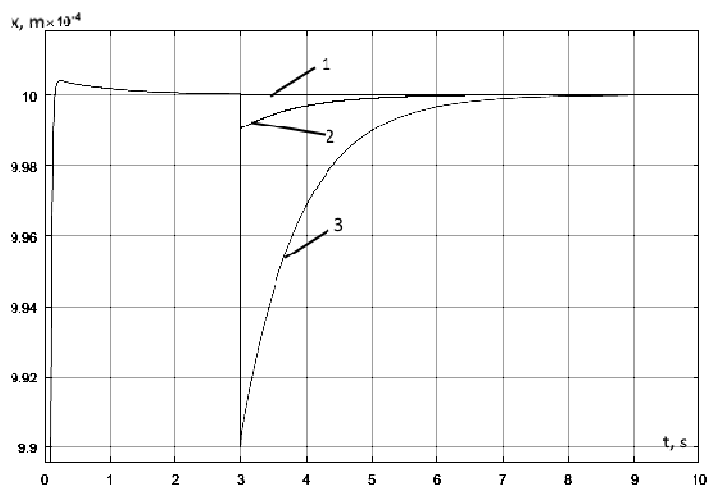


Рис. 7. Переходный процесс по отклонению при различных отклонениях:  
 1 – нанометровое отклонение от центральной оси; 2 – микрометровое отклонение от центральной оси; 3 – десятикратное микрометровое отклонение от центральной оси

Анализируя результаты цифрового моделирования полученного алгоритма адаптивного управления активным электромагнитным подшипником по состоянию можно сделать заключение, что синтезированная система автоматического управления за счет работы алгоритма адаптации обладает астатизмом как к внешним, так и к параметрическим отклонениям.

**Выводы.** Результаты имитационного моделирования доказывают, что полученные переходные процессы соответствуют характеру работы ультрапрецизионного технологического оборудования, поскольку компенсация радиальных отклонений выполняется в микрометровом диапазоне точности.

## Литература

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с.
3. Поляков М.В. Определение зоны допустимых перемещений ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1005–1014.
4. Думов I., Kotin D. Method for implementation of active stabilization the spatial position of mechatronic device rotor. Proc. of 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7756721>.
5. Думов I., Kotin D. Signal-Adaptive Controller for Micro Electric Drive Rotor Radial Displacement Updating. Proc. of 18<sup>th</sup> Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017 (Eragol, Altai Republic, 29 June – 3 July, 2017). Novosibirsk, 2017, pp. 572–578.
6. Filatov A., Hawkins L., McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems. *Actuators*, 2016, vol. 5, iss. 4, pp. 5–26. DOI:10.3390/act5040026.
7. Yuanping Xia, Long Dib, Jin Zhoua, Chaowu Jina, Qintao Guo. Active magnetic bearings used as exciters for rolling element bearing outer race defect diagnosis. *ISA Transactions*, 2016, vol. 61, March, pp. 221–228.

---

**ДЫМОВ ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ** – аспирант, ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Новосибирск ([dymov.2010@corp.nstu.ru](mailto:dymov.2010@corp.nstu.ru)).

**КОТИН ДЕНИС АЛЕКСЕЕВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Новосибирск ([d.kotin@corp.nstu.ru](mailto:d.kotin@corp.nstu.ru)).

**ПАНКРАЦ ЮРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Новосибирск ([pankracz@corp.nstu.ru](mailto:pankracz@corp.nstu.ru)).

---

### I. DYMOV, D. KOTIN, Yu. PANKRATS

#### STATE-FEEDBACK BASED ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM OF ACTIVE ELECTROMAGNETIC BEARING

**Key words:** active stabilization, balancing, signal-adaptive controller, micro electric drive.

*The paper is devoted to the development and investigation of automatic adaptive control system of electric machine rotor radial displacement stabilization with active magnetic bearings. A new approach to solving the problem of stabilizing the rotating element of motor, based on active current updating of the spatial position is offered. The development of automatic control algorithm is carried out using the Lyapunov function method. The paper describes the way of constructive implementation of this method, structural synthesis methodology of control law, as well as the results of simulation proving promising potential of the conducted research. Practical implementation of the developed system will increase the parametric reliability of electrical equipment for various purposes.*

#### References

1. Zhuravlev Yu.N. *Aktivnyye magnitnyye podshpniki: Teoriya, raschet, primeneniye* [Active magnetic bearings: Theory, calculation, application]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2003, 206 p.
2. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernyye, nelineinye, optimal'nyye i adaptivnyye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 464 p.

3. Polyakov M.V. *Opređenje zony dopustimykh peremeshchenii rotora elektrodvigate-lyamakhovika s aktivnym magnitnym podvesom* [Determination of the zone of permissible movements of the rotor of the electric motor-flywheel with active magnetic suspension] // *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2016, vol. 17, no. 4, pp. 1005–1014.

4. Dymov I., Kotin D. Method for implementation of active stabilization the spatial position of mechatronic device rotor. Proc. of 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7756721>.

5. Dymov I., Kotin D. Signal-Adaptive Controller for Micro Electric Drive Rotor Radial Displacement Updating. Ptoc. of 18<sup>th</sup> Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017 (Eragol, Altai Republic, 29 June – 3 July, 2017). Novosibirsk, 2017, pp. 572–578.

6. Filatov A. Hawkins L. McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems. *Actuators*, 2016, vol. 5, iss. 4, pp. 5–26. DOI:10.3390/act5040026.

7. Yuanping Xua, Long Dib, Jin Zhoua, Chaowu Jina, Qintao Guo. Active magnetic bearings used as excitors for rolling element bearing outer race defect diagnosis. *ISA Transactions*, 2016, vol. 61, March, pp. 221–228.

---

**DYMOV ILYA – Post-Graduate Student, Assistant of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk (dymov.2010@corp.nstu.ru).**

**KOTIN DENIS – Candidate of Technical Sciences, Head of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk (d.kotin@corp.nstu.ru).**

**PANKRATS YURIY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk (pankracz@corp.nstu.ru).**

---

**Формат цитирования:** Дымов И.С., Котин Д.А., Панкрац Ю.В. Алгоритм адаптивного управления активным электромагнитным подшипником по состоянию // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 69–77.

УДК 621.316.717-573.2-048.24

ББК 3264.344-013

Е.Г. ЕГОРОВ, Г.Е. ЕГОРОВ, Н.Ю. ЛУИЯ

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНТАКТОРАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Ключевые слова:* контактор, электрическая дуга, коммутационные испытания, восстанавливающаяся электрическая прочность, восстанавливающееся электрическое напряжение.

*Рассмотрены решения актуальной проблемы энергосбережения за счет сокращения сроков, объемов и методик коммутационных испытаний. На основе анализа результатов ранее опубликованных работ и разработанных математических моделей определены основные критерии, подтверждающие работоспособность электрических аппаратов.*

*Целью работы является разработка расчетно-экспериментальной методики оценки коммутационной способности контактора путем измерения восстанавливающейся электрической прочности и электрического напряжения в момент перехода тока дуги через нуль.*

*Проанализированы дуговые процессы при отключении нагрузок, эквивалентных отключению асинхронных двигателей. Установлена зависимость времени запаздывания пробоя от крутизны восстанавливающегося напряжения. Даны рекомендации по увеличению достоверности измеряемых значений восстанавливающейся электрической прочности.*

*Исследование восстанавливающейся электрической прочности при скорости подъема зондирующих импульсов от 50 до 150 В/мкс показали, что при большей крутизне имеет место превышения измеряемой восстанавливающейся прочности до 20%. Необходимость учета влияния крутизны нарастания зондирующего импульса на измеряемые значения восстанавливающейся прочности обеспечивает достоверность измерений, что отличается новизной по сравнению с другими методами. При измерении восстанавливающейся прочности гарантированный пробой между коммутирующими контактами обеспечивается путем увеличения испытательного напряжения до требуемого уровня, а также регулированием крутизны восстанавливающего повышенного испытательного напряжения за счет коэффициента амплитуды и собственной частоты испытательного контура.*

Надежность аппаратов должна подтверждаться энергоемкими коммутационными испытаниями на предельную коммутационную способность (токи достигают нескольких килоампер, напряжение – тысячи вольт) и коммутационную износостойкость<sup>1</sup> (составляет до нескольких миллионов циклов коммутации), контролируется в течение нескольких месяцев, в некоторых случаях до нескольких лет. Решению проблемы энергосбережения за счет сокращения сроков и объемов испытаний уделяется серьезное внимание, что подтверждается публикациями в ряде отечественных и зарубежных научных публикациях [4–5, 8, 9, 12–16]. Эти работы посвящены исследованию явлений, возникающих при дуговой коммутации электрической цепи: физических, тепловых, газодинамических и др., на основе которых были разработаны математические модели, позволяющие подтверждать работоспособность электрических аппаратов.

<sup>1</sup> ГОСТ 11206-77. Контактторы электромагнитные низковольтные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1977. 18 с.

В работе [15] приведены результаты экспериментов и их статистической обработки, по которым вычислены параметры электрической дуги модели Майра, рассчитаны напряжение на дуге и переходное напряжение восстановления, даны рекомендации по разработке подобных конструкций выключателей.

Влияние электрического поля на гашение электрической дуги в дугогасительной решетке рассмотрено в статье [16]. Были учтены результаты исследования распределения температуры и напряженности электрического поля при оптимизации процесса гашения дуги и для повышения коммутационной способности аппаратов.

В работе [14] исследована модель электрической дуги с использованием ANSYS CFX с учетом тепловых свойств плазмы дуги при разработке новых автоматических выключателей на токи до 200 А. Результаты этих исследований были использованы при создании расчетной математической модели.

Правомерность выбора аппаратуры для обеспечения требуемой надежной работы энергетического оборудования на основании надежностных показателей электрических аппаратов показана в статье [13].

Методика определения разрядных напряжений между контактами высоковольтных выключателей рассмотрены в работе [12]. Моделирование характеристик пробивных напряжений выполнено в средах ELCUT, ANSYS и дан анализ результатов сопоставления коммутационных свойств выключателей. Это позволило рассмотреть возможность повышения коммутационной способности выключателя. Метод неразрушающего контроля при испытаниях на отключающую способность предложен в работе [9] по результатам анализа плазменных и электродуговых процессов гашения электрической дуги [11].

Целью работы является разработка расчетно-экспериментальной методики оценки коммутационной способности контактора переменного тока путем измерения восстанавливающейся электрической прочности, сравнения этой характеристики с восстанавливающимся напряжением, относящимся к моменту времени перехода тока дуги через нуль.

Успешное гашение электрической дуги обеспечивается при условии  $u_{ВП}(t) > u_{ВН}(t)$  за переходом тока дуги через нулевое значение и происходит вследствие интенсивных процессов деионизации остаточного столба дуги в момент изменения полярности электродов: «анод» становится «катодом» и быстрые электроны рекомбинируют на аноде. Таким образом, создается так называемая мгновенная восстанавливающаяся прочность в околокатодной зоне вновь образовавшегося катода. Время запаздывания электрического пробоя в этом случае объясняется временем появления в межконтактном промежутке первого эффективного электрона и резкого роста тока в разрядном промежутке [6].

В работах [1, 2, 6] исследовались процессы пробоя газовых промежутков. Установлено, что имеет место сильное увеличение времени пробоя, связанное с явлением образования микровзрыва на электродах (испусканием электронных капель – «эффект эктонов»). Этот процесс характерен для большого количества типов разрядов, в том числе на электрических контактах (в вакуумных камерах, а также в дугогасительных камерах при высоких давлениях).

Показано, что развитие пробоя происходит при значениях работы выхода электронов: 4,4 эВ; 4,5 эВ; 4,74 эВ – соответственно для медных, вольфрамовых и серебряных контактов [2, 4, 10].

По результатам исследований [6] установлено, что время разряда складывается из времени запаздывания  $t_3$  и времени коммутации  $t_K$ ; время коммутации  $t_K$  мало и составляет несколько наносекунд. Время запаздывания определяется статическим временем запаздывания  $t_{CT}$  и временем формирования разряда  $t_\Phi$ :

$$t_3 = t_{CT} + t_\Phi + t_K$$

Время запаздывания определяется в основном временем формирования пробоя, так как  $t_{CT} \ll 10^{-7}$  с.

Результаты исследований [4] показали, что в диапазоне токов отключения 10÷5400 А время разряда  $t_r$  примерно равно  $t_\Phi$  и составляет от 0,3 до 1 мкс.

В работе [4] исследовались влияние скорости нарастания зондирующего (испытательного) импульса на измеряемые значения восстанавливающейся электрической прочности (ВП) в аппаратах низкого напряжения. Результаты исследований показали, что при скорости подъема напряжения зондирующего импульса 125 В/мкс измеренные значения ВП на 11÷12% выше, чем при скорости подъема, равной 50 В/мкс в диапазоне отключаемых токов 10÷140 А. Аналогичные закономерности были получены для токов отключения до 5400 А.

Результаты исследования восстанавливающейся прочности для разных отключаемых токов от 10 до 5400 А при скорости подъема зондирующих импульсов от 50 В/мкс до 150 В/мкс показали, что при большей крутизне имеет место превышения измеряемой восстанавливающейся прочности до 20 % [4].

Поэтому при исследовании ВП необходимо учитывать влияние скорости (крутизны) нарастания зондирующего импульса на измеряемые значения восстанавливающейся прочности.

Следовательно, необходимо обеспечить равенство скорости изменения напряжения испытательного зондирующего импульса и скорости восстановления напряжения в номинальном режиме, т.к. в этих случаях будет одинаковым время разряда. Выполнение этих условий, обеспечивает повышение достоверных измерений восстанавливающейся прочности до 20 %.

Измеренное значение восстанавливающейся прочности может быть определена по соотношению:

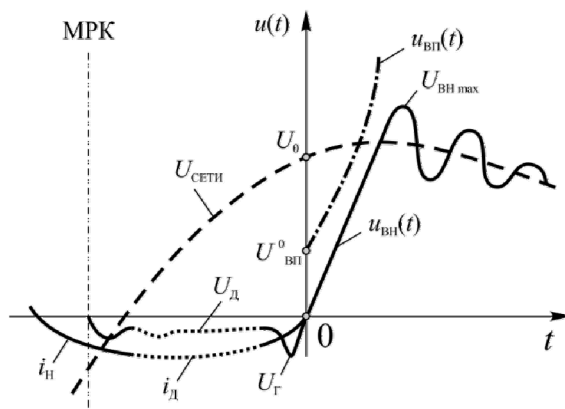
$$u_{ВП}(t) = k_{и} u_{ВП\text{ ст}}(t); k_{и} = \frac{U_{ВН\text{max}}}{U_0},$$

где  $k_{и}$  – коэффициент импульса;  $u_{ВП\text{ ст}}$  – статическое пробивное напряжение, соответствующее тепло- и электрофизическому состоянию газа в межконтактном промежутке для данного момента времени.

Восстанавливающаяся электрическая прочность определяется свойствами дугогасительного промежутка и дугогасительного устройства, а восстанавливающаяся электрическое напряжение зависит от отключаемой  $R, L$  нагрузки (асинхронного двигателя) и приведенной по отношению к контактам емкости, которая всегда участвует в переходном процессе.



На рисунке показаны переходные процессы, возникающие при гашении электрической дуги на контактах электрического аппарата [4, 10]. Полученные в результате измерения опытные данные  $u_{ВН}(t)$  и  $u_{ВП}(t)$  подвергались статистической обработке, рассчитывались среднее значение  $U_{ВП\text{ ср}}$  и среднеквадратичное отклонение  $S$  [3] для расчета вероятности пробоя межконтактного промежутка и длительности горения дуги.



Переходные процессы при отключении электрической дуги переменного тока: МРК – начало расхождения контактов;  $i_д$  – ток дуги;  $i_н$  – ток в цепи нагрузки;  $U_д$  – напряжение на дуге;  $U_Г$  – пик напряжения на дуге в момент нуля тока;  $U_{СЕТИ}$  – напряжение сети;  $U_0$  и  $U_{ВП}^0$  – напряжение сети и восстанавливающаяся прочность при переходе тока в цепи через ноль;  $u_{ВП}(t)$  и  $u_{ВН}(t)$  – восстанавливающаяся электрическая прочность и восстанавливающееся электрическое напряжение.

Минимальная ВП определяется средним квадратичным отклонением и зависит от принятой квантили вероятности  $k$ . Например, для вероятности 90% табличное значение  $k = 1,282$  [3].

Значения волновых параметров для испытаний на максимальную отключающую способность рассчитываются по соотношениям [4]

$$\begin{cases} f_0 = 2600 I_0^{0,2} U_0^{-0,8} \pm 10\%; \\ k_a = 1,15 + 0,5 \exp(-0,016 f_0) \pm 0,05, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_a$  – коэффициент амплитуды;  $I_0$  – ток нагрузки, А;  $U_0$  – номинальное напряжение цепи нагрузки, В;  $f_0$  – частота колебания тока цепи нагрузки, кГц.

Максимальное значение ВН рассчитывается с учетом среднего квадратичного отклонения напряжения и принятой вероятности  $k$ .

Угасание электрической дуги контролируется сопоставлением зависимости восстанавливающейся прочности  $U_{ВП\text{ min}}(t)$  и восстанавливающейся  $U_{ВП\text{ max}}(t)$ .

Экспериментальные исследования проводились в схеме коммутационных испытаний на предельную отключающую способность в режиме соответствующей категории применения АС-4<sup>1</sup>. В ходе этих экспериментов контро-

<sup>1</sup> ГОСТ 11206-77. Контактные электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.

лировались время дуги, восстанавливаемая прочность, восстанавливаемое напряжение. Волновые характеристики коммутируемой цепи рассчитывались по соотношениям (1) с учетом конкретных значений отключаемого тока и напряжения цепи нагрузки<sup>1</sup>. Восстанавливаемая прочность  $U_{ВП}$  измерялась по методу «повторных пробоев» [4, 7].

Волновые параметры отключаемой цепи зависят от параметров нагрузки цепи  $L$ ,  $R$ ,  $C$  и характеризуется  $u_{ВН\text{ МАХ}}(t)$  и  $f_0$ , которые определяются экспериментально и регламентируются<sup>1</sup>.

Сравнение характеристик восстанавливаемой прочности  $u_{ВП}(t)$  и восстанавливаемого напряжения  $u_{ВН}(t)$  в околонулевых паузах тока определяет условия гашения дуги. При  $u_{ВП}(t) > u_{ВН}(t)$  происходит гашение электрической дуги.

При измерении восстанавливаемой прочности необходимо обеспечить гарантированный пробой между коммутирующими контактами за счет увеличения восстанавливаемого испытательного напряжения до требуемого уровня, а для увеличения достоверности результатов измерения необходимо обеспечить крутизну восстанавливаемого повышенного испытательного напряжения той крутизне, которая соответствует изменению восстанавливаемого напряжения в номинальном режиме.

Предлагаемая процедура позволит увеличить точность измерения величины восстанавливаемой электрической прочности и повысить достоверность оценки результатов коммутации. Регулирование (изменение) скоростей подъема номинального напряжения  $U_{0Н}$  и напряжения испытательного  $U_{0ИСП}$  регулируется за счет шунтирования коммутирующих контактов элементами  $R_{Ш}$  и  $C_{Ш}$  [4]. Равенство скоростей восстановления напряжения при номинальном (660 В) и испытательном повышенном напряжении (принимая, например, равным 800 В) достигается регулированием крутизны импульса восстанавливаемого напряжения за счет изменения собственной частоты  $f_{0ИСП}$  испытательного напряжения. Скорость подъема восстановления напряжения рассчитывается по формуле [4, 10]:

$$\left(\frac{dU_{ВН}}{dt}\right)_{\text{сп}} = 2U_0 f_0 k_a; U_0 = \sqrt{2} U_H \sin \varphi.$$

Например, скорость изменения восстанавливаемого напряжения при номинальном напряжении сети  $U_H = 660$  В, коммутируемом токе отключения 300 А и волновых параметрах ( $f_{0Н} = 45$  кГц,  $k_a = 1,38$ ) испытательной цепи равна 82 В/мкс. При испытательном напряжении 800 В и токе отключения 300 А аналогичная скорость изменения восстанавливаемого напряжения будет обеспечиваться при  $f_0 = 37$  кГц и  $k_a = 1,27$ .

Рассмотренная методика была проверена при испытаниях дугогасительных камер на предельную отключающую способность в режиме, соответствующем категории применения АС-4 с разными конструкциями дугогасительных камер (табл. 1)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50030.1-2007 (МЭК 60947-1:2004). Аппаратура распределения и управления низковольтная. М.: Стандартинформ, 2008. 142 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 11206-77. Контактные электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.

Таблица 1

Основные параметры дугогасительных камер

Параметры ДК	Вариант дугогасительных камер		
	А	Б	В
Объём дугогасительной камеры, см <sup>3</sup>	9	15	9
Длина пластин, мм	16	29	23
Расстояние между пластинами, мм	5	2,3	5,5
Число пластин на каждый разрыв мостикового контакта	5	7	5

Примечания. Раствор контактов – 5 мм; толщина дугогасительных пластин – 1 мм.

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний дугогасительных камер

Показатель		Варианты дугогасительных камер		
		А	Б	В
Успешность гашения ( $n_{\Gamma} / n_0$ )	$t_{\Gamma} < 1$ п/п	0,8		
	$t_{\Gamma} < 2$ п/п	0,2	0,2	0,6
	$t_{\Gamma} < 3$ п/п и более		0,8	0,4
$U_{ВП}, В$		925÷1030	808÷1380	975÷1400
$U_{ВН}, В$		< 925	< 808	< 975

Примечания.  $n_{\Gamma}$  – количество успешных отключений;  $n_0$  – общее количество опытов.

В результате испытаний было установлено, что наиболее эффективное дугогашение имеет дугогасительная камера по варианту А, в которой созданы наиболее благоприятные условия для вхождения дуги в решетку и её гашения.

**Выводы.** 1. Рассмотренный расчетно-экспериментальный метод испытаний по измеренным напряжениям восстанавливающейся прочности (ВП) и восстанавливающегося напряжения (ВН) позволяет определить с минимальными энергозатратами отключающуюся способность контактора переменного тока при ограниченном объеме прямых испытаний, а также выбрать наиболее эффективную дугогасительную систему электрического аппарата.

2. Для определения достоверного значения  $U_{ВП \max}$  необходимо соблюдение равенства изменения испытательного и номинального напряжения сети после нуля тока дуги, что исключает влияние времени электрического пробоя.

3. Этот метод позволяет обеспечить сохранность дугогасительной камеры и дает возможность анализа результатов дугогашения при минимальном числе испытательных коммутационных циклов и минимальных энергозатратах на проведение коммутационных испытаний.

Литература

1. Бычкова Л.Г., Бычков Ю.И., Месяц Г.А. Эффект сильного роста времени запаздывания пробоя газовых промежутков при высоких электрических полях // Известия вузов. Физика. 1969. № 2. С. 36–39.
2. Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Цвентух М.М. Инициирование эктонных процессов при взаимодействии плазмы с микровыступом на металлической поверхности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 134, № 6(12). С. 1213–1224.
3. Венцель Е.С. Теория вероятностей. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

4. Егоров Е.Г. Испытания и исследования низковольтных коммутационных аппаратов: учебное электронное издание. Ч. 2. Исследования низковольтных коммутационных аппаратов. Министерство связи и массовых коммуникаций РФ [Электронный ресурс]. Чебоксары, 2015. Зарегистр. в ФГУП НТЦ «Информрегистр», рег. свидетельство № 39967, номер гос. регистрации обязательного экземпляра электронного издания № 03215011331.

5. Егоров Е.Г., Иванова С.П., Рыжкова Н.Ю., Егоров Е.Г. Некоторые направления энергосбережения при испытаниях магнитных пускателей на надежность // Электротехника. 2012. № 5. С. 16–19.

6. Месяц Г.А., Кремнёв В.В., Корицунов Г.С., Янкевич Ю.Б. Ток и напряжение искры при импульсном пробое газового промежутка в наносекундном диапазоне времени // Журнал технической физики. 1969. Т. 39, вып. 1. С. 75–81.

7. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. 5-е изд., перераб., и доп. СПб.: Лань, 2015. 592 с.

8. Розанов Ю.К., Егоров Е.Г., Егоров Г.Е. Неразрушающие испытания контактной коммутационной аппаратуры методом контроля восстанавливающейся электрической прочности // Электротехника. 2007. № 4. С. 47–53.

9. Рывльская Л.А. Определение отключающей способности вакуумных дугогасительных камер по критерию отказа при использовании метода неразрушающих испытаний // Электротехника. 2016. № 6. С. 2–9.

10. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1973. 424 с.

11. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1969. 370 с.

12. Чернокутов Д.В., Черных И.В., Хомяков Р.А. Математический метод расчета электрической прочности и анализ отключающей способности высоковольтного элегазового выключателя // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 5. С. 33–39.

13. Bao-ying Wang. The Study on the Design of Low voltage AC Contactor in the Electrical System and the Control Applications. 4<sup>th</sup> Int. Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMSCCE), 2015. *Advances in Computer Science Research*, 2015, pp. 140–143. DOI: 10.2991/ICMMSCCE-15.2015.27.

14. Iturregi A., Barbu B., Torres E., Berger F., Inmaculada Z. Electric Arc in Low-Voltage Circuit Breakers: Experiments and Simulation. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2016, pp. 1–8. DOI: 10.1109/TPS.2016.2633400.

15. Nitu S., Nitu C., Anghelita P. Electric Arc Model, for High Power Interrupters. IEEE EUROCON 2005 – The International Conference on «Computer as a Tool», 2005, vol. 2, pp. 1442–1445. DOI: 10.1109/EURCON.2005.1630234.

16. Tiansheng Z., Nairui Y., Shenli J. Hongwu L., Ruiliang G. Research on the effect of electric field in arc separating process. *IEEE Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), 2015, 3<sup>rd</sup> Int. Conference*, 2015, pp. 18–21. DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2015.7368328.

---

**ЕГОРОВ ЕВГЕНИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ea@chuvsu.ru).

**ЕГОРОВ ГРИГОРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – инженер-программист, ОАО ВНИИР, Россия, Чебоксары (yegreg@mail.ru).

**ЛУИЯ НАТАЛИЯ ЮРЬЕВНА** – инженер-конструктор, АО ЧЭАЗ, Россия, Чебоксары (nataliluiya@mail.ru).

---

E. EGOROV, G. EGOROV, N. LUIYA

FEATURES OF MEASUREMENT OF RECOVERABLE  
ELECTRICAL STRENGTH IN LOW-VOLTAGE AC CONTACTORS

*Key words:* contactor, arc, switching tests, restored electric strength, restored electric voltage.

*The article considers solutions to the actual problem of energy saving due to the reduction of terms, volumes and methods of switching tests. On the basis of an analysis of the*

results of previously published papers and developed mathematical models, the main criteria for confirming the performance of electrical devices were determined.

The aim of the work is to develop a computational-experimental method for estimating the switching capacity of a contactor by measuring recoverable electrical strength and electrical voltage at the time when the arc current passes through zero.

The paper analyzed arc processes when disconnecting loads equivalent to the asynchronous motors shut-off. The dependence of the breakdown delay time on the steepness of the recovering voltage is established. Recommendations are given to increase the reliability of measured values of restoring electrical strength.

The study of restoring electrical strength at a lifting rate of coding impulses from 50 V/ $\mu$ s to 150 V/ $\mu$ s has shown that with a larger steepness, the measured recoverable strength is exceeded up to 20%.

The need to take into account the influence of the steepness of the probe pulse rise on the measured values of the recoverable strength ensures the accuracy of measurements, this method being different in comparison with other ones. When measuring recoverable strength, guaranteed breakdown between the switching contacts is provided by increasing the test voltage to the required level, as well as by adjusting the steepness of the restoring increased test voltage due to the amplitude factor and the natural frequency of the test circuit.

### References

1. Bychkova L.G., Bychkov Yu. I., Mesyats G. A. *Effekt sil'nogo rosta vremeni zapazdyvaniya proboya gazovykh promezhukov pri vysokikh elektricheskikh polyakh* [The effect of strong growth breakdown delay time of gases in strong electric fields. Proceedings of the universities]. *Izv. vuzov. Fizika* [News of higher education institutions. Physics], 1969, no. 2, pp. 36–38.
2. Barengol'ts P.A., Mesyats G.A., Tsventukh M.M. *Iniitsirovanie ektonnykh protsessov pri vzaimodeistvii plazmy s mikrovystupom na metalliche-skoi poverkhnosti* [Initiation ectonic processes in the plasma interaction with microscopic projections on the metalsurface]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Physics elektrotehnicheskoy], 2008, vol. 134, no. 6(12), pp. 1213–1224.
3. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow, Nauka Fizmatgiz Publ., 1969, 576 c.
4. Egorov E.G. *Ispytaniya i issledovaniya nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparatov. Ch. 2. Issledovaniya nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparatov. Ministerstvo svyazi i massovykh kommunikatsii RF* [Testing and research of low-voltage switching devices. Part 2. Research of low-voltage switching devices. Ministry of Telecom and Mass Communications of the Russian Federation]. Cheboksary, 2015.
5. Egorov E.G., Ivanova S.P., Ryzhkova N.Yu., Egorov G.E. *Nekotorye napravleniya energo-sberezheniya pri ispytaniyakh magnitnykh puskatelei na nadezhnost'* [Some areas of energy savings in testing the reliability of magnetic starters]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2012, no. 5, pp. 16–19.
6. Mesyats G.A., Kremnev V.V., Korshunov G.S., Yankelevich Yu.B. *Tok i napryazhenie iskry pri impul'snom proboe gazovogo promezhutka v nanosekundnom diapazone vremeni* [Current and voltage sparks during pulsed breakdown of the gas gap in the nanosecond range time]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 1969, vol. 39, no. 1, pp. 75–81.
7. Kurbatov P.A., ed. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of electrical apparatus. 5<sup>th</sup> ed.]. St. Petersburg, Doe Publ., 2015, 592 p.
8. Rozanov Yu.K., Egorov E.G., Egorov G.E. *Nerazrushayushchie ispytaniya kontaktnoi kommutatsionnoi apparatury metodom kontrolya vosstanavlivayushcheysya elektricheskoi prochnosti* [Non-destructive testing of the contact switchgear control method recovering electric strength]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2007, no. 4, pp. 47–53.
9. Ryl'skaya L.A. *Opredelenie otklyuchayushchei sposobnosti vakuurnykh dugogasitel'nykh kamer po kriteriyu otказа pri ispol'zovanii metoda nerazrushayushchikh ispytaniy* [Determinatuion of the breaking capacity of the vacuum interrupters on the criterion of failure using method the non-destructive testing]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2016, no. 6, pp. 2–9.
10. Taev I.S. *Elektricheskie kontakty i dugogasitel'nye ustroystva apparatov nizkogo napryazheniya* [Electrical contacts and arc suppression of apparatuses low-voltage]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 424 p.

11. Finkel'burg V., Mekker G. *Elektricheskie dushi i termicheskaya plazma* [Electric arc and thermal plasma]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1969, 370 p.

12. Chernoskutov D.V., Chernykh I.V., Khomyakov R.A. *Matematicheskii metod rascheta elektricheskoi prochnosti i analiz otklyuchayushchei sposobnosti vysokovol'nogo elegazovogo vyklyuchatelya* [Mathematical method of calculation of electric durability and the analysis of the disconnecting ability of the high-voltage gas-insulated switch], *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2016, no. 5, pp. 33–39.

13. Bao-ying Wang. The Study on the Design of Low voltage AC Contactor in the Electrical System and the Control Applications. 4<sup>th</sup> Int. Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE), 2015. *Advances in Computer Science Research*, 2015, pp. 140–143. DOI: 10.2991/ICMMCCE-15.2015.27.

14. Iturregi A., Barbu B., Torres E., Berger F., Inmaculada Z. Electric Arc in Low-Voltage Circuit Breakers: Experiments and Simulation. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2016, pp. 1–8. DOI: 10.1109/TPS.2016.2633400.

15. Nitu S., Nitu C., Anghelita P. Electric Arc Model, for High Power Interrupters. IEEE EUROCON 2005 – The International Conference on «Computer as a Tool», 2005, vol. 2, pp. 1442–1445. DOI: 10.1109/EURCON.2005.1630234.

16. Tiansheng Z., Nairui Y., Shenli J. Hongwu L., Ruiliang G. Research on the effect of electric field in arc separating process. *IEEE Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*, 2015, 3<sup>rd</sup> Int. Conference, 2015, pp. 18–21. DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2015.7368328.

---

**EGOROV EVGENIY** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ea@chuvsu.ru).

**EGOROV GREGORY** – Software Engineer, Public Corporation VNIIR, Russia, Cheboksary (yegreg@mail.ru).

**LUIYA NATALIA** – Design Engineer, JSC CHEAZ, Russia, Cheboksary (nataliluiya@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Егоров Е.Г., Егоров Г.Е., Луия Н.Ю. Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 78–86.

УДК 537.311.5:621.365.3

ББК 31.292

А.Н. ИЛЬГАЧЁВ, В.А. КНЯЗЕВ

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ БОКОВОЙ СТЕНКИ КАЛЬЦИНАТОРА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО КАМЕРЫ ПРОКАЛИВАНИЯ

*Ключевые слова:* электрокальцинатор, камера прокаливания, проводящая стенка, непроводящая стенка, сопротивление в критериальной форме, показатель неравномерности распределения объемной мощности.

*В работе описаны математические модели электрического поля камеры прокаливания электрокальцинатора для различных конструкций боковой стенки и с учётом однородной проводимости материала ванны. Предложен показатель оценки неравномерности распределения объемной мощности по объему камеры прокаливания. Исследовано влияние конструкции боковой стенки и заглибления электрода на сопротивление камеры и распределение объемной мощности по ней. Показано, что для кальцинатора ИЭТ-10 лучшим решением, обеспечивающим равномерность распределения объемной мощности в камере прокаливания при высоких технических показателях работы установки, является применение непроводящей стенки из диэлектрического материала. При этом заглибление электрода составляет 1-2 радиуса верхнего электрода. Введение в непроводящую стенку электрически изолированной проводящей вставки не улучшает равномерность распределения объемной мощности.*

В электротермии широкое применение находят углеродные материалы, из которых изготавливаются футеровочные блоки, угольные, графитовые и самообжигающиеся электроды для ряда электротехнологических установок. Углеродные материалы характеризуются высокими показателями теплопроводности, электрической проводимости, стойкости против теплового удара и малым тепловым расширением.

Электроды и футеровочные материалы изготавливаются из электродной массы, включающей в себя антрациты, доменный кокс, связующее, в качестве которого используется каменноугольный пек. Наряду с этими материалами применяются естественный графит, карбид кремния, графитированные отходы смежных производств [4, 5].

Производство электродной массы в России организовано на многих рудотермических и электродных заводах в специализированных цехах, где ее изготавливают по примерно одинаковой технологической схеме, в которой важное место занимает электротермическая обработка (прокаливание). Прокаливание антрацита и кокса ведется во вращающихся барабанных печах. Температура прокаливания антрацита 1300°C, литейного кокса 1200°C.

Более полное прокаливание термоантрацита и кокса достигается в электрических печах, называемых электрокальцинаторами. Они представляют собой однофазную печь сопротивления, содержащую верхний и нижний электроды, камеру нагрева и камеру выдержки (рис. 1). Питание электрокальцинатора производится от однофазного трансформатора мощностью 2-3 МВ·А. В футерованном металлическом кожухе (шахте прокалочной печи)

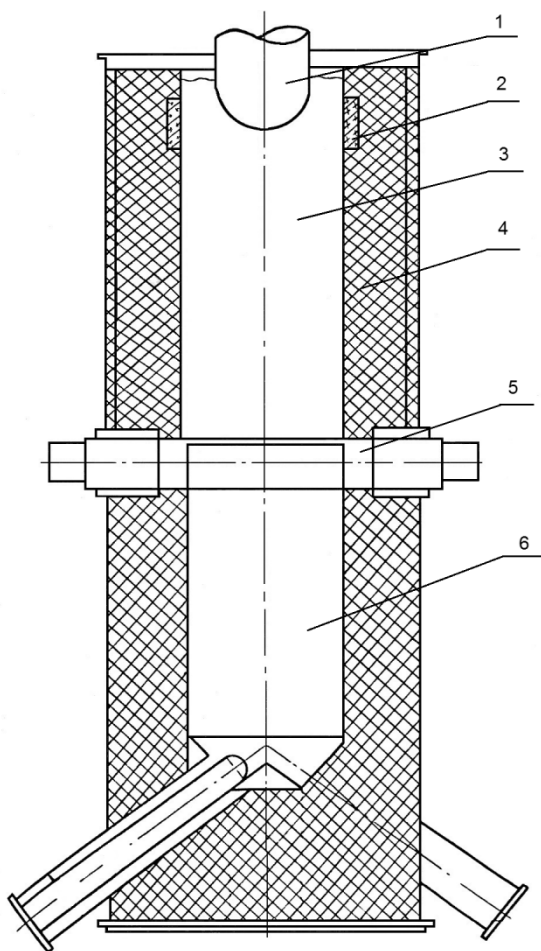


Рис 1. Эскиз конструкции электрокальцинатора:  
 1 – верхний электрод; 2 – проводящая вставка;  
 3 – камера прокаливания; 4 – футеровка;  
 5 – нижний электрод; 6 – камера выдержки

находится прокаливаемый материал. Температура прокалики углеродных материалов может превышать  $1700^{\circ}\text{C}$ .

Качество прокалённой углеродной массы и стойкость футеровки камеры прокаливания электрокальцинатора в значительной степени зависят от распределения температуры в объёме камеры. На температурное поле в свою очередь большое влияние оказывает распределение мощности в камере прокаливания. Электрическое поле в камере прокаливания определяется краевыми условиями на поверхностях, ограничивающих эту камеру.

Исследование электрических полей ванн одноэлектродных печей показали [6], что при характерных для электрокальцинаторов геометрических параметрах, когда высота камеры прокаливания в несколько раз превышает внутренний диаметр, граничные условия на боковых стенках оказывают весьма значительное влияние на распределение мощности и её сопротивление. Поэтому для получения высокого качества прокалённого

материала необходимо выбрать конструкцию и геометрические параметры боковой стенки зоны нагрева, которые обеспечивают рациональное распределение мощности. Для обеспечения равномерности качество прокалённой углеродной массы в электрокальцинаторов типа ИЭТ-10 предлагались различные технические решения: применение составной боковой стенки с проводящими вставками [1], применение секционированного нижнего электрода [2].

Целью данной работы является исследование влияние конструкции боковой стенки электрокальцинатора на электрические характеристики камеры прокаливания. Рассматривались следующие варианты конструкции боковой стенки: проводящая, непроводящая и непроводящая с изолированной проводящей вставкой.



Камера прокаливания электрокальцинатора заполнена прокаливаемым углеродистым материалом в виде кусков размером 40–70 мм. Размеры кусков значительно меньше линейных размеров зоны нагрева, поэтому при исследовании зависимости сопротивления камеры, закономерности распределения по ней объемной мощности материал, заполняющий ванну, можно считать сплошной и непрерывной средой.

Боковые стенки ванн электрокальцинаторов могут быть выполнены как сплошными из непроводящих по сравнению с прокаливаемым материалом, так и составными, где имеются части, выполненные из огнеупорных материалов (шамот, корунд), и части, выполненные из угольных или графитовых материалов. На непроводящих частях боковых стенок задаются граничные условия второго рода  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ , а на проводящих – граничные условия первого рода  $\varphi = \text{const}$ .

По литературным данным [4], усреднённая проводимость насыпной массы углеродистых материалов сильно зависит от температуры. Кроме того, экспериментальные исследования температурного поля, проведённые на действующем электрокальцинаторе, показывают, что перепады температур в объёме ванны достигают значительных величин. При таких обстоятельствах расчёт электрического поля необходимо рассматривать как часть сопряжённой задачи расчёта электротеплового поля. Ввиду сложности рассматриваемой задачи для исследования общих закономерностей распределения мощности по ванне и зависимости её сопротивления можно ограничиться приближением, когда проводимость слабопроводящей среды считается однородной. При пренебрежении поверхностным эффектом электрическое поле в этом случае описывается уравнением Лапласа  $\nabla^2 \varphi = 0$  при следующих граничных условиях на участках, ограничивающих поверхности камеры прокаливания (рис. 2):

- 1 – осевая симметрия; 2 –  $\frac{\partial \varphi^*}{\partial r^*} = 0$ ; 3 –  $\frac{\partial \varphi^*}{\partial z^*} = 0$ ; 4 –  $\varphi^* = 0$ ; 5 –  $\frac{\partial \varphi^*}{\partial r^*} = 0$ ; 6 –  $\varphi_{\text{вс}}^* = \text{const}$ ,  $\int_{S_{\text{вс}}} \delta ds = 0$ ; 7 –  $\frac{\partial \varphi^*}{\partial z^*} = 0$ ; 8 –  $\varphi_{\text{эл}}^* = 1$ .

Расчет распределения мощности и сопротивления камеры прокаливания производился с использованием компьютерного приложения

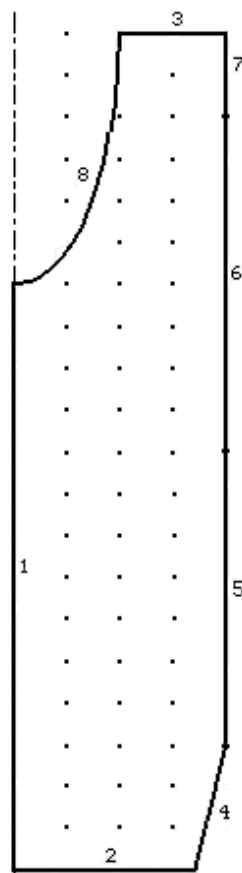


Рис. 2. Обозначения участков ограничивающих поверхностей камеры прокаливания с непроводящей боковой стенкой и проводящей вставкой

COMSOLMultiphysics [3] и осуществлялся при напряжении на участке «верхний электрод – нижний электрод», равном единице. В этом случае сопротивление камеры прокаливания численно равно обратному значению тока, стекающему с поверхности верхнего электрода:

$$R_k = \frac{1}{\int_{S_3} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds},$$

$S_3$  – площадь рабочей поверхности верхнего электрода.

В критериальной форме сопротивление камеры определяется

$$\Gamma_k = \frac{\gamma l}{\int_{S_3} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds}.$$

Приведенные на рис. 3 результаты моделирования показывают, что активное сопротивление камеры с полностью проводящей стенкой минимально. Величина его, примерно, в 6-12 раз ниже, чем сопротивление камеры с непроводящей боковой стенкой, которая обладает наиболее высоким сопротивлением. Сопротивление камеры с непроводящей стенкой, имеющей электрически изолированную проводящую вставку, несколько ниже, чем сопротивление ванны с полностью непроводящей стенкой. Это объясняется тем, что в случае применения изолированной проводящей вставки происходят изменение конфигурации электрического поля и затекание части протекающего тока на проводящий участок стенки с последующим вытеканием из него, что и вызывает снижение сопротивления камеры (рис. 4).

С помощью программы COMSOLMultiphysics было также исследовано распределение объемной мощности в камере прокаливания для различных конструкций боковой стенки. Анализ результатов расчета показывает, что мощность по объему ванны распределяется неравномерно.

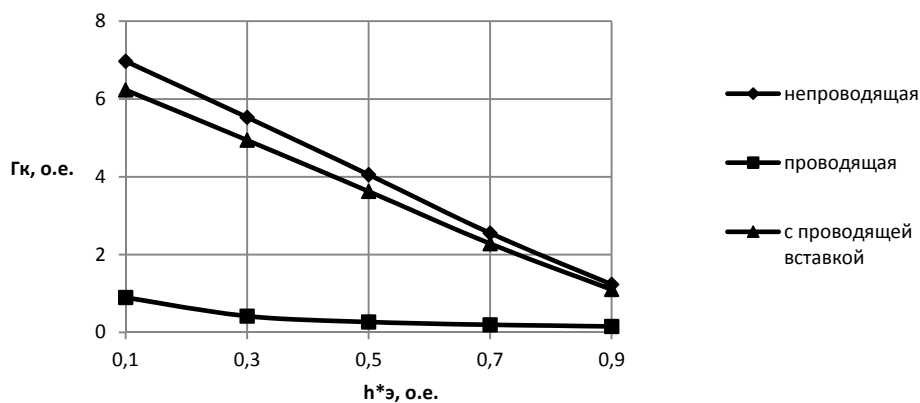


Рис. 3. Зависимости сопротивления в критериальной форме камеры прокаливания для различных конструкций боковой стенки

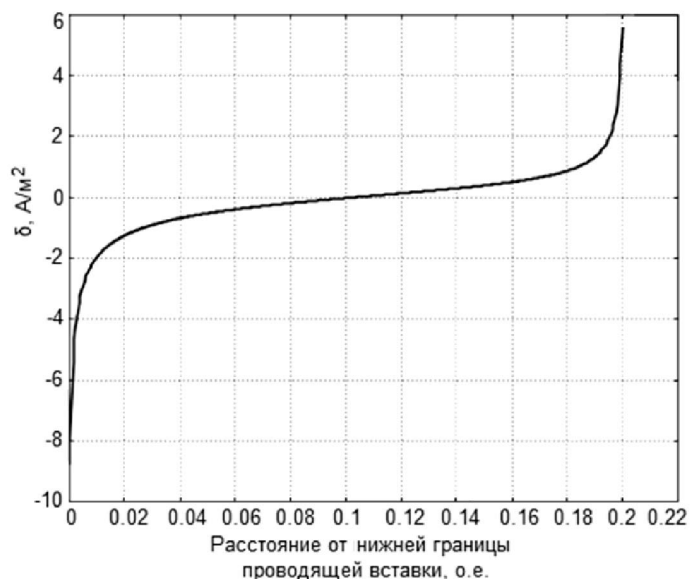


Рис. 4. Распределение нормальной составляющей плотности тока  $\delta$  вдоль поверхности проводящей вставки ( $h^*_{вст} = 0,2$ )

В установке с полностью проводящей боковой стенкой при небольших заглублениях верхнего электрода почти вся мощность выделяется в верхней части камеры вблизи поверхности электрода и между электродом и стенкой. По мере удаления вниз от электрода удельная мощность резко уменьшается и примерно с середины расстояния от нижней части рабочей поверхности электрода до нижнего электрода мощность практически не выделяется. Такое распределение находит объяснение в том, что почти весь ток с электрода протекает на верхнюю часть боковой проводящей стенки ванны и практически не попадает на нижнюю её часть. По мере увеличения заглубления электрода происходит смещение вниз зоны с большим выделением мощности, при этом уменьшается объём зоны, где мощность практически не выделяется.

В камере прокаливания с полностью непроводящей боковой стенкой вблизи электрода имеется зона повышенного выделения мощности, а в верхней части камеры вблизи боковой стенки выделение мощности незначительно. При увеличении заглубления электрода область с незначительным выделением мощности вблизи стенки возрастает. В нижней части ванны примерно с середины её высоты удельная объёмная мощность распределена практически равномерно.

Применение непроводящей стенки с изолированной проводящей вставкой приводит к изменению конфигурации электрического поля в верхней части камеры и характера распределения тока и мощности по ней по сравнению с камерой, имеющей сплошную непроводящую боковую стенку. Часть тока, стекающего с поверхности верхнего электрода, затекает на верхнюю часть проводящей вставки и затем, возвращаясь в камеру через нижнюю часть этой вставки, проходит через слабо проводящий слой на нижний коль-

цевой электрод, соединённый с источником питания. Другая часть тока протекает непосредственно через слабо проводящий слой от верхнего электрода к нижнему, как и в ванне с непроводящей стенкой.

Характер распределения плотности тока по высоте проводящей вставки боковой стенки одинаков независимо от соотношения геометрических размеров ванны и элементов составной стенки: в верхнюю часть проводящей вставки ток стекает, с нижней части стекает (рис. 4). Доля тока, затекающего на верхний проводящий участок, и расположение «точки поворота» тока на нём зависят от коэффициента заполнения камеры  $K = d/d_k$ , заглубления электрода  $h^*$ , и высоты проводящей вставки  $h^*_{\text{вст}}$ . В результате в средней части вставки абсолютные значения нормальной составляющей плотности тока невелики, что приводит к образованию «холодной» зоны вблизи этой части поверхности. На краях проводящей вставки нормальная составляющая плотности тока имеет наибольшие абсолютные значения, что определяет повышенное выделения мощности вблизи них. Это сопровождается локальным увеличением температуры и снижением стойкости футеровки. На рис. 5 приведена картина распределения относительной объемной мощности в камере прокаливания для непроводящей стенки с изолированной проводящей вставкой.

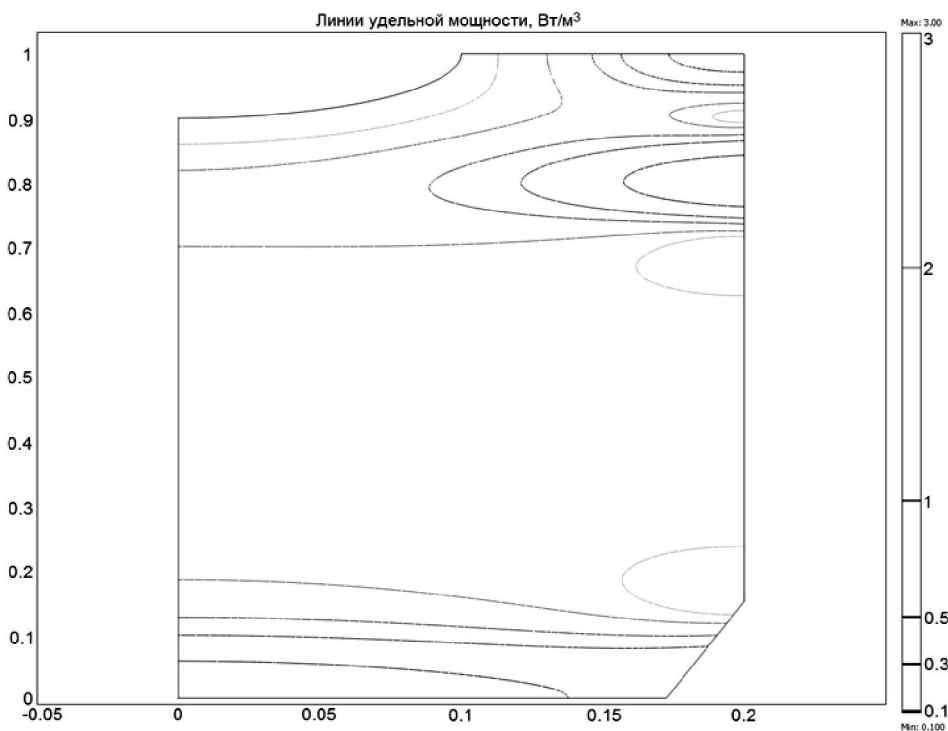


Рис. 5. Картина линий равных значений удельной объемной мощности

На рис. 6 показана зависимость нормальной составляющей плотности тока вдоль внутренней поверхности нижнего кольцевого электрода. Как вид-

но, плотность тока распределена по поверхности нижнего электрода неравномерно. Большая часть тока затекает в верхнюю часть внутренней поверхности кольцевого электрода, что говорит о неэффективном использовании площади его поперечного сечения.

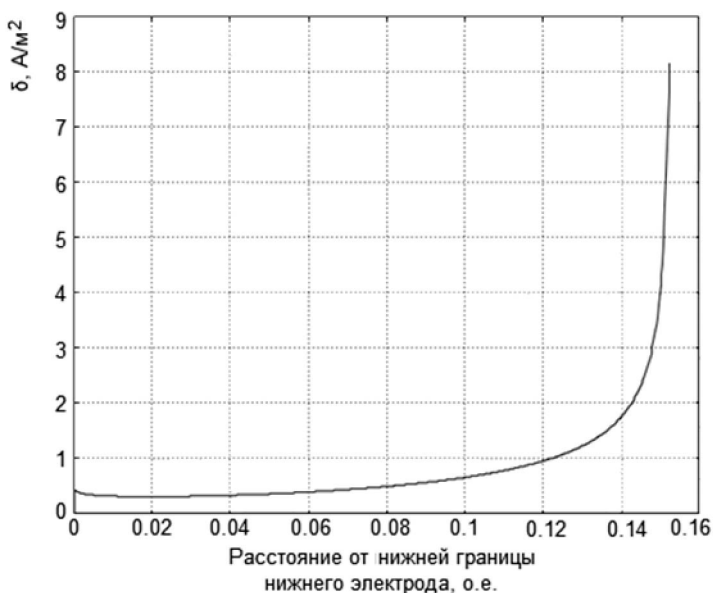


Рис. 6. Распределение нормальной составляющей плотности тока  $\delta$  по внутренней поверхности нижнего электрода

Для оценки степени неравномерности распределения удельной объемной мощности по объёму камеры прокаливания в работе предложен статистический показатель – нормированное среднеквадратичное отклонение относительной объемной мощности, выделяющейся в камере, от равномерно распределенной мощности

$$\sigma_{p_v}^* = \sqrt{\frac{1}{V_k} \int_{V_k} \left( \frac{p_v}{p_{vcp}} - 1 \right)^2 dv},$$

где  $V_k$  – объём камеры прокаливания;  $p_v = \frac{|\delta^2|}{\gamma}$  – удельная объемная мощность,

$\delta$  – вектор плотности тока электрического поля;  $p_{vcp} = \frac{P_{vк}}{V_k}$  – средняя мощность, равномерно распределённая по объёму камеры.

На рис. 7 показаны зависимости нормированного среднеквадратичного отклонения относительной объемной мощности от заглубления верхнего электрода для различных конструкций боковой стенки. С увеличением заглубления электрода  $h^*$  в камере с проводящей стенкой распределение мощ-

ности становится более равномерным, что характеризуется уменьшением нормированного среднеквадратичного отклонения относительной объёмной мощности  $\sigma_{pv}^*$ . Для непроводящей стенки, наоборот, с увеличением заглубления электрода  $h_3^*$ , нормированное среднеквадратичное отклонение относительной объёмной мощности  $\sigma_{pv}^*$  возрастает, что говорит об усилении неравномерности распределения. В камере прокаливания с проводящей вставкой в боковой стенке при заглублениях электрода ниже нижней границы проводящей вставки изменение среднеквадратичного отклонения практически совпадает с аналогичным изменением для непроводящей стенки.

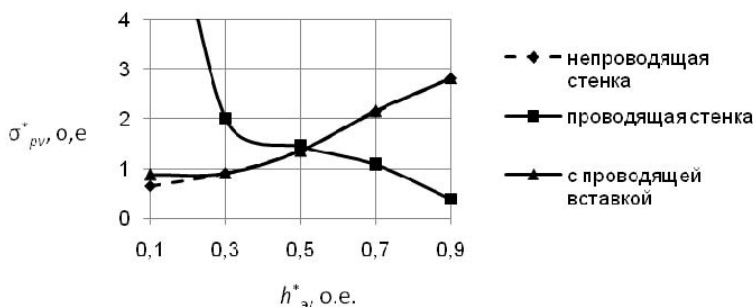


Рис. 7. Зависимости показателя неравномерности распределения объёмной мощности от заглубления электрода

Сравнивая значения показателя неравномерности распределения мощности  $\sigma_{pv}^*$ , можно отметить, что его наименьшие значения наблюдаются в камере с проводящей стенкой при большом заглублении верхнего электрода ( $h_3^* > 0,75$ ). Однако, как было установлено ранее, сопротивление камеры при этом минимально, что характеризует низкие энергетические показатели работы установки (низкий КПД,  $\cos \varphi$ , большие потери в короткой сети). Поэтому такая конструкция боковой стенки непригодна для эксплуатации в кальцинаторе. Несколько большие значения показателя неравномерности распределения удельной объёмной мощности наблюдаются при использовании непроводящей боковой стенки и небольшого заглубления верхнего электрода. Вместе с тем сопротивление камеры при этом имеет наибольшие значения. Введение в боковую стенку электрически изолированной проводящей вставки не улучшает равномерность распределения объёмной мощности.

**Выводы.** 1. При принятых допущениях для электрического поля камеры прокаливания кальцинатора построена математическая модель с целью исследования его характеристик.

2. Предложен показатель оценки неравномерности распределения объёмной мощности по объёму ванны электродных установок.

3. С использованием компьютерного приложения COMSOL Multiphysics и предложенного статистического показателя неравномерности распределения объёмной мощности исследовано влияние конструкции боковой стенки камеры прокаливания электрокальцинатора ИЭТ-10 на её электрические характери-

ки: сопротивление, распределение объемной мощности и распределение нормальной составляющей плотности тока по ограничивающим поверхностям.

4. Для кальцинатора ИЭТ-10 лучшим решением, обеспечивающим большую равномерность распределения объемной мощности в камере прокаливания, является применение непроводящей стенки из диэлектрического материала. Заглубление электрода при этом должно составлять 1-2 радиуса верхнего электрода. Введение в боковую стенку электрически изолированной проводящей вставки не улучшает равномерность распределения объемной мощности.

#### Литература

1. А.с. 1203338 (СССР). Электропечь для высокотемпературной проковки материала / Ю.М. Миронов, В.А. Тарасов, А.Н. Ильгачёв, Н.Ю. Таврин В.П. Кондрашов. Оpub. в БИ № 1 07.01.1986.
2. А.с. 1499082 (СССР). Способ управления электрическим режимом установки для прокаливания материала / А.В. Абрамов, А.Н. Ильгачёв, Н.Ю. Таврин. Оpub. в БИ № 29 07.08.89.
3. Введение в ComsolMultiphysics: [Электронный ресурс] URL: <http://www.comsol.ru/documentation>.
4. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Metallurgy, 1988. 784 с.
5. Гасик М.И. Электроды рудовосстановительных электропечей. М.: Metallurgy, 1984. 248 с.
6. Ильгачёв А.Н., Тарасов В.А. Алгоритм расчета электрического поля и сопротивления ванны одноэлектродной печи с составной стенкой // Специальные вопросы электротермии: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1981. С. 83–88.

---

**ИЛЬГАЧЁВ АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([anikil47@mail.ru](mailto:anikil47@mail.ru)).

**КНЯЗЕВ ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – магистр по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», инженер-конструктор второй категории, ООО «Научно-исследовательский центр ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары ([guard21@mail.ru](mailto:guard21@mail.ru)).

---

A. ILGACHEV, V. KNYAZEV

#### CALCINING OVEN SIDEWALL CONSTRUCTION INFLUENCE ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ITS HEATING ENCLOSURE

*Key words: calcining oven, heating enclosure, conductive wall, non-conductive wall, resistance in criterion form, volume power distribution nonuniformity index.*

*The article describes mathematical models of calcining oven heating enclosure electric field for different sidewall constructions and taking into account bath material uniform conductivity. Estimation index of volume power distribution nonuniformity over heating enclosure volume is suggested. The article presents the investigation of construction sidewall and electrode embedding influence on the enclosure oven resistance and volume power distribution over it. It is proved that the best decision providing volume power distribution uniformity in the heating enclosure for IET-10 calcining oven with high technical factors of installation work is using a non-conductive wall made of dielectric material. In this connection electrode embedding should be 1-2 of upper electrode radius. Electrically insulated conductive insert placing into non-conductive wall does not improve volume power distribution uniformity.*

## References

1. Mironov Yu.M., Tarasov V.A., Ilgachev A.N., Tavrin N.Yu., Kondrashov V.P. *Elektropech' dlya vysokotemperaturnoi prokalki materiala* [Electrical furnace for high-temperature material heating]. Copyright certificate no. 1203338 (USSR), 1986.
2. Abramov A.V., Ilgachev A.N., Tavrin N.Yu. *Sposob upravleniya elektricheskim rezhimom ustanovki dlya prokalivaniya materiala* [Material heating installation electrical mode control method] Copyright certificate no. 1499082 (USSR) 1989.
7. *Vvedenie v Comsol Multiphysics: Elektronnyi resurs* [Introduction in Comsol Multiphysics: electronic resource]. Available at: <http://www.comsol.ru/documentation>.
1. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov* [Theory and Technology of ferroalloys production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 784 p.
2. Gasik M.I. *Elektrody rudovosstanovitel'nykh elektropechei* [Electrodes for ore-smelting electric furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, 248 p.
3. Ilgachev A.N., Tarasov V.A. *Algoritm rascheta elektricheskogo polya i soprotivleniya vannы odnoelektrodnoi pechi s sostavnoi stenкой* [Algorithm of calculating bath electrical field and resistance for mono-electrode furnace with composite wall]. *Spetsial'nye voprosy elektrotermii: sb. nauch. tr.* [The special questions of electroheat: collected papers]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 1981, pp. 83–88.

---

**ILGACHEV ANATOLII** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Electrotechnologies, Electric Equipment and Automated Operation Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary ([anikil47@mail.ru](mailto:anikil47@mail.ru)).

**KNYAZEV VADIM** – Master's Degree in the Trend of Training «Power Industry and Electrotechnics», Design Engineer of the Second Category, LLC «Cheboksary Electric Equipment Plant Research-and-Development Center» ([guard21@mail.ru](mailto:guard21@mail.ru)).

---

**Формат цитирования:** Ильгачёв А.Н., Князев В.А. Влияние конструкции боковой стенки кальцинатора на электрические характеристики его камеры прокаливания // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 87–96.



УДК 621.314.57

ББК 31.273

Г.И. КОРОБКО, М.П. ШИЛОВ, И.Г. КОРОБКО

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

**Ключевые слова:** дизель-генератор, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, автономный инвертор напряжения, система управления автономным инвертором напряжения, система стабилизации напряжения.

В статье рассмотрена функциональная схема системы управления и преобразователя частоты для дизель-генераторного агрегата с изменяемой частотой вращения. Представлены и описаны основные устройства разработанной схемы. Цель работы заключается в создании модели управления автономным инвертором напряжения (АИН) и силовой модели дизель-генератора с преобразователем частоты, что позволит в дальнейшем проводить исследования и анализ работы электроэнергетической системы с входящим в нее дизель-генератором изменяемой частоты вращения. Представлены описания различных вариантов управления АИН по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Рассмотрен классический метод ШИМ, в котором определены сопутствующие достоинства и недостатки. Описан метод ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой. Для данного метода представлена модель системы управления преобразователем частоты, разработанная в программе Matlab/Simulink, где определены основные преимущества перед классическим методом. Представлен модифицированный метод ШИМ с синусоидальной трапецией. Особенность данного метода заключается в отсутствии седлообразной формы управляющего сигнала, что характерно для ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой. Основными управляющими элементами приведенных методов ШИМ являются: блок формирования задающего сигнала (БФЗС) и модулятор длительности импульсов. Задача БФЗС заключается в формировании управляющих сигналов. Разработана силовая модель дизель-генератора с преобразователем частоты и системой управления АИН. На основе модели проведено имитационное моделирование и проанализированы два метода ШИМ с учетом основных критериев, которые позволяют оценить качество ШИМ для АИН с активно-индуктивной нагрузкой. Представлены осциллограммы разомкнутой и замкнутой системы стабилизации напряжения для двух методов ШИМ, оценивающие переходные процессы при включении нагрузки. Проведено сравнение полученных результатов, которые демонстрируют высокое быстродействие системы стабилизации напряжения и допустимые динамические отклонения. Для оценки линейного выходного напряжения при помощи блока Powergui проанализировано влияние выбора формы управляющего сигнала. Представлены результаты гармонического состава, по которым были оценены величины высших гармоник и коэффициенты нелинейных искажений.

**Введение.** Преобразователи частоты (ПЧ) находят свое применение во многих сферах электротехники и электроэнергетики. ПЧ включают в себя силовые преобразователи электрической энергии, а также регуляторы амплитуды и частоты выходного напряжения. Общим признаком силовых преобразователей напряжения является наличие в них силовых электронных ключей для коммутации электрических цепей при поступлении сигналов от системы управления. Совершенствование систем управления стимулирует широкое использование законов

управления инверторами напряжения, которые основаны на использовании широтно-импульсной модуляции. Характерной особенностью АИН является возможность не только широкого управления напряжением и частотой, но и получения формы выходного тока, близкой к синусоидальной [5]. Наряду с этим качество преобразования электрической энергии в данных преобразователях по большей части зависит от метода реализации ШИМ. Вследствие этого возникает необходимость проведения анализа ШИМ.

**Анализ и разработка систем управления преобразователя частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в составе судовой электроэнергетической станции.** На рис. 1 изображена функциональная схема преобразователя частоты с системой управления и нагрузкой.

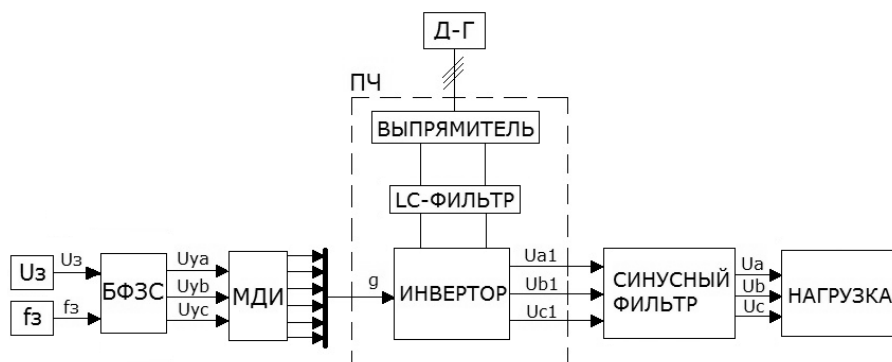


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частоты с системой управления и нагрузкой

Дизель-генератор с изменяемой частотой вращения (Д-Г) осуществляет питание ПЧ. Характерная особенность ПЧ заключается в способности работать при уменьшении частоты питающего напряжения на 25% от номинального значения. ПЧ выполнен по схеме с промежуточным звеном постоянного тока, основными элементами которого являются неуправляемый выпрямитель, сглаживающий LC-фильтр и инвертор напряжения с использованием широтно-импульсной модуляцией. В системе управления инвертором используется блок формирования задающего сигнала (БФЗС), на вход которого поступают сигналы задания амплитуды напряжения –  $U_z$  и частоты –  $f_z$ , изменяющиеся в диапазоне (0.9–1.1). БФЗС, получив на вход единичное значение задающего сигнала, формирует на своих выходах трехфазную систему управляющих сигналов  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$ , форма которых соответствует одному из законов управления широтно-импульсной модуляцией. С выходов БФЗС сигналы поступают на модулятор длительности импульсов (МДИ). МДИ преобразует сигналы  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$  в импульсы управления силовыми ключами –  $g$ , которые поступают на управляющий вход инвертора. Его выходное напряжение  $U_{a1}$ ,  $U_{b1}$ ,  $U_{c1}$  поступает на синусный фильтр, позволяющий сглаживать выходное напряжение с ПЧ до практически синусоидальной формы  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ , создавая наиболее благоприятные условия работы силового электрооборудования – нагрузки.

Прогресс в области преобразовательной техники обеспечивает высокое качество электрической энергии в сетях переменного тока. В связи с тем, что преобладающее количество способов управления преобразователями частоты создается на базе широтно-импульсной модуляции, выбор того или иного метода ШИМ, несомненно, влияет на качество преобразования электроэнергии. Основными методами управления АИН по принципу ШИМ являются классическая трехфазная ШИМ и ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой.

**«Классическая» трехфазная ШИМ.** Наиболее простым методом системы управления АИН по принципу ШИМ является классическая трехфазная ШИМ. Данный метод управления позволяет регулировать выходное напряжение в широких пределах, диапазон которого изменяется практически от нуля до максимальной величины. Эта величина устанавливается граничным значением постоянного напряжения, подаваемого на вход инвертора. Если величину постоянного напряжения принять за единицу, то на выходе инвертора значение амплитуды линейных напряжений составит 0,8453, это говорит о недостаточном использовании напряжения источника питания постоянного тока на 15,47% в связи с падением напряжения в элементах инвертора – диодах выпрямителя, сглаживающем фильтре, IGBT-транзисторах [4]. Отсюда следует, что задача повышения выходного напряжения инвертора является весьма актуальной. С целью повышения выходного напряжения инвертора теоретически можно применить следующие способы для компенсации пониженного напряжения: в частности, это использование генератора с большей мощностью. Если первоначально установлен генератор мощностью 100 кВА, то на выходе инвертора имеем пониженную величину напряжения. Компенсация потери передаваемой мощности в нагрузку реализуется путем установки нового генератора переменного тока мощностью 120 кВА с повышенным номинальным напряжением, т.е. переход от  $U_{ном} = 400$  В к  $U_{ном} = 460$  В, позволяющий поддерживать требуемую величину напряжения на номинальном уровне. Но более экономичным вариантом является использование вольтдобавочного устройства (ВДТ), которое позволяет компенсировать потерю напряжения в преобразователе и тем самым не увеличивать мощность источника электрической энергии [1]. Оба варианта обеспечивают выигрыш в использовании максимального напряжения на выходе инвертора.

**ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой.** При разработке источников энергии и силовых ключей самым важным является получение максимальной выходной мощности и КПД, а также сведение к минимуму массогабаритных показателей и стоимости. Для обеспечения номинальных параметров электроэнергии приходится пренебрегать синусоидальной формой управляющего сигнала, а именно переходить к седлообразной форме. Одним из действенных и вместе с тем доступных в реализации способов по формированию данного сигнала является предмодуляция посредством введения третьей гармоники в сигналы управления  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$ . Данная форма дает возможность увеличить амплитуду выходного напряжения  $U_m$  на 5–15% в отличие от классического метода. При этом спектральный состав выходного напряжения показывает эффективную фильтрацию высших гармоник.

При реализации ШИМ с предмодуляцией третью гармонику добавляют в отмеченном ниже соотношении [6]:

$$U_{yA} = \frac{K_M U_m}{\cos(\pi/6)} \{ \sin(\theta) + [1 - \cos(\pi/6)] \cdot \sin(3\theta) \};$$

$$U_{yB} = \frac{K_M U_m}{\cos(\pi/6)} \{ \sin(\theta - 4\pi/3) + [1 - \cos(\pi/6)] \cdot \sin(3\theta) \};$$

$$U_{yC} = \frac{K_M U_m}{\cos(\pi/6)} \{ \sin(\theta - 2\pi/3) + [1 - \cos(\pi/6)] \cdot \sin(3\theta) \};$$

где  $\cos(\pi/6)$  – коэффициент увеличения амплитуды основной гармоники с учётом добавления третьей гармоники;  $\theta$  – начальная фаза напряжения предмодуляции для данного интервала.

Начальная фаза  $\theta$  будет сдвинута на  $(4\pi/3)$  для второй и на  $(2\pi/3)$  для третьей фаз.

Для анализа ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой в пакете Matlab/Simulink была исследована модель системы управления преобразователя частоты, представленная на рис. 2.

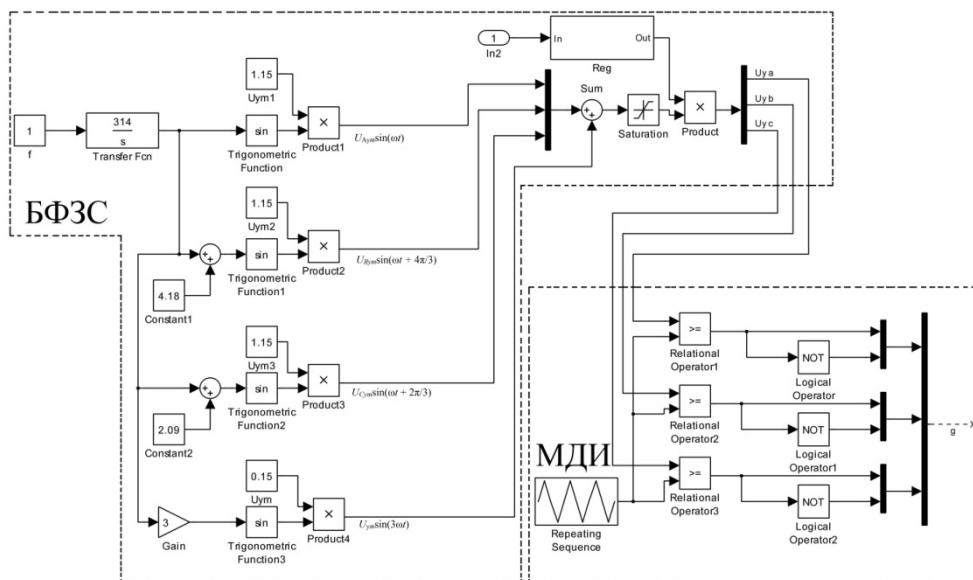


Рис. 2. Модель системы управления преобразователя частоты для ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой

При разработке модели использовались стандартные блоки библиотеки Simulink. В состав модели системы управления входят: БФЗС, представляющий собой трехфазный источник синусоидального напряжения, источник сигнала предмодуляции третьей гармоники, сумматор Sum этих сигналов, ограничитель Saturation и регулятор напряжения Reg. Трехфазный источник синусоидального напряжения работает следующим образом. Задание частоты

обеспечивает блок *f*. С выхода интегратора *Transfer Fcn* сигнал поступает на блок тригонометрической функции *sin*, тем самым являясь его аргументом, определяющим величину угловой частоты следования управляющих сигналов с частотой 50 Гц. Сигнал синусоидальной формы с выхода блока *sin* вместе с сигналом  $U_{ym1}$ , задающим величину амплитуды синусоиды, поступают на блок умножения *Product1*. Произведение этих сигналов будет формировать функцию  $U_{Aym}\sin(\omega t)$ , принадлежащей фазе А. Начальные фазы управляющих сигналов В ( $4\pi/3$ ) и С ( $2\pi/3$ ) задаются постоянными – *constant1* и *constant2*. Для фазы В сигнал имеет функцию  $U_{Bym}\sin(\omega t + 4\pi/3)$ , а фаза С, соответственно –  $U_{Cym}\sin(\omega t + 2\pi/3)$ . В сумматоре *Sum* складываются сигналы трехфазного источника  $U_{Aym}\sin(\omega t)$ ,  $U_{Bym}\sin(\omega t + 4\pi/3)$ ,  $U_{Cym}\sin(\omega t + 2\pi/3)$  с сигналом нулевой последовательности. В качестве сигнала нулевой последовательности используется сигнал третьей гармоники  $U_{ym}\sin(3\omega t)$ . Затем управляющие сигналы поступают на ограничитель. Ограничитель работает в диапазоне от  $-1$  до  $1$  и позволяет перейти от седлообразной формы к форме, близкой к трапецеидальной, тем самым увеличивая величину выходного напряжения АИН на 2%. На выходе БФЗС формируются три управляющих сигнала  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$ , близких по форме к трапецеидальной и сдвинутых на  $120^\circ$ , идущих на вход модулятора длительности импульсов. При уменьшении выходного напряжения АИН регулятор напряжения увеличивает амплитуду управляющих сигналов, тем самым регулируя напряжение питания нагрузки. Осциллограмма управляющих сигналов приведена на рис. 3.

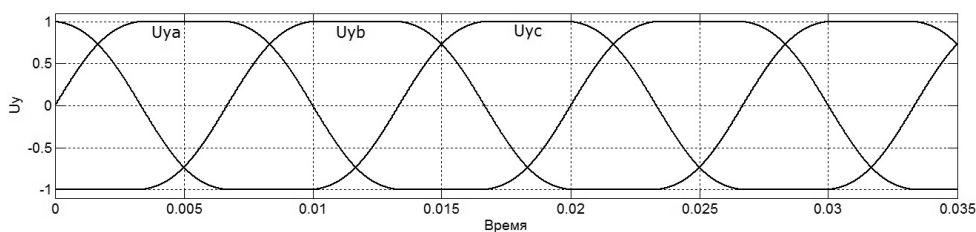


Рис. 3. Осциллограмма управляющих сигналов для ШИМ с предмодуляцией третьей гармоники

Блок *Repeating Sequence*, формирующий сигнал пилообразной формы, обеспечивает задающее значение несущей частоты коммутации IGBT-транзисторов, равное 10 кГц. В МДИ выполняется непрерывное сравнение трапецеидальных управляющих сигналов с сигналом пилообразной формы задающей частоты коммутации транзисторов. Таким образом на выходе МДИ генерируются шесть сигналов *g*, управляющие коммутацией IGBT-транзисторов силового инвертора.

**ШИМ с синусоидальной трапецией.** Альтернативный метод для ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой – это ШИМ с синусоидальной трапецией. Для исследования ШИМ в пакете *Matlab/Simulink* была разработана модель системы управления преобразователем частоты [3], представленная на рис. 4.

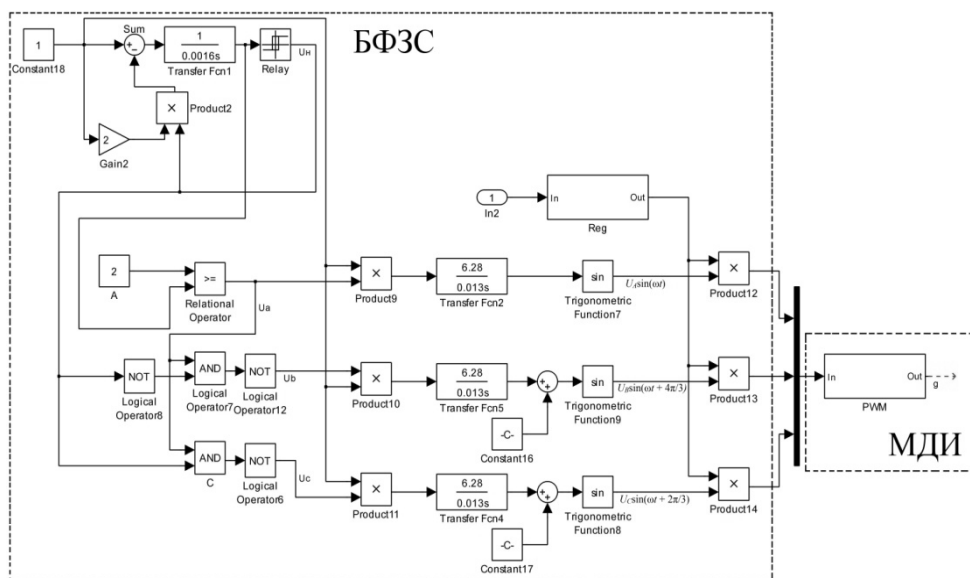


Рис. 4. Модель системы управления преобразователя частоты для ШИМ с синусоидальной трапецией.

При разработке модели использовались стандартные блоки библиотеки Simulink. Модель системы управления представляет собой трехфазный источник сигналов, близких к трапецеидальной форме. На положительный вход блока вычитания Sum поступает единичный сигнал. Этот сигнал вместе с сигналом Gain2, равным двум, задает частоту следования импульсов  $f = 100$  Гц и скважность  $S = 2$ . С помощью блока Sum формируется разность сигнала задания и удвоенного выходного сигнала  $U_n$ , представляющего собой сигнал прямоугольной формы. Выходное значение блока Sum поступает на вход интегратора Transfer Fcn1, на выходе которого формируется пилообразная форма сигнала, поступающая на входной порт блока Relay. Блок Relay выполняет функцию сравнения входного сигнала с заданным предельным значением, что позволяет выполнять переключение выходного сигнала между двумя установленными в параметрах величинами, тем самым формируя сигнал прямоугольной формы  $U_n$  с частотой  $f = 50$  Гц. Данный сигнал вместе с сигналом пилообразной формы поступает на группу логических элементов И, НЕ, осуществляющих формирование прямоугольных импульсов  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  для источника генерирования сигналов формы, близкой к трапецеидальной. В результате на выходе формируется трехфазная система управляющих сигналов, сдвинутых на  $120^\circ$ :  $U_A \sin(\omega t)$ ,  $U_B \sin(\omega t + 4\pi/3)$ ,  $U_C \sin(\omega t + 2\pi/3)$ . Для поддержания номинального выходного напряжения АИН используется регулятор напряжения Reg. Осциллограмма управляющих сигналов приведена на рис. 5.

Работа модулятора длительности импульсов в данном методе идентична работе ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой.

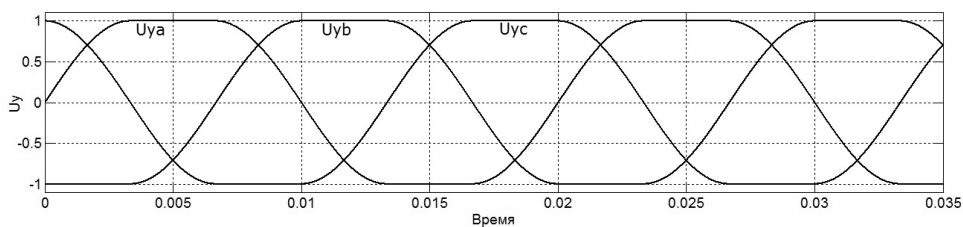


Рис. 5. Осциллограмма управляющих сигналов для ШИМ с синусоидальной трапецией

**Анализ систем управления преобразователя частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения.** Для анализа методов широтно-импульсной модуляции с использованием программного продукта Matlab была разработана модель дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и системой управления АИН [7], которая изображена на рис. 6.

При разработке модели использовались стандартные блоки из библиотек Simulink и SimPowerSystem. В качестве генератора использован явнополюсный синхронный генератор Synchronous Machine pu Fundamental мощностью  $S = 85$  кВА с номинальным напряжением на выходе 400 В и частотой 50 Гц. Напряжение на выходе генератора поддерживается за счет системы возбуждения, представленной блоком Excitation system. Напряжение возбуждения  $V_f$  формируется с учетом величины выходного напряжения генератора и задающего значения  $v_{ref}$ . Синхронный генератор приводится в действие дизелем Diesel, который формирует задание частоты вращения. Блок измерения measurement demux выдает текущие параметры генератора с выходного порта m (частота вращения вала генератора  $\omega_m$  и напряжения  $v_{s\_qd}$ ). Выходное напряжение генератора через сетевой дроссель Reactor подается на вход преобразователя частоты. ПЧ состоит из неуправляемого выпрямителя Rectifier, сглаживающего фильтра Filter в цепи постоянного тока, инвертора напряжения PWM IGBT Inverter и контроллера широтно-импульсной модуляции PWM.

На вход ШИМ-контроллера поступают управляющие сигналы с выхода системы управления Control system, соответствующие одному из законов ШИМ. Входными значениями Control system являются задатчик частоты напряжения Freq и выходное значение регулятора напряжения Voltage regulator. Voltage regulator имеет два входа – это задатчик эталонного значения амплитуды для выходного напряжения с преобразователя частоты и вход для сигнала обратной связи, позволяющий определить величину напряжения на нагрузке. Обратной связью регулятора напряжения служит сигнал с выхода блока измерения  $V_{abc\_Meter}$ .  $V_{abc\_Meter}$  состоит из трехфазного шестипульсного неуправляемого выпрямителя, делителя напряжения, понижающего выпрямленное напряжение до значения, равного 1В, и фильтра низких частот. Тем самым блок  $V_{abc\_Meter}$  формирует на выходе сигнал, пропорциональный выходному напряжению ПЧ, и позволяет уменьшить время восстановления напряжения при динамических процессах. К выходу ПЧ через Г-образный синусный фильтр с общей точкой LC Filter, подключена активно-индуктивная нагрузка Load. Блоки Total Harmonic Distortion и Active & Reactive Power предназначены для измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения и активно-реактивной мощности отдаваемой в нагрузку.

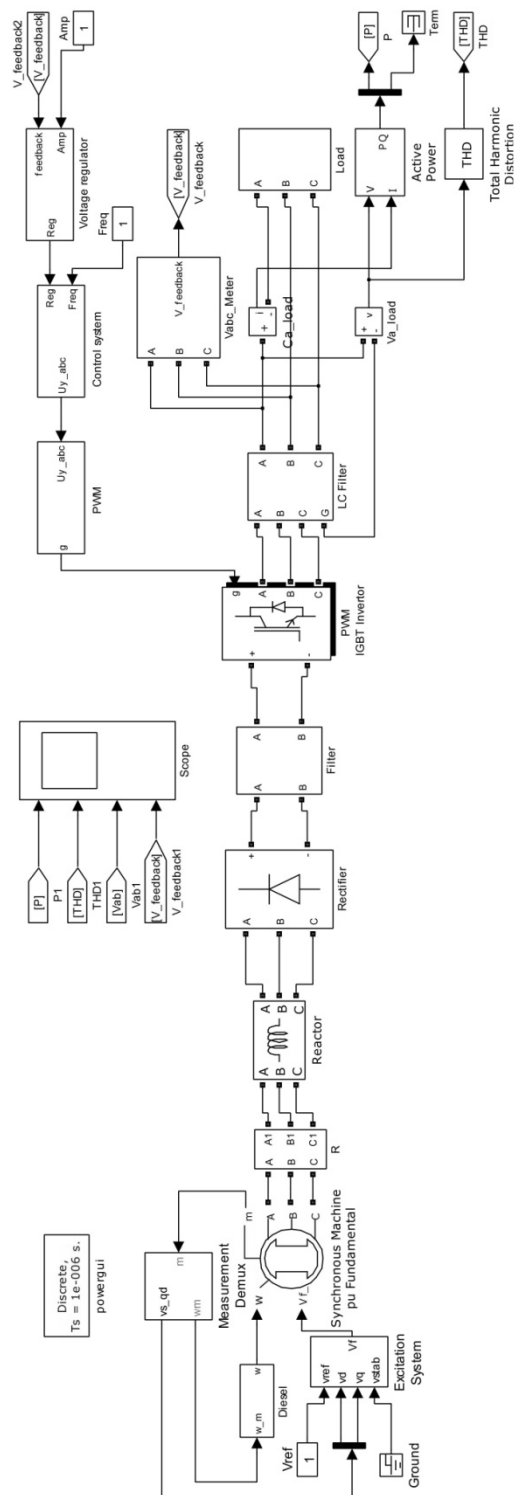


Рис. 6. Модель дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и системами управления



На рис. 7 представлены результаты моделирования электроэнергетической системы: изменение активной мощности (*a*), огибающие линейного напряжения  $U_{ab}$  в разомкнутой (*б*) и замкнутой (*в*, *г*) системах.

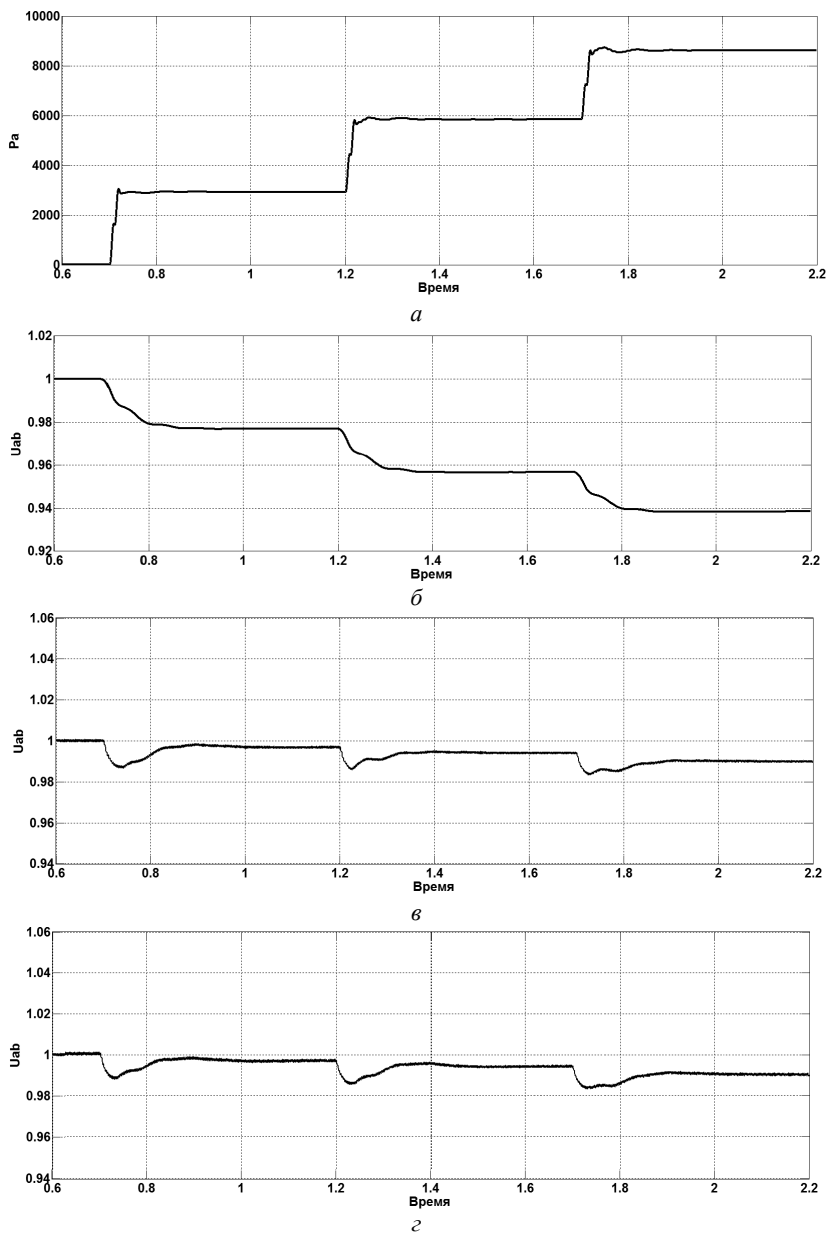


Рис. 7. Диаграммы изменения активной мощности (*a*) и огибающие линейного напряжения  $U_{ab}$  в разомкнутой (*б*) и замкнутой (*в*, *г*) системах

Моделирование производилось с использованием двух методов управления АИН по принципу ШИМ. На диаграммах (б, в) представлены огибающие напряжения ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой. На диаграмме (з) изображена огибающая напряжения с модифицированным алгоритмом – ШИМ с синусоидальной трапецией.

Нагрузка включается в следующие моменты времени:  $t = 0,7$  с,  $t = 1,2$  с,  $t = 1,7$  с. Полная мощность каждой нагрузки составляет  $S = 15$  кВА и  $\cos\varphi = 0,8$ . После включения трех нагрузок от 0 до 26,5 кВт (50% от активной мощности генератора) снижение напряжения в разомкнутой системе составляет приблизительно 6% из-за роста потерь в элементах ПЧ и LC-фильтре (рис. 7, б) [2]. Ошибка по статическому режиму в замкнутой системе при загрузке до 50% составляет 1% (рис. 7, в, з). Как видно из диаграмм, статические процессы двух законов управления ШИМ идентичны. Однако динамические процессы несколько отличаются. При включении нагрузки динамическое отклонение равно 1,3% (рис. 7, в). Применение ШИМ с синусоидальной трапецией снижает величину динамического отклонения до величины 1,1% (рис. 7, з). На основании представленных диаграмм можно отметить, что регулятор напряжения демонстрирует высокое быстродействие, время переходного процесса которого составляет  $t = 0,15$  с.

Для оценки качества работы законов ШИМ проведено моделирование замкнутых систем регулирования напряжения, результаты которого представлены на рис. 8.

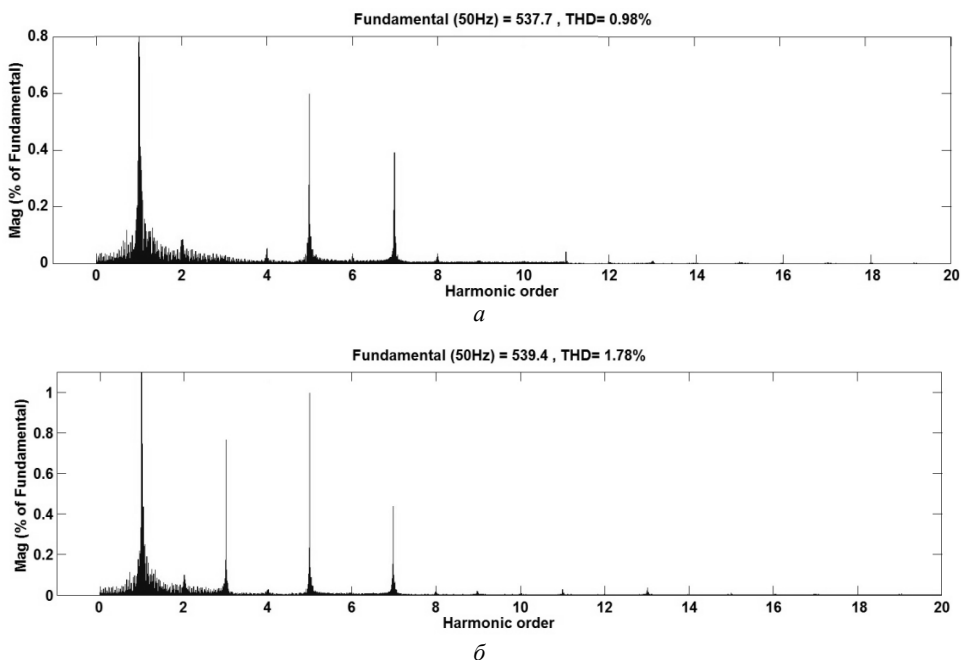


Рис. 8. Результаты моделирования ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой (а) и ШИМ с синусоидальной трапецией (б)

Применение метода ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой позволяет добиться невысокого коэффициента нелинейных искажений и достигает 0,98% (рис. 8, *а*). Анализ гармонического состава показывает снижение величины высших гармоник и отсутствие гармоник кратных трем. В данном методе наибольшее значение имеют пятая и седьмая гармоники, что незначительно влияет на искажение линейного выходного напряжения АИН.

Применение альтернативного метода – ШИМ с синусоидальной трапецией – увеличивает величину коэффициента нелинейных искажений. Для оценки величины высших гармоник представлены результаты анализа блока Powergui, где видно, что  $K_{ни} = 1,78\%$  (рис. 8, *б*). Благодаря использованию данного способа управления выходное напряжение с преобразователя частоты содержит только нечетные гармоники.

**Выводы.** Предложенная модель дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и системой управления АИН позволяет производить имитационное моделирование с различными методами широтно-импульсной модуляции. Анализ динамических свойств модели с замкнутой системой регулирования напряжения показал высокое быстродействие стабилизации напряжения. За счет использования замкнутой системы напряжение на нагрузке близко по величине к напряжению на зажимах генератора.

Исследование показало, что и метод ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, и ШИМ с синусоидальной трапецией дают оптимальные параметры и форму напряжения на нагрузке, близкую к синусоидальной. С учетом гармонического состава наиболее благоприятной является ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, в которой коэффициент нелинейных искажений менее 1%. Применение систем управления с синусоидальной трапецидальной формой ШИМ позволяет увеличить напряжение на выходе ПЧ примерно на 2% по сравнению с таковым при использовании ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой.

Применение преобразователей частоты с оптимальной ШИМ предоставит возможность широкого применения дизель-генераторов, частота вращения которых может изменяться до 75% от номинального значения.

#### Литература

1. *Климаш В.С.* Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием. Владивосток: Дальнаука, 2002. 140 с.
2. *Коробко Г.И., Хватов О.С., Коробко И.Г.* Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 1. С. 55–61.
3. *Лазарев Ю.М.* Моделирование процессов и систем в Matlab. СПб.: Питер; Киев: ВНУ, 2005. 512 с.
4. *Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е.* Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 7. С. 23а–31.
5. *Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А.* Силовая электроника. М.: ИД МЭИ, 2007. 632 с.
6. *Чаплыгин Е.Е.* Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. М.: Изд-во МЭИ, 2009. 56 с.
7. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

---

**КОРОБКО ГРИГОРИЙ ИВАНОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, Волжский государственный университет водного транспорта, Россия, Нижний Новгород (Tv-out@narod.ru).

**ШИЛОВ МАКСИМ ПЕТРОВИЧ** – аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, Волжский государственный университет водного транспорта, Россия, Нижний Новгород (MaksimShilov1@yandex.ru).

**КОРОБКО ИВАН ГРИГОРЬЕВИЧ** – инженер, Нижегородский инженеринговый центр ООО «Электро Лэнд», Россия, Нижний Новгород (Tv-out@narod.ru).

---

**G. KOROBKO, M. SHILOV, I. KOROBKO  
DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS  
OF FREQUENCY CONVERTER FOR DIESEL GENERATOR  
WITH VARIABLE FREQUENCY ROTATION  
AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS**

**Key words:** diesel generator, frequency converter, pulse-width modulation, autonomous voltage inverter, AVI controls system, voltage stabilization system.

*The article describes the functional diagram of the control system and frequency converter for a diesel generator set with variable speed. The basic devices of the developed circuit are presented and described. The aim of the work is to create a model of control of an autonomous voltage inverter (AVI) and a power model of a diesel generator with a frequency converter, which will allow further research and analysis of the operation of an electric power system with a variable speed rotation diesel generator. Descriptions of various options for controlling the AVI according to the pulse width modulation principle (PWM) are presented. The classical PWM method is considered, in which the associated advantages and disadvantages are defined. The PWM method with third harmonic premodulation is described. For this method, a model of a frequency converter control system is presented. It is developed in the Matlab Simulink program, where the main advantages over the classical method are determined. A modified PWM method with a sine trapezoid is presented. The peculiarity of this method is the absence of a saddle-shaped control signal, which is typical of PWM with third harmonic premodulation. The main control elements of the above PWM methods are the master signal generation unit (MSGU) and the pulse duration modulator (PDM). The task of MSGU is to form control signals. A power model of a diesel generator with a frequency converter and an AVI control system has been developed. On the basis of the model, simulation modeling was performed and two PWM methods were analyzed, taking into account the main criteria that allow evaluating the quality of PWM for AVI with active-inductive load. Oscillograms of open-loop and closed-loop voltage stabilization systems are presented for two PWM methods, estimating transients when the load is turned on. Comparison of the results obtained, which demonstrate the high performance of the voltage stabilization system and the permissible dynamic deviations is made. To assess the linear output voltage using the Powergui block, the effects of the shape of the control signal are analyzed. The paper presents the results of the harmonic composition, by which the values of higher harmonics and nonlinear distortion coefficients were estimated.*

References

1. Klimash V.S. *Vol'todobavochmyye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impul'snym i fazovym regulirovaniyem* [Booster devices for compensation of voltage and reactive energy deviations with amplitude, pulse and phase control]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2002, 140 p.
2. Korobko G.I., Khvatov O.S., Korobko I.G. *Razrabotka i modelirovaniye dizel'-generatora s izmenyayemoy chastotoy vrashcheniya v sudovoy yedinoy elektroenergeticheskoy sisteme* [Develop-

ment and simulation of a diesel generator with variable speed in the ship's unified electric power system]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Energy University], 2017, no. 1, pp. 55–61.

3. Lazarev Yu.M. *Modelirovaniye protsessov i sistem v Matlab* [Modeling of processes and systems in Matlab]. St. Petersburg, Piter Publ., Kiev, BHV Publ., 2005, 512 p.

4. Obukhov S.G., Chaplygin Ye.Ye., Kondrat'yev D.Ye. *Shirotno-impul'snaya modulyatsiya v trekhfaznykh invertorakh napryazheniya* [Pulse width modulation in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2008, no. 7, pp. 23a–31.

5. Rozanov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, MEI Publ. House, 2007, 632 p.

6. Chaplygin Ye.Ye. *Spektral'noye modelirovaniye preobrazovateley s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey* [Spectral modeling of converters with pulse-width modulation]. Moscow, MEI Pul., 2009, 56 p.

7. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystem i Simulink* [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystem and Simulink]. Moscow, DMK Press, 2007, 288 p.

---

**KOROBKO GREGORIY** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Volga State University of Water Transport, Russia, Nizhny Novgorod (Tv-out@narod.ru).

**SHILOV MAKSIM** – Post-Graduate Student, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Volga State University of Water Transport, Russia, Nizhny Novgorod (MaksimShilov1@yandex.ru).

**KOROBKO IVAN** – Engineer, Nizhny Novgorod Engineering Center of LLC Electro Land., Russia, Nizhny Novgorod (Tv-out@narod.ru).

---

**Формат цитирования:** Коробко Г.И., Шилов М.П., Коробко И.Г. Разработка систем управления преобразователем частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и их сравнительный анализ // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 97–109.

УДК 621.316.91

ББК 31.247

М.И. КОЩЕЕВ, А.Л. СЛАВУТСКИЙ, Л.А. СЛАВУТСКИЙ

## ПРОСТЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТИ

*Ключевые слова:* нейронные сети, определение места повреждения, переходные процессы, волновой метод, энергосистема.

*Волновой метод определения места повреждения (ОМП) в энергосистеме (линиях электропередач) основан на точной фиксации момента времени, соответствующего началу переходного процесса. При быстром развитии цифровых технологий метод находит все более широкое применение. В работе предлагается ОМП на основе простых нейросетевых алгоритмов. Используется искусственная нейронная сеть (ИНС) прямого распространения, обученная с помощью метода обратного распространения ошибки и с минимальным количеством нейронов. Это позволяет упростить и ускорить процесс ее обучения, для которого использованы результаты моделирования переходных процессов в линиях электропередач методом синтетических схем. Показано, что задача ОМП может решаться в два этапа: приблизительное определение поврежденного участка на основе записей с традиционной частотой оцифровки 0,6–2,4 кГц, а затем при наличии в измерительных органах «высокочастотного» (от 0,5 МГц) аналого-цифрового преобразователя с циклически обновляемым буфером ОМП при помощи ИНС может в «отложенном времени» осуществляться с соответствующим разрешением в сотни, и даже десятки, метров. Это связано с принципиальной возможностью получить временное разрешение при определении «фронта» переходного процесса во временном интервале, длительность которого на порядок меньше периода дискретизации.*

**Введение.** Развитию методов определения места повреждения (ОМП) в линиях электропередач (ЛЭП) посвящено значительное число исследований [13, 20]. Традиционно задача решается на основе анализа параметров аварийных режимов [1, 2], в частности – на основе переходного сопротивления сети [6, 23]. Дистанционное ОМП в любом случае требует детального моделирования процессов в энергосистеме [3, 11], развития методов обработки сигналов [18, 19] для распознавания режимов, выделения аварийных режимов на фоне коммутаций и т.д. [4, 8, 9].

В связи со стремительным развитием цифровых технологий и возможностью получения записей сигналов токов и напряжений с высоким временным разрешением, быстро развиваются волновые методы ОМП, основанные на теории длинных линий [14, 16] и определении момента начала (фронта) переходного процесса [17, 24, 25]. Задачи дистанционного ОМП на магистральных ЛЭП принято разделять на одно- и двухсторонние, требующие временной синхронизации работы измерительных органов и автоматики [7].

В настоящей работе для определения момента времени начала переходного процесса предлагается применение аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [5]. Используется ИНС прямого распространения с обратным распространением ошибки и минимальным количеством нейронов [10, 21, 22]. Для обучения ИНС необходимо моделирование большого числа

режимов энергосистемы, поэтому точность ОМП в значительной степени определяется не только дискретизацией сигналов, но и точностью численного моделирования переходных процессов. Для соответствующих расчетов использован алгоритм Доммеля (метод синтетических схем) [15].

**Моделирование переходных процессов в ЛЭП.** Рассмотрим пример моделирования переходных процессов при коротком замыкании на высоковольтной линии электропередач (ВЛ) номинального напряжения 110 кВ между двумя подстанциями (ПС1 и ПС2, рис. 1, *a*). Протяженность линии составляет 114,2 км. Марка провода: АС-150/24, тип опор линии: ПБ110-15. Моделировались трехфазные и однофазные короткие замыкания (КЗ) на землю в различных местах ВЛ.

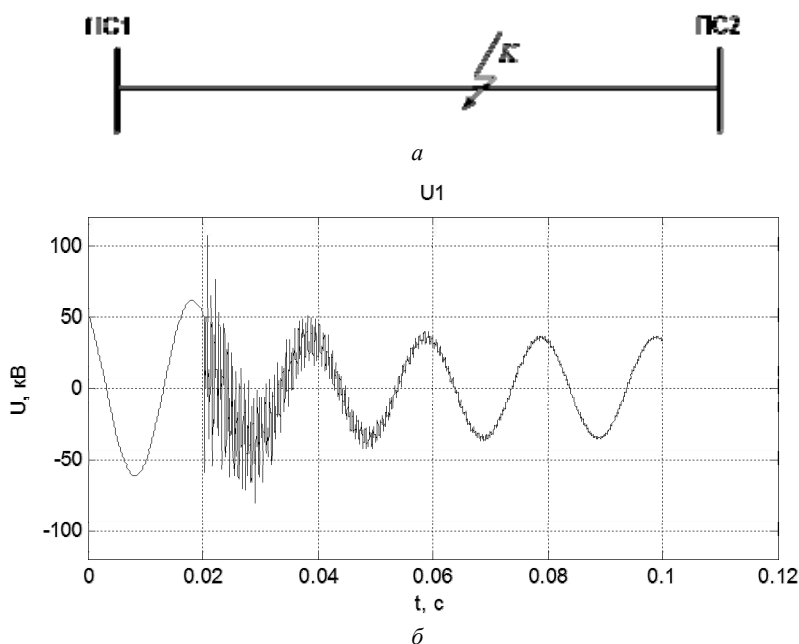


Рис. 1. Схематическое изображение места замыкания на исследуемой ВЛ (*a*) и осциллограмма напряжения на одной из фаз при трехфазном замыкании (*б*)

Пример осциллограммы напряжения на одной из фаз при трехфазном замыкании в точке *K* показан на рис. 1, *б*. Переходный процесс при возникновении КЗ характеризуется возникновением широкого спектра высокочастотных колебаний на собственных частотах возникающих RLC-контуров. Амплитуда колебаний напряжения часто сопоставима с амплитудой напряжения основной частоты, соответствующие колебания проявляются, в меньшей степени, и в осциллограммах тока.

Для исследования переходных процессов в ЛЭП составлялись две модели с разными длинами участков, каждый из которых заменялся эквивалентными П-схемами. Одна модель составлена при разделении ВЛ на участки по 10 км, вторая – при разделении на участки по 1 км.

Примеры спектров сигналов, полученных на моделях разной степени точности, показаны на рис. 2. Как видно из него, на частотах выше 10 кГц модель с участками по 10 км не имеет собственных частот колебаний, поскольку не образуется замкнутых RLC-контуров, способных колебаться на таких частотах.

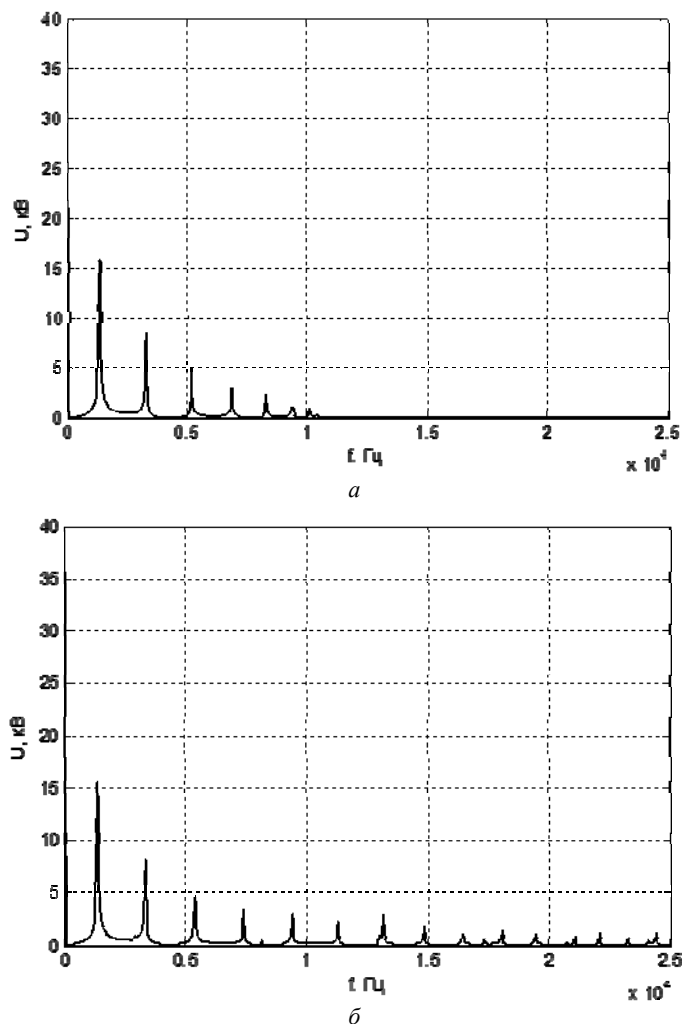


Рис. 2. Спектр напряжения в фазе С при трехфазном коротком замыкании в точке К для модели с разбиением ВЛ на участки по 10 км (а) и 1 км (б)

Небольшая разница в спектре на частотах от 5 до 10 кГц может быть вызвана шунтированием одних RLC-контуров другими в модели с участками по 1 км. Кроме того, можно видеть более быстрое затухание амплитуд гармоник в спектре модели меньшей точности. В целом по результатам моделирования спектральный состав напряжения при КЗ состоит из гармоник в полосе до 20–30 кГц.

**Нейросетевой алгоритм.** Для оценки возможностей предлагаемых нейроалгоритмов для ОМП ИНС обучалась по искусственно созданной выборке из



1000 строк. В каждой строке указаны значения сигналов в  $N$  точках, количество которых соответствует частоте дискретизации, а также момент времени  $t_a$ , в который начинается аномалия (переходный процесс) в сигнале. Для проведения оценок оказывается достаточно временного интервала, соответствующего одному периоду синусоидального напряжения, включающего начало переходного процесса (см. рис. 3, *а*).

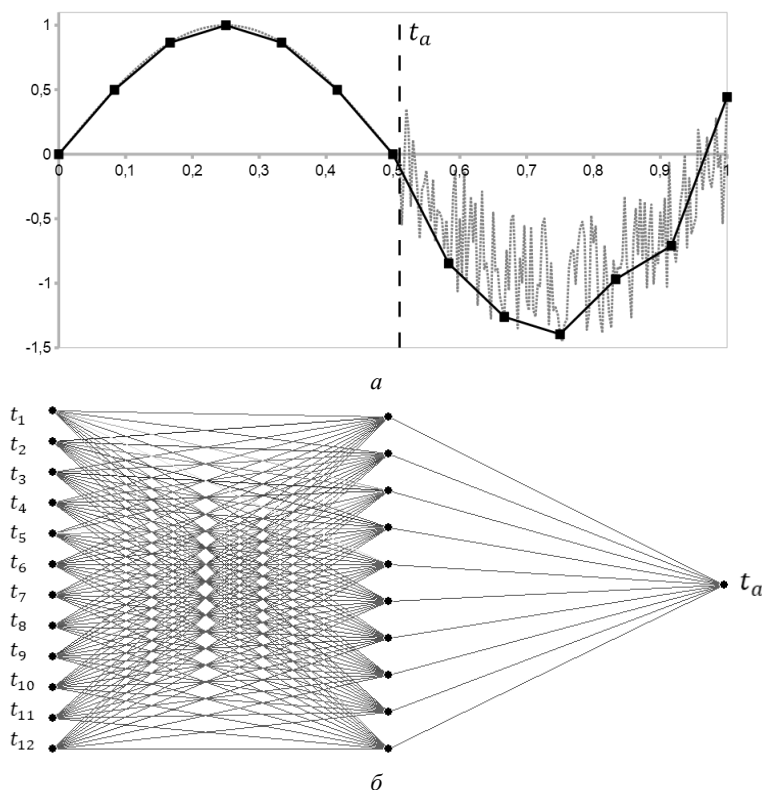


Рис. 3. Пример записи на входе ИНС (*а*) и схема ИНС-модели (*б*).

На рис. 3 приведены примеры сигнала для обучения ИНС и ее структура. До начала переходного процесса сигнал соответствует чистому синусу на частоте 50 Гц. При возникновении аномалии (переходного процесса) в сигнал, в данном случае, добавляется случайный шум с полосой до 15 кГц, что соответствует данным моделирования рис. 2. Максимальная амплитуда шума сопоставима с амплитудой сигнала основной частоты. В данном случае она составляет половину амплитуды сигнала основной частоты. Шум и время возникновения аномалии имеют равномерное случайное распределение. Необходимо отметить, что такие условия для обучения ИНС заведомо хуже, чем условия, когда спектр переходного процесса имеет дискретный характер, соответствующий КЗ на ВЛ (рис. 2).

На рис. 3, *а* показан сигнал с традиционной для цифровых измерительных органов (ЦИО) частотой оцифровки 12 точек на период. На рис. 3, *б* пред-

ставлена используемая структура ИНС. В ней один скрытый слой с 10 нейронами, 12 входными нейронами и 1 выходным нейроном. На входные нейроны подаются сигналы, соответствующие временным отсчетам ( $t_n$ ). На выходе ИНС – момент возникновения переходного процесса ( $t_a$ ).

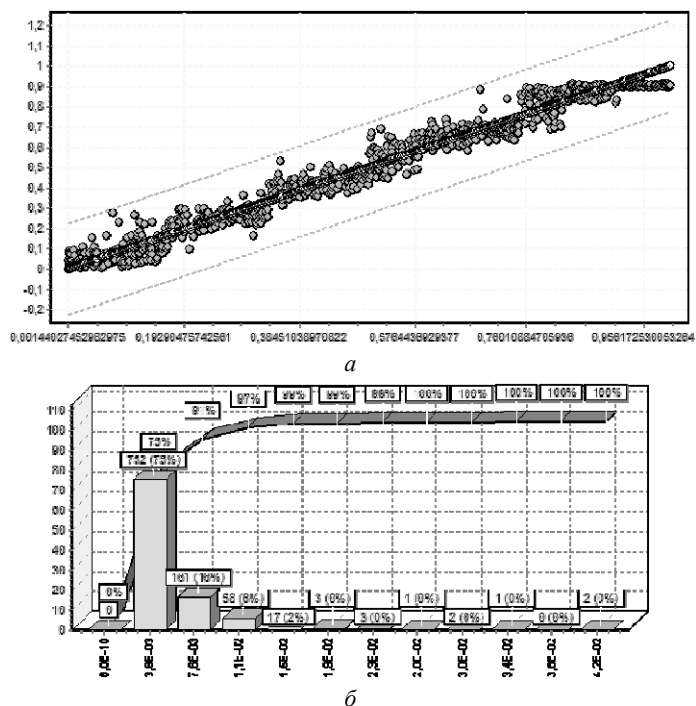


Рис. 4. Диаграмма рассеяния (пунктирными линиями показана 5%-ная среднеквадратичная ошибка) (а) и гистограмма распределения среднеквадратичной ошибки (б)

На рис. 4, а и б представлены диаграмма рассеяния и гистограмма распределения среднеквадратичной ошибки, полученные в результате обучения ИНС со структурой, показанной на рис. 3. Из данных, представленных на рис. 4, следует, что при распознавании 100% связей (вычислительных путей) между нейронами ошибка в определении момента начала переходного процесса не превышает 5%.

Следовательно, при частоте оцифровки сигнала 600 Гц с учетом данных рис. 3 (ошибка при распознавании 100% связей < 5%) ИНС позволяет определить момент начала переходного процесса с разрешением порядка 100 мкс ( $\left[\frac{1}{600}\right] \cdot 0,05 = 8,33 \cdot 10^{-5}$ ). Эти данные могут использоваться для ОМП «первого приближения». Приведенная оценка является грубой, однако необходимо учитывать, что среднеквадратичное отклонение у 75% примеров, на которых проводилось обучение и тестирование ИНС, не превышает 0,4% (см. гистограмму рис. 4).

**Выводы.** Таким образом, в работе на простом примере показана возможность использования нейросетевых алгоритмов для определения места повреждения волновым методом. При адекватном обучении простейшей ИНС на основе моделирования переходных процессов в ЛЭП начало «фронта» переходного процесса при ОМП может быть зафиксировано на временном интервале, по крайней мере на порядок меньшем периода дискретизации сигналов. То есть при частоте оцифровки 1 МГц и распределении ошибок при обучении и тестировании ИНС в пределах 5–10% (см. рис. 4) временное разрешение ОМП может теоретически составлять 0,05–0,1 мкс. Это соответствует пространственному разрешению в десятки метров.

Предложенный подход может, по-видимому, использоваться совместно с другими методами ОМП в «отложенном времени». Например, при наличии в измерительных органах «быстродействующего» аналого-цифрового преобразователя с циклически обновляемым буфером. Запись сигнала из такого буфера, соответствующего аварийному процессу на интервале до 1 мс (что возможно обеспечить в реальном времени современными средствами), оцифрованная с частотой 0,5–1 МГц, может использоваться для уточнения места повреждения с помощью предлагаемого алгоритма.

Подход не исключает комбинированного использования традиционных и волновых методов ОМП, как и применение ИНС более сложной архитектуры, рассчитанных на анализ динамических процессов [5, 12].

#### Литература

1. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат. 2003. 272 с.
2. Арцишевский Я.Л., Арслан Жамсран Метод повышения точности определения мест повреждения элементов электрической сети путем уточнения ее параметров // Вестник Московского энергетического института. 2007. № 1. С. 64–71.
3. Законьшек Я., Славутский А.Л. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени // Релейная защита и автоматизация. 2012. №1. С. 66–72.
4. Козлов В.Н., Бычков Ю.В., Ермаков К.И. О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 1. С. 42–46.
5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 382 с.
6. Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М. Диагностический комплекс по исследованию линий электропередач // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2007. № 7-8. С. 17–22.
7. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 137–146.
8. Лямец Ю.Я., Белянин А.А., Воронов П.И. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 4. С. 11–16.
9. Лямец Ю.Я., Худельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б., Законьшек Я. Распознаваемость повреждений электропередачи, ч. 1, 2, 3 // Электричество. 2001. № 2. С. 16–23; № 3. С. 16–24; № 12. С. 9–22.
10. Славутская Е.В., Аbruков В.С., Славутский Л.А. Нейросетевой системный анализ уровней психологических характеристик // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 164–173.
11. Славутский А.Л., Пряников В.С., Славутский Л.А. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с трехобмоточным трансформатором на разных уровнях напряжения // Электротехника. 2017. № 7. С. 20–24.

12. Сучков В.О., Ядарова О.Н., Славутский Л.А. Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока на основе искусственной нейронной сети // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 207–212.
13. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
14. Bewley L.V. Travelling waves on transmission systems. New York, John Wiley and Sons, 1933. 333 p.
15. Dommel H.W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. Pas-88, no. 4, pp. 388–399.
16. Elhaffar A.M. Power Transmission Line Fault Location Based on Current Travelling Waves: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology, Helsinki, 2008.
17. Kasztenny B., Guzman A., Mangapathirao V.M., Titiksha J. Locating Faults Before the Breaker Opens-Adaptive Autoreclosing Based on the Location of the Fault. Proc. of 44<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conf., 2017, pp. 1–15.
18. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N., Obratsov S.A., Ryzkin A.A., Shimina A.O. A Multifunctional Device for Recording the Monitoring of Electric Power Quality and for Fault Finding on Electric Transmission Lines. *Power technology and engineering*, 2014, vol. 47, no. 5, pp. 386–392.
19. Malathi V., Marimuthu N.S. Wavelet Transform and Support Vector Machine Approach for Fault Location in Power Transmission Line. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, vol. 39.
20. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location in Power Networks. 1<sup>st</sup> ed. New York, Springer-Verlag, 2010.
21. Slavutskaya E.V., Abrukov V.S., Slavutskii L.A. Simple neuro network algorithms for evaluating latent links of younger adolescent's psychological characteristics. *Experimental Psychology*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 131–142.
22. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models. Proc. of the Sci. Conf. «Society. Integration. Education», 2018, vol. 5, pp. 455–464. Available at: <http://dx.doi.org/10.17770/sie2018vol1.3348>.
23. Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gaikwad, Mahendra Patel. Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. *IEEE Access*, 2009, vol. 2.
24. Thomas D.W.P., Carvalho R.J.O., Pereira E.T. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. IEEE Bologna PowerTech Conf. Bologna, 2003.
25. Wang J., Liu X., Pan Z. A New Fault Location Method for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1070–1072, pp. 718–725.

---

**КОЩЕЕВ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ** – аспирант кафедры автоматике и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (maxkoshe5@gmail.com).

**СЛАВУТСКИЙ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ** – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела разработки программных продуктов, Обособленное подразделение ООО «Юнител Инжиниринг» в г. Чебоксары, Россия, Чебоксары (slavutskii@gmail.com).

**СЛАВУТСКИЙ ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры автоматике и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (lenya@slavutskii.ru)

---

M. KOSHCHEEV, A. SLAVUTSKIY, L. SLAVUTSKII

SIMPLE NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR WAVE METHOD  
OF FAULT LOCATION IN POWER NETWORKS

**Key words:** neural networks, fault location, transients, wave method, power system.

*The wave method for the fault location in the power system (power networks) is based on the exact fixation of the time corresponding to the beginning of the transition process. With the*

fast development of digital technology the method is increasingly applied. The paper proposes the fault location on the basis of the simple neural network algorithms. The feed forward artificial neural network (ANN) with back error propagation and a minimum number of neurons is used. This allows to minimize and accelerate the process of its training, for which the results of transients simulation in power networks by means of Dommel's algorithm are applied. It is shown that the problem of fault location can be solved in two stages: approximate determination of the fault area on the basis of records with the traditional digitization frequency of 0,6–2,4 kHz, and then, in the presence of «high-frequency» (from 0,5 MHz) analog-to-digital converter with a cyclically updated buffer, by means of ANN fault location can be carried out with the appropriate resolution of hundreds, and even tens of meters in the "delayed time". This is due to the key possibility to obtain a temporary resolution in determining the "front" of the transition process in the time interval which duration is an order of magnitude less than the sampling period.

### References

1. Shuin V.A., ed., Arzhannikov E.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikhanov M.Sh. *Opređenje mesta korotkogo замыкания на высоковольтных линиях электропередачи* [Detection of short circuit location on high-voltage power lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003, 272 p.
2. Artsishevskii Ya.L., Arslan Zhamsran *Metod povysheniya tochnosti opredeleniya mest povrezhdeniya elementov elektricheskoi seti putem utochneniya ee parametrov* [The method of improving the accuracy of determining the locations of damage to the electrical network elements by clarifying its parameters]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Bulletin of the Moscow Energy Institute], 2007, no. 1, pp. 64–71.
3. Zakon'shek Ya., Slavutskii A.L. *Tsifrovoe modelirovanie sovremennykh energosistem v real'nom vremeni* [Digital simulation of real-time power systems]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automatization], 2012, no. 1, pp. 66–72.
4. Kozlov V.N., Bychkov Yu.V., Ermakov K.I. *O tochnosti sovremennykh ustroystv OMP* [About accuracy of modern devices for network damage location]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automatization], 2016, no. 1, pp. 42–46.
5. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye neironnye seti. Teoriya i praktika* [Neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya Telekom Publ., 2001, 382 p.
6. Kulikov A.L., Petrukhin A.A., Kudryavtsev D.M. *Diagnosticeskii kompleks po issledovaniyu linii elektroperedach* [Diagnostic complex for the study of power lines]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [News of universities. Energy problems], 2007, no. 7–8, pp. 17–22.
7. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N. *Realizatsiya volnovogo metoda opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov analiza dannykh* [Implementation of the wave method of determining the location of damage on power lines using statistical data analysis methods]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the RAS. Energetic], 2013, no. 6, pp. 137–146.
8. Lyamets Yu.Ya., Belyanin A.A., Voronov P.I. *Analiz perekhodnykh protsessov v dlinnoi linii v bazise diskretnogo i nepreryvnogo vremeni* [Analysis of transients in a long line in the basis of discrete and continuous time]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2012, no. 4, pp. 11–16.
9. Lyamets Yu.Ya., Nudel'man G.S., Pavlov A.O., Efimov E.B., Zakon'shek Ya. *Raspoznavаемость povrezhdenii elektroperedachi, ch. 1, 2, 3* [Detectability of power transmission damage]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2001, no. 2, pp. 16–23; no. 3, pp. 16–24; no. 12, pp. 9–22.
10. Slavutskaya E.V., Abrukov V.S., Slavutskii L.A. *Neirosetevoi sistemnyi analiz urovnevnykh psikhologicheskikh kharakteristik* [Systematical analysis of leveled psychological characteristics with using of neural networks]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 164–173.
11. Slavutskii A.L., Pryanikov V.S., Slavutskii L.A. *Modelirovanie perekhodnykh rezhimov uzla nagruzki s trekhobmotochnym transformatorom na raznykh urovnyakh napryazheniya* [Simulating the transients in a load node with a triple-wound transformer at different voltage levels]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2017, vol. 88, no. 7, pp. 412–415.
12. Suchkov V.O., Yadarova O.N., Slavutskii L.A. *Distsionnyi ul'trazvukovoi kontrol' vozdušnogo potoka na osnove iskusstvennoi neironnoi seti* [Remote ultrasonic airflow control based on artificial neural network]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 207–212.

13. Shalyt G.M. *Opređenje mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Determination of places of damage in electrical networks]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 312 p.
14. Bewley L.V. *Travelling waves on transmission systems*. New York, John Wiley and Sons., 1951, 333 p.
15. Dommel H.W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. Pas-88, no. 4, pp. 388–399.
16. Elhaffar A.M. Power Transmission Line Fault Location Based on Current Travelling Waves: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology, Helsinki, 2008.
17. Kasztenny B., Guzman A., Mangapathirao V.M., Titiksha J. Locating Faults Before the Breaker Opens-Adaptive Autoreclosing Based on the Location of the Fault. Proc. of 44<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conf., 2017, pp. 1–15.
18. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N., Obratsov S.A., Ryvkin A.A., Shimina A.O. A Multifunctional Device for Recording the Monitoring of Electric Power Quality and for Fault Finding on Electric Transmission Lines. *Power technology and engineering*, 2014, vol. 47, no. 5, pp. 386–392.
19. Malathi V., Marimuthu N.S. Wavelet Transform and Support Vector Machine Approach for Fault Location in Power Transmission Line. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, vol. 39.
20. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location in Power Networks. 1<sup>st</sup> ed. New York, Springer-Verlag, 2010.
21. Slavutskaya E.V., Abrukov V.S., Slavutskii L.A. Simple neuro network algorithms for evaluating latent links of younger adolescent's psychological characteristics. *Experimental Psychology*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 131–142.
22. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models. Proc. of the Sci. Conf. «Society. Integration. Education», 2018, vol. 5, pp. 455–464. Available at: <http://dx.doi.org/10.17770/sie2018vol1.3348>.
23. Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gaikwad, Mahendra Patel Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. *IEEE Access*, 2009, vol. 2.
24. Thomas D.W.P., Carvalho R.J.O., Pereira E.T. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. IEEE Bologna PowerTech Conf.. Bologna, 2003.
25. Wang J., Liu X., Pan Z. A New Fault Location Method for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1070–1072, pp. 718–725.

---

**KOSHCHIEV MAKSIM – Post-Graduate Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (maxkoshe5@gmail.com).**

**SLAVUTSKIY ALEXANDR – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Software Products Development, a Separate Division of LLC «Unitel Engineering» in Cheboksary, Russia, Cheboksary (slavutskii@gmail.com).**

**SLAVUTSKII LEONID – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (lenya@slavutskii.ru).**

---

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

УДК 621.311.1  
ББК 31.279

А.А. КУЗЬМИН, В.Г. МЕДВЕДЕВ,  
М.И. ПЕТРОВ, И.Г. ХАДЬБЕВ

### К ВОПРОСАМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЧАСТИ РЕАКТОРА ДУГОГАШЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ЗАЗОРАМИ

**Ключевые слова:** индуктивность дугогасящего реактора, зависимость геометрических размеров реактора от индуктивности, немагнитный зазор в стальном магнитопроводе, шунтирующий магнитный поток, эффективная площадь обмотки реактора по шунтирующему магнитному потоку.

Повышенный уровень емкостных токов и однофазные замыкания на землю в электрических сетях среднего класса напряжения были и остаются наиболее вероятными аварийными ситуациями, приводящими к негативным последствиям в работе потребителей электроэнергии. Симметрирование состояния замыкания на землю в распределительных электрических сетях 6–35 кВ обеспечивается устройствами компенсации тока замыкания на землю. Правильная компенсация емкостного тока и тока замыкания на землю способствует быстрому гашению дуги. Кроме того, существует определенная возможность поддерживать сеть в рабочем состоянии. Первыми исследованиями, посвященными борьбе с указанными проблемами, были труды немецкого ученого Petersen, 100-летию которых и посвящена настоящая работа. В статье приведен обзор метода расчета индуктивности реактора дугогашения двухстержневыми и бронестержневыми магнитопроводами с немагнитными зазорами по геометрическим параметрам устройства. Предложено выражение корректировки расчета величины эффективной площади обмотки реактора по шунтирующему магнитному потоку. В результате сравнительной оценки численных расчетов показано значительное влияние эффективной площади обмотки реактора по шунтирующему магнитному потоку на результат вычисления индуктивности. Показано, что при постановке обратной задачи определения геометрических размеров электрической части реактора по известному значению индуктивности, зависящему и вычисленному от параметров заданной сети, в том числе и от емкостных токов, проведение правильного расчета улучшит помимо электрических характеристик устройства также и технико-экономические показатели.

В высоковольтных электрических сетях среднего класса напряжения в связи с переходом системы энергетики к цифровым подстанциям особо актуальной задачей остается защита таких сетей от однофазных замыканий на землю. Динамические процессы, происходящие в энергетических системах, носят непредсказуемый по природе их появления и нелинейный по протекающим в них явлениям характер. Известно, что в обеспечении надежной работы высоковольтных сетей среднего класса напряжения и в борьбе с емкостными токами электрической сети, а также с последствиями однофазных замыканий на землю роль электрических реакторов, называемых катушками Петерсена, имеет важное и принципиальное значение<sup>1</sup> [1, 4–7]. Из доступной научной литературы в области исследования электрических реакторов, на наш взгляд, одним из основополагающих исследований, отражающих наиболее полную методику расчетов реакторов со стальным магнитопроводом и

<sup>1</sup> Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35 кВ. Общие технические требования. Стандарт организации ПАО «Россети». СТО 34.01-3.2-008-2017. 22 с

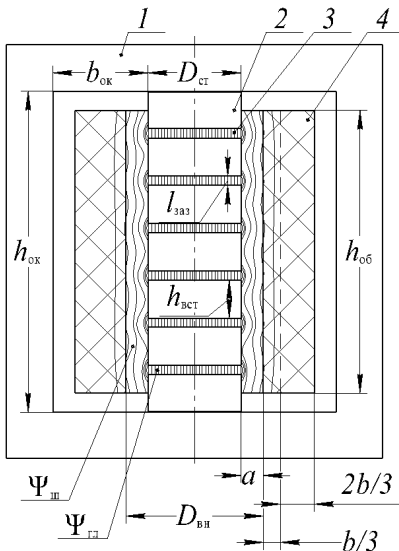


Рис. 1. Структура бронестержневого однофазного дугогасящего реактора с немагнитными зазорами в стали:

- 1 – магнитопровод;
- 2 – магнитные вставки стержня;
- 3 – немагнитные зазоры;
- 4 – обмотка

С одной стороны, суммарное потокосцепление  $\Psi_{\Sigma}$  реактора, состоящего из главного потокосцепления, проходящего по стали  $\Psi_{ст}$  и шунтирующего потокосцепления, проходящего вне сердечника  $\Psi_{ш}$ , описывается уравнением

$$\begin{aligned} \Psi_{\Sigma} &= \Psi_{ст} + \Psi_{ш} = w[\Phi_{ст} + \Phi_{ш}] = \\ &= w[B_{ст}S_{ст} + B_{ш}S_{ш}] = w[B_{зая}S_{зая} + B_{ш}S_{ш}], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $w$  – число витков обмотки;  $\Phi_{ст}$ ,  $\Phi_{ш}$  – главный и шунтирующий магнитные потоки;  $B_{ст}$ ,  $B_{зая}$ ,  $B_{ш}$  – магнитная индукция в сердечнике (стали), в зазоре и вне стали;  $S_{ст}$ ,  $S_{зая}$ ,  $S_{ш}$  – площадь сердечника, зазора и площадь сечения пути, шунтирующего путь главного потока [1].

С другой стороны, полное потокосцепление равно произведению индуктивности дросселя на ток реактора

$$\Psi_{\Sigma} = LI_p. \quad (2)$$

Следуя [1], для  $B_{ш}$  можно записать

$$I_p w = B_{ш} h_{об} / \mu_0,$$

откуда  $B_{ш} = \mu_0 I_p w / h_{об}$  или

$$B_{зая} = \frac{\mu_0 I_p w}{n l_{зая}},$$

где для  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

зазорами (рис. 1), является работа [1]. Как отмечено в [3], нелинейные характеристики реактора приводят к возникновению высших гармонических составляющих в регулируемой им цепи. По этим причинам на практике наиболее широкое распространение получили реакторы с линейными характеристиками, имеющие в магнитной цепи немагнитные зазоры дискретного характера [3]. Автоматические устройства управления такими реакторами основаны на реализации дискретных законов регулирования и управления.

Здесь делается упор на анализ метода определения индуктивности от геометрических размеров магнитопровода и обмотки реактора, в частности на вычисление наиболее эффективной площади поперечного сечения обмотки по пути шунтирующего магнитного потока [1]. В настоящей работе сохранена терминология и обозначения на рисунках, предложенные Э.А. Манькиным в [1].



Тогда получим

$$LI_p = B_{ст} S_{ст} + \mu_0 I_p w S_{ш} / h_{об}. \quad (2')$$

Индуктивность реактора с равномерными зазорами через геометрические размеры магнитопровода из (2') определяется выражением в соответствии с [1]

$$L = \frac{B_{ст} S_{ст}}{I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}}.$$

Учитывая  $\frac{B_{ст}}{S_{ст}} = \frac{B_{заз}}{S_{заз}}$ , получим

$$L = w \left[ \frac{B_{заз} S_{заз}}{I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}} \right] = w \left[ \frac{\mu_0 I_p w S_{заз}}{n l_{заз} I_p} + \frac{\mu_0 w S_{ш}}{h_{об}} \right],$$

$$L = \mu_0 w^2 \left[ \frac{S_{заз}}{n l_{заз}} + \frac{S_{ш}}{h_{об}} \right], \quad (3)$$

где  $S_{заз} = S_{ст} + P_{ст} \varepsilon$  – эквивалентное сечение сердечника;  $n$  – количество зазоров;  $l_{заз}$  – длина одного зазора; площадь шунтирующего потока равна  $S_{ш} = \pi(D_{ст} + 2a)^2 / 4 - S_{ст} - 3P_{ст} / 4 + S_{1/3}$ ;  $D_{ст}$  – диаметр сердечника;  $S_{ст}$  – сечение сердечника;  $3P_{ст} = 2(c + d + 2\varepsilon)$  – периметр стали;  $c, d$  – стороны сечения сердечника, по [1];  $S_{1/3} = l_{эфф} b / 3$ ;  $l_{эфф}$  – длина окружности обмотки эффективной зоны участка шунтирующего потока;  $\varepsilon$  – выпуклость магнитного поля в зазоре (рис. 3);  $a$  – расстояние от обмотки до сердечника;  $b$  – радиальный размер (толщина) обмотки;  $h_{об}$  – высота обмотки.

В формулах (7) и (11) работы [1] в последнем слагаемом в выражении  $S_{ш}$ , на наш взгляд, для определения длины окружности вместо

$$l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + b)$$

следовало бы записать

$$l_{эфф} = \pi(D_{ст} + 2a + b/3).$$

Величина  $b/3$  получается как  $b/3 = b/6 + b/6$ . В этом случае при вычислении площади обмотки на радиальном размере  $b/3$  в отличие от [1] длина окружности

$$l_{эфф} = l_{b/6} = D_{ст} + 2a + 2b/6.$$

Фактически вычисляется площадь кольца, толщиной  $b/3$ , приведенной на рис. 2. При такой форме записи выражения  $l_{эфф} \cdot b/3$  вместо площади кольца вычисляется эквивалентная площадь, равная площади трапеции (рис. 4) с

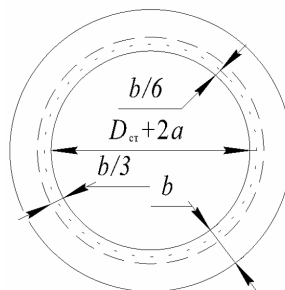


Рис. 2. К определению площади обмотки реактора на толщине  $b/3$  от внутреннего диаметра

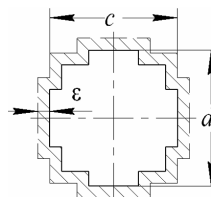


Рис. 3. К вычислению периметра стержня  $P_{ст}$  с учетом ширины бокового потока  $\varepsilon$

длиной средней линии трапеции  $l_{b/3}$ . Если же применить запись в виде  $D_{ст} + 2a + b$ , следуя [1], то толщина кольца будет равна не  $b/3$ , а  $b/2$ , что существенно меняет представление о наиболее эффективном влиянии шунтирующего магнитного потока в соответствии с [1] на толщине обмотки  $b/3$  (рис. 1) со средней длиной окружности на толщине обмотки  $b/2$ . Поэтому после детальной коррекции

$$S_{1/3} = \pi(D_{ст} + 2a + b/3)b/3$$

окончательно получим

$$L = \mu_0 w^2 \left[ \frac{S_{ст} + P_{ст}\varepsilon}{nl_{зав}} + \frac{\pi(D_{ст} + 2a)^2 / 4 - S_{ст} - 3P_{ст}\varepsilon / 4 + S_{1/3}}{h_{об}} \right]. \quad (4)$$

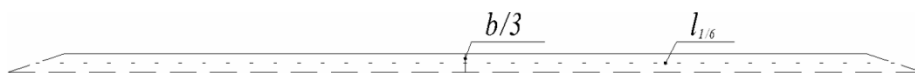


Рис. 4. К вычислению площади трапеции, эквивалентной площади обмотки реактора на толщине  $b/3$  от внутреннего диаметра

**Сравнительные проверочные расчеты.** Числовые значения параметров сердечника и обмотки реактора приняты из [1] как  $D_{ст} = 150$  мм,  $a = 22$  мм,  $b = 17$  мм.

Результаты вычисления  $l_{эфф}$  занесены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных вычислений  $l_{эфф}$

№	Выражение $l_{эфф}$ , № работы	Значение $l_{эфф}$ , мм	$\Delta l_{эфф}$ , мм
1	$\pi(D_{ст} + 2a + b/3)$ , в данной работе	626,95	–
2	$\pi(D_{ст} + 2a + b)$ , [1]	662,54	35,58

В табл. 2 занесены результаты вычисления  $S_{1/3}$ .

В табл. 2 погрешность вычисления площади обмотки

$$\Delta S_{1/3} = \left| S_{1/3, \text{ по Манькину}} - S_{1/3, \text{ по наст. раб}} \right|$$

на толщине обмотки  $b/3$  от внутреннего диаметра.

Таблица 2

Результаты сравнительных вычислений  $S_{1/3}$

№	Выражение $S_{1/3}$ , № работы	Значение $S_{1/3}$ , мм <sup>2</sup>	$\Delta S_{1/3}$ , мм <sup>2</sup>
1	$\pi(D_{ст} + 2a + b/3)b/3$ , по настоящей работе	3552,73	-
2	$\pi(D_{ст} + 2a + b)b/3$ , [1]	3754,39	201,65

Отметим, что влияние значения  $S_{1/3}$  в (4) ощутимо заметно при увеличении или при уменьшении эффективной ширины шунтирующего потока.

Для сравнительной оценки влияния значения  $S_{1/3}$  в (4) проведем расчеты, используя числовые значения расчетных размеров реактора по [1]. При этом эффективная толщина обмотки шунтирующего потока задается в соответ-

ствии со значениями, приведенными во второй колонке табл. 3. Расчет проводился для двух случаев описания эффективной толщины обмотки, табл. 1:

1.  $\pi(D_{ст} + 2a + b/k)b/3$  для  $L_1$  в соответствии с [1];
2.  $\pi(D_{ст} + 2a + b/k)b/k$  для  $L_2$  в соответствии с корректировкой в данной работе, где  $k = 17...1$  с шагом  $-1$ .

Таблица 3

Результаты сравнительных вычислений  $L$

№	Эффективная толщина обмотки, $b/k$ , мм	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн
1	1	7,545187606	7,275923892
2	1,0625	7,545292402	7,279549751
3	1,13333333	7,545411171	7,283661854
4	1,21428571	7,545546906	7,288365035
5	1,30769231	7,545703524	7,293796601
6	1,41666667	7,545886245	7,300139955
7	1,54545455	7,546102188	7,307645705
8	1,7	7,54636132	7,316665563
9	1,88888889	7,546678036	7,327709028
10	2,125	7,547073932	7,341543052
11	2,42857143	7,54758294	7,359378131
12	2,83333333	7,548261618	7,383243071
13	3,4	7,549211767	7,41681687
14	4,25	7,550636991	7,467533874
15	5,66666667	7,553012364	7,553012364
16	8,5	7,557763109	7,727532402
17	17	7,572015346	8,27959699

В первом случае переменным является величина  $b/k$  для вычисления средней линии трапеции и постоянным является значение высоты трапеции, равное  $b/3$ , по аналогии с [1]. Во втором случае переменными являются величина  $b/k$  для вычисления средней линии трапеции и величина высоты трапеции, равная также  $b/k$ . Графическая интерпретация полученных решений для  $L_1$  и  $L_2$  по (4) в двух разных масштабах по оси ординат приведена рис. 5 и 6. Сплошная линия на рисунках соответствует случаю вычисления индуктивности  $L_1$ , а пунктирная –  $L_2$ .

По графикам на рис. 5 и 6 видно, что зависимость  $L(S_{1/3})$  носит экспоненциальный характер. Однако при использовании методики как в [1] для  $L_1$  происходит более медленный рост графика, чем для  $L_2$ . Пересечение графиков  $L_1$  и  $L_2$  происходит в точке, соответствующей  $b/k = b/3$ . Отметим также, что наиболее характерная область нелинейности графиков лежит в диапазоне изменения  $b/k = 0,17...1,4$ , т.е. на толщине обмотки от  $0.1b$  до  $0.5b$ .

На рис. 7 приведен график  $\Delta L = |L_1 - L_2|$ .

При выбранном подходе сравнения график на рис. 7 показывает разницу между двумя рядами вычисленных значений  $L_1$  и  $L_2$ . При значении переменной  $b/k = 1,7$  погрешность вычислений составляет  $\Delta L = 0,7076$  мГн.

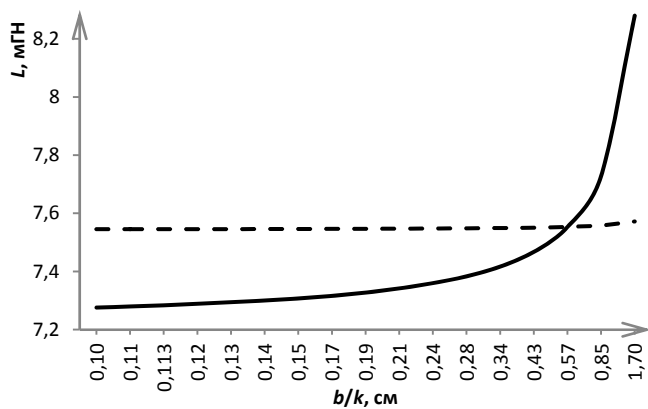


Рис. 5. Графики вычисления  $L_1$  и  $L_2$  в диапазоне отображения индуктивности 7,2 ÷ 8,3 мГн

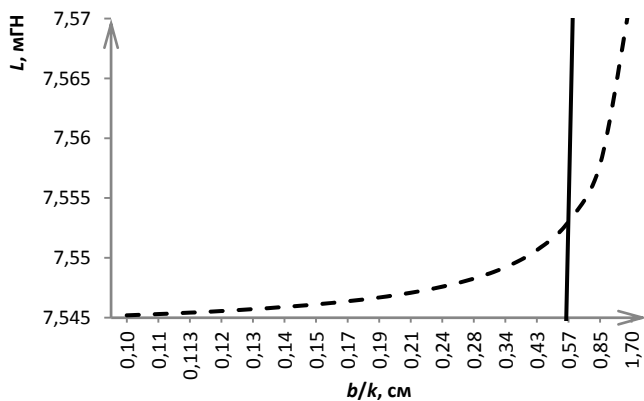


Рис. 6. Графики вычисления  $L_1$  и  $L_2$  в диапазоне отображения индуктивности 7,545 ÷ 7,57 мГн.

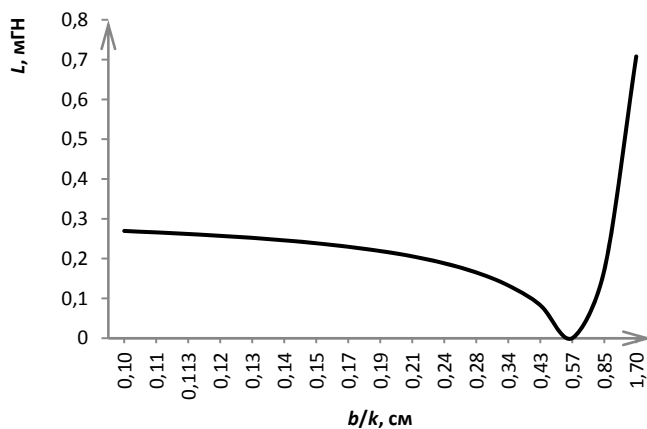


Рис. 7. График  $\Delta L = |L_1 - L_2|$

Отметим, что при постановке обратной задачи определения геометрических размеров электрической части реактора по известному значению индуктивности, зависящему и вычисленному от параметров заданной сети, в том числе и от емкостных токов, проведение правильного расчета на основе скорректированных математических моделей улучшит помимо электрических характеристик устройства также и технико-экономические показатели.

#### Литература

1. Козлов В.Н., Петров М.И. Дугогасящие реакторы в сетях среднего напряжения. Компенсация емкостных токов замыкания на землю // Новости электротехники. 2012. № 2(74). С. 60–62.
2. Манькин Э.А. Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами // Электричество. 1959. № 7. С. 35–40.
3. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974. 240 с.
4. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. ETZ, 1917, H. 47, 48.
5. Petersen W. Limitation of earth current and suppression of earth fault arcs by the earthing coil. ETZ Elektrotechnische Zeitschrift, 1919, vol. 40(5-7), S. 17–19.
6. Druml G., Kugi A., Parr B. Control of Petersen Coils. Proc. of XI. Int. Symp. on Theoretical Electrical Engineering, August 2001, Linz, Austria, pp. 1–7.
7. Druml G. Petersen – Coil Controller, Operating Manual, REGSys, 2007. Available at: <http://www.aeberle.com>.

---

**КУЗЬМИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – ассистент кафедры безопасности труда, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Красноярск ([marca.duulga@gmail.com](mailto:marca.duulga@gmail.com)).

**МЕДВЕДЕВ ВЯЧЕСЛАВ GERMANOVICH** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([mwg71@mail.ru](mailto:mwg71@mail.ru)).

**ПЕТРОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ** – кандидат технических наук, директор ООО «НИР ЭНЕРГО», Россия, Чебоксары ([pmi@nirenergo.ru](mailto:pmi@nirenergo.ru)).

**ХАДЫЕВ ИРЕК ГАЙНУЛЛИНОВИЧ** – начальник лаборатории высоковольтных испытаний, Оскольский электрометаллургический комбинат, Россия, Старый Оскол ([hadyev@oemk.ru](mailto:hadyev@oemk.ru)).

---

#### A. KUZMIN, V. MEDVEDEV, M. PETROV, I. KHADYEV TO THE PROBLEM OF ASSESSMENT (SELECTION) OF PARAMETERS OF ACTIVE PART OF EXTINGUISHING REACTOR WITH DISTRIBUTED GAPS

**Key words:** inductance of arc suppression reactor, dependence of geometric dimensions of reactor on inductance, non-magnetic gap in steel magnetic circuit, shunt magnetic flux, effective area of reactor winding across shunt magnetic flux.

*The increased level of capacitive currents and single-phase earth faults in medium voltage electrical networks have been the most likely emergency situations causing negative consequences for electricity consumers. The balancing of the earth fault condition in the distribution electric networks of 6-35 kV is provided by devices for compensating the earth fault current. Proper compensation of capacitive current and earth fault current contributes to the rapid extinction of the arc. Furthermore, there is a definite possibility to keep the network operational. The first studies devoted to solving these problems were the works of the German scientist Petersen, whose 100<sup>th</sup> anniversary the present paper is ded-*

icated to. The article provides an overview of the method for calculating the inductance of an extinguishing reactor with double-rod and armor-core magnetic cores with non-magnetic gaps according to the geometric parameters of the device. A formulation for adjusting the calculation of the effective area of the reactor winding across a shunt magnetic flux is proposed. The comparative assessment of numerical calculations shows a significant impact of the effective area of the reactor winding across a shunt magnetic flux on the inductance calculation result. While setting the inverse problem for determining the geometric dimensions of the electrical part of the reactor according to the known inductance value depending and being calculated on the parameters of the given network including capacitive currents, it is revealed that implementation of proper calculation will improve electrical characteristics of the device as well as technical and economic indicators.

#### References

1. Kozlov V.N., Petrov M.I. *Dugogasyashchie reaktory v setyah srednego napryazheniya. Kompensatsiya emkostnyh tokov замыкания на землю* [Arcing reactors in medium voltage networks. Compensation of capacitive earth fault currents]. *Novosti elektrotehniki* [Electrical News], 2012, no. 2(74), pp. 60–62.
2. Mankin E.A. *Raschet reaktorov so stal'nym magnitoprovodom i zazorami* [Calculation of reactors with a steel magnetic circuit and gaps]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1959, no. 7, pp. 35–40.
3. Petrov G.N. *Elektricheskie mashiny. Ch. 1. Transformatory* [Electric cars. Part 1. Transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 240 p.
4. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, H. 47, 48.
5. Petersen W. Limitation of earth current and suppression of earth fault arcs by the earthing coil. *ETZ Elektrotechnische Zeitschrift*, 1919, vol. 40(5-7), S. 17–19.
6. Druml G., Kugi A., Parr B. Control of Petersen Coils. Proc. of XI. Int. Symp. on Theoretical Electrical Engineering, August 2001, Linz, Austria, pp. 1–7.
7. Druml G. Petersen – Coil Controller, Operating Manual, REGSys, 2007. Available at: <http://www.aeberle.com>.

---

**KUZMIN ALEXEY** – Assistant Lecturer, Department of Labor Safety, Novosibirsk State Technical University, Russia, Krasnoyarsk ([marca.duulga@gmail.com](mailto:marca.duulga@gmail.com)).

**MEDVEDEV VYACHESLAV** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary ([mwg71@mail.ru](mailto:mwg71@mail.ru)).

**PETROV MIKHAIL** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director, «NIR-Energy», Russia, Cheboksary ([pmi@nirenrgo.ru](mailto:pmi@nirenrgo.ru)).

**KHADYEV IREK** – Head of the Laboratory for High Voltage Testing, Oskol Electrometallurgical Plant Joint Stock Company, Russia, Stary Oskol ([hadyev@oemk.ru](mailto:hadyev@oemk.ru)).

---

**Формат цитирования:** Кузьмин А.А., Медведев В.Г., Петров М.И., Хадыев И.Г. К вопросам оценки параметров активной части реактора дугогашения с распределенными зазорами // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 119–126.

УДК 621.315.23 064.1-7

ББК 3279.03:327-018

Д.Г. КУЗЬМИН, Г.А. КРАВЧЕНКО,  
Э.Л. ЛЬВОВА, А.М. МАКАРОВ, С.В. СТОЛЯРОВ**МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ  
И ЕЁ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ**

*Ключевые слова:* кабельная линия, кабельная муфта, контроль состояния кабельной линии, датчики нулевой последовательности, осциллограммы.

*В статье проанализированы основные проблемы при возникновении однофазных коротких замыканий на землю и их последствия. Рассмотрены вопросы диагностики кабельных линий и концевых кабельных муфт под рабочим напряжением. Для этих целей использовались специализированные датчики непрерывного контроля разрядных характеристик, по показаниям которых можно судить об исправности кабельной линии. Для экспериментальных исследований применялась эквивалентная электрическая модель распределительной сети с изолированной нейтралью. Основные параметры контролировались при помощи датчиков тока ДТР-ДУКАТ и осциллографом. Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод о том, что по виду полученных осциллограмм можно судить, в каком месте кабельной линии произошло короткое замыкание. Методика, предложенная в работе, позволяет выявлять наличие коротких замыканий на конкретных участках кабельной линии и принимать целесообразные меры для восстановления работоспособности системы электроснабжения.*

От главной понизительной подстанции промышленных предприятий электроэнергия передается потребителям с помощью кабельной либо воздушной линии электропередачи (ЛЭП). Присоединения кабельных линий осуществляется концевыми кабельными муфтами.

В эксплуатации с определенной периодичностью кабельные линии проходят профилактический контроль по разным в зависимости от типа изделия методикам [2].

Основными причинами выхода из строя кабельных линий, включая кабельные муфты, являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) и их последствия.

ОЗЗ приводят к нежелательным последствиям: отключениям на определенный период электропитания, интенсификации процесса старения электрической изоляции и даже её разрушению. Поэтому вопросы защиты от ОЗЗ являются весьма актуальными.

В устройствах защиты от ОЗЗ воздействующий сигнал получается от первичных измерительных преобразователей, в качестве которых выступает фильтр напряжения нулевой последовательности (НП) (ФННП) и фильтр тока НП (ФТНП) [1].

Системы защиты от ОЗЗ при срабатывании приводят к отключению потребителей от сети и снятию напряжения с поврежденной кабельной линии либо просто сигнализируют.

Исследования различных ОЗЗ на кабельных линиях, применяемых в системе электроснабжения Пикалевского глиноземного завода Ленинградской области, в течение 3 лет показал, что причины носят сезонный характер. В

весенние месяцы ОЗЗ связаны с попаданием влаги в изоляцию через микропоры конструкций кабельных муфт и самих кабелей. Часто это приводит к локальным перегревам и даже к возгоранию изоляции концевых муфт.

В связи с вышеизложенным важным вопросом является диагностика изоляции силовых кабелей и кабельных муфт под рабочим напряжением. Одним из путей решения этой проблемы является использование специализированных датчиков для непрерывного контроля температуры изоляции кабельных муфт. Для предотвращения отказов электрооборудования и сохранения его в работе необходимо иметь возможность оценить воздействие эксплуатационных факторов различной физической природы на его надежность [4].

На сегодняшний день техническое состояние кабельных концевых муфт контролируется только периодическими температурными измерениями. В то же время установлено, что кабельные муфты являются наиболее «слабым звеном» в кабельной линии электроснабжения.

Перегревы также могут проявляться из-за продолжительного действия частичных разрядов, возникающих в микропорах изоляции [3].

Для снятия напряжения с линии и сохранения электрооборудования в рабочем состоянии устанавливается дуговая защита.

Для предотвращения пожара в муфте периодических температурных методов контроля недостаточно, поэтому актуальным является непрерывный контроль температуры и разрядных характеристик, по которым можно судить об исправности кабельной линии.

Часто при срабатывании защиты остается неизвестным, в какой части кабельной линии произошло короткое замыкание, поэтому в данной работе были рассмотрены вопросы выявления зон неисправности кабельной линии. Условно были выделены три области исследования (рис. 1): зона контроля 1 – участок кабельной линии до входной муфты; зона контроля 2 – концевая муфта; зона контроля 3 – сеть электроснабжения.

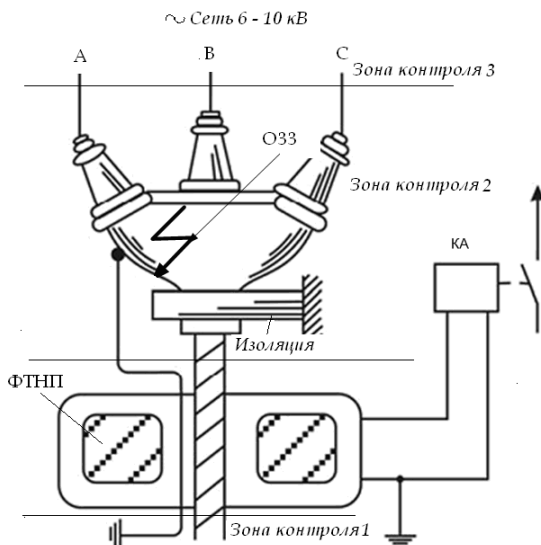


Рис. 1. Схема распределения кабельной линии по зонам контроля



При таком разделении ФТНП контролирует возможное ОЗЗ в первой зоне. Сложностью контроля состояния кабельной муфты является то, что она находится вне зоны контроля ФТНП.

Для экспериментальных исследований использовалась эквивалентная электрическая модель распределительной сети с изолированной нейтралью.

В качестве модели кабельной линии были использованы отрезки силового кабеля марки ААБл – 10–3×70 длиной 8 м. Блок схема эксперимента представлена на рис. 2.

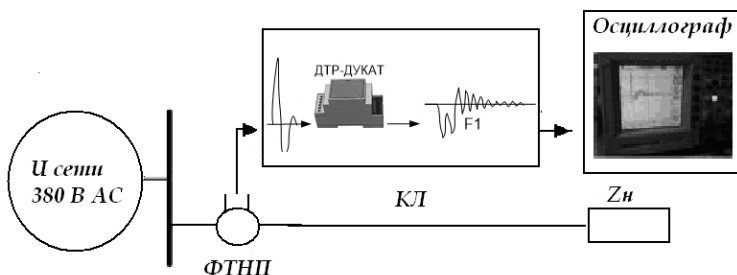


Рис. 2. Блок-схема эксперимента:  
ФТНП – фильтр тока нулевой последовательности; ДТР – ДУКАТ – датчик тока;  
КЛ – кабельная линия;  $Z_n$  – сопротивление нагрузки

В процессе проведения эксперимента искусственно создавались ОЗЗ в разных зонах контроля (рис. 3). При помощи датчиков тока ДТР-ДУКАТ и осциллографирования фиксировался сигнал с датчика. В экспериментальных исследованиях была использована группа датчиков, настроенных на определенные резонансные частоты. Это позволило идентифицировать ОЗЗ по зонам.

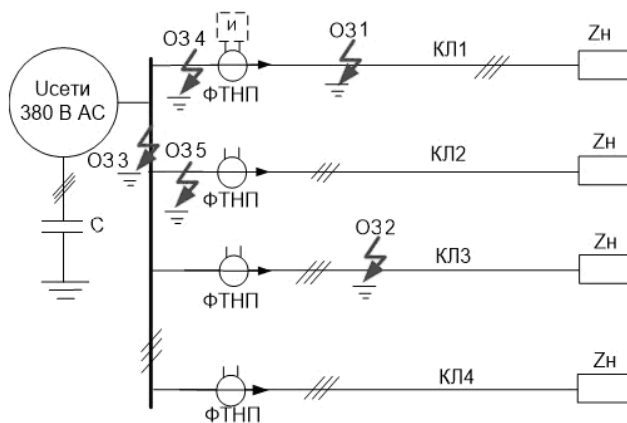


Рис. 3. Распределение экспериментальных ОЗ по зонам контроля:  
ОЗ1 – в первой зоне контроля; ОЗ4 – во второй зоне контроля;  
ОЗ2, ОЗ3, ОЗ5 – в третьей зоне контроля

Для каждого из случаев однофазного замыкания (ОЗ) были получены осциллограммы.

На рис. 4 приведена осциллограмма сигнала датчика при прохождении импульса тока при ОЗ в зоне 1. В момент ОЗ зафиксировано явно выраженное увеличение амплитуды сигнала с частотой настройки датчика.

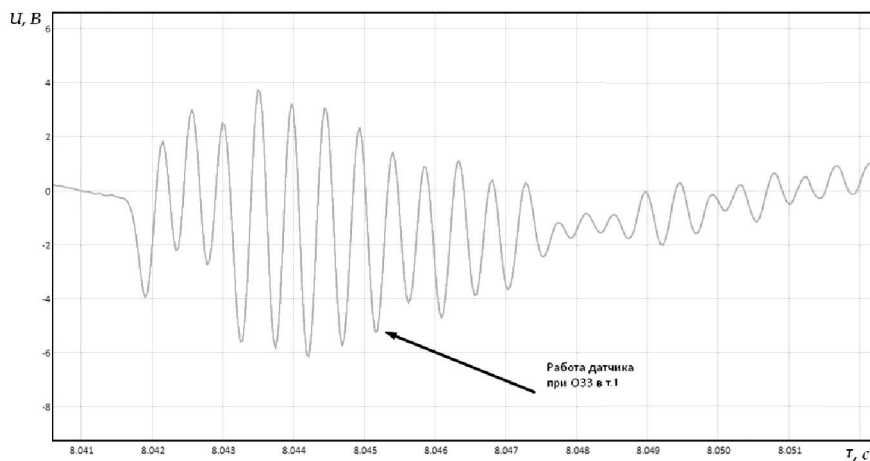


Рис. 4. Осциллограмма сигнала датчика при ОЗ в зоне 1

На рис. 5 приведена осциллограмма сигнала датчика при прохождении импульса тока при ОЗ в зоне 2. Здесь отмечается значительное возрастание амплитуды по отношению к опорным сигналам (сигналы не аварийных кабелей и сигналов ФТНП, или ФННП).

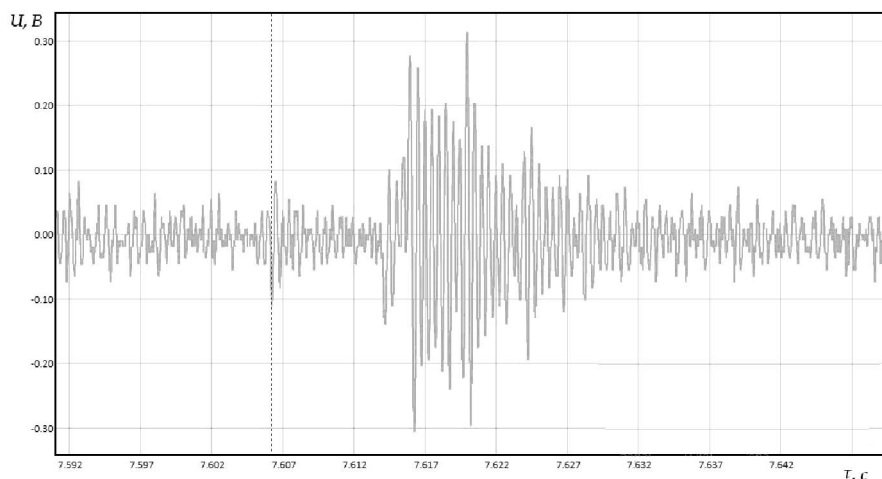


Рис. 5. Осциллограмма сигнала датчика при ОЗ в зоне 2

На рис. 6 показана осциллограмма сигнала при ОЗ в зоне 3.

Таким образом, сравнительный анализ полученных в экспериментальных исследованиях осциллограмм показал, что по характерным особенностям сигнала можно сделать предварительный вывод о том, в каком месте кабельной линии произошло ОЗЗ. Для окончательного заключения о повреждениях в кабельных линиях необходимо продолжить работу в этой области.

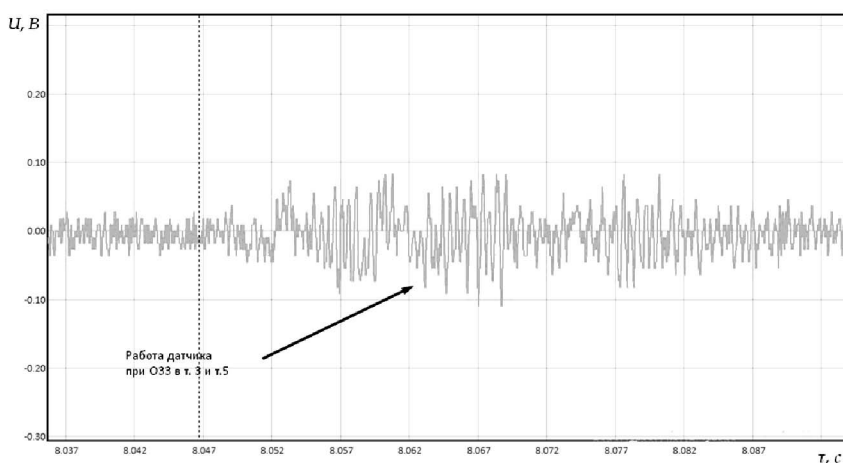


Рис. 6. Осциллограмма сигнала датчика при ОЗ в зоне 3

Таким образом, примененная в работе методика позволяет непрерывно контролировать исправность кабельной линии в рабочем режиме.

Методика, предложенная в работе, позволяет выявлять наличие коротких замыканий, в том числе кратковременных, на конкретных участках кабельной линии, и принимать необходимые меры для восстановления работоспособности системы электроснабжения. При этом уменьшается количество контролирующей аппаратуры и сокращаются трудозатраты по эксплуатации.

#### Литература

1. Мельников М.А. Релейная защита и автоматика элементов систем электроснабжения промышленных предприятий. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. 218 с.
2. Миронова А.Н., Львова Э.Л. Электрооборудование промышленных предприятий и городских сетей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. 246 с.
3. Оценка технического состояния кабелей и кабельных линий / под ред. А.И. Таджибаева. СПб.: ПЭИПК, 2007. 172 с.
4. Определение вероятности отказа оборудования электросетевых предприятий на основе оценки технического состояния / под ред. Д.А. Андреева, А.Н. Назарычева, А.И. Таджибаева. СПб.: ПЭИПК, 2017. 193 с.

---

**КУЗЬМИН ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ** – студент IV курса факультета энергетики и электротехники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (kuzmindimag@yandex.ru).

**КРАВЧЕНКО ГАЛИНА АЛЕКСЕЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (krav68@bk.ru).

**ЛЬВОВА ЭЛЬВИРА ЛЬВОВНА** – старший преподаватель кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elyalvov1@yandex.ru).

**МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (alex41mak@yandex.ru).

**СТОЛЯРОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ** – технический директор, ООО «Инженерный центр Вольtron», Россия, Чебоксары (info.energopribor@mail.ru).

---

**D. KUZMIN, G. KRAVCHENKO, E. LVOVA,  
A. MAKAROV, S. STOLYAROV**  
**METHOD OF CONTROL OF CONDITION  
OF CABLE LINE AND ITS BASIC ELEMENTS  
IN OPERATIONAL MODE**

**Key words:** cable line, cable box, cable line condition monitoring, zero sequence sensors, oscillograms.

*The paper analyzes the main problems in the event of a single-phase short circuits to earth and their consequences. The authors consider the issues of diagnostics of cable lines and cable boxes under operating voltage. For this purpose, specialized sensors for continuous monitoring of temperature and discharge characteristics were used, their readings showing the condition of the cable line. For experimental studies the authors have used the equivalent electrical model of the distribution network with an isolated neutral. The main parameters were monitored with the help of current sensors DTR-DUKAT and an oscilloscope. The results of experimental studies show that the type of oscillograms obtained can be used to determine a short circuit location in the cable line. The technique suggested in the work allows to detect the presence of short circuits in the cable line and take appropriate measures to restore the proper operation of power supply system.*

References

1. Mel'nikov M.A. *Releynaya zashchita i avtomatika ehlementov sistem ehlektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Relay protection and automation of elements of power supply systems of industrial enterprises]. Tomsk, 2008, 218 p.
2. Mironova A.N., L'vova E.L. *Ehlektrooborudovanie promyshlennykh predpriyatii i gorodskikh seteI* [Electrical equipment of industrial enterprises and urban networks]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2015, 246 p.
3. Tadzhibaev A.I., ed. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kabelei i kabel'nykh liniI* [Evaluation of the technical condition of cables and cable lines]. St. Petersburg, 2007, 172 p.
4. Andreev D.A., Nazarychev A.N., Tadzhibaev A.I. *Opredelenie veroyatnosti otkaza oborudovaniya ehlektrosetevykh predpriyatii na osnove otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya* [Determination of the probability of failure of equipment of electric grid enterprises based on the assessment of the technical condition]. St. Petersburg, 2017, 193 p.

---

**KUZMIN DMITRY** – 4<sup>th</sup> Year Student, Faculty of Energy and Electrical Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (kuzmindimag@yandex.ru).

**KRAVCHENKO GALINA** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (krav68@bk.ru).

**LVOVA ELVIRA** – Senior Lecturer, Departments of Electrical Engineering, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elyalvov1@yandex.ru).

**MAKAROV ALEXEY** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrotechnologies, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (alex41mak@yandex.ru).

**STOLYAROV SERGEY** – Technical Director, Voltron Engineering Center LLC, Russia, Cheboksary (info.energopribor@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Кузьмин Д.Г., Кравченко Г.А., Львова Э.Л., Макаров А.М., Столяров С.В. Метод контроля состояния кабельной линии и её основных элементов в рабочем режиме // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 127–132.

УДК 621.311.21

ББК 31.57

В.И. КУРИП

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ГИДРОГЕНЕРАТОРА С ТУРБИНОЙ В MATLAB/SIMULINK

**Ключевые слова:** гидрогенератор с турбиной, система автоматического управления скорости вращения турбины и система возбуждения генератора, моделирование рабочего режима гидроагрегата в MATLAB/SIMULINK.

Приведён обзор работ, посвящённых численному анализу рабочего режима гидроагрегата ГЭС в MATLAB/SIMULINK. Показана эволюция моделей гидроагрегата для реализации их в MATLAB/SIMULINK. В статье эволюция представлена четырьмя разделами: 1) классические модели; 2) оптимальное робастное управление турбиной и генератором; 3) адаптивное управление турбиной и генератором; 4) совместное адаптивное управление с привлечением нейросетевых методов и нечёткой логики. Наличие в MATLAB ряда специальных пакетов позволило исследователям оценить эффективность всех типов оптимального, адаптивного и цифрового управления турбиной и генератором, а также смоделировать любой тип аварии на ГЭС и энергосети, произвести анализ их последствий. На базе MATLAB/SIMULINK неоднократно смоделирована операция введения стабилизирующих звеньев и систем в контур управления всего гидроагрегата и энергетической системы. Эволюция пакета MATLAB, появление библиотеки OPC TOOLBOX MATLAB/SIMULINK создают условия подключения пакета к системе управления ГЭС. Основной вывод работы – пакет MATLAB/SIMULINK следует включить в ПО АСУТП ГЭС.

Необходимым условием для нормальной работы генератора с энергосетью является обеспечение устойчивости процессов производства, передачи, распределения электроэнергии. Работы над созданием достоверной модели функционирования генератора с сетью, позволяющей численно воссоздать особенности работы реального генератора с сетью, ведутся уже несколько десятилетий. Ввиду сложности моделей энергетических систем для их численного анализа принято использовать специализированные пакеты MATLAB, EUROSTAG, RTDS, MUSTANG и др. Они позволяют промоделировать устойчивые, неустойчивые режимы работы энергосистемы, численно описать предаварийное, аварийное состояние системы.

Ранее всех для решения данной задачи был привлечён пакет MATLAB [11–14]. Модели турбины, гидрогенератора, трансформаторов, потребителей электроэнергии в MATLAB представлены стандартными блоками, позволяющими провести их установку на электронном поле файла и сборку схемы энергосистемы с последующим решением собранной модели энергосистемы.

Дальнейшее уточнение указанных моделей проведено в работах [27, 28]. В [27] проведено введение в классическую модель ГЭС элемента уравнивающей башни (между водохранилищем ГЭС и трубопроводом). В [28] характер течения в трубопроводе принят нестационарным, волновым. В [3] проведено моделирование в MATLAB гидротурбин с регуляторами частоты вращения и активной мощности. В [18] на линии вблизи к одной из нагрузок энергосети смоделировано КЗ и оценено влияние КЗ на энергосеть и процесс управления

турбиной и генератором. В [20] проведено сравнение работы ПИ- и ПИД-регуляторов в системе управления турбиной. В [6] предпринята попытка смоделировать аварию на СШ ГЭС. Модель гидроагрегата дополнена моделью системы возбуждения генератора и моделью электрической нагрузки. Модель регулятора скорости вращения турбины в пакете MATLAB подобрана аналогичной регулятору, применявшемуся на СШ ГЭС, а в модели турбины воспроизведены такие значения КПД турбины и колебания напора, которые предшествовали аварии.

В работах [8, 15, 16] получены параметры оптимального регулятора турбины с помощью методики аналитического конструирования оптимальных регуляторов. В модели создаваемой оптимальной системы управления турбиной [16] заранее введены дополнительные условия устойчивости работы системы управления. В [21] приведено построение робастного оптимального регулятора турбины, в котором использованы результаты исследований по нелинейной теории оптимального регулятора. В работе [1] параметры оптимального регулятора турбины определяются на основе принципа максимума.

В [4, 9, 10, 25] проведено определение параметров ПИД-регуляторов турбины с применением методов генетической оптимизации. В [17] приведён обзор работ, посвящённых рассматриваемой в статье тематике.

В работе [19] приведён алгоритм для нахождения параметров регулятора турбины, основанный на методе адаптивного робастного управления со сдвигом полюсов передаточной функции контура регулирования турбиной и генератором в зону устойчивости. В работе [23] построена система управления турбиной на базе теории управления динамическими объектами Model Predictive Control (MPC). При построении ПИ-регулятора турбины автор использует метод GPC – адаптивный метод с самонастройкой. Показано преимущество адаптивного регулятора в управлении турбиной по сравнению с классическим. В [26] представлена гибридная инструментальная среда для реализации адаптивного управления мощностью гидротурбин. Она состоит из нелинейной дискретной модели турбины и генератора в среде MATLAB, программируемого логического контроллера PLC-controller и оборудования для сбора данных. Динамическое поведение гидротурбины исследуется для всего диапазона изменения мощности. Обсуждаются результаты моделирования, полученные от адаптивных и традиционных ПИ-контроллеров. Они показывают преимущества предлагаемой адаптивной системы управления над классической.

В [2] рассматриваются проблемы современных систем управления электрогидравлическими преобразователями, использующихся для открытия направляющего аппарата гидроагрегатов с поворотной-лопастной турбиной Каплана. Предложена адаптивная система управления и диагностики для повышения качества работы системы открытия направляющего аппарата. Приведена самообучающаяся модель электрогидравлического преобразователя и алгоритм обучения. В [5] предложено управлять активной мощностью турбины Каплана и частотой электрического тока на шинах генератора с помощью

ПИ-регуляторов открытия направляющего аппарата и разворота лопастей рабочего колеса турбины. Параметры регуляторов оценивают в процессе управления с помощью принципа максимума с использованием нелинейной модели в пространстве состояний. Параметры модели определяют методом наименьших квадратов.

Также проведены работы по применению нечёткой логики и искусственных нейросетей для управления сетью Микро-ГЭС (Мини-ГЭС) [29, 33], работающих в автоматическом режиме. В состав систем управления с применением искусственных нейросетей входят, как правило, два элемента: Neuroidentifier и Adaptive Neurocontroller. При управлении с помощью нечёткой логики регулятор управления назван Fuzzy Logic Controller. Авторы [33] утверждают (по данным результатов расчётов), что симбиоз обеих систем управления удачен.

Авторами [20, 22] смоделирована операция введения стабилизирующих звеньев PSS в контур управления всего гидроагрегата и энергетической системы. Стабилизирующий элемент в [20] PSS Stabilizer подключён к выводам угловой частоты вращения турбины, активной мощности турбины, а также к обмотке возбуждения генератора. В схему введены также стабилизаторы энергосети Multi-Band Power System Stabilizer и Generic Power System Stabilizer. В [22] подключение звеньев PSS установлено на обмотке возбуждения генератора и на линии генератор – сеть. В обоих вариантах подтверждено значимое, демпфирующее действие стабилизирующих элементов на работу генератора и энергосети.

В [30–32] представлены результаты совместного применения цифровых и классических регуляторов скорости вращения турбины. Введение цифрового регулятора скорости вращения турбины не избавляет систему управления турбиной от новой проверки на устойчивость её работы. Совместная работа классических и цифровых регуляторов делает управление гидротурбиной, по мнению авторов, более гибким.

В [24] описано подключение PLC-контроллеров в систему управления гидроагрегатом, а также встраивание в систему управления ГЭС SCADA SYSTEM (АСУТП) программного обеспечения пакета MATLAB/SIMULINK.

Приведём в качестве примера расчёт модели генератора с турбиной, работающего на энергосеть (рис. 1, 2). Генератор выдаёт электроэнергию в сеть (13.8 кВ, 210 МВт). С помощью трансформатора напряжение сети повышается до 230 кВ. Через 10 с производится отключение одной из нагрузок. Наблюдаем рост величины тока в сети [7].

Преимущества пакета MATLAB над аналогичными пакетами заключается в следующем:

1. Пакет MATLAB позволяет проводить численный анализ моделей в пакетном режиме, используя скрипты – программы, написанные на языке MATLAB.

2. Пакет MATLAB позволяет проводить численное решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений, не привлекая стандартные модели пакета MATLAB/SIMULINK.

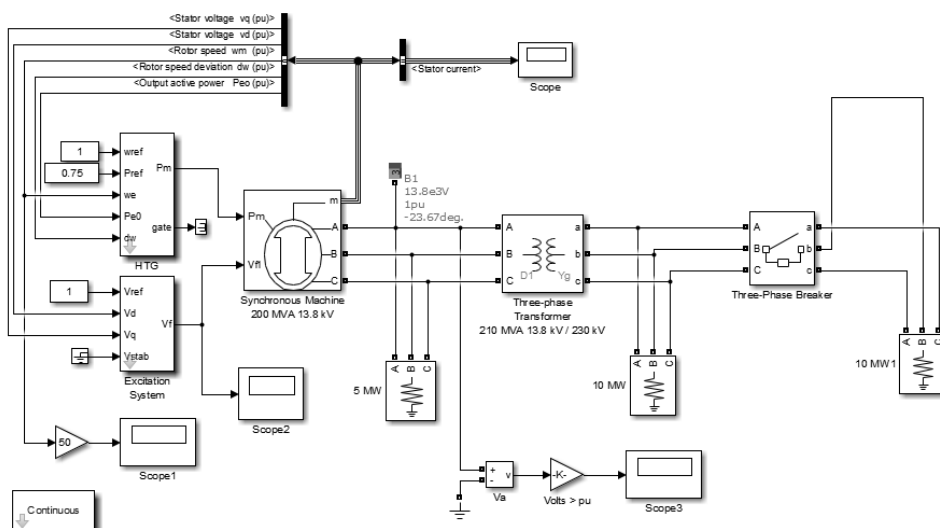


Рис. 1. Модель гидрогенератора, работающего на активную нагрузку

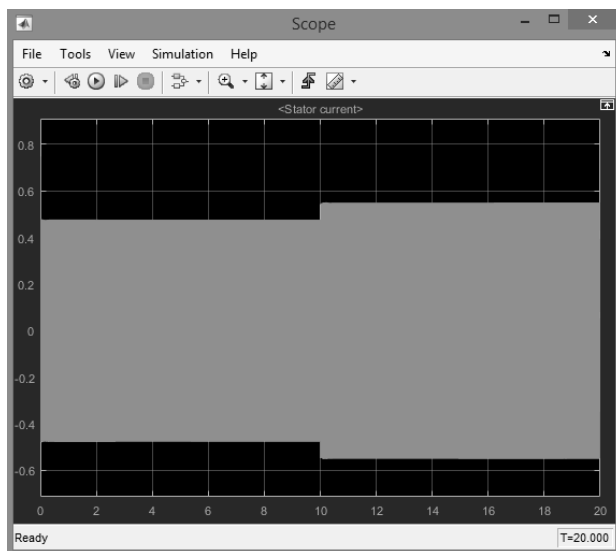


Рис. 2. Изменение величины тока в шинах гидрогенератора в связи с отключением части нагрузки потребителей

3. Пакет CONTROL SYSTEM TOOLBOX позволяет моделировать и проектировать системы автоматического управления как для непрерывных сигналов управления, так и для дискретных.

4. Пакет NONLINEAR CONTROL DESIGN BLOCKSET реализует метод динамической оптимизации параметров для исследуемых систем. Пакет автоматически настраивает параметры моделируемых систем, основываясь на определённых пользователем ограничениях на их временные характеристики.



5. Пакет MATLAB широко использует аппарат матричных вычислений, наиболее удобный при определении вектора собственных частот (eigenvector) энергетических (электрических) систем.

6. Библиотека OPC TOOLBOX MATLAB SIMULINK предоставляет набор интерфейсов для работы с OPC-серверами. Это позволяет подключить к MATLAB внешние аппаратные средства, обмениваться с ними данными, строить распределенные системы управления, расширять возможности средств проектирования систем управления, подключаться к АСУТП ГЭС.

**Выводы.** Пакет MATLAB/SIMULINK следует включить в ПО АСУТП ГЭС как обязательный его элемент по двум причинам:

1. Для проведения численного анализа и поиска оптимального режима работы САУ гидроагрегата и её подсистем, исследования зон устойчивости работы САУ, как инструмент предварительного анализа работы САУ при возможной модификации её элементов и подсистем со временем.

2. Для прогнозирования предаварийных ситуаций, возникающих на ГЭС и в энергетической сети, а также для координации действий энергетиков по устранению их последствий.

#### Литература

1. Башнин О.И. Управление мощностью гидравлической турбины // Гидротехника. XXI век. 2015. Т. 24, № 4. С. 32–41.

2. Браганец С.А. Разработка математической модели сервомотора направляющего гидроагрегата с поворотной-лопастной турбиной // Промышленные ФСУ и контроллеры. 2012. № 10. С. 10–13.

3. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Моделирование гидротурбин, автоматических регуляторов частоты и активной мощности в среде MATLAB // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 67–70.

4. Булатов Ю.Н. Моделирование автоматических регуляторов возбуждения генераторов электрических станций в среде MATLAB // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. СПб., 2008. Вып. 14. С. 18–24.

5. Гольцов А.С., Гольцов С.А., Клименко А.В., Силаев А.А. Управление активной мощностью гидроагрегата ГЭС с поворотной-лопастной турбиной // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 11. С. 1–4.

6. Леонов Г.А., Андриевский Б.Р., Кузнецов Н.В., Юлдашев М.В., Юлдашев П.В. Математическое моделирование переходных процессов гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2018. № 4. С. 80–105.

7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB.SimPower-Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2012. 288 с.

8. Arnautovic D.B., Skataric D.M. Suboptimal Design of Hydro turbine Governors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, vol. 6, no. 3, pp. 438–444.

9. Chu Zhang, Tian Peng, Chaoshun Li, Wenlong Fu, Xin Xia, Xiaoming Xue. Multiobjective Optimization of Fractioned – Order PID-Controller for Pumped Turbine Governing System Using an Improved NSGA-III Algorithm under Multiworking Conditions. *Complexity*, 2019, vol. 2019, Article ID 5826873, 18 p.

10. Chuanwen Jiang, Yuchao Ma, and Cengmin Wang. PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing systems using deterministic – chaotic – mutation evolutionary programming (DCMEP). *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, no. 9–10, pp. 1222–1230.

11. IEEE committee report, Dynamics models for steam and hydro turbines in power system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1973, vol. 7, no. 6, pp. 1904–1915.

12. IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Dynamic Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 167–179.

13. IEEE 421.5–1992 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 1992, 56 p.
14. IEEE 421.5–2005 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 2006, 95 p.
15. Jin Jiang. Design of an Optimal Robust Governor for Hydraulic Turbine Generating Units. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 188–194.
16. Kishor N., Saini R.L., Singh S.P. Optimal Pole Shift Control in Application to a Hydro Power Plant. *Journal of Electrical Engineering*, 2005, vol. 56, no. 11–12, pp. 290–297.
17. Kishor N., Saini R.P., Singh S.P. A review on hydropower plant models and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, vol. 11, pp. 776–796.
18. Lone R.A., Ganie Z.A. Modeling and Fault Analysis of Canal Type Small Hydro Power Plant. *International Journal of Computational Engineering Research*, 2013, vol. 3, no. 6, pp. 60–67.
19. Malik O.P., Zeng Y. Design of a Robust Adaptive Controller for a Water Turbine Governing System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 354–359.
20. Margonis P. Modelling and Optimization of a Hydroelectric Power Plant for a National Grid Power System Supple. Master Thesis, Technical University of Greece, March 2017, 178 p.
21. Mei Sheng Wei, Gui Xiao Yang, Shen Chen, Lu Qiang. Dynamic Extending Nonlinear  $H_{\infty}$  Control and its application to hydraulic turbine governor. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2007, vol. 50, no. 5, pp. 618–635.
22. Morab A.N., Jinde S.P., Narra J., Kokane O. Comparative Study of Synchronous Machine Model 1.0 and Model 1.1 in Transient Stability Studies with and without PSS. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 300–306.
23. Munoz-Hernandez G.A. Application of Model Based predictive Control to a Pumped Storage Hydroelectric Plant. Doctor Thesis, University of Wales, 2005, 139 p.
24. Nasstrom J. State of the Art Development Platform for Hydropower Turbine Governors. Master Thesis, University of Umea, Sweden, 2017, 56 p.
25. Razmjooy N., Khalilpour M. Optimum Control of Hydro Turbine Connected to the Equivalent Network for Damping Frequency Oscillation Using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 1204–1211.
26. Ruzhikov G., Slavov Ts., Puleva T. Modeling and Implementation of Hydro Turbine Power Adaptive Control based on gain scheduling technique. Proc. of 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Intelligent System Applications to Power Systems, 25 – 28 Sept. 2011 Greece, Hersonissos, pp. 229–234.
27. Sharma J.D., Kumar A. Development and Implementation of Non – Linear Hydro Turbine Model with Elastic Effect and Surge Tank. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 234–243.
28. Souza O.H. Jr., Barbieri N., Santos A.H.M. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1269–1273.
29. Theophilus E.C., Eneh I.I. Improving the Stability of Hydro Power Generator Using Neuro-Fuzzy Techniques. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2016, vol. 5, no. 6, pp. 113–124.
30. Tripathy S.C. Digital Governor for Use Computer Control of Generating Unit. *Energy Conversion and Management*, 1998, vol. 39, no. 10, pp. 973–983.
31. Vinatoru M. Monitoring and Control of Hydro Power Plant. Proc. of IFAC Workshop ICPS'07 July 09–11, 2007, Cluj–Napoca, Romania, pp. 44–55.
32. Zhaohui Li, Luqing Ye, Shouping Wei, Malik O.P., Hope G.S., Hancock G.C. Fault Tolerance Aspects of Highly Reliable Microprocessor–based Water Turbine Governor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 1–7.
33. Zhihuai Xiao, Suili Meng, Na Lu, Malik O.P. One-Step-Ahead Predictive Control for Hydroturbine Governor. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 382954, 10 p.

---

**КУРИР ВАЛЕРИЙ ИОСИПОВИЧ** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет КНИТУ – КАИ имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (kurir\_valerian@mail.ru).

---

**V. KURIR**  
**ON MODELING HYDROGENERATOR WITH TURBINE**  
**IN MATLAB/SIMULINK**

**Key words:** hydrogenerator with turbine, automatic control systems for rotation speed of turbine and generator excitation system, simulation of operating mode for hydraulic unit using MATLAB/SIMULINK.

The author gives an overview of the works devoted to the numerical analysis of hydraulic unit operating mode for hydropower plant (HPP) in MATLAB/SIMULINK. The article shows the evolution of hydraulic unit models for their implementation in MATLAB/SIMULINK. The evolution is presented in four sections: 1) classical models; 2) optimal robust turbine and generator control; 3) adaptive turbine and generator control; 4) joint adaptive control involving neural network methods and fuzzy logic. The presence of a number of special packages in MATLAB allowed researchers to evaluate the effectiveness of all types in optimal, adaptive and digital turbine and generator control, as well as to simulate any type of accident at the hydropower plant and power grid, to analyze their consequences. On the basis of MATLAB/SIMULINK, the operation to introduce stabilizing links and systems into the control loop of the whole hydraulic unit and power system is repeatedly modeled. The evolution of the MATLAB package, the appearance of the OPC TOOLBOX MATLAB/SIMULINK library create conditions for connecting the package to the HPP control system. The author comes to conclusion that MATLAB/SIMULINK package should be included into APCS of HPP.

References

1. Bashnin O.I. *Upravleniye moshchnost'yu gidravlicheskoj turbiny* [Hydraulic turbine power control]. *Gidrotekhnika. XXI vek* [Hydrotechnical. XXI Century], 2015, vol. 24, no. 4, pp. 32–41.
2. Braganets S.A. *Razrabotka matematicheskoy modeli servomotora napravlyayushchego gidroagregata s povorotno-lopastnoy turbinoj* [Development of a mathematical model of a servomotor of a hydraulic unit with a rotary vane turbine]. *Promyshlennyye FSU i kontrolyery* [Industrial FSU and controllers], 2012, no. 10, pp. 10–13.
3. Bulatov Yu.N., Ignat'yev I.V. *Modelirovaniye gidroturbin, avtomaticheskikh regulyatorov chastoty i aktivnoy moshchnosti v srede MATLAB* [Modeling of hydro turbines, automatic frequency controllers and active power in the MATLAB environment]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2009, no. 4, pp. 67–70.
4. Bulatov Yu. N. *Modelirovaniye avtomaticheskikh regulyatorov vzbuzhdeniya generatorov elektricheskikh stantsiy v srede MATLAB* [Simulation of automatic excitation regulators of power station generators in MATLAB environment]. *Matematicheskoye modelirovaniye, chislennyye metody i kompleksy programm: mezhvuz. temat. sbornik tr. Vyp. 14* [Mathematical modeling, numerical methods and program complexes: Interuniversity Thematic Collection of papers, issue 14]. St. Petersburg, 2008, pp. 18–24.
5. Gol'tsov A.S., Gol'tsov S.A., Klimenko A.V., Silayev A.A. *Upravleniye aktivnoy moshchnost'yu gidroagregata GES s povorotno-lopastnoy turbinoj* [Control of the active power of a hydroelectric unit of a hydroelectric station with a rotary vane turbine]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2008, no. 11, pp. 1–4.
6. Leonov G.A., Andriyevskiy B.R., Kuznetsov N.V., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V. *Matematicheskoye modelirovaniye perekhodnykh protsessov gidroagregata Sayano-Shushenskoy GES* [Mathematical modeling of transients of the hydraulic unit of the Sayano-Shushenskaya HPP]. *Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential Equations and Control Processes], 2018, no. 4, pp. 80–105.
7. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB.SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB.SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 288 p.
8. Arnautovic D.B., Skataric D.M. Suboptimal Design of Hydro turbine Governors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, vol. 6, no. 3, pp. 438–444.

9. Chu Zhang, Tian Peng, Chaoshun Li, Wenlong Fu, Xin Xia, Xiaoming Xue. Multiobjective Optimization of Fractioned – Order PID-Controller for Pumped Turbine Governing System Using an Improved NSGA-III Algorithm under Multiworking Conditions. *Complexity*, 2019, vol. 2019, Article ID 5826873, 18 p.
10. Chuanwen Jiang, Yuchao Ma, and Cengmin Wang. PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing systems using deterministic – chaotic – mutation evolutionary programming (DCMEP). *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, no. 9–10, pp. 1222–1230.
11. IEEE committee report, Dynamics models for steam and hydro turbines in power system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1973, vol. 7, no. 6, pp. 1904–1915.
12. IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Dynamic Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 167–179.
13. IEEE 421.5–1992 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 1992, 56 p.
14. IEEE 421.5–2005 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 2006, 95 p.
15. Jin Jiang. Design of an Optimal Robust Governor for Hydraulic Turbine Generating Units. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 188–194.
16. Kishor N., Saini R.L., Singh S.P. Optimal Pole Shift Control in Application to a Hydro Power Plant. *Journal of Electrical Engineering*, 2005, vol. 56, no. 11–12, pp. 290–297.
17. Kishor N., Saini R.P., Singh S.P. A review on hydropower plant models and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, vol. 11, pp. 776–796.
18. Lone R.A., Ganie Z.A. Modeling and Fault Analysis of Canal Type Small Hydro Power Plant. *International Journal of Computational Engineering Research*, 2013, vol. 3, no. 6, pp. 60–67.
19. Malik O.P., Zeng Y. Design of a Robust Adaptive Controller for a Water Turbine Governing System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 354–359.
20. Margonis P. Modelling and Optimization of a Hydroelectric Power Plant for a National Grid Power System Supple. Master Thesis, Technical University of Greece, March 2017, 178 p.
21. Mei Sheng Wei, Gui Xiao Yang, Shen Chen, Lu Qiang. Dynamic Extending Nonlinear H $\infty$  Control and its application to hydraulic turbine governor. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2007, vol. 50, no. 5, pp. 618–635.
22. Morab A.N., Jinde S.P., Narra J., Kokane O. Comparative Study of Synchronous Machine Model 1.0 and Model 1.1 in Transient Stability Studies with and without PSS. *International Journal of Engineering Research & Tecnology*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 300–306.
23. Munoz-Hernandez G.A. Application of Model Based predictive Control to a Pumped Storage Hydroelectric Plant. Doctor Thesis, University of Wales, 2005, 139 p.
24. Nasstrom J. State of the Art Development Platform for Hydropower Turbine Governors. Master Thesis, University of Umea, Sweden, 2017, 56 p.
25. Razmjoo N., Khalilpour M. Optimum Control of Hydro Turbine Connected to the Equivalent Network for Damping Frequency Oscillation Using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 1204–1211.
26. Ruzhekov G., Slavov Ts., Puleva T. Modeling and Implementation of Hydro Turbine Power Adaptive Control based on gain scheduling technique. Proc. of 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Intelligent System Applications to Power Systems, 25 – 28 Sept. 2011 Greece, Hersonissos, pp. 229–234.
27. Sharma J.D., Kumar A. Development and Implementation of Non – Linear Hydro Turbine Model with Elastic Effect and Surge Tank. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 234–243.
28. Souza O.H. Jr., Barbieri N., Santos A.H.M. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1269–1273.
29. Theophilus E.C., Eneh I.I. Improving the Stability of Hydro Power Generator Using Neuro-Fuzzy Techniques. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2016, vol. 5, no. 6, pp. 113–124.

30. Tripathy S.C. Digital Governor for Use Computer Control of Generating Unit. *Energy Conversion and Management*, 1998, vol. 39, no. 10, pp. 973–983.

31. Vinatoru M. Monitoring and Control of Hydro Power Plant. Proc. of IFAC Workshop ICPS'07 July 09–11, 2007, Cluj–Napoca, Romania, pp. 44–55.

32. Zhaohui Li, Luqing Ye, Shouping Wei, Malik O.P., Hope G.S., Hancock G.C. Fault Tolerance Aspects of Highly Reliable Microprocessor–based Water Turbine Governor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 1–7.

33. Zhihuai Xiao, SuiliMeng, Na Lu, Malik O.P. One-Step-Ahead Predictive Control for Hydroturbine Governor. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 382954, 10 p.

---

**KURIR VALERY – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (kurir\_valerian@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** Курир В.И. О моделировании гидрогенератора с турбиной в Matlab/Simulink // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 133–141.

УДК 621.313

ББК 31.261.2

К.В. ЛИЦИН

## АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

**Ключевые слова:** двигатель переменного тока, промежуточный трансформатор, преобразователь частоты, угловая скорость, энергетические характеристики.

Проведен анализ влияния промежуточных трансформаторов на технико-экономические показатели электропривода, основанного на высоковольтном асинхронном электродвигателе. Дана оценка систем пуска высоковольтных электродвигателей переменного тока. Представлены достоинства и недостатки двухтрансформаторной схемы пуска высоковольтного электропривода. Отмечено, что использование низковольтных преобразователей частоты позволит существенно уменьшить стоимость высоковольтного электропривода. Представлена функциональная схема двухтрансформаторной системы высоковольтного электропривода. Проанализированы ее основные элементы. Рассчитаны параметры схемы замещения трансформаторов и двигателя переменного тока по известным методикам. Разработана модель системы высоковольтного электропривода в программе Matlab Simulink. Разработанная система включает в себя: источник, дроссель, выпрямитель, сглаживающий входной фильтр, инвертор, синус-фильтр, асинхронный двигатель. Управление IGBT-транзисторами, являющимися составной частью инвертора, осуществляется с помощью блока векторного управления. Блок векторного управления реализует известные законы управления по вектору потокосцепления и на основе получаемой скорости с асинхронного двигателя. Рассчитаны необходимые параметры регуляторов скорости и тока. Проанализированы качественные показатели переходного процесса угловой скорости, полученные в процессе разгона двигателя. Среди основных качественных показателей можно выделить время регулирования и перерегулирования. На основании разработанной схемы исследована величина динамических потерь системы с промежуточными трансформаторами и без них. Выявлено, что промежуточные трансформаторы незначительно ухудшают энергетические характеристики системы. Кроме того, величина потерь будет наблюдаться только в процессе разгона асинхронного двигателя. В представленной работе время выхода на основную скорость не превышает 1,5 с. В ходе работы возможен переход на питание от сети напрямую по технологии «Байпасс». При необходимости возможно управление скоростью двигателя через низковольтный преобразователь частоты. Величина абсолютной разницы не превысит порога допустимого значения. Произведено сравнение стоимости систем с низковольтной и высоковольтной инверторными ячейками. Выявлено, что величина экономического эффекта от использования схемы с двумя трансформаторами может достигать 2,5 млн руб.

**Введение и постановка задачи.** В настоящее время преимущество в конкурентной борьбе получают те предприятия, чья продукция будет отвечать все возрастающим требованиям производительности, технологическим возможностям и экономичности [8]. Пуск высоковольтных двигателей переменного тока сопряжен с задачей подбора аналогичного по мощности преобразователя частоты [1]. С целью удешевления стоимости системы применяются различные схемные решения, одно из которых связано с использованием двухтрансформаторной схемы [11].

Причина использования двухтрансформаторной схемы заключается в том, что, с одной стороны, имеется возможность применить в процессе эксплуатации двигателя низковольтную инверторную ячейку, которая бы позволила осуществлять коммутацию ключей инвертора при напряжении двигателя от 6 до 10 кВ [9]. С другой стороны, наличие дополнительных элементов, в данном случае трансформаторов, неизбежно приведет к усложнению конструкции и незначительному снижению КПД системы [3].

В схеме преобразователь частоты – высоковольтный двигатель переменного тока образуются высшие гармоники напряжения, которые приводят к росту потерь в трансформаторах, связанных с гистерезисом и вихревыми токами. Кроме того, увеличиваются потери в обмотках вследствие увеличения активного сопротивления, вызванного поверхностным эффектом и эффектом близости. Как следствие, возрастает вероятность повышенного нагрева частей трансформатора и электродвигателя, процесс старения изоляции происходит быстрее и уменьшается срок службы электрических машин. Применение низковольтной ячейки взамен высоковольтного преобразователя частоты позволит также добиться существенной экономии финансовых средств по причине высокой стоимости высоковольтных транзисторов. Поэтому задача исследования энергетических характеристик в системе преобразователя частоты – высоковольтный двигатель переменного тока с промежуточными трансформаторами – является актуальной.

Целью работы является исследование влияния двухтрансформаторной схемы электропривода на энергетические показатели системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель двухтрансформаторной схемы в программе Matlab Simulink;
- исследовать влияние промежуточных трансформаторов на качественные показатели в процессе разгона двигателя;
- исследовать величину потерь в двухтрансформаторной системе электропривода.

**Модель системы электропривода с промежуточными трансформаторами.** На рис. 1 представлена функциональная схема двухтрансформаторной системы высоковольтного электропривода, включающая в себя понижающий (Т1) и повышающий (Т2) трансформатор, низковольтный преобразователь частоты (ПЧ), синус-фильтр (СФ) и высоковольтный двигатель переменного тока (М).

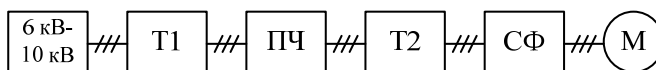


Рис. 1. Функциональная схема двухтрансформаторной системы высоковольтного электропривода

Исходное трёхфазное напряжение 6-10 кВ подается на вход понижающего силового трансформатора, с его выхода поступает и обрабатывается в низ-

ковольтном преобразователе частоты. Повышение до необходимого уровня напряжения происходит в Т2. Очевидным преимуществом данной схемы является то, что при использовании двойного преобразования напряжения возможно применение низковольтного ПЧ, который значительно дешевле высоковольтного [7].

Для моделирования схемы, представленной на рис. 1, была выбрана 6 кВ ячейка с трансформаторами, параметры которых представлены в табл. 1 [5].

Таблица 1

## Паспортные данные трансформатора

Тип трансформатора	$S_{ц}$ , кВА	$U_{кз}$ , %	$P_{кз}$ , Вт	$P_0$ , Вт	$I_0$ , %
ТМ-250/6-10-66	250	4,5	3700	1050	2,3

Согласно методике, представленной в [7], был осуществлен расчёт параметров схемы замещения трансформатора в относительных единицах, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Параметры схемы замещения трансформатора

R1	L1	R2	L2	Rm	Lm
0,0074	0,021	0,0074	0,021	238,1	44,22

В качестве высоковольтного электродвигателя переменного тока был использован асинхронный двигатель А4-355L-4. Его параметры представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Паспортные данные асинхронного двигателя

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота, об/мин	КПД, %	Питание, В
А4-355L-4	250	1500	94,1	6000

Параметры схемы замещения двигателей рассчитаны по методике, изложенной в [6].

В результате в программе Matlab/Simulink была составлена структурная схема, представленная на рис. 2. Блок Vector Control позволяет реализовать векторное управление преобразователем частоты. Описание принципа его работы представлено в [10].

Обязательным элементом системы является наличие синус-фильтра (SinFilter), который позволяет приблизить форму повышенного напряжения к синусоидальной.

Влияние промежуточных трансформаторов на систему оценим с помощью качественных показателей переходных процессов скорости без промежуточных трансформаторов (рис. 3) и при их наличии (рис. 4).

В табл. 4 представлены качественные показатели переходного процесса скорости при наличии повышающего и понижающего трансформаторов и без них.



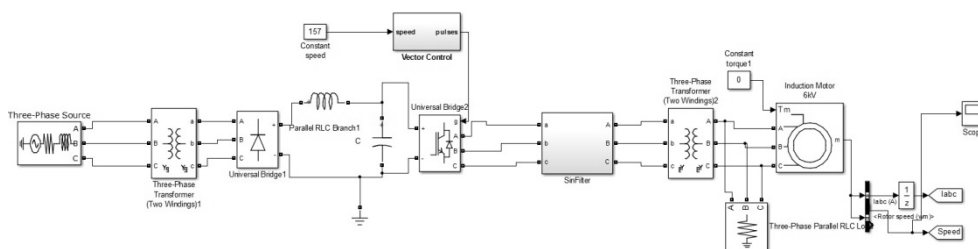


Рис. 2. Структурная схема двухтрансформаторного высоковольтного электропривода

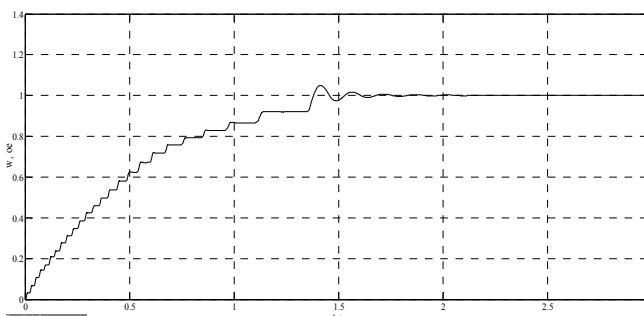


Рис. 3. Осциллограмма угловой скорости высоковольтного электропривода переменного тока без промежуточных трансформаторов, отн. ед.

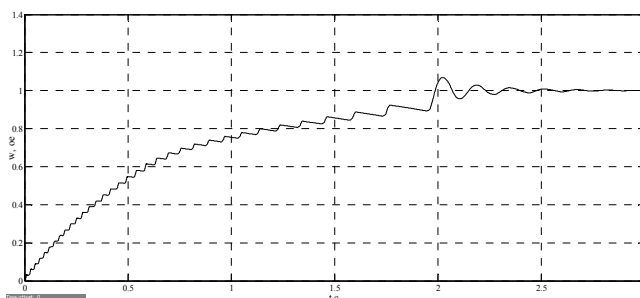


Рис. 4. Осциллограмма угловой скорости высоковольтного электропривода переменного тока с промежуточными трансформаторами, отн. ед.

Таблица 4

**Качественные показатели переходного процесса скорости**

Параметр	Без промежуточных трансформаторов	При наличии промежуточных трансформаторов
Время регулирования, с	1,48	2,15
Перерегулирование, %	4,89	6,92
Время достижения максимума, с	1,38	1,97
Время нарастания, с	1,33	1,88

Анализируя данные, представленные в табл. 4, можно сделать вывод, что при эксплуатации промежуточных трансформаторов время регулирования возрастёт на 0,67 с (31,16%), перерегулирование возрастёт на 2,03%, время достижения максимума и нарастания увеличится на 0,61 с (29,94%) и 0,55 с (29,25%).

Кроме того, с помощью схемы измерения потерь мощности и КПД, подробно описанной в [2], был проведен сравнительный анализ потерь, добавляемых промежуточными трансформаторами (рис. 5).

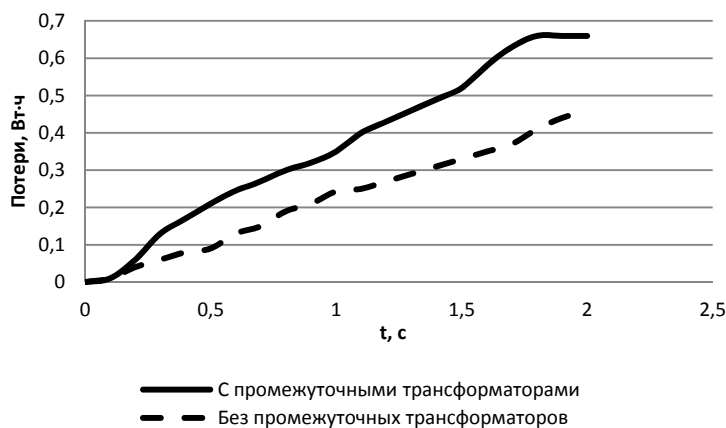


Рис. 5. График изменения потерь при разгоне электродвигателя

Из рис. 5 следует, что в процессе выхода высоковольтного двигателя переменного тока на номинальную скорость величина потерь в системе с промежуточными трансформаторами превышает потери в системе без их использования. Для сравнения, в момент времени, равный 1 с, трансформаторная система имеет величину потерь, равную 0,35 Вт·ч. При том же временном значении величина потерь у бестрансформаторной системы равна 0,24 Вт·ч. Относительная разность потерь равна 30,51%. При достижении величины угловой скорости номинального значения (бестрансформаторная система), относительная разность потерь составила 30,54%.

Произведем оценку экономической составляющей систем, опираясь на данные, представленные в [4] (табл. 5).

Таблица 5

**Экономическая оценка трансформаторной и бестрансформаторной систем**

Мощность двигателя, кВт	Стоимость системы с промежуточными трансформаторами и низковольтной инверторной ячейкой, тыс. руб.	Стоимость системы с высоковольтной инверторной ячейкой, тыс. руб.
200	3400	5900
400	4590	6250
500	4960	6480
800	6950	8210
1000	7900	8400

Из табл. 5 следует, что максимальный экономический эффект может быть достигнут при мощности двигателей в диапазоне 200–300 кВт. Разница в системах составляет около 2,5 млн руб. По мере увеличения мощности двигателя разница несколько нивелируется, что объясняется возрастающей ценой трансформаторов. В целом диапазон экономического эффекта составляет 1,5–2,5 млн руб.

**Выводы.** 1. Произведен расчет схемы замещения промежуточных трансформаторов и асинхронного электродвигателя. На их основе разработана двухтрансформаторная схема высоковольтного электропривода переменного тока в программе Matlab/Simulink.

2. Влияние промежуточных трансформаторов на систему электропривода оценено с помощью анализа качественных показателей переходного процесса скорости. Отмечено, что при эксплуатации промежуточных трансформаторов время регулирования возрастёт на 0,67 с (31,16%), перерегулирование возрастёт на 2,03%, время достижения максимума и нарастания увеличатся на 0,61 с (29,94%) и 0,55 с (29,25%).

3. Проведен анализ динамических потерь при разгоне электродвигателя. Относительная разность потерь в системах при выходе на номинальную скорость составила 30,54%. В абсолютных единицах данная величина равна 0,24 Вт·ч.

4. Экономический эффект при использовании системы с промежуточными трансформаторами составит 1,5–2,5 млн руб. в зависимости от мощности двигателя.

5. В итоге система с промежуточными трансформаторами высоковольтного электропривода имеет недостатки, связанные с увеличением потерь и времени разгона двигателя. Однако величина абсолютных потерь невелика. При этом предлагаемая система обладает существенным преимуществом в виде экономического эффекта, который перекрывает названные недостатки.

#### Литература

1. Анисимов Д.М., Сарваров А.С., Сарваров И.А., Петушков М.Ю., Трёхфазное устройство пуска высоковольтного электродвигателя: свидетельство РФ на полезную модель. № 82963; опубл. в БИМП. 2009. № 3.

2. Басков С.Н., Лицин К.В., Радионов А.А. Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме векторно-импульсного пуска // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 3–8.

3. Высоковольтные двухтрансформаторные преобразователи частоты компании «Univolts» [Электронный ресурс]. URL: <http://univolts.ru/trademap/electric/invertors/highvoltage/2trans>.

4. Иванов В.В. Цены и сроки окупаемости высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых машин (дымососов и вентиляторов) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.erasib.ru/staty/price-ROI-cement-fan>.

5. Каталог силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/elektrifikaciya-blochno-komplektnyh-ustanovok-neftyanoy-promyshlennosti-15.html>.

6. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab Simulink // ACADEMY. 2015. № 2. С. 7–11.

7. Петушков М.Ю. Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2015. 226 с.

8. Сивак Б.А., Наливайко А.В. Актуальные направления и задачи развития металлургического машиностроения России // Вестник ЮНИДО в России. 2014. № 13. С. 33–36.

9. Фокеев А.Е. Исследование силовых трансформаторов при несинусоидальных режимах: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск., 2012. 147 с.

10. Baskov S.N., Litsin K.V. Research of vector-pulse start system of synchronous motor with intermediate transformer and sensorless determination of angular rotor position with mathematical

methods. 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910955.

11. Sawa T. Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial states. *IEEE Trans. Industry Applications*, 2003, no. 39, pp. 761–767.

---

**ЛИЦИН КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники, Московский институт стали и сплавов (Новотроицкий филиал), Россия, Новотроицк (k.litsin@rambler.ru).

---

K. LITSIN

**ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS  
OF AC VOLTAGE ELECTRIC DRIVE SYSTEM  
WITH INTERMEDIATE TRANSFORMERS**

**Key words:** AC motor, intermediate transformer, frequency converter, angular velocity, energy characteristics.

The article analyzed the influence of intermediate transformers on the technical and economic performance of an electric drive based on a high-voltage asynchronous electric motor. The analysis of the start-up systems for high-voltage AC electric motors was carried out. The advantages and disadvantages of a two-transformer start-up circuit of a high-voltage electric drive are presented. It is noted that the use of low-voltage frequency converters will significantly reduce the cost of the high-voltage electric drive. The functional diagram of a two-transformer system of a high-voltage electric drive is presented, its main elements being analyzed. The parameters of the equivalent circuit of transformers and AC motors are calculated using known methods. The model of the high-voltage electric drive system has been developed in the Matlab Simulink program. The developed system includes source, choke, rectifier, smooth input filter, inverter, sine filter, asynchronous motor. The control of IGNT transistors, which are part of the inverter, is carried out using a vector control unit. The vector control block implements the known laws of control on the vector of flux linkage and on the basis of the resulting speed from the asynchronous motor. Necessary parameters of the speed and current regulators are calculated. The qualitative indicators of the transition process of the angular velocity obtained in the process of engine acceleration are analyzed. Among the main quality indicators we can distinguish the regulation time and overshoot. Based on the developed scheme, the magnitude of the dynamic losses of the system with and without intermediate transformers is investigated. It is revealed that intermediate transformers slightly degrade the energy performance of the system. In addition, the magnitude of the loss will be observed only in the process of acceleration of the induction motor. In the present work, the time for reaching the main speed does not exceed 1.5 s. During work, it is possible to switch to power from the network directly using the Bypass technology. If necessary, it is possible to control the motor speed through a low-voltage frequency converter. The magnitude of the absolute difference does not exceed the threshold of acceptable values. A comparison of the cost of systems with low-voltage and high-voltage inverter cell is made. It was revealed that the value of the economic effect from the use of a circuit with two transformers can reach 2.5 million rubles.

References

1. Anisimov D.M., Sarvarov A.S., Sarvarov I.A., Petushkov M.Yu. *Puskovoe ustroystvo trekhfaznogo vysokovol'nogo elektrodvigatelya peremennogo toka* [Starting device of the three-phase high-voltage AC electric motor]. Certificate of the Russian Federation for utility model no. 82963, publ. in BIMP, 2009, no. 3.
2. Baskov S.N., Litsin K.V., Radionov A.A. *Opreделение uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya v rezhime vektorno-impul'snogo pushka* [Determination of the rotor angular position of the synchronous motor in the vector-pulse starting mode]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. [News of higher educational institutions of Chernozem region], 2014, no 4, pp. 3–8.

3. Kompaniya «Univolts». *Vysokovol'tnyye dvukhtransformatornyye preobrazovateli chastoty*. [Univolts company. High-voltage two-transformer converters frequently]. Available at: <http://univolts.ru/trademap/electric/invertors/highvoltage/2trans>.

4. Ivanov V.V. *Tseny i sroki okupaemosti vysokovol'tnykh chastotno-reguliruemyykh elek-tropri-vodov tyagodut'evykh mashin (dymosov i ventilyatorov)* [Prices and payback periods for high-voltage variable-frequency drives of electric machines (smoke exhausters and fans)]. Available at: <http://www.erasib.ru/staty/price-ROI-cement-fan>.

5. *Katalog silovykh transformatorov 6(10)/0,4 kV*. [Catalog of power transformers 6(10) /0,4 kV]. Available at: <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/elektrifikaciya-blochno-komplektnykh-ustanovok-neftyanoy-promyshlennosti-15.html>.

6. Pantel' O.V. *Metodika rascheta parametrov asinkhronnogo dvigatelya dlya modelirovaniya rezhimov ego raboty v srede Matlab Simulink*. [The method of calculating the parameters of an asynchronous engine for modeling its operation modes in Matlab Simulink]. *ACADEMY*, 2015, no. 2, pp. 7–11.

7. Petushkov M.Yu. *Povyshenie resursoeffektivnosti ekspluatatsiya vysokovol'tnykh asinkhronnykh elektroprivodov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving resource efficiency operation of high-voltage asynchronous electric drives. Doct. Diss]. Magnitogorsk, 2015, 226 p.

8. Sivak B.A., Nalivaiko B.A. *Aktual'nye napravleniya i zadachi razvitiya metallurgicheskogo mashino-stroeniya Rossii* [Actual directions and tasks of the development of metallurgical machine building in Russia]. *Vestnik YuNIDO v Rossii*, 2014, no. 13, pp. 33–36.

9. Fokeev A.E. *Issledovanie silovykh transformatorov pri nesinusoidal'nykh rezhimakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of power transformers with non-sinusoidal modes. Doct. Diss.]. Izhevsk, 2012, 147 p.

10. Baskov S.N., Litsin K.V. Research of vector-pulse start system of synchronous motor with intermediate transformer and sensorless determination of angular rotor position with mathematical methods. 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910955.

11. Sawa T. Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial states. *IEEE Trans. Industry Applications*, 2003, no. 39, pp. 761–767.

---

**LITSIN KONSTANTIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Moscow Institute of Steel and Alloys (Novotroitsk Branch), Russia, Novotroitsk (k.litsin@rambler.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Лицин К.В.* Анализ технико-экономических параметров системы высоковольтного электропривода переменного тока с промежуточными трансформаторами // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 142–149.

УДК 621.33  
ББК 31.291-04

А.В. МАКАРОВ, В.Г. МАКАРОВ, А.Ю. АФАНАСЬЕВ

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ДВИЖЕНИИ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

**Ключевые слова:** гибридная силовая установка, электропривод, электродвигатель, энергосбережение, электромагнитный момент, мощность потерь, оптимальное управление, стационарное движение, принцип максимума.

*Движение транспортного средства обычно состоит из нескольких этапов. В простейшем случае наблюдаются три этапа. На первом этапе происходят трогание транспортного средства с места и его разгон до определенной скорости. Второй этап – движение с постоянной скоростью продолжительное время. Третий этап – торможение и остановка. Первый и третий этапы являются переходными процессами, а второй этап – установившимся процессом. Реально второй этап сопровождается изменениями скорости. Цель работы – разработка оптимальных законов управления токами электродвигателя и оптимальных законов движения электропривода при стационарном движении транспортного средства с гибридной силовой установкой. Разработаны методология оптимизации токов и процессов движения тяговых электродвигателей, алгоритмы и компьютерные программы синтеза оптимального управления согласно принципу максимума по критерию энергосбережения. В процессе работы использовались аналитические и численные методы математического программирования и оптимального управления электромеханическими системами. В результате исследования были разработаны алгоритмы и компьютерные программы поиска оптимальных законов управления токами и оптимального закона движения электроприводом гибридной силовой установки транспортного средства. Определено, что для синтеза оптимального управления движением транспортного средства с гибридной силовой установкой при заданном суммарном моменте необходимо учитывать комплексный показатель стоимости энергии двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя.*

Известно, что принцип максимума Л.С. Понтрягина предполагает составление системы  $n$  дифференциальных уравнений относительно переменных состояния (фазовых координат) и системы  $n$  дифференциальных уравнений относительно сопряженных переменных [3].

В случае линейного описания объекта управления характеристическое уравнение объединенной системы дифференциальных уравнений имеет  $n$  корней в левой полуплоскости комплексной плоскости и  $n$  корней в правой полуплоскости. Объединенная система из  $2n$  уравнений получается неустойчивой [6].

Во время разгона свободная составляющая скорости  $v$  отрицательная и уменьшается по модулю до нуля. Эта составляющая соответствует корням характеристического уравнения, лежащим в левой полуплоскости («устойчивым» корням) [5].

При стационарном движении скорость постоянна и равна принужденной составляющей. При торможении скорость уменьшается до нуля, а свободная составляющая отрицательная и растет по модулю. Она соответствует корням

характеристического уравнения, лежащим в правой полуплоскости («неустойчивым» корням) [4].

Рассмотрим задачу поиска оптимального стационарного движения электропривода с инерционным объектом и электродвигателем. Движение объекта управления описывается уравнениями:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (cu - M_c(x_2)) / J, \quad (2)$$

где  $x_1 = \alpha$  – угол поворота объекта;  $x_2 = \omega$  – его частота вращения;  $c$  – коэффициент электромагнитного момента и ЭДС вращения;  $u$  – управляющее воздействие, равное току обмотки управления электродвигателя;  $M_c$  – статический момент сопротивления;  $J$  – момент инерции подвижных частей электропривода [1].

Статический момент определяется формулой

$$M_c = k_0 + k_1x_2 + k_2x_2^2. \quad (3)$$

Первое слагаемое соответствует активному моменту из-за наклонной дороги и моменту трения, второе слагаемое дает момент вязкого трения, а третье слагаемое – вентиляторный или аэродинамический момент [2].

Качество управления определяется функционалом

$$V = \int_0^{t_f} [ru^2 + cx_2u + Q]dt, \quad (4)$$

где  $t_f$  – время движения;  $r$  – эквивалентное активное сопротивление обмотки электродвигателя;  $Q$  – условная стоимость единицы времени работы электропривода [7].

Требуется найти частоту вращения  $x_2$  и управление  $u$ , при которых объект повернется на требуемый угол  $\alpha_f$ , а функционал (4) минимален. За аргумент примем частоту вращения  $x_2$ . Решая задачу на условный экстремум, получим, что справедливы соотношения:

$$t_f = \frac{\alpha_f}{x_2}; M = M_c;$$

$$u = (k_0 + k_1x_2 + k_2x_2^2) / c; \quad (5)$$

$$V = [r(k_0 + k_1x_2 + k_2x_2^2)^2 / c^2 + x_2(k_0 + k_1x_2 + k_2x_2^2) + Q] \frac{\alpha_f}{x_2} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Условие стационарности функции  $V$  имеет вид

$$\frac{dV}{dx_2} = 0. \quad (7)$$

Это уравнение решается методом Ньютона с помощью итерационной формулы [8]

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - \frac{dV / dx_2}{d^2V / dx_2^2}. \quad (8)$$

После определения параметров, соответствующих установившемуся режиму работы электропривода, целесообразно решить задачу оптимального управления электроприводом методом принципа максимума Понтрягина, чтобы убедиться в стационарности оптимального движения. Для этого запишем гамильтониан и уравнения относительно сопряженных переменных, а также условие максимума гамильтониана:

$$H = -ru^2 - cx_2u - Q + \psi_1x_2 + \psi_2(cu - M_c(x_2)) / J; \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = cu - \psi_1 + \frac{\psi_2}{J} \frac{dM_c(x_2)}{dx_2}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = -2ru - cx_2 + \psi_2c / J = 0. \quad (12)$$

В качестве начальных условий для сопряженных переменных должны быть приняты значения  $\psi_1, \psi_2$ , полученные из равенств (11), (12). При этом гамильтониан  $H$  должен быть тождественно равен нулю, что соответствует оптимальному времени движения.

Параметры электропривода имели следующие значения:  $r = 3$  Ом;  $c = 2$  В/с;  $J = 0,5$  кг·м<sup>2</sup>;  $k_0 = 2,0$ ;  $k_1 = 0,004$ ;  $k_2 = 0,000008$ ;  $\alpha_f = 150$  рад.

Шаг интегрирования  $h = 0,0002$  с. Масштаб по времени – 150. Масштабы угла поворота и частоты вращения – 2,5 и 5. Масштабы сопряженных переменных – 40 и 6. Количество шагов определялось для каждого значения стоимости  $Q$ .

На рис. 1 приведены графики угла поворота объекта  $x_1$ , его частоты вращения  $x_2$ , сопряженных переменных  $\psi_1, \psi_2$  в функции от времени при шести значениях условной стоимости  $Q = 5, 10, \dots, 30$  Вт. Все величины, кроме угла, постоянны по времени, что свидетельствует о стационарности движения. Видно, что с увеличением величины  $Q$  увеличиваются частота вращения  $x_2$  и сопряженные переменные  $\psi_1, \psi_2$ , а время движения  $t_f$  уменьшается.

Гамильтониан  $H$  во всех случаях тождественно равен нулю, что говорит об оптимальности времени движения.

На рис. 2 приведены зависимости времени движения  $t_f$ , частоты вращения  $x_2$ , управления  $u$ , сопряженных переменных  $\psi_1, \psi_2$  и функционала  $V$  в зависимости от условной стоимости  $Q$ . Масштабы имеют значения: для  $Q$  – 20; для сопряженных переменных – 40 и 5; для частоты вращения – 4; для управления – 200; для времени движения – 60; для показателя качества (для функционала  $V$ ) – 0,8.

Видно, что с увеличением величины  $Q$  время движения  $t_f$  уменьшается, а все другие величины возрастают. Полученные зависимости могут быть использованы при выборе скорости движения транспортного средства при значительных силах лобового сопротивления с учетом стоимости времени эксплуатации транспортного средства на интервалах времени, когда процесс движения стационарен.



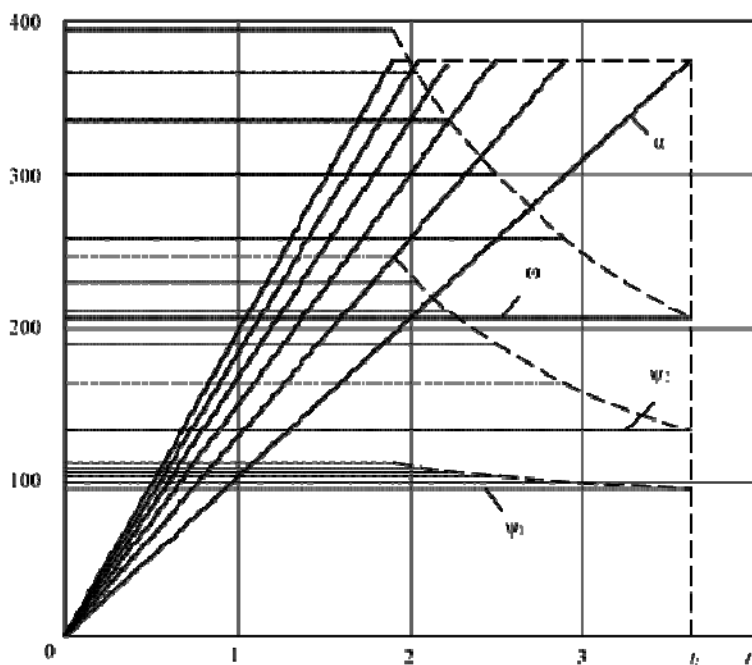


Рис. 1. Зависимости угла и частоты вращения от времени

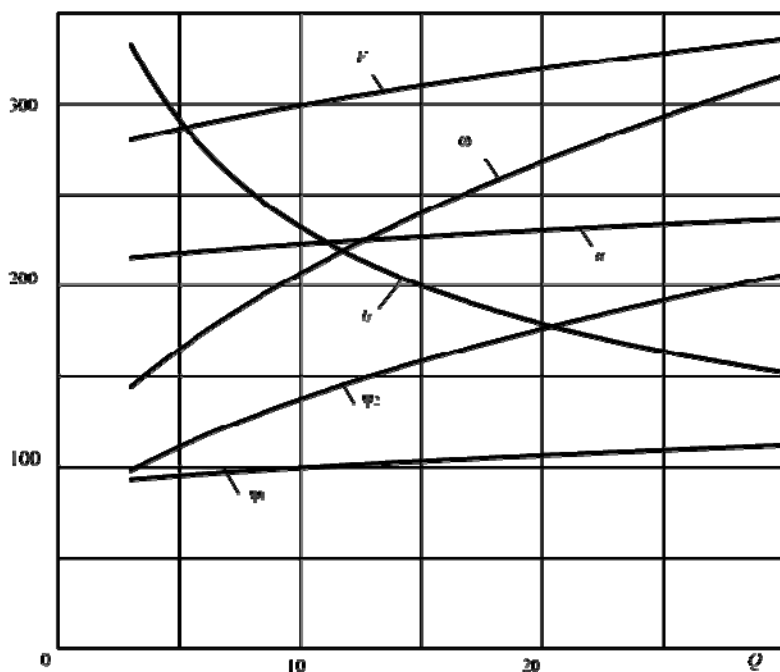


Рис. 2. Зависимости времени движения, частоты вращения, управления, сопряженных переменных и функционала от условной стоимости

**Поиск оптимального стационарного движения транспортного средства (ТС) с гибридной силовой установкой (ГСУ) и жесткой связью в передаче.** Рассмотрим задачу оптимального движения ТС с ГСУ с постоянной скоростью. Пусть движение ТС с ГСУ описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (13)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = [M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2) - M_{1c}(x_2)] / J_1, \quad (14)$$

где  $x_1 = \alpha_1$ ,  $x_2 = \omega_1$  – угол поворота и частота вращения вала дизельного двигателя ДД;  $u_1$  – степень использования дизеля по мощности и моменту;  $u_2 = I$  – ток электродвигателя (ЭД);  $J_1$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу дизельного двигателя (ДД);  $M_{1c}$  – приведенный статический момент сопротивления, определяется формулой

$$M_{1c} = k_0 + k_1 x_2 + k_2 x_2^2.$$

Величины  $x_1$  и  $x_2$  играют роль фазовых координат, а величины  $u_1$  и  $u_2$  – роль управляющих воздействий.

Интервал времени  $[t_0, t_f]$  не определен, а начальные и конечные условия заданы:

$$x_1(t_0) = x_{10}; x_2(t_0) = x_{20}; x_1(t_f) = x_{1f}; x_2(t_f) = x_{2f}. \quad (15)$$

Требуется найти значения постоянных управляющих воздействий  $u_1$  и  $u_2$ , при которых функционал

$$V = \int_{t_0}^{t_f} (a_D G(u_1, x_2) + a_E P(u_2, x_2) + Q) dt \quad (16)$$

имеет минимальное значение при уравнениях (13), (14). Здесь  $a_D$ ,  $a_E$  – весовые коэффициенты, определяющие ценность дизельного топлива и электрической энергии; константа  $Q$  – условная стоимость единицы времени эксплуатации электропривода или движения транспортного средства.

При решении задачи секундный расход топлива ДД  $G$  определяется согласно [1], а мощность  $P$ , потребляемая ЭД, определяется уравнением

$$P = x_2 M_2 + c_1 M_2^2 = c u_2 x_2 + c_1 c^2 u_2^2.$$

Запас крутящего момента  $m_3 = 0,2$ .

Коэффициенты для ДД:  $b_0 = 1,23$ ;  $b_1 = -0,79$ ;  $b_2 = 0,56$ ;  $d_0 = 1,7$ ;  $d_1 = -2,62$ ;  $d_2 = 1,92$ .

Максимальная мощность  $P_m = 75$  кВт. Частота вращения при максимальной мощности  $\omega_p = 150$  с<sup>-1</sup>. Удельный расход топлива при этом  $g_p = 6 \cdot 10^{-8}$  кг/с·Вт, а секундный расход топлива  $G_p = 4,5 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Момент при максимальной мощности  $M_p = 500$  Н·м.

Коэффициенты, определяющие статический момент сопротивления:  $k_0 = 400$ ;  $k_1 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,0025$ .

Коэффициент для мощности потерь в ЭД  $c_1 = 0,05$ .

Углы поворота:  $\alpha(0) = 0$ ;  $\alpha(t_f) = 300$  рад.

Весовые коэффициенты:  $a_D = 1$ ;  $a_E = 4 \cdot 10^{-8}$ .

Масштабы графики для переменных: для частоты вращения  $x_2 = \omega_1 - 3,0$ ; для степени использования ДД  $u_1 - 200$ ; для моментов  $M_1, M_2 - 1,0; 1,0$ ; для показателя качества  $V - 50000$ ; для времени движения  $t_f - 70$ .

Величина  $Q$  изменялась от 0 до  $5 \cdot 10^{-4}$  с шагом  $5 \cdot 10^{-6}$ . Частота вращения изменялась от  $60 \text{ с}^{-1}$  до  $120 \text{ с}^{-1}$  с шагом  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Степень использования ДД  $u_1$  принимала 30 значений от 0 до 1. Шаг ее изменения при вычислении первой и второй производных – 0,001.

На рис. 3 приведены зависимости частоты вращения  $x_2 = \omega_1$ , степени использования ДД  $u_1$ , моментов ДД и ЭД  $M_1, M_2$ , показателя качества  $V$  и времени движения  $t_f$  от стоимости  $Q$ .

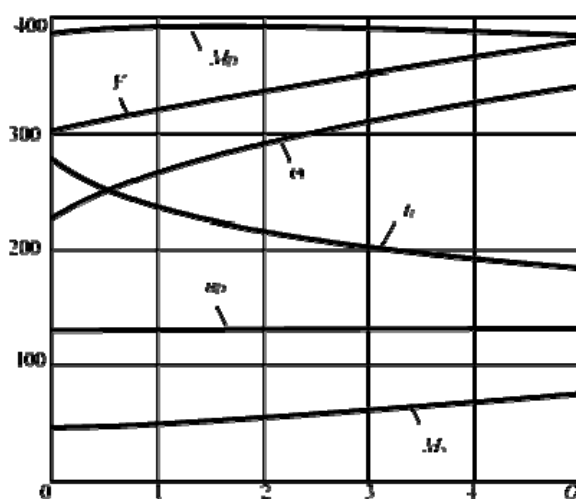


Рис. 3. Зависимости частоты вращения, степени использования ДД, моментов ДД и ЭД, показателя качества и времени движения от стоимости

Видно, что с увеличением стоимости  $Q$  оптимальная частота вращения увеличивается, время движения уменьшается. При этом возрастает момент сопротивления  $M_C$  из-за вязкого трения и аэродинамического сопротивления. В результате момент ЭД тоже возрастает. Увеличивается и показатель  $V$ .

Полученные графики могут быть использованы при выборе параметров стационарного движения с постоянной скоростью в зависимости от стоимости единицы времени эксплуатации транспортного средства.

Были получены зависимости оптимальных значений  $x_2, t_f, u_1, M_1, M_2, V$  от значения стоимости  $Q$  при других значениях параметров, когда происходит обмен моментами между ДД и ЭД.

Приводятся только параметры, отличные от предыдущей задачи.

Коэффициенты, определяющие статический момент сопротивления:  $k_0 = 300$ ;  $k_1 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,0025$ .

Масштабы графики для переменных: для частоты вращения  $x_2 = \omega_1 - 3,0$ ; для степени использования ДД  $u_1 - 200$ ; для моментов  $M_1, M_2 - 1,0; 1,0$ ; для показателя качества  $V - 80\ 000$ ; для времени движения  $t_f - 70$ .

Величина  $Q$  изменялась от 0 до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  с шагом  $2,5 \cdot 10^{-7}$ . Частота вращения изменялась от  $50 \text{ с}^{-1}$  до  $90 \text{ с}^{-1}$  с шагом  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Степень использования ДД  $u_1$  принимала 120 значений от 0 до 1. Шаг ее изменения при вычислении первой и второй производных – 0,001.

На рис. 4 приведены зависимости частоты вращения  $x_2 = \omega_1$ , степени использования ДД  $u_1$ , моментов ДД и ЭД  $M_1, M_2$ , показателя качества  $V$  и времени движения  $t_f$  от стоимости  $Q$ .

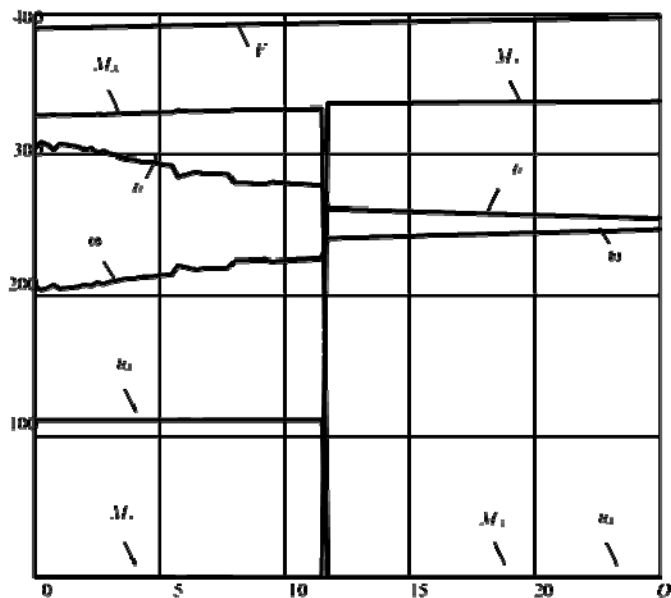


Рис. 4. Зависимости моментов, управления дизеля, частоты вращения, показателя качества и времени движения от стоимости  $Q$

Видно, что при значениях стоимости  $Q$ , меньших 12, вся нагрузка приходится на ДД, а момент ЭД  $M_2$  равен нулю. При больших значениях  $Q$  работает ЭД, а ДД должен быть выключен. При критическом значении  $Q$  происходит небольшое скачкообразное изменение времени  $t_f$  и частоты вращения  $\omega_1$ .

Как и на рис. 4, при увеличении  $Q$  время движения  $t_f$  уменьшается, а частота вращения  $\omega_1$  и показатель качества  $V$  растут.

В случае гибридной силовой установки серьезной проблемой являются выбор передаточного отношения коробки передач или гидромеханической передачи и распределение нагрузки между двигателем внутреннего сгорания и электродвигателем с учетом профиля дороги, графика скорости и ограниченной энергии, запасенной в емкостном накопителе или аккумуляторе. Выбор рациональной общей схемы гибридной силовой установки во многом зависит от места и условий эксплуатации транспортного средства.

Проблемы выбора типа и мощности тягового электродвигателя должны решаться в комплексе с проблемами управления двигателем внутреннего сгорания и транспортным средством в целом с учетом основных технических требований, а также требований экономики и экологии.

## Литература

1. Макаров А.В., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства с переключением передач // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докл. II науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. С. 283–293.
2. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы. Казань: Изд-во КГТУ, 2010. 300 с.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976. 393 с.
4. Changle Xiang, Donghao Zhang, Hailiang Zheng, Lijin Han, Kun Huang. A Novel Nonlinear Optimal Control Approach for the Dynamic Process of a Hybrid Electric Vehicle Equipped with Electromechanical Transmission. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 238264, 20 p.
5. Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2014, vol. 19, pp. 1279–1287.
6. Kyusik Park, Hanho Son, Kyunggook Bae, Yoonuk Kim, Hyunhwa Kim, Jeongseok Yun, Hyunsoo Kim. Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Driver's Characteristic. *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS-2017)*, 2017, pp. 151–156.
7. Sciarretta A., Back M., Guzzella L. Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 352–363.
8. Zou Yuan, Liu Teng, Sun Fengchun, Hui Peng. Comparative Study of Dynamic Programming and Pontryagin's Minimum Principle on Energy Management for a Parallel Hybrid Electric Vehicle. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 2305–2318.

---

МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ – аспирант, ассистент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (amakarov.kai@gmail.com).

МАКАРОВ ВАЛЕРИЙ ГЕНАДЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (vg\_makarov@mail.ru).

АФАНАСЬЕВ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (afanasiev\_co@mail.ru).

---

A. MAKAROV, V. MAKAROV, A. AFANASIEV  
OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE  
WITH CONSTANT SPEED

**Key words:** hybrid electric vehicle, electric drive, electric motor, energy conservation, electromagnetic torque, power loss, optimal control, stationary motion, maximum principle.

The motion of the vehicle usually consists of several stages. In the simplest case, there are three stages. At the first stage, the carrier vehicle pulls away and accelerates to a certain speed. The second stage is a movement at a constant speed for a long time. The third stage is braking and stopping. The first and third stages are transitional cases, the second one being an established process. It is known that the second stage is accompanied by speed changing. The aim of the work is designing optimal algorithms for controlling the electric motor currents and optimal algorithms of the electric drives motion during stationary movement of a hybrid electric vehicle. Methodology for optimal control of currents and processes of movement of electric motors, algorithms and computer programs for the synthesis of optimal control according to the maximum principle with the reduction of electrical energy consumption criteria have been developed. Analytical and numerical methods of mathematical program-

ming and optimal control of electromechanical systems were used. As a result of the research, algorithms and computer programs were developed to search for the optimal current control algorithm and the optimal motion control algorithm of hybrid electric vehicle. For the synthesis of optimal motion control of a hybrid electric vehicle with a given total torque, it is necessary to take into account the complex indicator of the energy cost of the internal combustion engine and the electric motor.

#### References

1. Makarov A.V., Afanasiev A.Yu. *Optimal'noe upravlenie gibridnoi silovoi ustanovkoi transportnogo sredstva s pereklyucheniem peredach* [Optimal control of hybrid electric vehicle with gear shifting]. *Priborostroenie i avtomatizirovanniy elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve: materialy dokl. II nauch.-prakt. konf.* [Proc. of 2<sup>nd</sup> Sci. and Pract/Conf. «Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy and housing and public utility sectors»]. Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2016, pp. 283–293.
2. Makarov V.G. *Asinkhronnyi elektroprivod s optimal'nymi rezhimami raboty* [Optimal control of asynchronous electric drive]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2010, 300 p.
3. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 393 p.
4. Changle Xiang, Donghao Zhang, Hailiang Zheng, Lijin Han, Kun Huang. A Novel Nonlinear Optimal Control Approach for the Dynamic Process of a Hybrid Electric Vehicle Equipped with Electromechanical Transmission. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 238264, 20 p.
5. Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2014, vol. 19, pp. 1279–1287.
6. Kyusik Park, Hanho Son, Kyungook Bae, Yoonuk Kim, Hyunhwa Kim, Jeongseok Yun, Hyunsoo Kim. Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Driver's Characteristic. *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS-2017)*, 2017, pp. 151–156.
7. Sciarretta A., Back M., Guzzella L. Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 352–363.
8. Zou Yuan, Liu Teng, Sun Fengchun, Hwei Peng. Comparative Study of Dynamic Programming and Pontryagin's Minimum Principle on Energy Management for a Parallel Hybrid Electric Vehicle. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 2305–2318.

---

**MAKAROV ALEKSEI** – Post-Graduate Student, Assistant Lecturer of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (amakarov.kai@gmail.com).

**MAKAROV VALERIY** – Doctor of Technical Science Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (vg\_makarov@mail.ru).

**AFANASIEV ANATOLIY** – Doctor of Technical Science, Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (afanasiev\_eo@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Макаров А.В., Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства при движении с постоянной скоростью // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 150–158.

УДК 621.33  
ББК 31.291-04

А.В. МАКАРОВ, В.Г. МАКАРОВ, А.Ю. АФАНАСЬЕВ

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ДВИЖЕНИИ С ПОСТОЯННЫМ МОМЕНТОМ

**Ключевые слова:** гибридная силовая установка, электропривод, энергосбережение, оптимальное управление, принцип максимума, метод множителей Лагранжа, уменьшение потребления электроэнергии, снижение расхода топлива.

Гибридные силовые установки применяются на колесном транспорте для достижения двух основных целей – экономии топлива и уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу. Цель работы – разработка оптимальных законов управления токами электродвигателя и оптимальных законов движения электропривода при постоянном моменте гибридной силовой установки транспортного средства. Разработаны методология оптимизации токов и процессов движения тяговых электродвигателей, алгоритмы и компьютерные программы синтеза оптимального управления. В процессе работы использовались аналитические и численные методы математического программирования и оптимального управления электромеханическими системами. В результате исследования были разработаны алгоритмы и компьютерные программы поиска оптимальных законов управления токами электродвигателя и оптимальные законы движения электропривода гибридной силовой установки транспортного средства. Определено, что для синтеза оптимального управления движением транспортного средства с гибридной силовой установкой при заданном суммарном моменте необходимо учитывать комплексный показатель стоимости энергии от двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя.

Одним из путей экономии энергии является оптимальное управление токами электродвигателя по критерию минимума мощности, потребляемой от источника электроэнергии, при создании требуемого электромагнитного момента, а также оптимальное управление движением инерционного объекта с основными компонентами статического момента по тому же критерию, когда отыскиваются оптимальные законы изменения электромагнитного момента, скорости и пути объекта в функции времени [3].

На дизельный двигатель (ДД) поступает топливо с секундным расходом  $G$ , кг/с. Выходной вал ДД имеет момент  $M_1$  и частоту вращения  $\omega_1$ . Он связан с входным валом гидромеханической передачи (ГМП) через передачу с передаточным числом  $i_1$ .

На электродвигатель (ЭД) поступает электроэнергия от преобразователя частоты с мощностью  $P$ , Вт. Выходной вал ЭД имеет момент  $M_2$  и частоту вращения  $\omega_2$ . Он связан с входным валом ГМП через передачу с передаточным числом  $i_2$  [4].

Постановка задачи оптимального управления при заданном суммарном моменте. Предположим, что задан требуемый момент  $M_3^0$ , прикладываемый ко входному валу гидромеханической передачи, и частоты вращения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . Требуется найти моменты ДД  $M_1$  и ЭД  $M_2$ , создающие момент:

$$M_3^0 = i_1 M_1 + i_2 M_2 \quad (1)$$

при условии, что комплексный показатель расхода энергии

$$Q = a_D G + a_E P \quad (2)$$

имеет минимальное значение. Здесь  $a_D$ ,  $a_E$  – весовые коэффициенты, определяющие ценность дизельного топлива и электрической энергии [5].

Моменты  $M_1$ ,  $M_2$  определяются выражениями (3), (4). Секундный расход топлива  $G$  и потребляемая мощность  $P$  задаются выражениями (5), (6)

$$M_1 = u_1 M_6. \quad (3)$$

Здесь  $M_6$  – момент ДД при полной подаче топлива;  $u_1$  и  $u_2$  – степень использования момента или мощности ДД и ЭД, соответственно.

Электромагнитный момент определяется как

$$M_2 = c_3 I; \quad (4)$$

$$G = g M_1 u_1, \quad (5)$$

где  $M_1$  – момент ДД;  $g$  – удельный расход топлива.

$$P = M_2 \omega_2 + 3rI^2 + c_1 u_2 + c_2 u_2^2, \quad (6)$$

где  $M_2$  – момент на валу ЭД;  $\omega_2$  – частота вращения вала ЭД, рад/с;  $P$  – электрическая мощность, потребляемая ЭД от источника;  $r$ ,  $I$  – активное сопротивление и действующее значение тока фазы обмотки статора ЭД [1].

**Решение задачи оптимального управления.** Задача поиска минимума функции  $Q$  от двух аргументов  $u_1$ ,  $u_2$  при одном ограничении типа равенства решается как задача поиска минимума функции одного аргумента [2].

Метод множителей Лагранжа позволяет получить аналитические соотношения. Составим функцию Лагранжа и запишем условия ее стационарности по переменным  $u_1$ ,  $u_2$ :

$$F = a_D G(u_1, \omega_1) + a_E P(u_2, \omega_2) + \lambda [i_1 M_1(u_1, \omega_1) + i_2 M_2(u_2) - M_3^0]; \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_1} = a_D \frac{\partial G}{\partial u_1} + \lambda i_1 \frac{\partial M_1}{\partial u_1} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_2} = a_E \frac{\partial P}{\partial u_2} + \lambda i_2 \frac{\partial M_2}{\partial u_2} = 0. \quad (9)$$

Справедливы равенства:

$$\frac{\partial G}{\partial u_1} = f_p f_\omega G_p (d_0 + 2d_1 u_1 + 3d_2 u_1^2); \quad (10)$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial u_1} = f_M M_p; \quad (11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial u_2} = i_2 \omega_2 c_3 + 6r u_2; \quad (12)$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial u_2} = c_3. \quad (13)$$

Решая уравнения (10)–(13), получаем

$$u_1 = \frac{-d_1 + \sqrt{d_1^2 - 3d_2 \cdot d_3}}{3d_2}, \quad (14)$$



где

$$d_3 = d_0 + \frac{i_1 \lambda f_M M_P}{a_D f_P f_\omega G_P}; \quad u_2 = -\frac{i_2 c_3 (\lambda + a_E \omega_2)}{6 r a_E}. \quad (15)$$

Задаваясь значениями множителя Лагранжа  $\lambda$ , получаем оптимальные значения управлений  $u_1, u_2$  и соответствующее значение момента  $M_3$  [3].

**Анализ расположения точки минимума.** Минимум функции  $Q(u_1, u_2)$  может достигаться во внутренней точке или на границе области возможных значений управлений  $u_1, u_2$ . Для анализа возможных ситуаций построим зависимости

$$Q(M_1) = c_G G(u_1, \omega_1) + c_P P(u_2, \omega_2) \quad (16)$$

при условии

$$i_2 M_2 = M_3^0 - i_1 M_1. \quad (17)$$

На рис. 1 приведены различные варианты расположения точки глобального минимума [5].

Параметры имеют следующие значения: максимальная мощность дизельного двигателя  $P_m = 75$  кВт; частота вращения при максимальной мощности  $\omega_P = 150$  с<sup>-1</sup>; момент дизеля при этом  $M_P = 500$  Н·м; удельный расход топлива при этом  $g_P = 6 \cdot 10^{-8}$  кг/с·Вт, а секундный расход топлива  $G_P = 4,5 \cdot 10^{-3}$  кг/с; частоты вращения  $\omega_1 = 100$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 100$  с<sup>-1</sup>; коэффициенты веса  $a_D = 1$ ;  $a_E = 4 \cdot 10^{-8}$ .

Мощность, потребляемая электродвигателем, определялась по формуле

$$P = M_2 \omega_2 + c_1 M_2^2,$$

где коэффициент  $c_1 = 0,05$ .

Масштаб момента  $M_1 - 1$ . Масштаб по вертикальной оси - 1000 [2].

Были рассчитаны три варианта момента  $M_3$ :

1) при  $M_3 = M_3' = 151,4$  Н·м минимум суммарного расхода достигается при  $M_1 = M_1' = 0$ ,  $M_2 = M_2' = M_3'$  и составляет  $Q' = 0,651 \cdot 10^{-3}$  (точка  $a'$ ); при  $M_1 = M_1' = M_3'$ ,  $M_2 = M_2' = 0$  суммарный расход составляет  $Q = 1,003 \cdot 10^{-3}$ ;

2) при  $M_3 = M_3'' = 351,4$  Н·м минимум суммарного расхода достигается в двух точках: при  $M_1 = M_1'' = 0$ ,  $M_2 = M_2'' = M_3''$ ; при  $M_1 = M_1'' = M_3''$ ,  $M_2 = M_2'' = 0$  и составляет  $Q'' = 1,653 \cdot 10^{-3}$  (точка  $a''$ ) (это пограничный случай);

3) при  $M_3 = M_3''' = 551,4$  Н·м минимум суммарного расхода достигается во внутренней точке при  $M_1 = M_1''' = 406,4$  Н·м,  $M_2 = M_2''' = 145,0$  Н·м и составляет  $Q''' = 2,494 \cdot 10^{-3}$  (точка  $a'''$ ).

При  $M_1 = 0$ ,  $M_2 = M_3'''$  суммарный расход составляет  $Q = 2,814 \cdot 10^{-3}$ .

При  $M_1 = M_3'''$ ,  $M_2 = 0$  суммарный расход составляет  $Q = 2,891 \cdot 10^{-3}$ .

Было построено семейство характеристик  $M_1(M_3)$ ,  $M_2(M_3)$  при частотах вращения  $\omega_1 = \omega_2 = 15, 30, \dots, 90$  с<sup>-1</sup> (рис. 2). Им соответствуют графики 1, 2, ..., 6.

Видно, что при частотах вращения  $\omega_1 = \omega_2 = 15$  с<sup>-1</sup> и при моменте  $M_3 < 190$  Н·м всю нагрузку принимает на себя электродвигатель. При моменте  $M_3 = 190$  Н·м происходят скачки моментов  $M_1, M_2$ . При изменении момента  $M_3$  в пределах 190...250 Н·м весь момент создается дизелем. При этом  $M_2 = 0$ . При моменте  $M_3 > 250$  Н·м нагрузка распределяется между дизелем и электродвигателем.

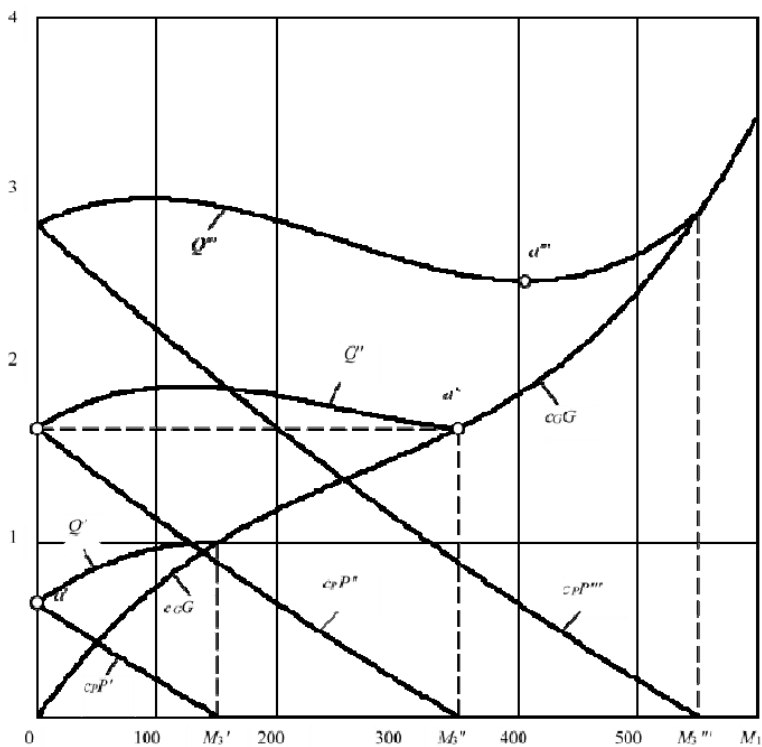


Рис. 1. Зависимости  $c_G G(M_1)$ ,  $c_P P(M_1)$ ,  $Q(M_1)$

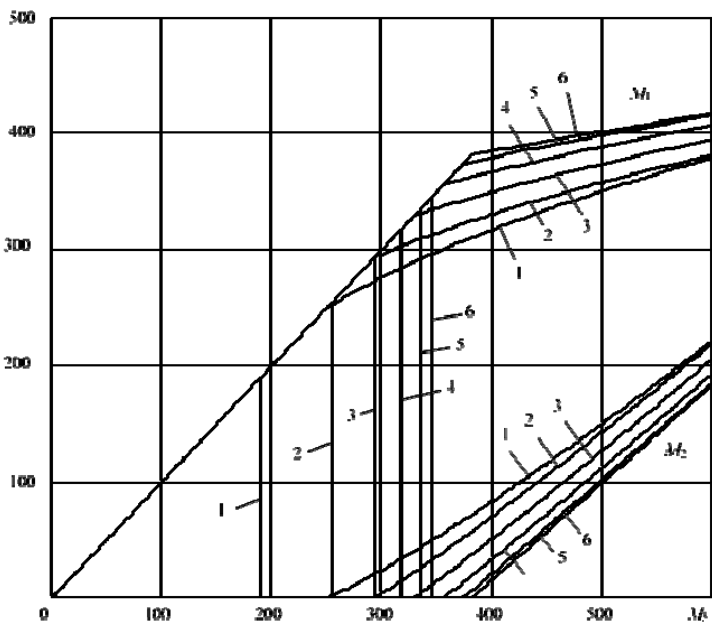


Рис. 2. Зависимости  $M_1(M_3)$ ,  $M_2(M_3)$  при  $\omega = 15 \dots 90 \text{ c}^{-1}$

Анализ оптимальных моментов  $M_1, M_2$  при постоянном моменте  $M_3$  и частотах вращения  $\omega_1 = \omega_2 = 150 \text{ с}^{-1}$ . Были рассмотрены случаи  $M_3' = 181 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_3'' = 331 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_3''' = 481 \text{ Н}\cdot\text{м}$  (рис. 3).

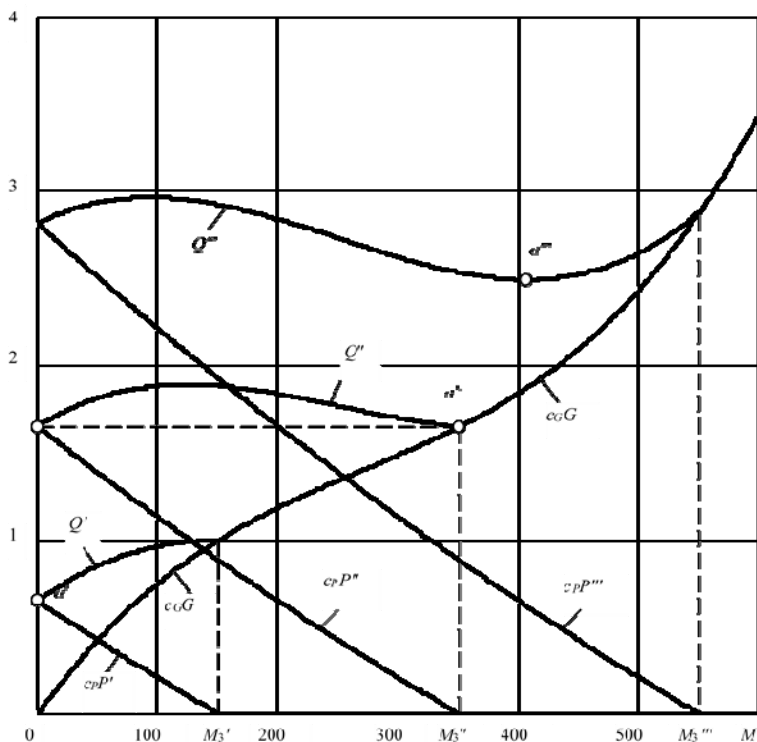


Рис. 3. Зависимости  $c_G G(M_1), c_P P(M_1), Q(M_1)$  при  $M_3 = \text{const}$

При значениях суммарного момента  $M_3$  менее 481 Н·м оптимальный момент  $M_1 = 0$ , а всю нагрузку принимает на себя электродвигатель, т.е.  $M_2 = M_3$  (точки  $a', a''$ ).

При моменте  $M_3 = 481 \text{ Н}\cdot\text{м}$  глобальный минимум функции  $Q(M_1)$  достигается сразу в двух точках – при  $M_1 = 0$  и при  $M_1 = 326,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Здесь  $Q = 0,00335$  (точка  $a'''$ ).

При моментах  $M_3 > 481 \text{ Н}\cdot\text{м}$  глобальный минимум функции  $Q(M_1)$  достигается во внутренних точках, когда  $M_1 > 0$  и  $M_2 > 0$ .

Далее ДД и ЭД работают вместе.

Было построено семейство характеристик  $M_1(M_3), M_2(M_3)$  при частотах вращения  $\omega_1 = \omega_2 = 105, 120, \dots, 165 \text{ с}^{-1}$  (рис. 4). Им соответствуют графики 7, 8, ..., 11.

На рис. 4 видно, что зависимости оптимальных моментов  $M_1, M_2$  от суммарного момента  $M_3$  при частотах вращения  $\omega_1 = \omega_2 = 150 \text{ с}^{-1}$ .

При  $M_3 < 480 \text{ Н}\cdot\text{м}$   $M_1 = 0, M_2 = M_3$ . Работает только электродвигатель.

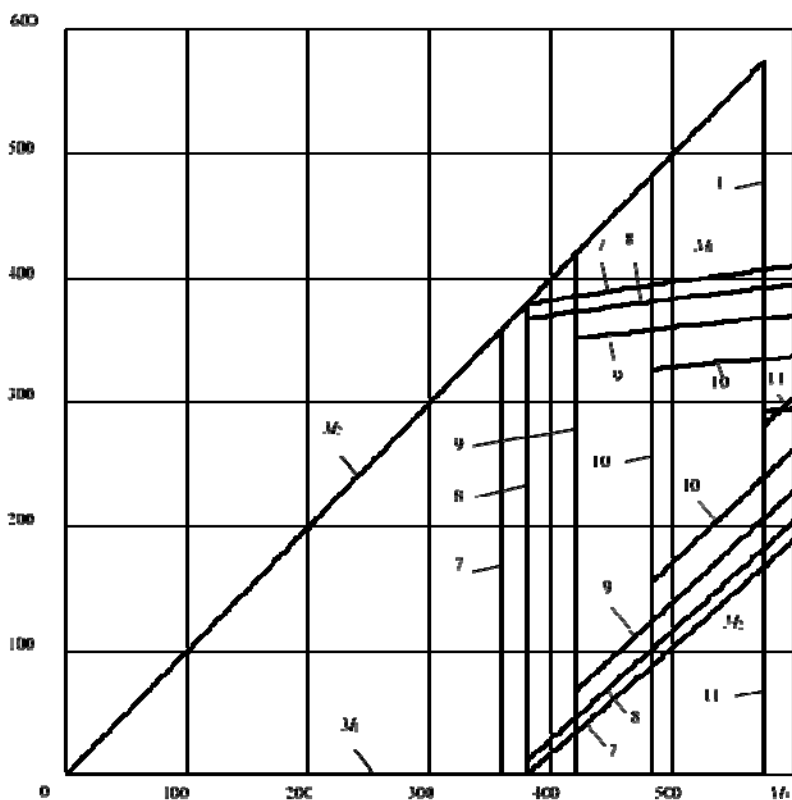


Рис. 4. Зависимости оптимальных моментов  $M_1(M_3)$ ,  $M_2(M_3)$  при  $\omega_1 = \omega_2 = 105, \dots, 165 \text{ c}^{-1}$

При  $M_3 = 480 \text{ Н}\cdot\text{м}$  момент  $M_1$  скачком возрастает до  $327 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а момент  $M_2$  уменьшается до  $154 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Далее ДД и ЭД работают вместе.

Современный силовой электропривод, применяемый на транспортных средствах, ставит перед разработчиками многообразные задачи. Как видно из приведенной в работе задачи и ее решения, важной проблемой являются правильный выбор типа тягового двигателя и оптимальное управление движением транспортного средства.

Применяемый для питания двигателя преобразователь частоты должен быть экономичным, вырабатывать качественные напряжения и допускать обратный поток при рекуперации энергии. Аккумуляторная батарея или емкостной накопитель должны быть удобны в эксплуатации, надежны и дешевы, а также обладать большой удельной мощностью и энергией. Оптимальное управление токами электродвигателя должно формироваться с учетом обмена энергией с накопителем энергии.

#### Литература

1. Березовский А.Б., Егоров С.В. Эксплуатационные свойства автомобиля. Казань: Изд-во КГТУ, 2002. 50 с.

2. Макаров А.В., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства с переключением передач // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докл. II науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2016. С. 283–293.

3. Changle Xiang, Donghao Zhang, Hailiang Zheng, Lijin Han, Kun Huang. A Novel Nonlinear Optimal Control Approach for the Dynamic Process of a Hybrid Electric Vehicle Equipped with Electromechanical Transmission. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 238264, 20 p.

4. Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2014, vol. 19, pp. 1279–1287.

5. Kyusik Park, Hanho Son, Kyunggook Bae, Yoonuk Kim, Hyunhwa Kim, Jeongseok Yun, Hyunsoo Kim. Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Driver's Characteristic. *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS-2017)*, 2017, pp. 151–156.

6. Moura S.J., Fathy H.K., Callaway D.S., Stein J.L. A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE transactions on control systems technology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 1063–6536. DOI: 10.1109/TCST.2010.2043736.

7. Mrzljak V., Medica V., Mrakovčić T. Simulation of diesel engine cylinder process using quasi-dimensional numerical model. *Scientific Journal of Maritime Research*, 2015, vol. 29, pp. 165–169.

8. Sciarretta A., Back M., Guzzella L. Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 352–363.

---

**МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ** – аспирант, ассистент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (amakarov.kai@gmail.com).

**МАКАРОВ ВАЛЕРИЙ ГЕНАДЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (vg\_makarov@mail.ru).

**АФАНАСЬЕВ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (afanasiev\_eo@mail.ru).

---

**A. MAKAROV, V. MAKAROV, A. AFANASIEV**  
**OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE**  
**WITH CONSTANT TORQUE**

**Key words:** hybrid electric vehicle, electric drive, energy conservation, optimal control, maximum principle, Lagrange multipliers method, reduction of electrical energy consumption, reduction of fuel consumption.

Hybrid electric vehicles are used to achieve two main goals. They are fuel economy and reduction of harmful emissions into the atmosphere. The aim of the work is designing optimal algorithms for controlling the electric motor currents and optimal algorithms of the electric drives motion with constant torque of a hybrid electric vehicle. Methodology for optimal currents control and the motion of electric motors, algorithms and computer programs for the synthesis of optimal control have been developed. Analytical and numerical methods of mathematical programming and optimal control of electromechanical systems were used. As a result of the research, algorithms and computer programs were developed to search for the optimal current control algorithm and the optimal motion control algorithm of hybrid electric vehicle. For the synthesis of optimal motion control of a hybrid electric vehicle with a constant total torque, it is necessary to take into account the complex indicator of the energy cost of the internal combustion engine and the electric motor.

## References

1. Berezovskii A.B., Egorov S.V. *Ekspluatatsionnye svoystva avtomobilya* [Vehicle performance]. Kazan, Kazan State Technical Univeristy Publ., 2002, 50 p.
2. Makarov A.V., Afanasiev A.Yu. *Optimal'noe upravlenie gibridnoi silovoi ustanovkoi transportnogo sredstva s pereklyucheniem peredach* [Optimal control of hybrid electric vehicle with gear shifting]. *Priborostroenie i avtomatizirovannyyi elektroprivod v toplivnoe-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve: materialy dokl. II nauch.-prakt. konf.* [Proc of 2<sup>nd</sup> Sci. and Pract. Conf. «Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy and housing and public utility sectors»]. Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2016, pp. 283–293.
3. Changle Xiang, Donghao Zhang, Hailiang Zheng, Lijin Han, Kun Huang. *A Novel Nonlinear Optimal Control Approach for the Dynamic Process of a Hybrid Electric Vehicle Equipped with Electromechanical Transmission*. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 238264, 20 p.
4. Kim N., Cha S., Peng H. *Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle*. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2014, vol. 19, pp. 1279–1287.
5. Kysik Park, Hanho Son, Kyunggook Bae, Yoonuk Kim, Hyunhwa Kim, Jeongseok Yun, Hyunsoo Kim. *Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Driver's Characteristic*. *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS-2017)*, 2017, pp. 151–156.
6. Moura S.J., Fathy H.K., Callaway D.S., Stein J.L. *A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE transactions on control systems technology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 1063–6536. DOI: 10.1109/TCST.2010.2043736.
7. Mrzljak V., Medica V., Mrakovčić T. *Simulation of diesel engine cylinder process using quasi-dimensional numerical model*. *Scientific Journal of Maritime Research*, 2015, vol. 29, pp. 165–169.
8. Sciarretta A., Back M., Guzzella L. *Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 352–363.

---

**MAKAROV ALEKSEI** – Post-Graduate Student, Assistant Lecturer of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (amakarov.kai@gmail.com).

**MAKAROV VALERIY** – Doctor of Technical Science Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (vg\_makarov@mail.ru).

**AFANASIEV ANATOLIY** – Doctor of Technical Science, Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (afanasiev\_eo@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Макаров А.В., Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства при движении с постоянным моментом // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 159–166.

УДК 621.316

ББК 31.2

Д.В. МОИСЕЕВ, Н.А. ГАЛАНИНА, Н.Н. ИВАНОВА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА  
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ\***

**Ключевые слова:** система релейной защиты и автоматики (РЗА), цифровая централизованная система РЗА, экспресс-анализ аварийных режимов, система диагностики устройств РЗА, цифровая подстанция.

*Задача диагностики на правильность, ложность, излишность или отказ срабатывания и пуска функций защит устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) условно может быть разделена на две подзадачи: экспресс-анализ аварийных режимов и анализ работы защит на основе эталонных алгоритмов. Экспресс-анализ аварийных режимов предполагает использование в определении правильности работы устройств РЗА результатов определения места повреждения и параметров срабатывания защит. Для решения этой подзадачи были разработана методика экспресс-анализа аварийных режимов, предложена форма протокола данного анализа. Кроме того, были сформулированы требования к устройствам РЗА, реализующим функцию определения места повреждения. Полученные результаты могут быть использованы в проектировании и разработке системы диагностики централизованной системы РЗА.*

Формирование нового технологического уклада российской экономики невозможно без инновационного развития всех отраслей промышленности [3]. В конце 2018 г. советом директоров «Россетей» была утверждена концепция «Цифровая трансформация 2030»<sup>1</sup>. По мнению специалистов «Россети Центр» и ряда других исследователей, с помощью цифровизации электро сетевого комплекса и внедрения новых методов мониторинга и прогнозистики состояния генерирующего и сетевого оборудования удастся достичь существенного (в разы) снижения аварийных ситуаций, а также уменьшения времени их ликвидации в среднем с 5,5 ч до 1 ч [7, 9, 10 и др.].

В ходе цифровизации необходимо не только построить цифровую сеть управления электроэнергетическими объектами, но и улучшить качество управления электрическими системами и получить так называемый дополнительный системный эффект [1]. Совершенствование средств управления электроэнергетических систем (ЭЭС), в частности диагностики функций защит устройств РЗА в аварийных режимах, представляет собой важнейшую научно-практическую задачу.

Задачу диагностики на правильность, ложность, излишность или отказ срабатывания и пуска функций защит устройств РЗА условно можно разделить на две подзадачи – экспресс-анализ аварийных режимов и анализ работы

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чувашской Республики в рамках научного проекта № 19-48-210005 р\_а.

<sup>1</sup> Концепция «Цифровая трансформация 2030» [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf).

функций защит на основе эталонных алгоритмов. Экспресс-анализ аварийных режимов предполагает использование в определении правильности работы устройств РЗА результатов определения места повреждения и параметров функций защит.

Цель данного исследования – разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов энергосети. Назначение экспресс-анализа заключается в определении причин возникновения аварийного режима, оценке правильности работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и противоаварийной автоматики (ПА) [2]. Данные, полученные в ходе такого анализа, позволят разработать комплекс мероприятий для предупреждения развития аварийного режима [4].

Процедура экспресс-анализа развития аварий на уровнях энергообъекта запускается после срабатывания функции фиксации автоматического отключения силового выключателя микропроцессорными устройствами РЗА. Источниками входной информации являются сигналы, получаемые из программного комплекса регистрации аварийных событий (ПК РАС), а также параметры функций РЗА, описанные стандартизированной моделью данных. Взаимная интеграция энергетических систем может быть реализована на основе стандартов МЭК 61970 и МЭК 61968, в частности с использованием общих информационных моделей СИМ (Common Information Model), которые широко применяются в мировой практике и поддерживаются различными существующими программными системами [6]. Информационная СИМ-модель энергосистемы содержит схему соединений первичного оборудования с описанием их параметров [8]. Другим вариантом описания модели данных является использование стандарта МЭК 61850-9-2LE, который является более предпочтительным, так как обмен информацией между вторичными устройствами и регистратором аварийных событий осуществляется по протоколу МЭК 61850-9-2LE (по шине процесса) [5].

В качестве входных данных для экспресс-анализа развития аварий должны выступать результаты реализации функции определения места повреждения (ОМП) на ЛЭП. Для каждой функции РЗА определяются требования к ее срабатыванию и пуску при аварии в расчетной точке. Производится сравнение результатов работы алгоритма анализа функций РЗА по ОМП с фактическими результатами работы функции РЗА в ходе аварии. Результаты приводятся в отчете.

В отчете о развитии аварийного нарушения должна содержаться следующая информация<sup>1</sup>:

– параметры повреждения, фиксируемые (измеренные или расчётные) функцией ОМП на ЛЭП (в первичных величинах) для уточняющего расчета – дата, время, вид короткого замыкания (КЗ), действующие значения токов и напряжений при КЗ и в предаварийном режиме, углы между токами и напря-

<sup>1</sup> СТО 34.01-4.1-007-2018 Технические требования к автоматизированному мониторингу устройств РЗА, в том числе работающих по стандарту МЭК 61850. М.: ПАО «Российские сети», 2018. 55 с



жениями всех фаз, значения нулевой, прямой и обратной последовательности токов и напряжений при КЗ [11];

- метки времени начала аварии, конца переходных процессов, начала и конца установившегося аварийного режима или факта отсутствия события короткого замыкания;

- данные о месте повреждения (присоединение);

- дискретные сигналы пусков, срабатываний (действий на отключение, телеотключения и телеускорения, блокирующие сигналы), отключений коммутационных аппаратов, определенные на основании осциллограмм аварийных событий [12];

- требования к срабатываниям и пускам для всех анализируемых устройств РЗА для определенного места КЗ: в зоне действия быстродействующих защит; в зоне ближнего резервирования; в зоне дальнего резервирования; вне зоны действия защиты [13];

- сведения о фактически сработавших выключателях функций устройств РЗА;

- вывод о правильности работы устройств РЗА в случае, когда быстродействующие (основные) защиты сработали и поврежденное оборудование было отключено (на уровне энергообъекта);

- выводы о развитии аварии при отключении оборудования в результате действия резервных защит (на уровне предприятия).

- оценка правильности срабатываний и пусков устройств РЗА.

На основе вышеперечисленных требований к содержанию отчета была разработана форма протокола экспресс-анализа. Пример заполнения протокола показан в табл. 1.

Таблица 1

**Протокол экспресс-анализа аварийного режима**

<i>1. Протокол экспресс-анализа</i>	
Наименование ВЛ	ВЛ 110кВ Оренбургская – Юго-Восточная с отпайками
Наименование подстанций	ПС 110 кВ Юго-Восточная ПС 110 кВ Оренбургская
Класс напряжения ВЛ, кВ	110
Длина ВЛ, км	10,65
Дата, время КЗ	10.07.2018 17:49:35.076
Вид повреждения на ВЛ	однофазное замыкание на землю фазы А
Тип ОМП	одностороннее
Расчетное место повреждения, км	3,7 от ПС 110 кВ Юго-Восточная 6,95 от ПС 110 кВ Оренбургская
Оценка переходного сопротивления	1,04
Расчетная зона обхода	от 3,6 км до 3,8 км опора 24, опора 26
Место повреждения по приборам, км	5,3
Фактическое место повреждения, км	5,26

Окончание табл. 1

Устройство / функция	Срабатывание		Оценка работы	Пуск		Оценка работы
	расчетное	фактическое		расчетный	фактический	
МТЗ	есть	есть	правильно	есть	есть	правильно
ДЗ	нет	нет	правильно	нет	нет	правильно
ЗМН	нет	есть	ложно	нет	есть	ложно
НВЧЗ	нет	есть	излишне	нет	есть	излишне
ТЗНП	есть	нет	отказ	есть	нет	отказ

Вид повреждения (одно-, двух- или трехфазное замыкание) и поврежденная фаза определяются фазовым селектором, реализованным в программном комплексе РАС. Блок-схема алгоритма анализа аварийного режима приведена на рис. 1.

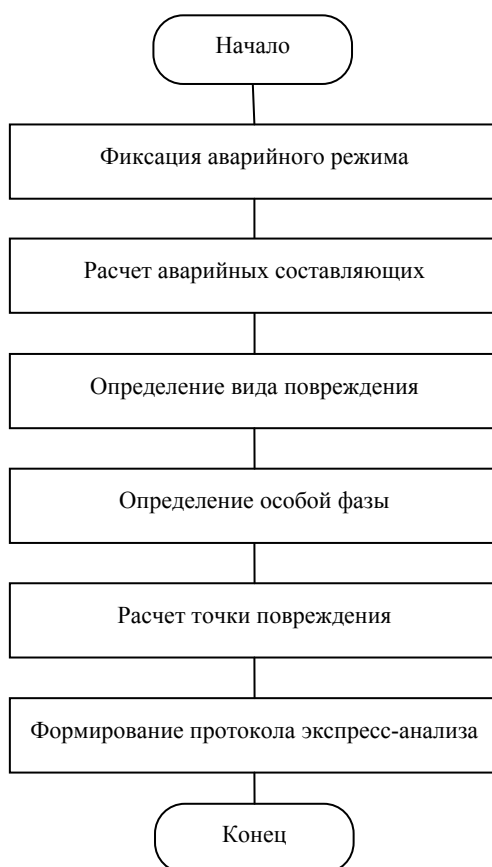


Рис. 1. Блок-схема алгоритма анализа аварийного режима

Устройства РЗА, реализующие функцию определения места повреждения, должны удовлетворять таким техническим требованиям, как:

- учет на линиях с многосторонним питанием особенностей алгоритмов для ОМП;
- определение основных характеристик повреждения (длительность КЗ, повреждённые фазы, расстояния до места повреждения, однофазное и трёх-фазное АПВ) после получения всех данных из разных источников и их последующего сравнения;
- возможность ручного выбора вида повреждения и моментов времени аварийного, нагрузочного режимов (для обеспечения работоспособность при сложных видах КЗ);
- возможность вычисления векторов напряжений и токов основной частоты, симметричных составляющих (табл. 2);

Таблица 2

**Электрические величины при повреждении**

Расчетный показатель	Значение	Угол
$3U_0$ , кВ	14,39	$-164,39^\circ$
$U_2$ , кВ	16,03	$-178,55^\circ$
$U_1$ , кВ	50,99	$4,86^\circ$
$3I_0$ , кА	0,977	$-63,67^\circ$
$I_2$ , кА	0,478	$-67,04^\circ$
$I_1$ , кА	0,476	$-56,52^\circ$
$I_{кз}$ , кА	1,278	$-64,94^\circ$
$T_{кз}$ , с	0,191	

- возможность создания моделей ЛЭП для разных режимов, например, максимального и минимального режимов;
- возможность расчета на основе осциллограмм в автоматическом и ручном режимах волнового ОМП на ЛЭП;
- возможность создания расчетных сигналов на основе формул с переменными, соответствующими значениям сигналов осциллограмм;
- возможность построения годографа сигналов;
- возможность построения векторной диаграммы аварийного режима (табл. 3, рис. 2);
- возможность построения векторной диаграммы доаварийного режима (табл. 4, рис. 3).

Таблица 3

**Расчетные показатели для построения векторной диаграммы аварийного режима**

Расчетный показатель	Значение	Угол
$I_a$ , кА	1,278	$-64,94^\circ$
$I_b$ , кА	0,127	$108,49^\circ$
$I_c$ , кА	0,175	$112,77^\circ$
$U_a$ , кВ	30,61	$-7,19^\circ$
$U_b$ , кВ	62,68	$-112,13^\circ$
$U_c$ , кВ	61,58	$109,56^\circ$

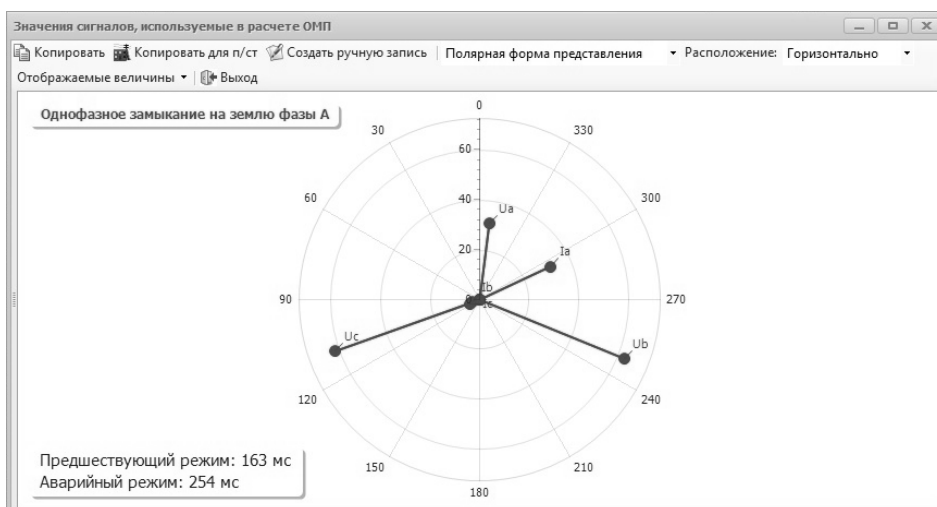


Рис. 2. Векторная диаграмма аварийного режима

Таблица 4

**Расчетные показатели для построения векторной диаграммы доаварийного режима**

Расчетный показатель	Значение	Угол
$I_a$ , кА	0,022	$49,69^\circ$
$I_b$ , кА	0,023	$-70,83^\circ$
$I_c$ , кА	0,023	$167,68^\circ$
$U_a$ , кВ	66,99	$0,0^\circ$
$U_b$ , кВ	67,99	$-120,51^\circ$
$U_c$ , кВ	67,58	$119,86^\circ$

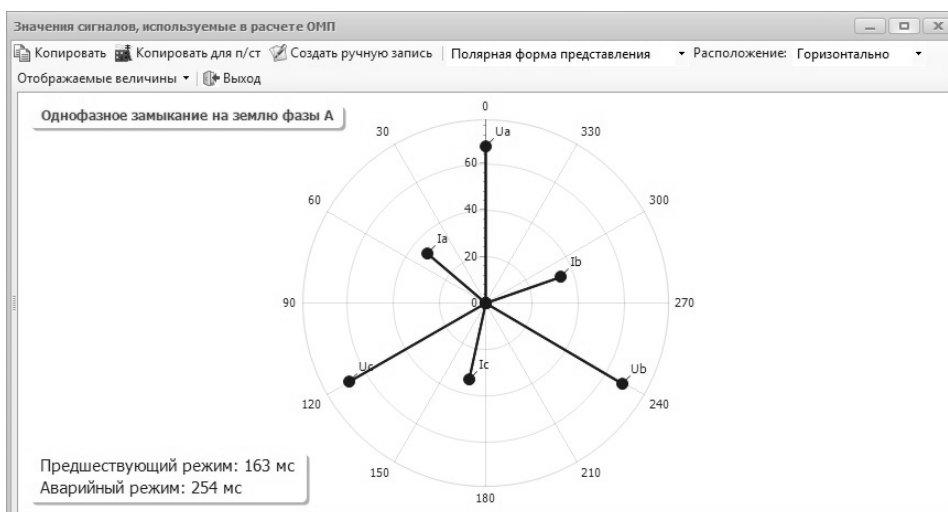


Рис. 3. Векторная диаграмма доаварийного режима

**Выводы.** 1. Разработана методика экспресс-анализа аварийных режимов электрической сети, позволяющая получить диагностические данные для разрабатываемой системы диагностики цифровой централизованной системы РЗА.

2. Создан опытный образец программного комплекса для реализации разработанной методики, позволяющий выполнять экспресс-анализ аварийных режимов энергосистемы и формировать протокол по результатам анализа.

3. Проведены исследования, в ходе которых установлено, что разработанная методика экспресс-анализа аварийных режимов энергосети может быть использована в реальных электроэнергетических системах.

#### Литература

1. Булычев А.В., Васильев Д.С., Козлов В.Н., Силанов Д.Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1. С. 71–77.
2. Бурбело М.И., Мельничук С.М. Использование реле проводимости для выявления неполнофазных режимов в сетях 110–220 кВ // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2. С. 40–44.
3. Медведев П.П. Цифровизация энергетики: угрозы и возможности развития // Экономика и управление: сб. науч. тр. / Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. СПб., 2018. С. 139–143.
4. Моисеев Д.В., Галанина Н.А. Анализ различных методик построения систем регистрации аварийных событий и диагностики работы устройств РЗА // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 391–396.
5. Моисеев Д.В., Галанина Н.А. Разработка структурной схемы подсистемы регистрации и диагностики аварийных событий системы релейной защиты и автоматики // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: сб. материалов IV Всерос. студ. конф. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. С. 80–83.
6. Моисеев Д.В., Галанина Н.А. CIM-модель энергообъектов как инструмент интеграции централизованной системы диагностики устройств РЗА // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 361–362.
7. «Россети»: цифровизация снизит время ликвидации энергоаварий в РФ в 6 раз [Электронный ресурс]. URL: [https://1prime.ru/state\\_regulation/20190725/830187495.html](https://1prime.ru/state_regulation/20190725/830187495.html).
8. Рыбаков А.К., Жуков Д.А., Федеров О.А. Концепция системы анализа аварийных событий и оценки правильности работы устройств РЗА // Электроэнергия. Передача и распределение. М.: Кабель, 2018. С. 100–101.
9. Текслер А.Л. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 3–6.
10. Golub G.M. Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8–13.
11. Iskakov U., Breido J. Settings adaptation system for current protection relay. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 371–377.
12. Tran Hoang Quang Minh. Technical efficiency and recommendations for overcurrent relay protection setting. In: AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. Vol. 371: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, pp. 175–184.
13. Nguyen Nhan, Minh Tran Hoang Quang, Nguyen Doan Quoc Anh. Setting Overcurrent Relay Protection with Using Statistical Algorithm. *International Journal of Control and Automation*, 2017, vol. 10, pp. 145–154. DOI: 10.14257/ijca.2017.10.1.13.

---

**МОИСЕЕВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ** – аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (dnsmv@gmail.com).

ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galaninacheb@mail.ru).

ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (naadeezdaa@rambler.ru).

**D. MOISEEV, N. GALANINA, N. IVANOVA  
DEVELOPMENT OF METHODS FOR EXPRESS ANALYSIS  
OF EMERGENCY CONDITIONS OF ELECTRICAL SYSTEM**

**Key words:** relay protection and automation systems (RPA), digital centralized relay protection system, express analysis of emergency conditions, RPA device diagnostics system, digital substation.

*Diagnostics task for correctness, falsehood, redundancy or failure of operation and start-up of protection functions of relay protection and automation devices (RPA) can conditionally be divided into two subtasks: express analysis of emergency conditions and analysis of protection functions based on reference algorithms. Express analysis of emergency conditions involves using the results of determining the location of damage and the parameters of the protection functions (settings) to determine the proper operation of relay protection and automation devices. To solve this subproblem, we developed a technique for express analysis of emergency conditions and offered a protocol for this analysis. We formulated the requirements to RPA devices functioning to determine the location of damage. The obtained results can be used to design and develop the system of diagnostics of RPA centralized system.*

**References**

1. Bulychiev A.V., Vasil'ev D.S., Kozlov V.N., Silanov D.N. *Releynaya zashchita v raspredelitel'nykh setyakh 110/35/10 kV v usloviyakh tsifrovoi transformatsii elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection in distribution networks 110/35/10 kV in the conditions of digital transformation of electric power systems]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2019, no. 1, pp. 71–77.
2. Burbelo M.I., Mel'nichuk S.M. *Ispol'zovanie rele provodimosti dlya vyyavleniya nepolnofaznykh rezhimov v setyakh 110–220 kV* [Use of the conductivity relay to detect phase conductor breakage in networks 110–220 kV]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*, 2015, no. 2, pp. 40–44.
3. Medvedev P.P. *Tsifrovizatsiya energetiki: ugrozy i vozmozhnosti razvitiya* [Digitalization of energy: threats and opportunities for development]. In: *Ekonomika i upravlenie: sb. nauch. tr.* [Economy and management. Collection of Scientific Works]. St. Peterburg, 2018, pp. 139–143.
4. Moiseev D.V., Galanina N.A. *Analiz razlichnykh metodik postroeniya sistem registratsii avariynykh sobytii i diagnostiki raboty ustroystv RZA* [Analysis of various methods of building systems for the registration of emergency events and diagnosing the operation of RPA devices]. In: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya IT-obrazovaniya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konferentsii* [Proc. of Russ. Sci. Conf. «The State and Prospects for IT Education»]. Cheboksary, Chuvsh State University Publ., 2019, pp. 391–396.
5. Moiseev D.V., Galanina N.A. *Razrabotka strukturnoi skhemy podsystemy registratsii i diagnostiki avariynykh sobytii sistemy releinoi zashchity i avtomatiki* [Develop a structural scheme of the subsystem for registration and diagnosis of emergency events of the relay protection system and automation]. In: *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii: sb. materialov IV Vseros. stud. konf.* [Proc. of 4<sup>th</sup> Russ. Sci. Conf. «Engineering personnel – the future of Russia's innovative economy»]. Yoshkar-Ola, 2018, pp. 80–83.
6. Moiseev D.V., Galanina N.A. *SIM-model' energoob'ektov kak instrument integratsii tsentralizovannoi sistemy diagnostiki ustroystv RZA* [The SIM model of energy objects as a tool to integrate a centralized system of diagnostic devices]. In: *Dinamika nelineynykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy 13-i Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 13<sup>th</sup> Russ. Sci. Conf. «Dynamics of non-linear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2019, pp. 361–362.

7. «Rosseti»: *tsifrovizatsiya snizit vremya likvidatsii energoavarii v RF v 6 raz* [«Rosseti»: Digitalization will reduce the time of elimination of energy accidents in Russia by 6 times]. Available at: [https://1prime.ru/state\\_regulation/20190725/830187495.html](https://1prime.ru/state_regulation/20190725/830187495.html).

8. Rybakov A.K., Zhukov D.A., Federov O.A. *Kontseptsiya sistemy analiza avariinykh so-bytii i otsenki pravil'nosti raboty ustroystv RZA* [The concept of the system of analysis of emergency events and assessment of the correctness of the RPA devices]. In: *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transfer and distribution]. Moscow, Kabel' Publ., 2018, pp. 100–101.

9. Teksler A.L. *Tsifrovizatsiya energetiki: ot avtomatizatsii protsessov k tsifrovoi transformatsii otrasli* [Power Industry Digitalization: from Process Automation to the Digital Transformation of the Industry]. *Energeticheskaya politika*, 2018, no. 5, pp. 3–6.

10. Golub G.M. Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8–13.

11. Iskakov U., Breido J. Settings adaptation system for current protection relay. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 371–377.

12. Tran Hoang Quang Minh. Technical efficiency and recommendations for overcurrent relay protection setting. In: *AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*. Vol. 371: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, pp. 175–184.

13. Nguyen Nhan, Minh Tran Hoang Quang, Nguyen Doan Quoc Anh. Setting Overcurrent Relay Protection with Using Statistical Algorithm. *International Journal of Control and Automation*, 2017, vol. 10, pp. 145–154. DOI: 10.14257/ijca.2017.10.1.13.

---

**MOISEEV DENIS – Post-Graduate Student of Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (dnsmsv@gmail.com).**

**GALANINA NATALIYA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (galaninacheb@mail.ru).**

**IVANOVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (naadeezdaa@rambler.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 167–175.

УДК 681.586.67:621.313-181.48

ББК 3965-044.3:3261

В.А. НЕСТЕРИН, Р.А. РОМАНОВ,  
А.Н. МАТЮНИН, Т.В. МЯСНИКОВА

## БЕСКОНТАКТНЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА БАЗЕ СВЕРХМИНИАТЮРНОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

*Ключевые слова:* бесконтактный датчик, датчик углового положения, электрическая машина, сверхминиатюрная электрическая машина (СМЭМ).

*В настоящее время вместе с микроэлектроникой, телекоммуникацией и т.п. в области современной электротехники отчетливо выражена потребность в миниатюризации (а часто и в сверхминиатюризации) структур электромеханических преобразователей энергии и систем. В статье предлагается конструкция датчика положения дроссельной заслонки с использованием сверхминиатюрной электрической машины (СМЭМ). Проведены испытания работоспособности опытного образца СМЭМ в температурном диапазоне от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $160^{\circ}\text{C}$ . Предложена конструкция СМЭМ при использовании высокотемпературных марок редкоземельных магнитов в системе возбуждения. Предложены конструктивные решения датчиков углового положения на базе СМЭМ.*

Развитие систем контроля и мониторинга интеллектуальных систем управления газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания напрямую зависит от эксплуатационных и функциональных возможностей вновь разрабатываемых датчиков. Наряду с расширением возможностей датчиковых систем повышаются и требования по надёжности и точности измерений, что в первую очередь затрагивает такие отрасли, как авиация, космические аппараты и нефтедобывающее оборудование. Воздействие широкого диапазона температур в области действия теплового поля двигателя ограничивает возможности применения большинства известных типов датчиков либо требует внесения изменений в конструкцию двигателя для защиты датчиков от воздействия высоких и низких температур. В статье предлагается конструкция датчика положения дроссельной заслонки с использованием сверхминиатюрной электрической машины (СМЭМ) [3].

Наибольшее распространение в сфере транспорта получили датчики двух типов: потенциометрические и бесконтактные [5]. Существенным недостатком потенциометрического датчика является наличие механического контакта ползуна с резистивными дорожками (рис. 1), что приводит к частому выходу датчика из строя и небольшому сроку службы.

С повышением требований к надёжности и условиям эксплуатации технические решения всё больше смещаются в сторону бесконтактных методов измерения углового положения [4]. Большинство бесконтактных датчиков разрабатываются на основе интегральных микросхем, использующих в своей работе эффект Холла или Гаусса. На вращающийся элемент датчика, соединённый с валом дроссельной заслонки, устанавливается постоянный магнит, а в неподвижном корпусе на минимальном расстоянии от магнита – интегральная микросхема, реагирующая на изменение магнитного поля (рис. 2).



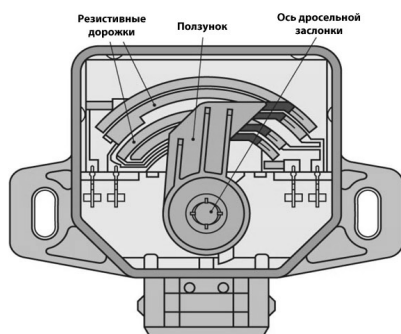


Рис. 1. Потенциометрический датчик положения дроссельной заслонки

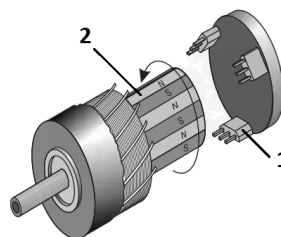


Рис. 2. Принцип работы датчика углового положения на интегральных микросхемах:  
1 – интегральная микросхема датчика Холла  
2 – постоянный магнит

Бесконтактные магнитоуправляемые интегральные схемы Холла повышают надёжность датчиков и позволяют использовать их в жёстких условиях эксплуатации (вибрация, загрязнения) при температурах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . При измерении углового положения дроссельной заслонки в диапазоне от  $0^{\circ}$  до  $180^{\circ}$  точность измерений датчика с одним элементом Холла составляет порядка 2%. Для получения более высокой точности в конструкции используют несколько чувствительных элементов.

Недостатками датчиков с интегральными микросхемами являются:

- необходимость усиления сигнала из-за низкой чувствительности элементов Холла (порядка  $0,4\text{--}0,7\text{ мВ}$  при напряжённости магнитного поля  $1\text{ кА/м}$ );
- наличие в конструкции платы печатного монтажа, имеющей более низкую рабочую температуру до  $130^{\circ}\text{C}$  и контактирующей непосредственно с датчиком, что не позволяет размещать датчик непосредственно в зоне действия теплового поля источника.

Указанных характеристик датчиков на основе элементов Холла достаточно для большинства автомобильных систем, однако применение их в более высокотемпературных системах (нефтедобывающая и авиационная отрасли) невозможно из-за физических ограничений:

- зависимости ширины запрещённой зоны полупроводников от температуры;
- уменьшения подвижности носителей заряда;
- уменьшения удельного сопротивления;
- электромиграции.

Повышение температуры приводит к нарушению герметизации, разрыву соединений и другим отказам интегральных микросхем.

Существует ряд технических решений в области электроники (металло-керамические корпуса, политетрафлуор-этиленовые монтажные платы со стеклом и керамикой и т.д.), которые позволяют расширить температурный диапазон эксплуатации микросхем от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+155^{\circ}\text{C}$  [1], отдельных компонентов до  $+550^{\circ}\text{C}$  (постоянные высококоэрцитивные магниты из сплава  $\text{Sm-Co-Fe-Cu-Zr}$  с повышенным содержанием меди) без существенного снижения остальных технических характеристик [6]. Однако использование

большинства их них приводит к значительному удорожанию конструкции и сокращению области их применения.

В качестве одного из решений вопроса разработки высокотемпературных датчиков авторами предлагается использовать для определения углового положения вместо интегральных микросхем сверхминиатюрную магнитоэлектрическую машину СМЭМ. Опытный образец СМЭМ представлен на рис. 3.

Корпус СМЭМ с поликапиллярной структурой получен многократной перетяжкой из преформ методом подobia. Особенностью технологического процесса являются низкая себестоимость изготовления и возможность получения микроструктур с уменьшением поперечных размеров, измеряемых сотнями и десятками микрон. Использование некоторых видов стекла позволяет применять статор при воздействии от сверхнизких температур до  $1200^{\circ}\text{C}$ . Проводники обмотки 1 СМЭМ (рис. 4) свободно размещаются в поликапиллярных отверстиях статора 2, что исключает возникновение деформаций и внутренних напряжений из-за разности температурных коэффициентов линейного расширения.

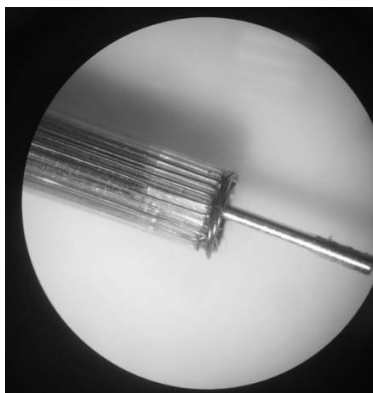


Рис. 3. Опытный образец СМЭМ в объективе микроскопа

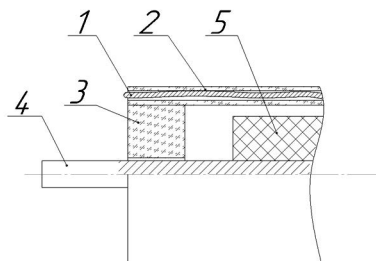


Рис. 4. Поперечный разрез СМЭМ:  
1 – проводник обмотки; 2 – корпус статора;  
3 – стеклянный подшипник скольжения;  
4 – вал; 5 – постоянный магнит ротора

В качестве обмоточных проводников можно использовать как изолированные медные провода с температурой рекристаллизации до  $240^{\circ}\text{C}$ , так и изолированные: эмалевые провода марок ПЭАИ 1-200 и ПТЭ 200 (с рабочей температурой  $+200^{\circ}\text{C}$ ); монтажные МК 26-191 и МС 26-15 ( $+200^{\circ}\text{C}$ ). Использование в качестве материала жил хромеля и алюмеля наряду с высокотемпературными стеклонитями в качестве изоляции (провода, аналогичные ПТКК ХА) позволяет повысить температуру используемого провода до  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Применение стеклянных втулок 3 в качестве подшипников скольжения лишает конструкцию СМЭМ такого недостатка классических машин, как использование подшипников с ограниченными диапазонами эксплуатации (от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  и от  $-20$  до  $+240^{\circ}\text{C}$ ) из-за температуры каплеобразования смазок. Испытания СМЭМ, проведенные в режиме датчика скорости [2], указали на верность принятого технического решения и работоспособность конструкции при высоких скоростях (более 10000 об/мин).

При изготовлении опытного образца СМЭМ для системы возбуждения использовался высококоэрцитивный магнит типа NdFeB с рабочей темпера-

турой от  $-60$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Однако, по утверждению западных разработчиков, имеющиеся в свободной продаже магниты марки N33АН11.3-11.7 способны работать без потери рабочих свойств до  $+240^{\circ}\text{C}$ , обеспечивая величину магнитной индукции до 1,17 Тл при коэрцитивной силе 812 кА/м. В то же время современные технологии позволяют получить редкоземельные магниты типа Sm-Co-Fe-Cu-Zr с рабочей температурой до  $+550^{\circ}\text{C}$  и  $+610^{\circ}\text{C}$  [6].

Таким образом, предложенная авторами конструкция СМЭМ может успешно функционировать в качестве исполнительного механизма датчика углового положения, работающего непосредственно в области воздействия высоких температур (рис. 5).

Подобный режим работы характерен для систем настройки объёмных расходов горячего воздуха и дымовых газов в различных газовых установках (системы газоснабжения котельных, тепловых электростанций, технологических газовых печей и т.д.). Для усиления сигнала и повышения точности СМЭМ достаточно использовать редукторную систему (рис. 6). Обмотка СМЭМ выводится на жгут необходимой длины, достаточный для размещения низкотемпературной системы управления и обработки сигналов (микроконтроллер, цифровую плату обработки сигнала) на безопасном расстоянии от источника теплового поля. Регулируя редукторную систему по величине получаемой электродвижущей силы, можно определить угол поворота оси дроссельной заслонки.

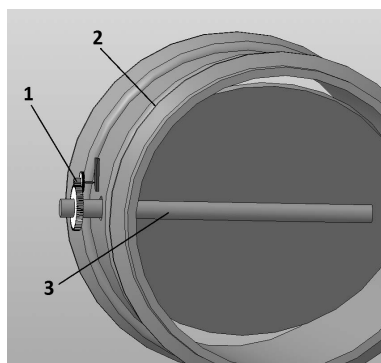


Рис. 5. Применение СМЭМ в высокотемпературной дроссельной заслонке диаметром 450 мм:  
1 – датчик на базе СМЭМ;  
2 – дроссельная заслонка;  
3 – ось дроссельной заслонки

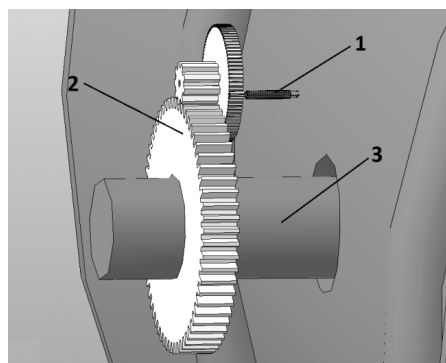


Рис. 6. Редукторная система высокотемпературного датчика положения дроссельной заслонки:  
1 – СМЭМ;  
2 – зубчатые передачи;  
3 – ось дроссельной заслонки

Конструкция микромашины позволяет разместить СМЭМ непосредственно в пределах действия теплового поля источника, а плату обработки сигнала вынести за его пределы. Функциональная схема датчика, построенного на базе интеграции СМЭМ с электронной системой обработки сигнал, представлена на рис. 7.

<sup>1</sup> Магниты постоянные из сплава типа неодим–железо–бор. ТУ 4229-007-18413402-2003.

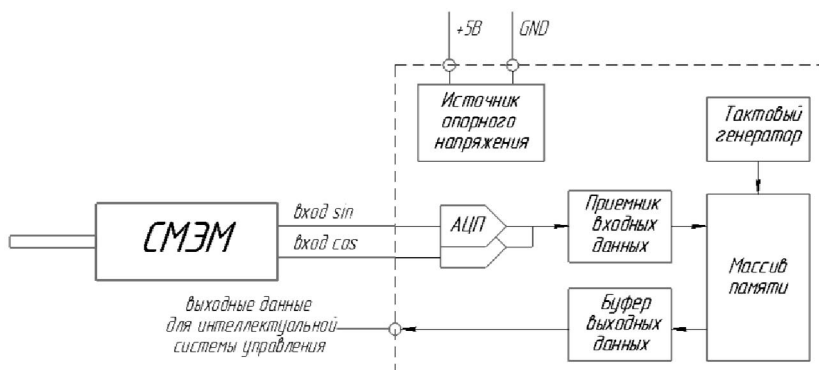


Рис. 7. Структурная схема микросхемы обработки данных углового положения СМЭМ

Преимуществом данного решения является возможность формирования информационного сигнала даже в отсутствии внешнего питающего напряжения при условии использования энергонезависимой памяти EEPROM. При вращении оси дроссельной заслонки на обмотках СМЭМ генерируется электродвижущая сила, амплитуда и частота которой сигнализируют об изменении углового положения.

Основным недостатком системы, указанной выше системы, является наличие механического контакта редуктора, необходимого для формирования необходимого уровня ЭДС.

Поэтому авторами предлагается второй вариант использования СМЭМ в качестве чувствительного элемента датчика углового положения с определением угла методом ШИМ-возбуждения (рис. 8).

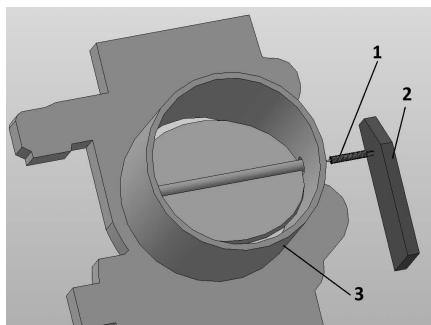


Рис. 8. СМЭМ в датчике положения дроссельной заслонки:  
1 – СМЭМ; 2 – плата обработки сигнала; 3 – дроссельная заслонка

При вращении оси дроссельной заслонки происходит изменение положения вала ротора СМЭМ и, соответственно, расположения полюсов постоянного магнита. Текущее угловое положение ротора СМЭМ определяется на основе уравнений электрического равновесия обмоток по осям  $d$ - $q$  роторной системы координат.

Приняв при преобразовании трехфазного тока в обмотках статора СМЭМ в токи двухфазной неподвижной системы координат следующие допущения: амплитуда вращающегося вектора тока в неподвижной системе координат равна амплитуде тока в фазе; начало вектора тока совпадает с началом координат; вектор вращается на плоскости вокруг начала координат с угловой скоростью, соответствующей частоте переменного тока  $\omega = 2\pi f$ , получим выражение токов для неподвижной системы координат:

$$\begin{cases} I_\alpha = I_A; \\ I_\beta = \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}}, \end{cases}$$

или, учитывая, что  $I_A + I_B + I_C = 0$ ,

$$\begin{cases} I_\alpha = I_A; \\ I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}I_A + \frac{2}{\sqrt{3}}I_B, \end{cases}$$

где  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  – фазные токи в обмотках статора СМЭМ, а  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  эквивалентные токи в двухфазной неподвижной системе координат (рис. 9).

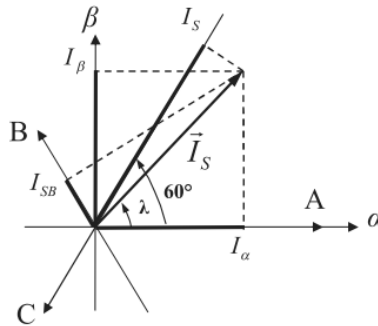


Рис. 9. Фазные преобразования токов СМЭМ

Переход от неподвижной системы координат к вращающейся вместе с ротором подвижной системе координат осуществляется по формуле

$$\begin{cases} I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta; \\ I_q = I_\beta \cos\theta - I_\alpha \sin\theta, \end{cases}$$

где  $\theta$  – угол между осью  $d$ , вращающейся вместе с ротором системой координат, и неподвижной осью  $\alpha$  статорной системы координат;  $I_q$  и  $I_d$  – токи статора во вращающейся системе координат.

Взаимная индуктивность  $M_{ABC}$  и собственные индуктивности  $L_d$  и  $L_q$  СМЭМ изменяются в функции угла отклонения  $\theta$ . Таким образом, угловое положение ротора оценивается при подаче на обмотку статора СМЭМ высокочастотных сигналов с помощью математической модели

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_{dq}}{dt} &= \bar{u}_{dq} - r \cdot \bar{i}_{dq} - \omega k(\bar{\Psi}_{dq} + \Psi_m); \\ \frac{J}{p^2} \frac{dw}{dt} &= \frac{3}{2} \bar{i}_{dq}^T k(\bar{\Psi}_{dq} + \Psi_m) - \frac{M_L}{p}; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \end{aligned}$$

где  $\bar{\Psi}_{dq}$  – вектор потокосцепления статора в системе координат  $d-q$ ;  $\bar{u}_{dq}$ ,  $\bar{i}_{dq}$  – векторы напряжения и тока в системе координат  $d-q$ ;  $\Psi_m$  – потокосцепление постоянного магнита;  $J$  – момент инерции;  $r$  – сопротивление обмоток статора;  $M_L$  – момент нагрузки;  $p$  – число пар полюсов;  $k$  – матрица коэффициентов.

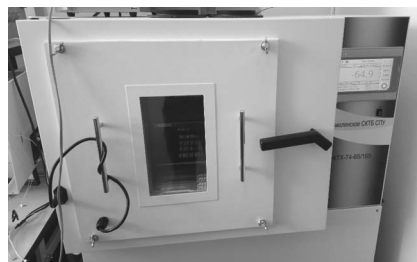
Для подтверждения теоретических утверждений о работоспособности СМЭМ в широком диапазоне температур были проведены испытания на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам<sup>1</sup>.

Испытания проводились посредством измерительно-вычислительного комплекса КТХ-74-65/165 методом 201-1.1 на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации (до 160,5°C) и методом 204-1 на воздействие нижнего значения температуры воздуха при транспортировании и хранении (рис. 10).

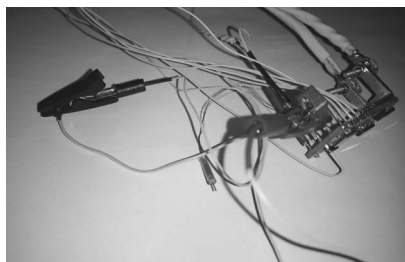
СМЭМ (без преобразователя) был помещен в камеру, после чего в камере была установлена температура, соответствующая нижнему значению температуры –65°C. Средняя скорость изменения температуры воздуха в камере составила 1,5°C/мин. Выдержка времени для установления теплового равновесия составных частей с учётом сверхмалой массы СМЭМ (0,14 г) составила 30 мин. По истечении указанного времени значение температуры воздуха в камере поднималось до 160,5°C с той же скоростью, как и изменения температуры. Выдержка СМЭМ на воздействие верхнего значения температуры составила 10 мин. При достижении комнатной температуры в камере (24°C) были проведены осмотр внешнего вида и запуск СМЭМ. Проведенные испытания подтвердили работоспособность сверхминиатюрной машины в условиях воздействия широкого диапазона температур.



а



б



в

Рис. 10. Проведение испытаний СМЭМ на стойкость к воздействию сверхнизких и высоких температур:  
а – испытания на воздействие повышенной температуры;  
б – испытания на воздействие пониженной температуры;  
в – подключение СМЭМ к плате управления

<sup>1</sup> ГОСТ Р 51368-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200113362>.

**Выводы.** 1. Проведенные испытания подтвердили работоспособность опытного образца СМЭМ в температурном диапазоне от  $-65$  до  $160^{\circ}\text{C}$ .

2. Предложенная конструкция СМЭМ при использовании более высокотемпературных марок редкоземельных магнитов в системе возбуждения позволяет увеличить рабочую температуру микромашины до  $+200^{\circ}\text{C}$  без заметного повышения себестоимости и рабочих характеристик СМЭМ.

3. Разработка на базе СМЭМ высокотемпературных датчиков с температурой эксплуатации до  $+550^{\circ}\text{C}$  требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований магнитной системы СМЭМ.

4. Предложенные конструктивные решения датчиков углового положения на базе СМЭМ позволяют существенно расширить их эксплуатационные и функциональные возможности.

#### Литература

1. Максимов А. Многослойные металлокерамические корпуса: преимущества и особенности // Электроника. 2011. № 3. С. 56–59.

2. Нестерин В.А., Генин В.С., Романов Р.А., Нестерин А.В., Матюнин А.Н. Исследование сверхминиатюрной магнитоэлектрической машины с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов в режиме датчика скорости // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 243–248.

3. Пат. 180945 РФ, МПК H02K 29/00. Магнитоэлектрический микродвигатель / Нестерин В.А., Романов Р.А., Матюнин А.Н. 2018101517; заявл. 16.01.18; опубл. 02.07.18, Бюл. № 19.

4. Семькина И.Ю., Тарнецкая А.В. Современные бездатчиковые методы оценивания положения неподвижного ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 126–132.

5. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Ч. 1. Потенциометры и датчики Холла // Компоненты и технологии. 2005. № 2 С. 52–59.

6. Jinfang Liu, PayalVora, Peter Dent and Michael Walmer Thermal stability and a radiation resistance of SmCo based permanent magnets. Proc. of Space Nuclear Conf., 2007, p. 2036.

---

**НЕСТЕРИН ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (v.nstrn@mail.ru)

**РОМАНОВ РОМАН АРТЕМЬЕВИЧ** – старший преподаватель кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ragnum@mail.ru).

**МАТЮНИН АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ** – старший преподаватель кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (matyunin86@mail.ru).

**МЯСНИКОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tatyana.myasnikova@yandex.ru).

---

V. NESTERIN, R. ROMANOV, A. MATYUNIN, T. MYASNIKOVA

NON-CONTACT HIGH-TEMPERATURE ANGULAR SENSORS  
ON THE BASIS OF SUPERMINIATURE MAGNETIC ELECTRIC MACHINE

*Key words:* proximity sensor, angle position sensor, electric machine, superminiature electric machine (SMEM).

Currently, in the field of modern electrical engineering, together with microelectronics, telecommunications, etc. there is a clear need for miniaturization (and often superminiaturization) of electromechanical energy converters and systems. The article proposes the design of a throttle position sensor using a subminiature electric machine (SMEM). Testing of the performance of the prototype SMEM in the temperature range from minus 65°C to 160°C was made. The design of SMEM using high-temperature grades of rare-earth magnets in the excitation system was developed. The constructive solutions of the angular position sensors based on the SMEM are proposed.

#### References

1. Maksimov A. *Mnogosloynnye metallokeramicheskie korpusa: preimushchestva i osobennosti* [Multilayer metal-ceramic shells: advantages and features]. *Elektronika*, 2011, no. 3, pp. 56–59.
2. Nesterin V.A., Genin V.S., Romanov R.A., Nesterin A.V., Matyunin A.N. *Issledovanie sverkhminiaturnoi magnitoelektricheskoi mashiny s vzbuzhdeniem ot vysokoenergeticheskikh postoyannykh magnitov v rezhime datchika skorosti* [Study of a subminiature magnetoelectric machine with excitation from high-energy permanent magnets in the speed sensor mode]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotehniki i energoeffektivnosti: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. «Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, 2018, pp. 243–248.
3. Nesterin V.A., Romanov R.A., Matyunin A.N. *Magnitoelektricheskii mikrodvigatel'* [Magnetoelectric micromotor]. Patent RF, no. 180945, 2018.
7. Semykina I.Yu., Tarnetskaya A.V. *Sovremennye bezdatchikovyie metody otsenivaniya polozeniya nepodvizhnogo rotora sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami* [Modern sensorless methods for estimating the position of a fixed rotor of a permanent magnet synchronous motor]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2, pp. 126–132.
8. Syssoeva S. *Avtomobil'nye datchiki polozheniya. Sovremennye tekhnologii i novye perspektivy. Chast' 1. Potentsiometry i datchiki Kholla* [Automotive position sensors. Modern technologies and new perspectives. Part 1. Potentiometers and Hall sensors]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 2, pp. 52–59.
9. Jinfang Liu, PayalVora, Peter Dent and Michael Walmer *Thermal stability and a radiation resistance of SmCo based permanent magnets*. Proc. of Space Nuclear Conf., 2007, p. 2036.

---

**NESTERIN VALERIY – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automated Electrotechnological Installations and Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (v.nstrn@mail.ru).**

**ROMANOV ROMAN – Senior Lecturer, Department of Automated Electrotechnological Installations and Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ragnum@mail.ru).**

**MATYUNIN ALEKSEY – Senior Lecturer, Department of Automated Electrotechnological Installations and Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (matyunin86@mail.ru)**

**MYASNIKOVA TATYANA – Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor, Department of Automated Electrotechnological Installations and Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (tatyanamiasnikova@yandex.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Нестерин В.А., Романов Р.А., Матюнин А.Н., Мясникова Т.В.* Бесконтактные высокотемпературные датчики углового положения на базе сверхминиатюрной магнитоэлектрической машины // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 176–184.



УДК 681.5.09  
ББК 31.278

Д.С. ОБЫЧАЙКО, В.А. ШИХИН

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДИКАТИВНЫХ ДИАГРАММ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**Ключевые слова:** эксплуатационная надежность, энергооборудование, киберфизические системы, граф состояний, диаграмма принятия решений.

*Восстановление работоспособности элементов энергооборудования, имеющего признаки киберфизических систем (КФС), рассматривается в отношении чрезвычайно критического и критического оборудования и деления полного жизненного цикла на временные срезы, соответствующие предаварийному, аварийному, восстановленному и спрогнозированному состояниям. Разрабатывается граф соответствующих состояний КФС относительно кибернетических и физических компонент. На основе построенных графов формулируется задача определения вероятности восстановления соответствующих компонент. Вводятся дифференциальные уравнения, связывающие вероятности восстановления кибернетических и физических компонент с интенсивностями отказов и восстановлений различного типа. Предложенные обыкновенные дифференциальные уравнения допускают аналитическое решение с ясной графической интерпретацией по временной области, где отображается изменение вероятности перехода компонентов системы из одного состояния в другое. Разработанная диаграмма принятия решений (ДПР) по восстановлению или замене соответствующего компонента КФС отображает возможность производства обоснованного выбора между вариантами действий по восстановлению работоспособности системы. По результатам проведенных исследований разработан алгоритм реализации метода, представленный в виде блок-схемы последовательного решения всех задач, составляющих основу предлагаемого метода. Тестовые задачи решались на примере анализа и прогнозирования надежности оборудования цифровой электроподстанции.*

**Введение.** Принятие технических решений при восстановлении работоспособности энергетического оборудования в процессе его интенсивной эксплуатации является достаточно комплексной задачей поскольку при этом должны приниматься в рассмотрение не только технические, но и экономические факторы. Необходимо учитывать, что современное электротехническое оборудование имеет достаточно высокую стоимость, а его отдельные компоненты не всегда ремонтпригодны в достаточной степени, либо их восстановление посредством ремонта требует значительных затрат. Удорожание оборудования связано, в том числе, с его усложнением, применением современных систем управления, автоматики, средств передачи и обработки информации и т.д. Современные электротехнические комплексы (например, цифровые подстанции) вполне могут быть отнесены к классу киберфизических систем (КФС) [6–9, 11, 12], где такие кибернетические компоненты (КК), как интеллектуальные датчики, цифровые измерительные средства и приборы, активные устройства сбора данных и обмена данными и другие интеллектуальных устройства, интегрированы в объекты и непосредственно взаимодействуют с их физическими компонентами (ФК). В последнее время появились работы, предлагающие различные методики расчёта надёжности

киберфизических систем (КФС). В частности, в [10] предпринята попытка проектного расчёта надёжности интегрированной КФС на основе введения киберфизической матрицы. Однако практически все предлагаемые методы остаются в рамках классических статистических подходов. Возникает необходимость в разработке метода анализа надёжности и восстановления работоспособности КФС, находящихся в условиях интенсивной эксплуатации, на основе применения актуализируемых и машинно-ориентированных моделей надёжности [3], что также позволит осуществлять анализ и прогнозирование оперативной надёжности КФС на основе эффективных автоматизированных вычислительных процедур.

#### **Разработка графа состояний КФС на жизненном цикле эксплуатации.**

Рассмотрим систему, состоящую из двух типов компонентов: физических (ФК) и кибернетических (КК). Построим граф состояний указанной КФС-системы, который отражает возможные состояния системы и направления возможных переходов системы из одного состояния в другое [4, 5]. Полагаем, что за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t$  в систему может поступить только одно требование и покинуть систему также может только одно требование. Другими словами, за это время система может либо остаться в прежнем состоянии, либо перейти в одно из соседних. Стрелки обозначают направления переходов с указанием параметров потоков изменений. Граф состояний системы является важным источником для быстрого и точного построения математической модели в виде системы дифференциальных уравнений.

Полагаем, что ФК имеет два варианта восстановления из аварийного состояния: автоматическое (повторное включение через определенный промежуток времени, включение резерва) и ручное (ремонтная бригада). Кибернетический компонент имеет три варианта восстановления из аварийного состояния: автоматическое, ручное и восстановление по умолчанию.

Предлагается рассматривать КФС на четырех временных срезах (рис. 1): предаварийное, аварийное, восстановленное, спрогнозированное состояние. Восстановление может происходить в ручном режиме (для ФК и КК), автоматически (для ФК и КК), по умолчанию (для КК).

Для описания вероятности возврата системы из аварийного состояния в рабочее (из  $S_{1ФК}$  в  $S_{2КФС}$ , из  $S_{1КК}$  в  $S_{2КФС}$ ) предлагается использовать дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} P_{12}^{ФК} = (\alpha_{АВ}^{ЧК} + \alpha_{РВ}^{ЧК} - \beta_{АВ}^{ЧК} - \beta_{РВ}^{ЧК}) \cdot \frac{dP_{12}^{ФК}}{dt} + \gamma_1 \cdot P_{3АМ}^{ФК} + \gamma_2 \cdot P_{ВОС}^{ФК}; \\ P_{12}^{КК} = (\alpha_{АВ}^{ЧК} + \alpha_{РВ}^{ЧК} + \alpha_{ВПУ}^{ЧК} - \beta_{АВ}^{ЧК} - \beta_{РВ}^{ЧК} - \beta_{ВПУ}^{ЧК}) \cdot \frac{dP_{12}^{КК}}{dt} + \gamma_1 \cdot P_{3АМ}^{ФК} + \gamma_2 \cdot P_{ВОС}^{ФК}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_{12}^{ФК}$  – вероятность возврата системы в рабочее состояние (переход системы из состояния  $S_{1ФК}$  в  $S_{2КФС}$ );  $P_{12}^{КК}$  – вероятность возврата системы в рабочее состояние (переход системы из состояния  $S_{1КК}$  в  $S_{2КФС}$ );  $\alpha_{АВ}^{ЧК}$  – интенсивность автоматического восстановления ЧК-оборудования;  $\alpha_{РВ}^{ЧК}$  – интенсивность ручного восстановления;  $\alpha_{ВПУ}^{ЧК}$  – интенсивность восстановления по

умолчанию;  $\beta_{AB}^{ЧК}$  – интенсивность отказа автоматического восстановления;  $\beta_{PB}^{ЧК}$  – интенсивность отказа ручного восстановления;  $\beta_{ВПУ}^{ЧК}$  – интенсивность отказа восстановления по умолчанию;  $P_{ЗАМ}^{КК}$  – вероятность восстановления с помощью замены;  $P_{ВОС}^{КК}$  – вероятность восстановления с помощью восстановления;  $\gamma_1$  – интенсивность замены;  $\gamma_2$  – интенсивность восстановления.

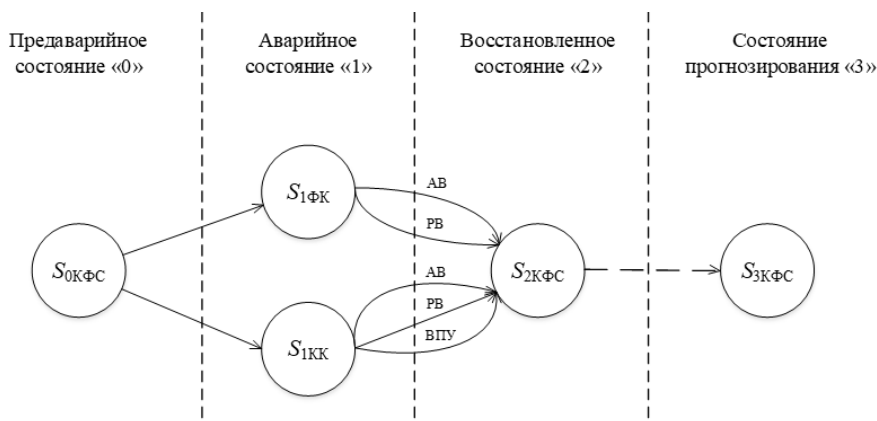


Рис. 1. Граф состояний рассматриваемой системы:

$S_{0КФС}$  – предаварийное состояние, компоненты системы в рабочем состоянии;  $S_{1ФК}$  – аварийное состояние, вышел из строя физический компонент;  $S_{1КК}$  – аварийное состояние, вышел из строя кибернетический компонент;  $S_{2КФС}$  – восстановленное состояние КФС, компоненты системы в рабочем состоянии;  $S_{3КФС}$  – спрогнозированное состояние КФС

Учет наличия ЗИП на объекте, времени доставки необходимых запчастей или нового изделия и приезда ремонтной бригады приводит к задержке. Это математически формализовано и выражается наличием эффекта запаздывания.

Уравнения в системе (1) связаны с введением дополнительного ограничения на значения интенсивностей восстановлений и отказов:

$$\alpha_{AB}^{КР} \leq 1, \alpha_{PB}^{КР} \leq 1, \alpha_{ВПУ}^{КР} \leq 1, \beta_{AB}^{КР} \leq 1, \beta_{PB}^{КР} \leq 1, \beta_{ВПУ}^{КР} \leq 1 \quad (2)$$

Физический смысл предложенных систем дифференциальных уравнений заключается в том, чтобы отобразить зависимость вероятностей перехода ФК  $P_{12}^{ФК}$  и КК  $P_{12}^{КК}$  из одного состояния в другое с учетом реально изменяющейся интенсивности каждого возможного типа восстановления и изменяющихся потоков отказов восстановления. При известных начальных условиях вероятностей  $P_{12}^{ФК}$ , КК  $P_{12}^{КК}$  и известных постоянных коэффициентах в правой части уравнений (определяются расчетным путем и/или на основе экспертных знаний) предложенная система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений (1) имеет единственное решение, которое, в частности, допускает ясное графическое отображение во временной области. Это позволяет представить изменение вероятностей перехода компонентов системы как ФК, так и КК из одного состояния в другое по временным срезам жизненного цикла исследуемой системы.

**Разработка диаграммы принятия решения.** Необходимо оценить целесообразность и соотнести возможные затраты на возврат рабочего состоя-

ния того или иного компонента. Может оказаться, что целесообразнее будет произвести замену компонента на новый, чем отремонтировать его.

Предложим диаграмму принятия решения по повышению надежности системы КФС, представленную на рис. 2, где по горизонтальной оси отображается срок эксплуатации системы во времени  $t$ , называемый жизненным циклом отдельного компонента  $T_{жцi}$  (ФК или КК), и системы в целом  $T_{жц}$ . Предполагается, что  $T_{жцi}$  компонента не меньше установленного в проектной документации жизненного цикла всей системы  $T_{жцi} \leq T_{жц}$ . По вертикальной оси отображаются стоимостные характеристики:  $C_B(t)$  – (балансовая) стоимость компонента, которая падает (условно линейно, без потери общности результатов исследования) от начального значения  $C_0$  до нуля по истечении жизненного цикла  $T_{жц}$ , а для  $i$ -го компонента от  $C_{0i}$  до  $T_{жцi} = T_{жц}$ ;  $\Delta C_{восi}$  – затраты на восстановление посредством ремонта и  $\Delta C_{замi}$  – затраты на замену компонента.

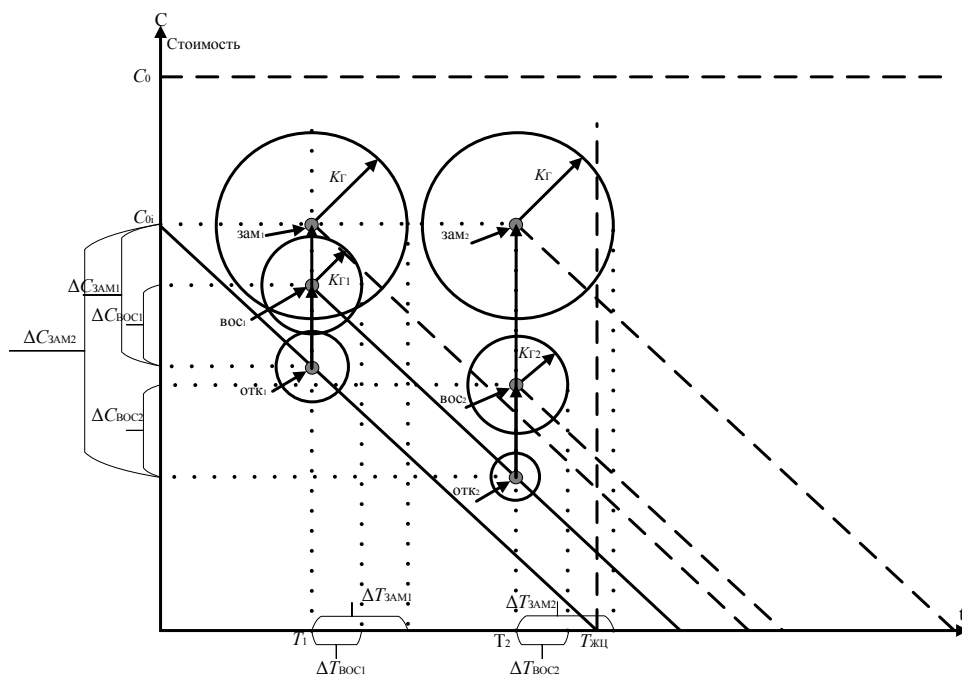


Рис. 2. Диаграмма принятия решения по выборке между ремонтом компонента или его заменой

Согласно диаграмме, представленной на рис. 2, полагаем, что в момент времени  $T_1$  произошел первый отказ некоторого компонента системы. При этом возможны два варианта действий:

а) ремонт компонента, что по его завершению приводит к перемещению центра соответствующей геометрической фигуры в виде круга в точку «восстановление 1» («вос1»), сопровождающееся изменением радиуса круга до значения  $K_{Г1}$  (коэффициент готовности отремонтированного компонента);

б) замена компонента, что по ее завершению приводит к перемещению центра круга в точку «замена 1» и изменению радиуса до значения  $K_{\Gamma}$  (коэффициент готовности нового компонента).

При этом важно отметить, что  $K_{\Gamma}$  является заданной константой (например, рассчитанной в проектной документации), а  $K_{\Gamma 1}$  является переменной, соответствующей расчетному выходному значению принятой модели оценки показателя эксплуатационной (оперативной) надежности (например, по модели в форме ИНС [1]).

Предлагается произвести выбор между вариантами действий (а) и (б), основываясь на проверке соотношений между рассчитанными значениями следующих коэффициентов:

$$K_{\text{ЖЦ}} = \frac{C_0}{T_{\text{ЖЦ}}}, K_{\text{ВОС } i} = \frac{\Delta C_{\text{ВОС } i}}{\Delta T_{\text{ВОС } i}}, K_{\text{ЗАМ } i} = \frac{\Delta C_{\text{ЗАМ } i}}{\Delta T_{\text{ЗАМ } i}}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{\text{ЗАМ } i} = T_{\text{ЖЦ}}$ ;  $K_{\text{ЖЦ}}$ ,  $K_{\text{ЖЦ } i}$  – коэффициент жизненного цикла системы и  $i$ -го компонента, соответственно;  $K_{\text{ВОС } i}$  – коэффициент эффекта восстановления  $i$ -го компонента;  $K_{\text{ЗАМ } i}$  – коэффициент эффекта замены  $i$ -го компонента, имеющие одинаковую размерность [руб./год].

В расчетных формулах (1) в числителе указаны затраты на соответствующее мероприятие ( $C_0$ ,  $\Delta C_{\text{ВОС } i}$ ,  $\Delta C_{\text{ЗАМ } i}$ ), а в знаменателе ( $T_{\text{ЖЦ}}$ ,  $\Delta T_{\text{ВОС } i}$ ,  $\Delta T_{\text{ЗАМ } i}$ ) интервалы времени, пропорциональные приращению коэффициента готовности до  $K_{\Gamma i}$  или до  $K_{\Gamma}$ , соответствуют измененному времени наработки на отказ.

Коэффициент эффекта отличается от коэффициента эффективности мероприятия (восстановления или замена) тем, что его численное уменьшение, как это следует из формулы (3), связано с позитивным техническим эффектом (меньше стоимость – выше наработка на отказ).

Если выполняется соотношение

$$K_{\text{ВОС } i} \leq K_{\text{ЖЦ}} \text{ и } K_{\text{ВОС } i} < K_{\text{ЗАМ } i}, \quad (4)$$

то предлагается принимать решение о восстановлении компонента, поскольку из (3) следует, что затраты на восстановление компонента приводят к существенному положительному эффекту.

Если выполняется соотношение

$$K_{\text{ЗАМ } i} \leq K_{\text{ЖЦ}} \text{ и } K_{\text{ЗАМ } i} < K_{\text{ВОС } i}, \quad (5)$$

то предлагается принимать решение о замене компонента, поскольку технико-экономический эффект от замены превышает эффект от восстановления компонента.

Допустим, принимается решение о восстановлении компонента и схема перехода по диаграмме (рис. 2) до последующего возможного отказа соответствует последовательности точек «отказ 1» – «восстановление 1» – «отказ 2».

Последовательность операций по восстановлению работоспособности компонента сохраняется, как и на предыдущем этапе.

Таким образом, предложена основа для разработки алгоритма принятия решения по поддержке работоспособности системы с учетом введения актуа-

лизированного показателя надежности по жизненному циклу системы, которая представлена на рис. 3.

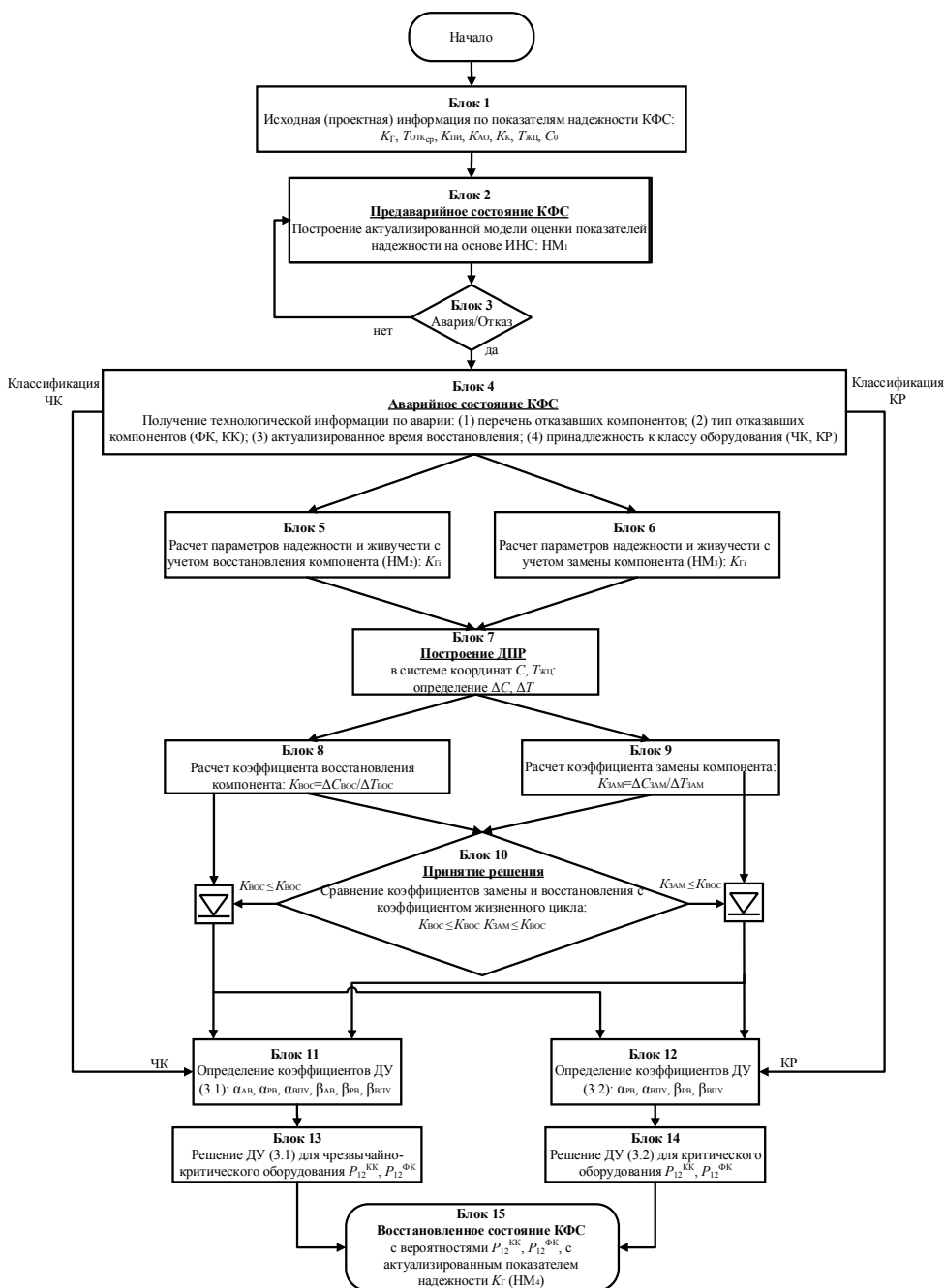


Рис. 3. Блок-схем алгоритма актуализации модели эксплуатационной надежности КФС на полном жизненном цикле

Рассмотрим взаимосвязи отдельных блоков схемы алгоритма и процедуры, которые применяются для решения указанных в них задач.

Блок 1. Блок 1 соответствует операции сбора исходной (проектной) информации по таким показателям надежности КФС, как: коэффициент готовности ( $K_G$ ), среднее время наработки на отказ ( $T_{\text{откср}}$ ), коэффициент полноты информации ( $K_{\text{ПИ}}$ ), коэффициент активности оператора ( $K_{\text{АО}}$ ), коэффициент конфликтности оборудования ( $K_K$ ), время жизненного цикла компонентов системы ( $T_{\text{жц}}$ ), балансовая стоимость компонентов системы и системы в целом ( $C_0$ ).

Блоки 2–3. Блок 2 соответствует построению актуализированной модели оценки надежности на основе ИНС на этапе предаварийного состояния КФС ( $\text{НМ}_1$ ). На вход модели поступают значения вероятностей нахождения каждого компонента КФС в конкретном состоянии. На выходе модели получаем значения четырех показателей живучести КФС [2]: коэффициент готовности ( $K_G$ ), коэффициент полноты информации ( $K_{\text{ПИ}}$ ), коэффициент активности оператора ( $K_{\text{АО}}$ ), коэффициент конфликтности оборудования ( $K_K$ ). КФС функционирует в штатном режиме до возникновения аварии или отказа ее компонентов (блок 3). Если имели место авария или отказ, то КФС переходит в аварийное состояние.

Блок 4. Аварийное состояние КФС. Осуществляется сбор технологической информации по аварии или отказу компонентов. Определяются следующие параметры:

- перечень отказавших компонентов КФС;
- тип отказавших компонентов КФС (ФК, КК);
- актуализированное время восстановления отказавших компонентов;
- принадлежность к классу оборудования (ЧК или КК).

Блоки 5–7. Для каждого отказавшего компонента КФС производится расчет параметров надежности и живучести с учетом как замены данного компонента (блок 5), так и восстановления данного компонента (блок 6). После рассчитанных актуализированных коэффициентов готовности  $K_G$  и времени наработки на отказ  $T_{\text{отк}}$  строится диаграмма принятия решения ДПР (рис. 2). Определяются затраты на замену и восстановление компонентов:  $\Delta C_{\text{зам}i}$ ,  $\Delta C_{\text{вос}i}$  и приращения времени наработки на отказ  $\Delta T_{\text{зам}i}$ ,  $\Delta T_{\text{вос}i}$ .

Блоки 8–10. Производится расчет коэффициентов восстановления компонентов  $K_{\text{вос}i}$  (блок 8) и коэффициентов замены компонентов  $K_{\text{зам}i}$  (блок 9). Затем принимается решение о восстановлении или замене компонентов на основе полученных соотношений для рассчитанных коэффициентов (4)–(5) (блок 10). Если выполняется соотношение (4), то принимается решение о восстановлении компонента. Если выполняется соотношение (5), то принимается решение о замене компонента.

Блоки 11–12. В зависимости от принадлежности к классу оборудования и от решения по замене или восстановления компонента определяются коэффициенты дифференциальных уравнений (1):  $\alpha_{\text{ав}}^{\text{чк}}$ ,  $\alpha_{\text{рв}}^{\text{чк}}$ ,  $\alpha_{\text{впу}}^{\text{чк}}$ ,  $\beta_{\text{ав}}^{\text{чк}}$ ,  $\beta_{\text{рв}}^{\text{чк}}$ ,  $\beta_{\text{впу}}^{\text{чк}}$  (блок 11) или коэффициенты дифференциальных уравнений (1):  $\alpha_{\text{рв}}^{\text{кп}}$ ,  $\alpha_{\text{впу}}^{\text{кп}}$ ,  $\beta_{\text{рв}}^{\text{кп}}$ ,  $\beta_{\text{впу}}^{\text{кп}}$  (блок 12).

Блоки 13–14. После определения коэффициентов дифференциальных уравнений рассчитываются вероятности перехода КФС в восстановленное состояние  $P_{12}^{КК}$ ,  $P_{12}^{ФК}$  по дифференциальным уравнениям.

Блок 15. Действия в соответствии с изложенным алгоритмом приводят к восстановленному работоспособному состоянию КФС с рассчитанными по уравнениям вероятностями  $P_{12}^{КК}$ ,  $P_{12}^{ФК}$  для кибернетических компонент и для физических компонент, соответственно. При этом актуализируются показатели надежности как компонентов, так и системы в целом  $K_G$ ,  $T_{ЖЦ}$ .

**Выводы.** 1. Построенный граф состояний КФС на четырех временных срезах в соответствии с жизненным циклом системы позволяет в ясной форме представить особенности процесса восстановления системы относительно кибернетических компонент и физических компонент.

2. На основе построенных графов предложены математическая формулировка и решение задачи по определению вероятности возврата работоспособности для физических и кибернетических компонент, основанные на введении дифференциальных уравнений, результат решения которых во многом определяется точностью определения констант, связанных с интенсивностями отказов и восстановлений различного типа.

3. При известных начальных условиях вероятностей соответствующих состояний ФК и КК, а также при известных коэффициентах дифференциальных уравнений получаемое графическое отображение решения во временной области позволяет представить изменение вероятностей перехода компонентов системы из одного состояния в другое по временным срезам жизненного цикла исследуемой системы.

4. В основу предлагаемого метода оценки эксплуатационной надежности КФС положена разработанная диаграмма принятия решения (ДПР) по восстановлению или замене соответствующего компонента КФС-системы. Основываясь на ДПР, можно произвести обоснованный выбор между вариантами действий по восстановлению работоспособности системы путем ремонта или замены соответствующих компонентов. При этом принятие решения сводится к проверке предложенных соотношений.

5. ДПР положена в основу разработки алгоритма принятия решения по поддержке работоспособности системы по полному жизненному циклу. Блок-схема разработанного алгоритма включает последовательное решение всех задач, составляющих основу предлагаемого метода. Разработанная блок-схема алгоритма предусматривает актуализацию показателей надежности на каждом временном срезе жизненного цикла КФС, для чего предлагается применение процедур машинного обучения (с использованием нейромоделей).

#### Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
2. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, 1987. 32 с.
3. Шихин В.А., Косинский М.Ю. Исследование возможностей нечётких моделей для оценивания эксплуатационной надёжности автоматизированных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 8. С. 35–42.



4. Шкляр В.Н. Надёжность систем управления. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 126 с.
5. Шубин П.А. Надёжность технических систем и техногенный риск. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 80 с.
6. Antsaklis P. Goals and challenges in cyber-physical system research. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 2017–2019.
7. Fei Hu, Yu Lu, A. V. Vasilakos, et al. Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation. *Future generation computer systems*, 2016. vol. 56, pp. 449–475.
8. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-AnKao. Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 – based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23.
9. Jiafu Wan, Hehua Yan, Hui Suo, Fang Li. Advances in Cyber-Physical Systems Research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2011, vol. 5, no. 11, pp. 1891–1908.
10. Lei H., Sigh C., Sprintson A. Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, vol. 5, no. 5, pp. 2194–2202.
11. Mitchell R., Ing-Ray Chen. Effect of Intrusion Detection and Response on Reliability of Cyber Physical Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 199–210.
12. Yilin Mo, Bruno Sinopoli. On the Performance Degradation of Cyber-Physical Systems Under Stealthy Integrity Attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, vol. 61, no. 9, pp. 2618–2624.

---

**ОБЫЧАЙКО ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ** – аспирант кафедры управления и информатики, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва (d.obychaiko@aamaautomatic.ru).

**ШИХИН ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва (shikhinva@mpei.ru).

---

**D. OBYCHAIKO, V. SHIKHIN**

**POWER EQUIPMENT OPERATIONAL RELIABILITY ENSURING  
VIA INDICATIVE DECISION-MAKING DIAGRAMS**

**Key words:** operational reliability, power equipment, cyber-physical systems, life cycle, state graph, decision-making flowchart.

Restoration of power equipment efficiency that attends to cyber-physical type of the systems (CPS) is discussed in respect of extremely critical and critical equipment in the CPS and the division of the full life cycle into time sections corresponding to the pre-emergency, emergency, restored and predicted states. The authors develop a graph for corresponding states of the CPS relative to the cybernetic and physical components. The problem of determining the probability of recovery of the corresponding components is formulated on the basis of the constructed graphs. Differential equations linking the probability of return to a working state of cybernetic and physical components with intensities of failures and restorations of various types are formulated. The suggested ordinary differential equations allow an analytical solution with a clear graphical interpretation in the time domain, which shows the changes in the probability of transition of the system components from one state to another. The developed decision-making diagram (DMD) for the restoration or replacement of the corresponding component of the FSC shows the possibility of making the reasonable choice between options for restoring the system performance. According to the results of the carried out research, an algorithm for the method implementation is developed and presented in the form of a block diagram for the sequential solution to all problems that form the basis of the proposed method. Testing has been executed through the digital power substation equipment reliability analysis and prediction.

## References

1. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, 1999, 864 p. (Russ. ed.: *Neironnye seti. Polnyi kurs*. Moscow, Vil'yams Publ., 2006, 1104 p.).
2. Cherkosov G.N. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh system* [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow, Znanie Publ., 1987, 32 p.
3. Shikhin V.A., Kosinskii M.Yu. *Issledovanie vozmozhnostei nechetkikh modelei dlya otsenivaniya ekspluatatsionnoi nadezhnosti avtomatizirovannykh system* [The Use of Fuzzy Models for Automated Systems Operational Reliability Analysis]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, no. 8, pp. 35–42.
4. Shklyar V.N. *Nadezhnost' sistem upravleniya* [Reliability of control systems: tutorial]. Tomsk Tomskii politekhnicheskii universitet Publ., 2011, 126 p.
5. Shubin R.A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk* [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Tambov Tambov State Technical University Publ., 2012, 80 p.
6. Antsaklis P. Goals and challenges in cyber-physical system research. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 2017–2019.
7. Fei Hu, Yu Lu, A. V. Vasilakos, et al. Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation. *Future generation computer systems*, 2016. vol. 56, pp. 449–475.
8. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-AnKao. Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 – based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23.
9. Jiafu Wan, Hehua Yan, Hui Suo, Fang Li. Advances in Cyber-Physical Systems Research. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2011, vol. 5, no. 11, pp. 1891–1908.
10. Lei H., Sigh C., Sprintson A. Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, vol. 5, no. 5, pp. 2194–2202.
11. Mitchell R., Ing-Ray Chen. Effect of Intrusion Detection and Response on Reliability of Cyber Physical Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 199–210.
12. Yilin Mo, Bruno Sinopoli. On the Performance Degradation of Cyber-Physical Systems Under Stealthy Integrity Attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, vol. 61, no. 9, pp. 2618–2624.

---

**OBYCHAIKO DMITRY** – Post-Graduate Student, Department of Automatics and Control, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia, Moscow (d.obychaiko@amautomatic.ru).

**SHIKHIN VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automatics and Control, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia, Moscow (shikhinva@mpei.ru).

---

**Формат цитирования:** Обычайко Д.С., Шихин В.А. Обеспечение эксплуатационной надежности энергооборудования посредством применения индикативных диаграмм принятия решений // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 185–194.

УДК 621.313.33:621.3.07:621.314.57

ББК 31.261.63+34.47+31.264.5

Д.И. ПОПОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ МАШИН

**Ключевые слова:** испытательный комплекс, электрическая машина, нагрузочные испытания, математическая модель, преобразователь частоты.

В статье обоснована актуальность вопроса испытаний асинхронных машин и разработки энергоэффективных электротехнических комплексов для проведения испытаний методом взаимной нагрузки. Отмечен наиболее энергозатратный вид испытаний – испытание на нагрев под номинальной нагрузкой в течение одного часа. Данный вид испытаний в соответствии с государственными стандартами является обязательным для проведения при приемочных и приемосдаточных испытаниях и не может быть заменен на упрощенные безнагрузочные испытания. Рассмотрены энергоэффективные схемы испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и машиной постоянного тока, позволяющие осуществить передачу электрической энергии испытываемому двигателю от нагрузочного генератора по звену постоянного тока. Поставлена проблема определения необходимого значения емкости конденсатора в звене постоянного тока схемы испытаний в процессе проектирования испытательного комплекса. В результате математического моделирования получены зависимости максимальных напряжений и действующего значения тока конденсатора от его емкости при различных номинальных мощностях машин. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования для различных схем испытаний. Получены зависимости необходимых значений емкости конденсатора различных схем от номинальной мощности испытываемого двигателя при обеспечении определенных значений максимальных пиков напряжения в звене постоянного тока в установившемся режиме работы. Отмечено, что при пуске машин в звене постоянного тока схем испытаний возникают значительно большие скачки напряжения, чем в установившемся номинальном режиме работы, вследствие чего определение параметров звена постоянного тока должно осуществляться в результате анализа возможных переходных процессов. Рассмотрен вариант вывода испытываемого двигателя на режим номинальной нагрузки путем увеличения частоты напряжения, подаваемого на обмотки статора, по экспоненциальному закону. Для рассмотренного варианта нагружения машин построены зависимости необходимых значений емкости конденсатора от номинальной мощности испытываемого двигателя. Выполнено сравнение данных зависимостей для переходного и установившегося режимов работы. Сделаны выводы, имеющие практическую ценность при проектировании электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин.

Неотъемлемой частью производства и эксплуатации электрических машин является проведение их испытаний для подтверждения соответствия реальных характеристик заявленным [13]. Такие испытания (приемочные и приемосдаточные) проводят на заводах-изготовителях и ремонтных предприятиях<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ 2582-2013 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.; ГОСТ 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 31 с.

Основным критерием, определяющим срок службы машины, является срок службы ее изоляционных конструкций, который, в свою очередь, определяется их температурой в процессе работы [3, 14, 15]. В связи с этим в перечень как приемочных, так и приемосдаточных испытаний включены испытания на нагревание в номинальном режиме в течение одного часа. Данный вид испытаний из всего перечня является наиболее энергозатратным. При этом он не может быть заменен на более простые виды испытаний (например, опыт холостого хода и короткого замыкания), так как они не дают достаточную информацию для точной оценки теплового состояния машины в процессе работы ввиду значительных упрощений [4]. С целью снижения затрат электроэнергии предлагаются укороченные по времени нагрузочные испытания [1], при которых также может быть использован метод взаимной нагрузки. Однако следует отметить, что данные виды испытаний не соответствуют государственным стандартам.

Для повышения энергетической эффективности испытаний асинхронных машин (АМ) ранее был разработан ряд схем взаимной нагрузки [2, 5–11], в которых валы испытуемой и нагрузочной машин жестко соединены муфтой. Анализ особенностей работы данных схем выполнен в работе [12]. Во всех схемах, приведенных в источниках [2, 5–11], одна или обе машины подключаются к выходам инверторов напряжения, являющихся отдельными устройствами или входящими в состав преобразователей частоты (ПЧ). В схеме, приведенной в источнике [5] (рис. 1) с нагрузочной асинхронной машиной (НАМ), и в схеме [8] (рис. 2) с нагрузочным генератором постоянного тока (НГПТ) передача энергии от нагрузочной к испытуемой машине осуществляется по звену постоянного тока (ЗПТ). При этом конденсатор, включенный в ЗПТ, при проектировании ПЧ выбирается без учета условий работы в схеме со взаимной нагрузкой. Следовательно, в данном случае требуется оценка особенностей условий работы конденсатора в данных схемах.

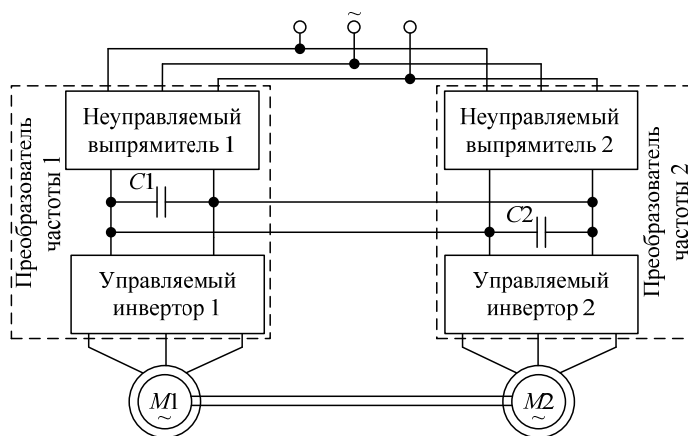


Рис. 1. Схема взаимной нагрузки с испытуемой и нагрузочной АМ

В схеме, представленной на рис. 1, суммарную емкость конденсаторов  $C1$  и  $C2$  обозначим как  $C = C1 + C2$ .

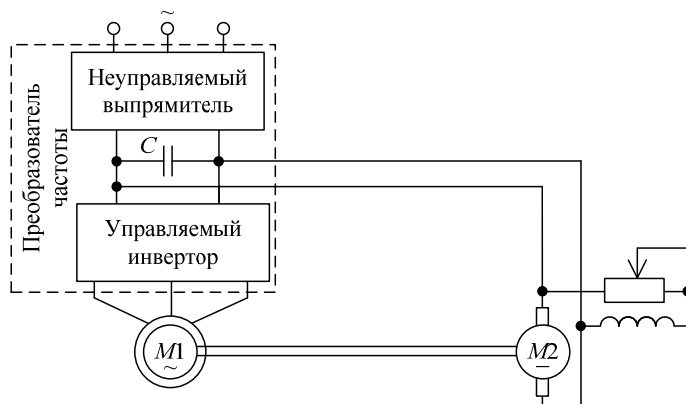


Рис. 2. Схема взаимной нагрузки АМ с НППТ

При проектировании испытательного комплекса по схеме, приведенной в [7] (рис. 3), требуется определять необходимую величину емкости  $C$ .

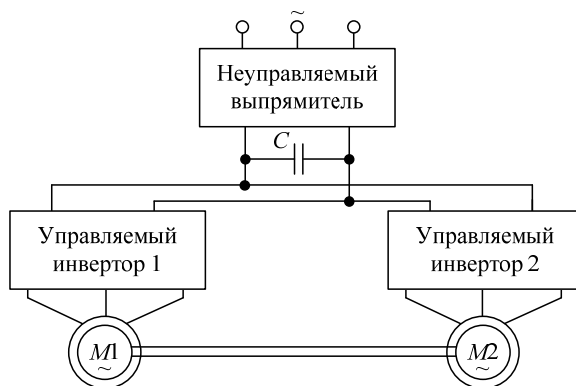


Рис. 3. Схема взаимной нагрузки с испытуемой и нагрузочной АМ без ПЧ

Остальные технические решения, представленные в источниках [2, 6, 9–11], являются аналогами схем, приведенных на рис. 1–3, анализ которых можно обобщить на полный их перечень, приведенный в работах [2, 5–11].

Таким образом, для различных схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки требует решения задача определения или уточнения необходимой величины емкости конденсатора в звене постоянного тока.

Проведем анализ зависимости скачков напряжения и тока конденсатора от его емкости при различных номинальных мощностях испытуемых машин. Для расчета данных параметров конденсатора в различных схемах

взаимной нагрузки применим математические модели, представленные в работе [12].

Результаты расчета максимальных значений скачков напряжения на конденсаторе  $U_{к\max}$  и действующих значений тока  $I_k$  для установившегося режима работы при различных номинальных мощностях испытуемого двигателя  $P_n$  приведены на рис. 4.

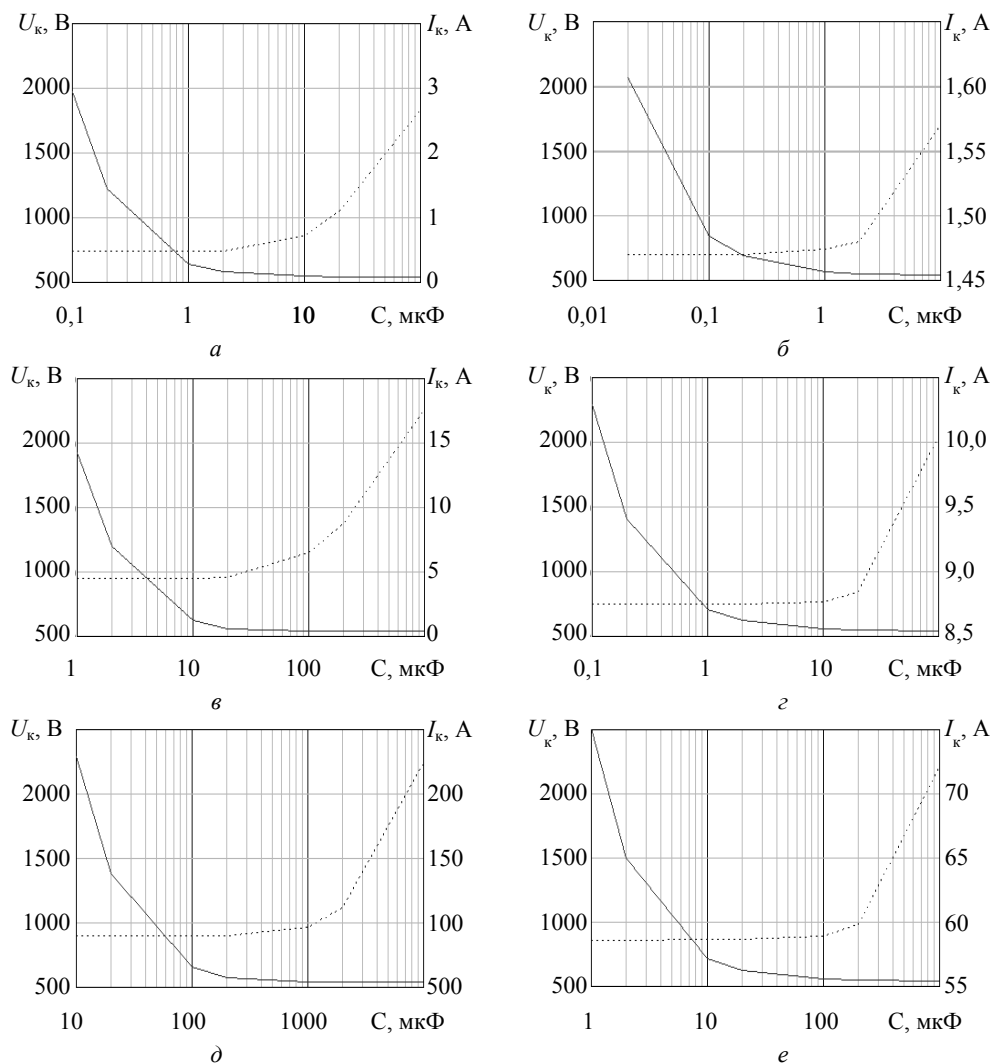


Рис. 4. Максимальное напряжение и действующее значение тока конденсатора при различных параметрах: а –  $P_n = 0,37$  кВт (НАМ); б –  $P_n = 0,37$  кВт (НГПТ); в –  $P_n = 5,5$  кВт (НАМ); г –  $P_n = 5,5$  кВт (НГПТ); д –  $P_n = 37$  кВт (НАМ); е –  $P_n = 37$  кВт (НГПТ)

При расчете схемы, приведенной на рис. 2, нагрузочный ГПТ принимался той же номинальной мощности, что и испытуемый асинхронный двигатель. Результаты моделирования данной схемы представлены на рис. 4, а, в, д.

При расчете схем, изображенных на рис. 1 и 3, испытуемая и нагрузочная асинхронные машины (НАМ) принимались с идентичными параметрами. Различие в данных схемах состоит в том, что два параллельно включенных выпрямителя в первой схеме (см. рис. 1) заменены на один во второй схеме (см. рис. 3) и аналогично два параллельно включенных конденсатора (см. рис. 1) заменены на один (см. рис. 3). В связи с этим результаты моделирования данных двух схем объединены на рис. 4, б, г, е. В случае схемы с двумя ПЧ в качестве емкости  $C$  на рис. 4 принята сумма емкостей конденсаторов обоих ЗПТ.

На практике необходимое значение емкости конденсатора определяется его способностью ограничить пики напряжения в ЗПТ до определенного уровня. Математическое моделирование позволило определить значения емкости ЗПТ, необходимые для ограничения напряжения в установившемся режиме работы схемы на уровне  $U_k \leq 550$  В ( $C_{550}$ ),  $U_k \leq 600$  В ( $C_{600}$ ),  $U_k \leq 800$  В ( $C_{800}$ ),  $U_k \leq 1000$  В ( $C_{1000}$ ), графики зависимости которых от номинальной мощности испытуемого двигателя для схемы с НАМ приведены на рис. 5, 6.

Графики зависимости значений емкости ЗПТ, необходимых для ограничения напряжения в установившемся режиме работы схемы с НГПТ на тех же уровнях, приведены на рис. 6.

Анализ результатов выполненного математического моделирования схем взаимной нагрузки асинхронных машин для установившегося режима работы показывает, что с увеличением емкости конденсатора ЗПТ максимальные значения  $U_k$  снижаются экспоненциально и стремятся к некоторой постоянной величине. Однако при увеличении емкости выше некоторого значения начинает резко возрастать действующее значение тока конденсатора (см. рис. 4).

Увеличение номинальной мощности испытуемого двигателя на порядок увеличивает необходимую емкость ЗПТ приблизительно также на порядок: данная зависимость имеет вид, близкий к прямолинейному (см. рис. 5 и 6). Сравнение результатов моделирования схем с НАМ и НГПТ (см. рис. 4) показывает, что наличие в схеме НГПТ, подключенного к звену постоянного тока, значительно снижает пики напряжения на конденсаторе, что приводит к уменьшению необходимых значений емкости для всего ряда мощностей  $P_n$ .

В переходных режимах работы испытуемой и нагрузочной машин скачки напряжения в ЗПТ преобразователя частоты могут быть значительно выше, чем в установившемся режиме. Следовательно, выбор необходимого значения емкости конденсатора для ЗПТ ПЧ должен осуществляться в первую очередь исходя из расчета переходных режимов.

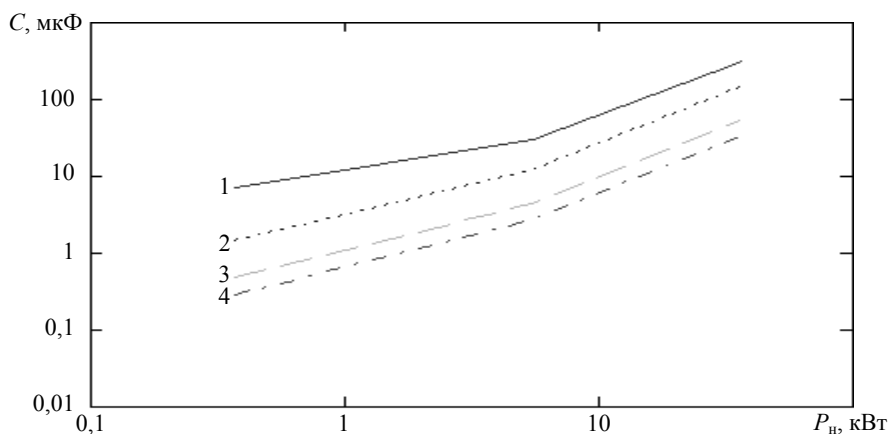


Рис. 5. Значение емкости конденсатора, необходимое для ограничения напряжения при установившемся режиме работы в схеме с НАМ:

$$1 - C_{550} = f(P_n), 2 - C_{600} = f(P_n), 3 - C_{800} = f(P_n), 4 - C_{1000} = f(P_n)$$

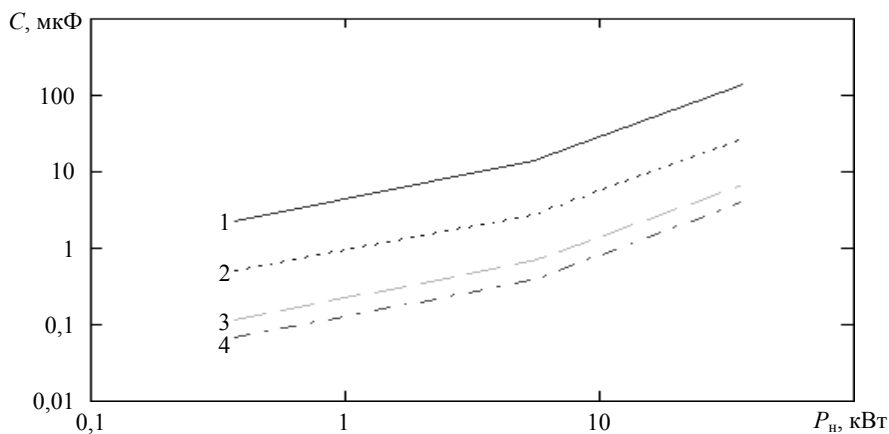


Рис. 6. Значение емкости конденсатора, необходимое для ограничения напряжения при установившемся режиме работы в схеме с НГПТ:

$$1 - C_{550} = f(P_n), 2 - C_{600} = f(P_n), 3 - C_{800} = f(P_n), 4 - C_{1000} = f(P_n)$$

При проведении испытания на нагрев в схеме используются два переходных режима: при пуске и остановке машин. Более опасным для оборудования, как правило, является переходной режим с увеличением нагрузки. Однако конкретные значения максимального напряжения на конденсаторе при пуске машин зависят от параметров алгоритма вывода их на режим нагрузки. Оптимизация данных алгоритмов является вопросом для дальнейших исследований. В данной работе для примера приведены результаты моделирования переходного процесса при нагружении испытуемого асинхронного двигателя (ИАД) и НАГ путем увеличения частоты напряжения ( $f_{\text{ИАД}}$ ,  $f_{\text{НАГ}}$ ), подаваемого на их обмотки статора, по экспоненциальным законам с различными асимптотами, как показано на рис. 7.



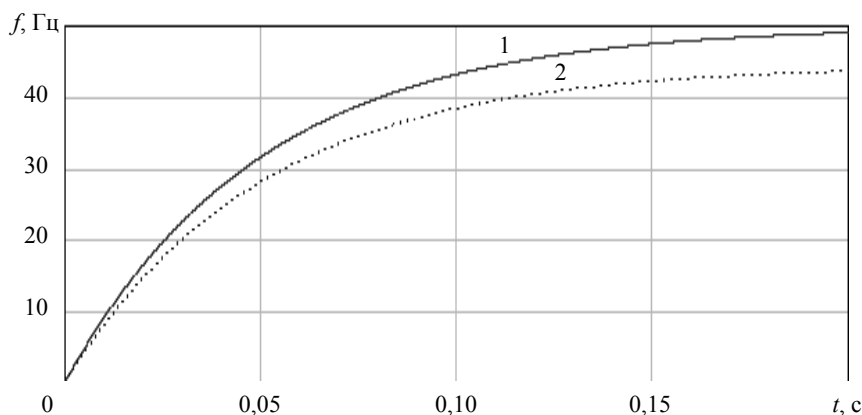


Рис. 7. Пример графиков изменения частоты напряжения, подаваемого на обмотки статора асинхронных машин: 1 – испытываемой; 2 – нагрузочной

Пример расчета частоты вращения ротора ( $n_2$ ), напряжения ( $u_k$ ) и тока конденсатора ( $i_k$ ) для испытываемой машины с  $P_n = 5,5$  кВт при значении  $C = 20$  мкФ приведен на рис. 8, 9.

Результаты проведенного моделирования для номинальных мощностей от 0,37 кВт до 37 кВт для рассмотренного варианта вывода машин на режим нагрузки приведены на рис. 10.

Анализ полученных результатов показывает, что при рассматриваемом варианте нагружения машин зависимости необходимых емкостей конденсатора от  $P_n$  принципиально имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 5 при установившемся режиме. Однако для переходного режима все значения емкости  $C$  необходимо увеличить более чем на порядок по сравнению с аналогичным показателем установившегося режима.

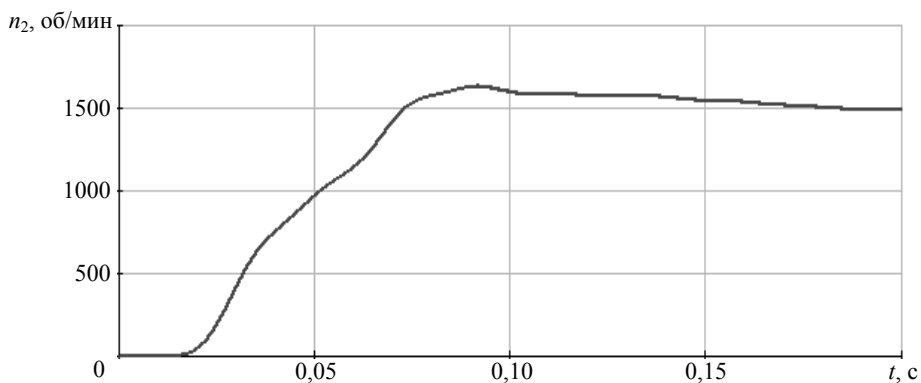


Рис. 8. Результаты расчета частоты вращения ротора при выводе машин мощностью 5,5 кВт на режим номинальной нагрузки

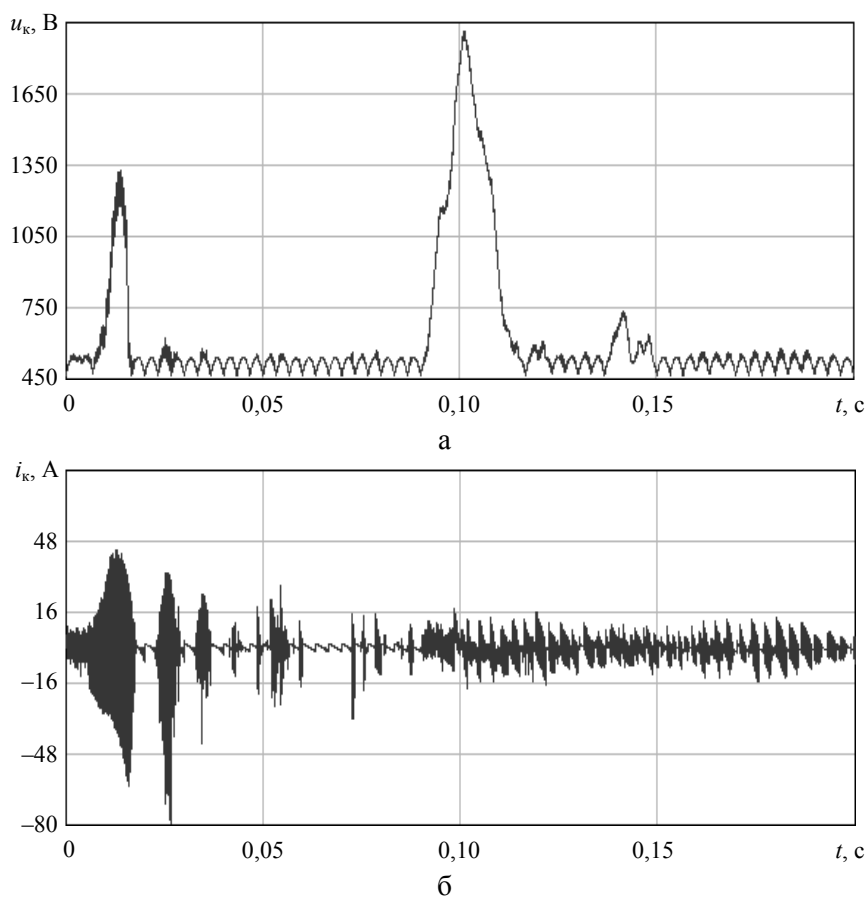


Рис. 9. Результаты расчета переходного процесса при выводе машин мощностью 5,5 кВт на режим номинальной нагрузки:  
 а – напряжение на конденсаторе; б – ток, проходящий по конденсатору

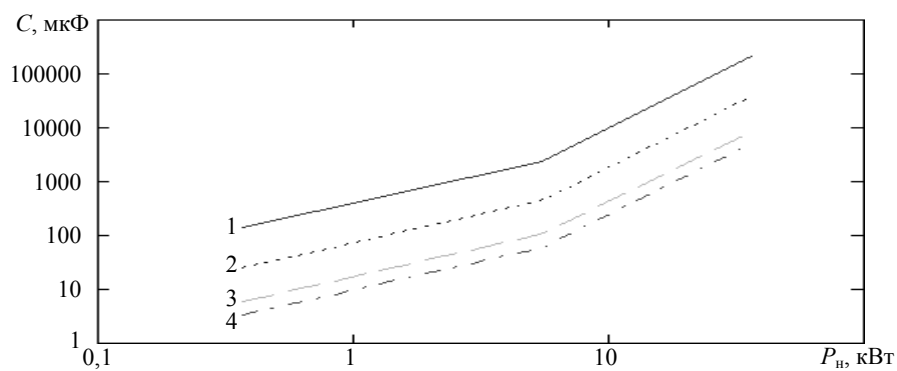


Рис. 10. Значения емкости конденсатора, необходимые для ограничения пиков напряжения при выводе машин на режим номинальной нагрузки:  
 1 –  $C_{550} = f(P_n)$ , 2 –  $C_{600} = f(P_n)$ , 3 –  $C_{800} = f(P_n)$ , 4 –  $C_{1000} = f(P_n)$

Выполненное математическое моделирование переходных и стационарных режимов работы схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки позволило определить зависимости необходимых значений емкости конденсатора для снижения пульсаций напряжения в звене постоянного тока от номинальной мощности испытуемого двигателя.

Результаты расчетов показывают, что схема с нагрузочной машиной постоянного тока менее склонна к перенапряжениям на конденсаторе, включенном в звено постоянного тока.

Полученные зависимости для переходного и стационарного режимов работы указывают на необходимость проведения исследований, направленных на разработку оптимальных алгоритмов нагружения электрических машин в процессе их испытаний с учетом возникающих скачков напряжения в звене постоянного тока.

#### Литература

1. Афанасов А.М. Определение рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 4 (52). С. 67–74.
2. Бейерлейн Е.В., Цукублин А.Б., Рапопорт О.Л. Схема испытания тяговых частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. 2006. №3. С. 46–48.
3. Бекшиев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Электропривод. М.: Юрайт, 2018. 301 с.
4. Епифанов А.П., Епифанов Г.А. Электрические машины. СПб: Лань, 2017. 300 с.
5. Пат. 140678 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авиллов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2013147519/28; заявл. 24.10.2013; опублик. 20.05.2014, Бюл. № 14. 2 с.
6. Пат. 143348 РФ, МПК G01R31/00. Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авиллов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2014112919/28; заявл. 02.04.2014; опублик. 20.07.2014, Бюл. № 20. 2 с.
7. Пат. 145998 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авиллов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2014112920/07; заявл. 02.04.2014; опублик. 27.09.2014, Бюл. № 27. 2 с.
8. Пат. 178716 РФ, МПК G01R31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.В. Харламов, Д.И. Попов (РФ). № 2017143232; заявл. 11.12.2017; опублик. 17.04.2018, Бюл. № 11. 5 с.
9. Пат. 2200960 РФ, МПК G01R31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / А.С. Курбасов, И.Л. Таргонский, Э.А. Долгошеев (РФ). № 2001101213/09; заявл. 12.11.2001; опублик. 20.03.2003, Бюл. № 8. 1 с.
10. Пат. 2433419 РФ, МПК G01R31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авиллов, А.И. Володин, В.Т. Данковцев, В.В. Лукьянченко, Е.В. Панькин (РФ). № 2010124307/28; заявл. 15.06.2010; опублик. 10.11.2011, Бюл. № 31. 6 с.
11. Пат. 80018 РФ, МПК G01R31/04. Устройство для испытания асинхронных тяговых электродвигателей / Е.В. Бейерлейн, А.Б. Цукублин, О.Л. Рапопорт (РФ). № 2008115647/22; заявл. 21.04.2008; опублик. 20.01.2009, Бюл. № 2. 1 с.
12. Попов Д.И. Анализ энергетической эффективности электротехнических комплексов испытаний асинхронных машин // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. 2018. № 12. С. 118–123.
13. Cummings P.G., Bowers W.D., Martiny W.J. Induction Motor Efficiency Test Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications* Volume IA-17, 1981, iss. 3, May/June, pp. 253–272.
14. Gonzalez-Cordoba J.L., Granados-Lieberman D., Osornio-Rios R.A., Romero-Troncoso R.J., De Santiago-Pérez J.J., Valtierra-Rodriguez M. Methodology for overheating identification on induction

motors under voltage unbalance conditions in industrial processes. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2016, vol. 75, iss. 2, pp. 100–107.

15. Pillay P., Manyage M. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, vol. 21, iss. 4, pp. 813–822.

---

**ПОПОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (popovomsk@yandex.ru).

---

D. POPOV

**DEFINITION OF NECESSARY PARAMETERS OF DC LINK  
OF ELECTRICAL SYSTEMS FOR TESTING INDUCTION MACHINES**

**Key words:** test complex, electric machine, load tests, mathematical model, frequency converter.

*The article substantiates the relevance of the question of testing induction machines and the development of energy-efficient electrical systems for testing by method of mutual load. The most energy-intensive type of tests is that for heating under rated load during one hour. This type of test is mandatory for acceptance tests in accordance with state standards and cannot be replaced by simplified non-load tests. The article considers energy-efficient scheme of testing induction motors with induction loading machine and a DC loading machine. The problem of determining the required capacitance value in the DC link of the test circuit during the design of the test complex is posed. As a result of mathematical modeling, the dependences of the maximum voltage and the current value of the capacitor are obtained. The comparative analysis of simulation results for different test schemes is carried out. The authors obtained the dependences of the required capacitance values of the capacitor of different schemes on the rated power of the tested engine while providing certain values of the maximum voltage peaks in the DC link in the steady-state operation. It is noted that when starting the machines in the DC link of the test circuits there are much larger voltage surges than in the steady-state nominal mode of operation. Therefore, the determination of the parameters of the DC link should be carried out as a result of the analysis of possible transients. The variant of output of the test engine to the rated load mode by increasing the frequency of the voltage applied to the stator windings is considered according to the exponential law. For the considered variant of loading machines, the dependences of the required capacitor capacitance values on the rated power of the tested engine are obtained. A comparison of these dependencies for transient and steady-state operation is performed. Conclusions made in the article have practical value in the design of electrical systems for testing induction motors.*

References

1. Afanasov A.M. *Opređenje racional'nykh rezhimov vzaimnogo nagruzeniya tyagovykh dvigatelei elektropodvizhnogo sostava magistral'nogo i promyshlennogo transporta* [Rational modes determination of traction motors loading-back for electric rolling stock in mainline and industrial transport]. *Nauka Ta Progres Transportu* [Science and Transport Progress], 2014, no. 4(52), pp. 67–74.
2. Beierlein E.V., Tsukublin A.B., Rapoport O.L. *Skhema ispytaniya tyagovykh chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh elektrodvigatelei* [Scheme of testing of traction frequency-controlled induction motors]. *Izvestiya vuzov. Ser. Elektromekhanika*, 2006, no. 2, pp. 46–48.
3. Bekishev R.F., Dementev YU. N. *Elektroprivod* [Electric drive]. Moscow, Urait Publ., 2018, 301 p.
4. Epifanov A.P., Epifanov G.A. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017, 300 p.
5. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema ispytaniya asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Scheme of testing of induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 140678, 2014.

6. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Ustroystvo dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Device for testing induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 143348, 2014.

7. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema ispytaniy asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Scheme of testing of induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 145998, 2014.

8. Kharlamov V.V., Popov D.I. *Stend dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki* [Stand for testing induction motors by method of mutual load]. Patent RF, no. 178716, 2018.

9. Kurbasov A.S., Targonskij I.L., Dolgosheev Eh.A. *Ustroystvo dlya ispytaniy beskollektornykh ehlektricheskikh mashin peremennogo toka* [Facility testing AC brushless electric machines]. Patent RF, no. 2200960, 2001.

10. Avilov V.D., Volodin A.I., Dankovtsev V.T., Luk'yanchenko, Pan'kin Ye.V. *Sposob ispytaniya asinkhronnykh ehlektrodvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Back-to-back test method for asynchronous motors]. Patent RF, no. 2433419, 2010.

11. Beierlein E.V., Tsukublin A.B., Rapoport O.L. *Ustroystvo dlya ispytaniya asinhronnykh tyagovykh ehlektrodvigateley* [Device for testing asynchronous traction motors]. Patent RF, no. 80018, 2008.

12. Popov D.I. *Analiz energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov ispytaniy asinkhronnykh mashin* [Analysis of energy efficiency of systems for testing induction machines]. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 12, pp. 118–123.

13. Cummings P.G., Bowers W.D., Martiny W.J. Induction Motor Efficiency Test Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications Volume IA-17*, 1981, iss. 3, May/June, pp. 253–272.

14. Gonzalez-Cordoba J.L., Granados-Lieberman D., Osornio-Rios R.A., Romero-Troncoso R.J., De Santiago-Pérez J.J., Valtierra-Rodriguez M. Methodology for overheating identification on induction motors under voltage unbalance conditions in industrial processes. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2016, vol. 75, iss. 2, pp. 100–107.

15. Pillay P., Manyage M. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, vol. 21, iss. 4, pp. 813–822.

---

**ПОПОВ ДЕНИС – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (popovomsk@yandex.ru).**

---

**Формат цитирования:** Попов Д.И. Определение необходимых параметров звена постоянного тока электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 195–205.

УДК 621.31

ББК 3279

Л.М. РЫБАКОВ, С.В. ЛАСТОЧКИН, О.И. КАНЮГИН

## К ВОПРОСУ ОДНОФАЗНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМЕ «РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ–ТРАНСФОРМАТОР» И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИХ ОТКАЗОВ

***Ключевые слова:** распределительная сеть, силовой трансформатор, резонансная частота, фильтрокомпенсирующие устройства, амплитудно-частотные характеристики, ограничитель перенапряжения нелинейный.*

*Рассмотрена статистика отказов силовых трансформаторов, наиболее распространенных в системах электроснабжения с низкой плотностью энергопотребления, что характерно для сельских распределительных сетей. Показано, что 30–64% отказов вызвано повреждением одной из фаз трансформаторов. Экспериментально исследованы частотные характеристики силовых трансформаторов I и II габаритов. Составлена также программа для расчета частотных характеристик указанных типов трансформаторов. Расчетные и экспериментальные значения резонансных частот отличаются незначительно. Выполнен анализ отказов элементов сельских распределительных сетей 10 кВ. Анализ показал, что однофазные замыкания в воздушных сетях оказывают влияние на отказы силовых трансформаторов. Предложена схема с использованием фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) для защиты высоковольтных обмоток трансформаторов от резонансных перенапряжений при совпадении поступающих из сети в трансформатор частот.*

Сельские распределительные сети 10 кВ работают в режиме с изолированной нейтралью, имеют большую протяженность, подвержены возникновению различных видов ненормальных режимов: обрыв провода, падение провода на землю с возникновением перемежающихся замыканий, неодновременное отключение фаз выключателей, пробой и перекрытие внешней изоляции сети, что способствует генерации высокочастотных сигналов в сетях с изолированной нейтралью [4].

В указанных сетях в основном установлены силовые трансформаторы мощностью от 63 до 400 кВ·А. В табл. 1 приведены данные по количеству и типам трансформаторов I и II габаритов ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Таблица 1

**Количество трансформаторов 10/0,4 кВ в ПАО «МРСК Центра и Приволжья» филиал «Маризэнерго» по состоянию на 01.01.2019 г.**

Показатель	Номинальная мощность трансформаторов, кВ·А					Итого
	63	100	160	250	400	
Количество, шт.	521	634	715	650	277	2797
%	19	23	25	23	10	100

Для указанных типов трансформаторов (табл. 1) выполнены эксперименты по снятию частотных характеристик, при которых учитывалось состояние изоляции [1]: опорная, соответствующая состоянию вновь вводимого в работу оборудования (I), находящегося в эксплуатации в пределах допустимого срока (II), длительно эксплуатируемых трансформаторов с уровнем изоляции, достигшим предельного (III).

Методика снятия частотных характеристик следующая:

- на обмотку одной из фаз высокого напряжения силового трансформатора подается напряжение 0,5 В в диапазоне частот от 20 до 80 кГц от генератора ГЗ-117, контролируемое милливольтметром ВЗ-38;
- на обмотке низкого напряжения с помощью милливольтметра ВЗ-56 регистрируется выходное напряжение;
- регистрируется амплитудно-частотная характеристика силового трансформатора.

Собственные резонансные частоты, полученные экспериментальным путем для указанных типов трансформаторов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон собственных резонансных частот, полученных экспериментальным путем для силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, и их амплитудные значения, в зависимости от их мощности

Показатели	Номинальная мощность, кВ·А			
	ТМ-63	ТМ-100	ТМ-160	ТМ-250
Диапазон собственных резонансных частот, кГц	от 47 до 66	от 46 до 66	от 45 до 65	от 22 до 33
Амплитудное значение частоты, кГц	57	57	55	26
Выходное напряжение( $V_2$ ), В	0,18	0,19	0,19	1,3
Напряжение генератора( $V_1$ ), В	0,05	0,05	0,05	0,05

Схема снятия резонансных частот силового трансформатора показана на рис. 1.

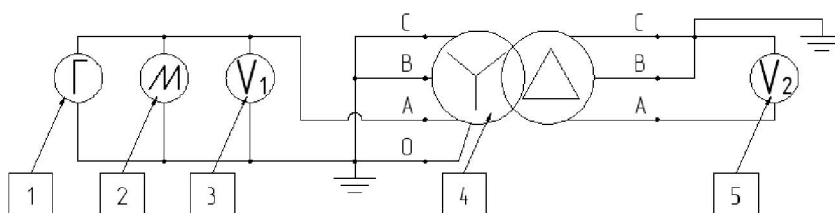


Рис. 1. Схема снятия амплитудно-частотной характеристики силового трансформатора: 1 – генератор ГЗ-117; 2 – осциллограф; 3 – милливольтметр ВЗ-38; 4 – контролируемый силовой трансформатор; 5 – милливольтметр ВЗ-56

Оборудование и средства измерений при снятии амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) представлены на рис. 2.

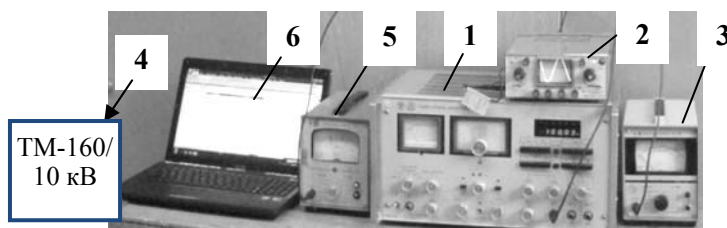
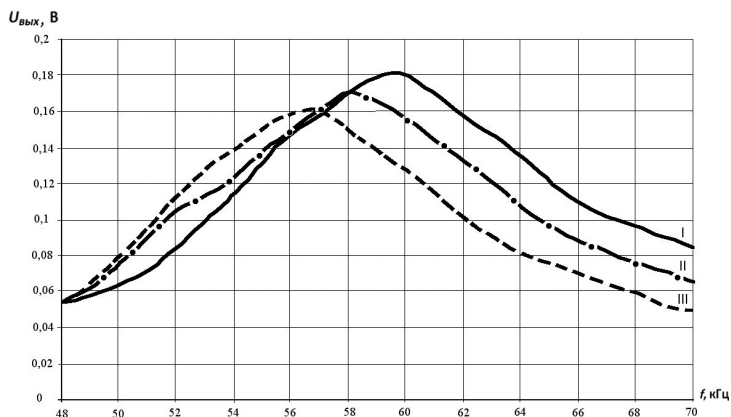
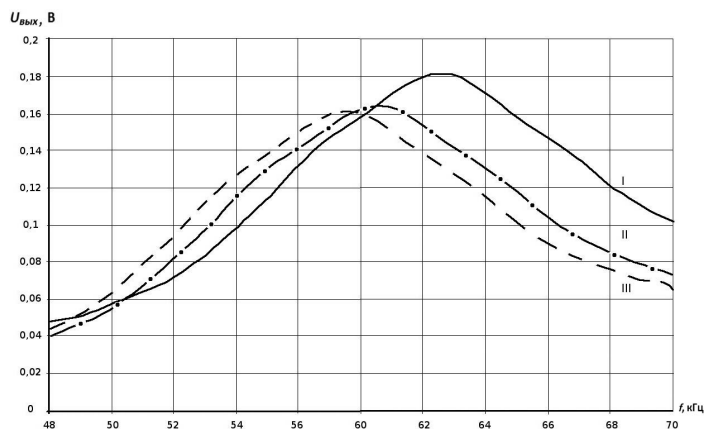


Рис. 2. Оборудование и средства измерений при снятии АЧХ: 1 – генератор ГЗ-117; 2 – осциллограф; 3 – милливольтметр ВЗ-38; 4 – трансформатор ТМ-160/10 кВ; 5 – милливольтметр ВЗ-56; 6 – ноутбук

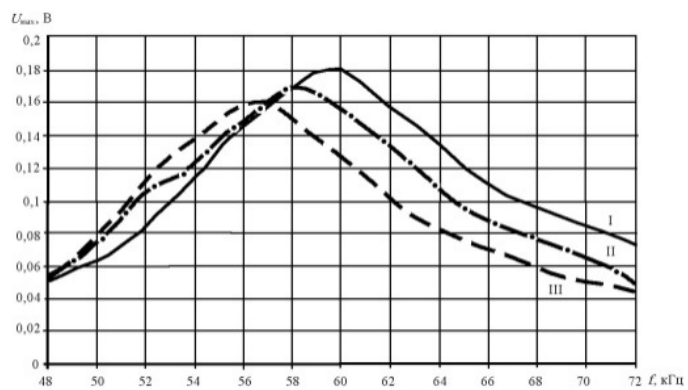
На рис. 3–6 приведены АЧХ для трансформаторов 63–250 кВ·А.



*a*



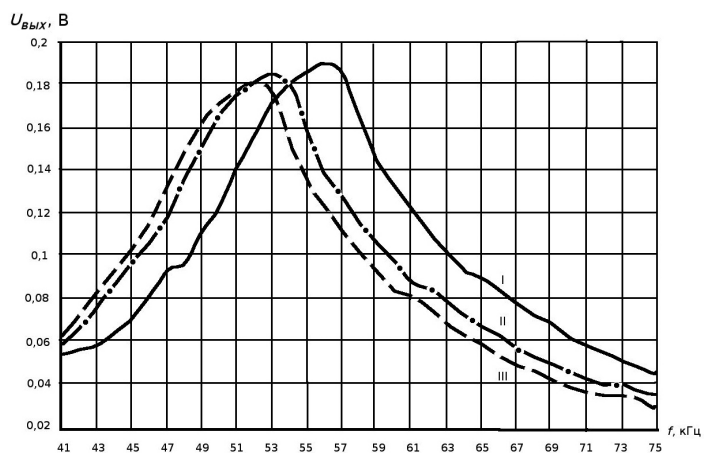
*б*



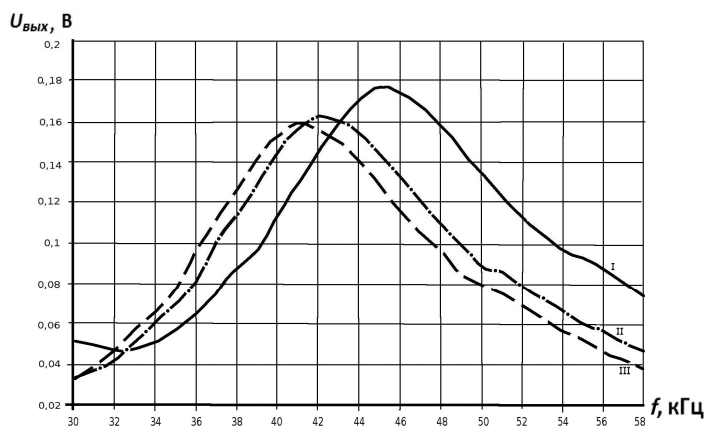
*в*

Рис. 3. Экспериментальные значения АЧХ ТМ 63/10 кВ фаз А (*a*), В (*б*), С (*в*):  
 I – состояние изоляции: опорная (сухая); II – состояние изоляции: увлажненная  
 в допустимых пределах; III – состояние изоляции: увлажненная(предельные значения)

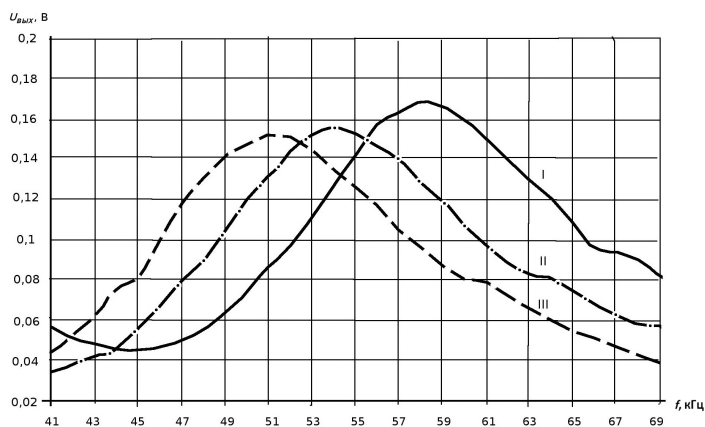




*a*

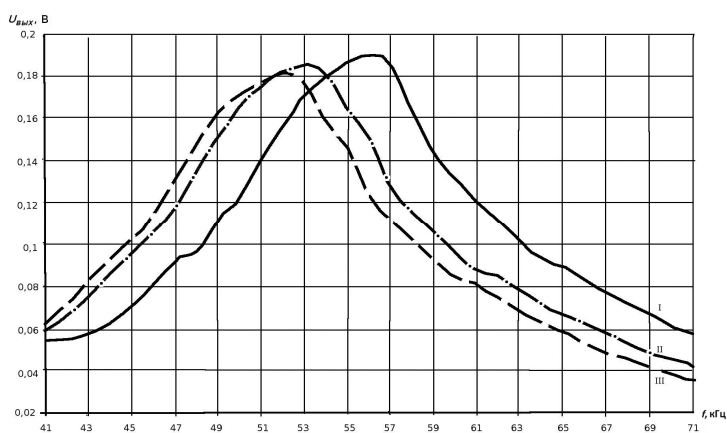


*б*

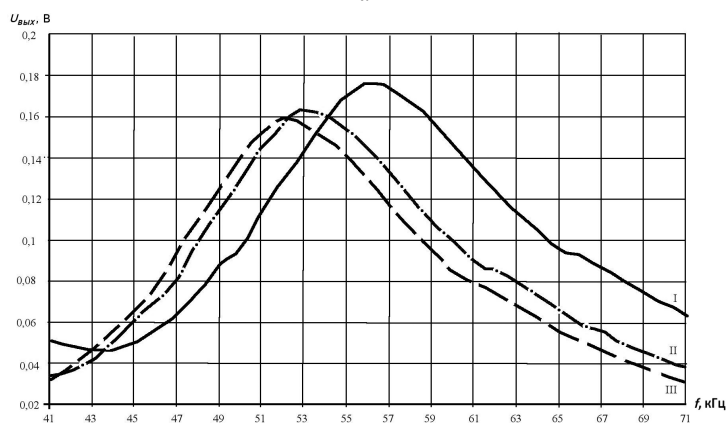


*в*

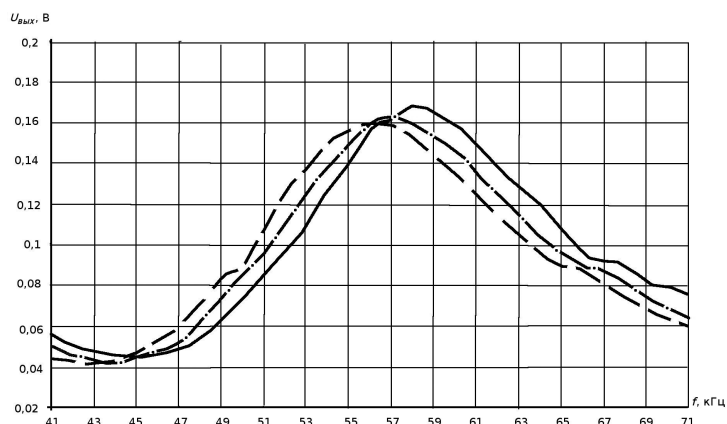
Рис. 4. Экспериментальные значения АЧХ ТМ 100/10 кВ фаз А (*a*), В (*б*), С (*в*):  
 I – состояние изоляции: опорная (сухая); II – состояние изоляции: увлажненная в допустимых пределах; III – состояние изоляции: увлажненная(предельные значения)



а



б



в

Рис. 5. Экспериментальные значения АЧХ ТМ 160/10 кВ фаз А (а), В (б), С (в):  
 I – состояние изоляции: опорная (сухая); II – состояние изоляции: увлажненная  
 в допустимых пределах; III – состояние изоляции: увлажненная (предельные значения)

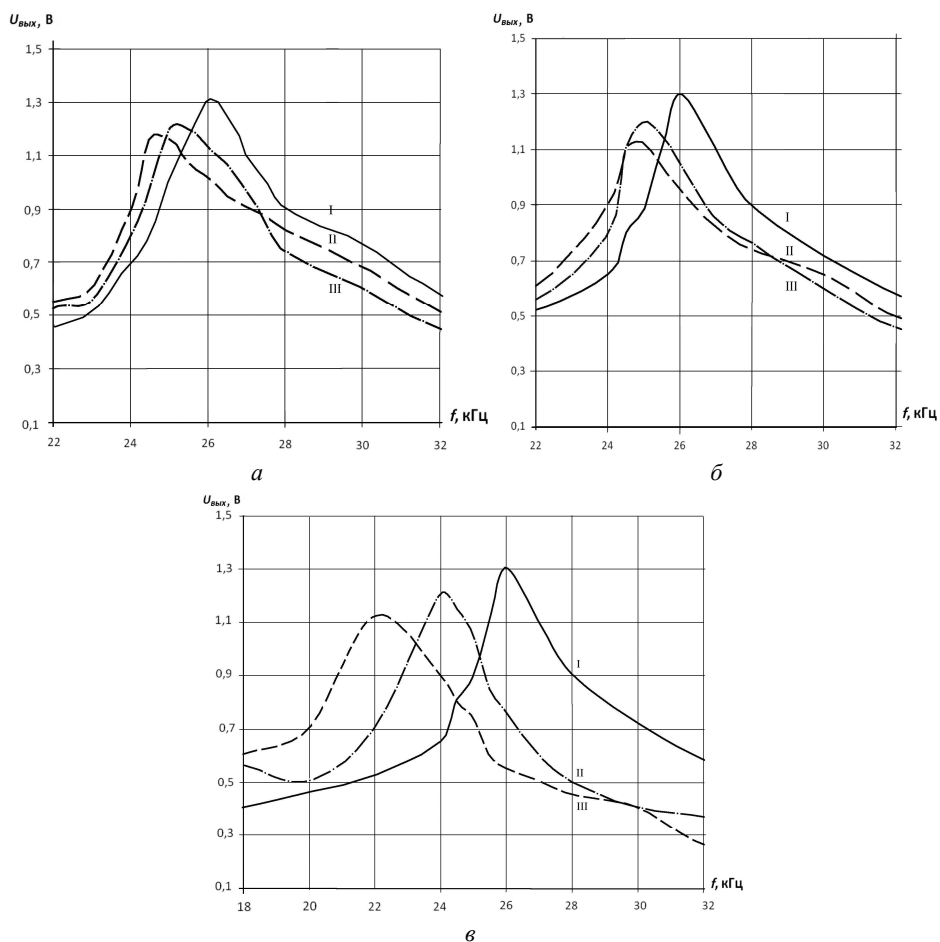


Рис. 6. АЧХ ТМ 250/10 кВ фаз А (а), В (б), С (в):

I – состояние изоляции: опорная (неувлажненная); II – состояние изоляции: увлажнение в пределах эксплуатационных норм; III – состояние изоляции: увлажненная

Экспериментальное снятие резонансных частотных характеристик требует больших трудозатрат, дорогостоящую приборную базу, привлечения обученного квалификационного персонала, владеющего теоретическими знаниями в области электротехники и метрологии, что не доступно для каждого электросетевого предприятия [2].

В связи с тем, что на каждом электросетевом предприятии количество силовых трансформаторов I, II габаритов исчисляется тысячами штук, экспериментальные методы измерений не приемлемы.

Парк трансформаторов электросетевых предприятий однотипный и охватывает I, II габариты. Поэтому, зная технические параметры трансформаторов: радиус обмоток, число витков слоя, катушки, высоты обмоток, размеры магнитопровода, емкостные параметры катушек и т.д., можно рассчитать для каждого типа трансформатора собственные резонансные частоты [1].

Нами разработана программа расчета резонансных частот для силовых трансформаторов 63–400 кВ·А со слоевой обмоткой. Фрагмент программы показан на рис. 7. Выполнено сравнение экспериментально полученных резонансных частот с расчетными значениями (табл. 3).

1. Индуктивность Рассчитать L

Радиус обмоток, м Rm =

Число витков одного слоя Nc =

Высота обмотки, м I =

Средняя длина магнитной линии, м h =

$$L = \frac{4 * \pi * 10^{-7} * N_c^2 * 2 * \pi * Rm * I}{h} = 0,711212 \text{ Гн}$$

2. Междуслойная емкость ВН Рассчитать K'

Диэлектрическая постоянная масла Eд =

Диаметр провода, м dl =

Толщина слоевой изоляции, м cl =

Средняя длина витка слоя, м li =

$$K' = 8,8542 * 10^{-12} * E_r * \frac{2 * \frac{dl}{10} * li * N_c^2}{4 * cl * \frac{\pi}{2} * \frac{dl}{10}} = 1,034E - 07 \Phi$$

3. Полная междувитковая емкость ВН Рассчитать K

Количество слоев n =

$$K = \frac{K'}{n} = 8,6E - 09 \Phi$$

4. Емкость между обмотками СН Рассчитать Cд

Средняя длина междуобмоточной изоляции, м lсд =

Толщина междуобмоточной изоляции, м D =

$$C_d = 8,8542 * 10^{-12} * E_r * \frac{2 * \frac{dl}{10} * lcr}{4 * D - \frac{\pi}{2} * \frac{dl}{10}} = 1,451E - 12 \Phi$$

5. Емкость обмотки относительно бака трансформатора Рассчитать Cб

Расстояние между баком и обмоткой, м Db =

Параметры бака, м a =  b =

$$C_b = 8,8542 * 10^{-12} * E_r * \frac{2 * \frac{dl}{10} * N_c * (a + 2 * b)}{4 * Db - \frac{\pi}{2} * \frac{dl}{10} * n} = 2,1848E - 10 \Phi$$

6. Полная емкость обмотки Рассчитать Cг

$$C_g = C_b + C_d = 2,1993E - 10 \Phi$$

7. Собственная частота колебаний обмотки Рассчитать w

$$\omega = \frac{(n * n)^2}{4 * \sqrt{L * C_g * [l + \frac{K}{C_g} * (\frac{n * \pi}{2})^2] * n}} = 240796,82 \text{ рад/с}$$

$$f = \frac{\omega}{2 * \pi} = 38324,005 \text{ Гц}$$

Рис. 7. Фрагмент программы для расчета резонансных частот силовых трансформаторов

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения резонансных частот силовых трансформаторов

Обмотка	Увлажненность изоляции	Расчетные значения резонансных частот, кГц	Экспериментально полученные значения, кГц	Относительная разница результатов расчетных и экспериментальных данных, %
ТМ-100/10 кВ				
А	I	58,2	56	3,9
	II	56,2	55	2,18
	III	51	53	3,77
В	I	48	45	5,5
	II	46	44	4,5
	III	42	42	0
С	I	58,2	58	0,35
	II	56,2	56,9	1,25
	III	51	54	5,6
ТМ-250/10 кВ				
А	I	26,3	26	1,14
	II	25,1	25	0,4
	III	22,7	24	5,4

Окончание табл. 3

Обмотка	Увлажненность изоляции	Расчетные значения резонансных частот, кГц	Экспериментально полученные значения, кГц	Относительная разница результатов расчетных и экспериментальных данных, %
В	I	23	22	4,5
	II	22	21,5	2,32
	III	20	20	0
С	I	26,3	26	1,15
	II	25,1	25	0,4
	III	22,7	24	5,42

*Примечание.* Расчетные и экспериментальные значения резонансных частот отличаются незначительно. Таким образом, расчетный метод может быть применен для определения резонансных частот силовых трансформаторов.

Безотказность силовых трансформаторов определена на основании данных наблюдений на электросетевых предприятиях Республики Марий Эл.

В табл. 4 приведено распределение числа отказов силовых трансформаторов I, II габаритов 10/0,4 кВ по месяцам.

Таблица 4

Распределение числа отказов силовых трансформаторов I, II габаритов 10/0,4 кВ по месяцам

Причина отказов	Число отказов													
	общее		по месяцам года, абс.											
	абс.	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Витковые замыкания	212	55,2	8	4	12	24	32	32	36	16	20	12	12	4
Пробой при внутренних перенапряжениях	132	34,4	8	4	12	16	16	12	12	8	16	12	12	4
Пробой при грозовых перенапряжениях	80	20,8	–	–	–	8	16	20	24	8	4	–	–	–
Дефект проходной изоляции (вводы ВН, НН)	26	6,8	1	2	2	4	3	3	3	3	1	1	1	2
Междуфазное замыкание, перегрузка	25	6,6	6	–	–	–	–	7	–	–	–	–	6	6
Прочие причины (дефекты магнитопровода, переключателей и др.)	10	2,4	–	–	–	–	–	–	5	–	–	–	–	5
Отказы, связанные с дефектом в главной изоляции	60	15,6	2	2	3	7	7	9	11	5	5	2	3	4
Отказы по невыясненным причинам	52	13,4	2	2	3	5	5	8	10	4	4	2	3	4
Всего	385		19	10	20	40	47	59	65	28	30	17	25	25
Доля отказов по месяцам, %		100	4,9	2,6	5,2	10,4	12,2	15,3	16,9	7,3	7,8	4,4	6,5	6,5

Наиболее слабыми элементами силового трансформатора являются витковая и главная изоляции. Доля отказов витковой изоляции составляет 55,2%, а главной изоляции – 15,6%. Общая доля в отказах силовых трансформаторов внутренней изоляции составляет 71%.

Основными причинами отказов являются внутренние (34%) и атмосферные перенапряжения (20,8%), которые вызывают повреждение витковой изоляции. Это, очевидно, связано с неудовлетворительным выравниванием распределения импульсного потенциала вдоль обмотки.

Характер повреждений обмоток по их месту в трансформаторах приведен в табл. 5.

Таблица 5

Характер повреждений обмоток по их месту в трансформаторах

Комбинации повреждений обмоток высокого(ВН) и низкого(НН) напряжений	Отказы, %
1ВН	30–64
2ВН	9–11
3ВН	20–34,4
1ВН+1НН	1,92
3ВН+1НН	4–5
3ВН+2НН	2–9,45
3ВН+3НН	16–20
1НН	0,48
3НН	0,96

На рис. 8–11 показана комбинация повреждений обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений трансформаторов в зависимости от их мощности [1, 5].

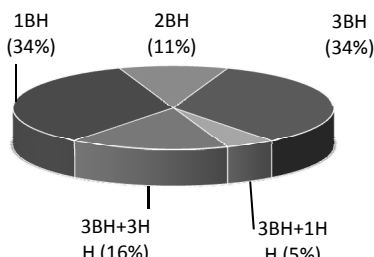


Рис. 8. Комбинация повреждений обмоток ВН и НН силового трансформатора ТМ 100 кВ·А

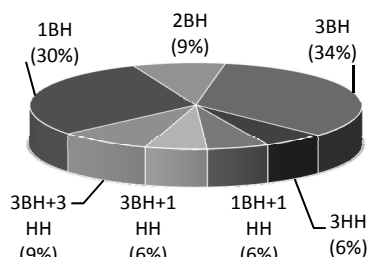


Рис. 9. Комбинация повреждений обмоток ВН и низкого НН силового трансформатора ТМ 160 кВ·А

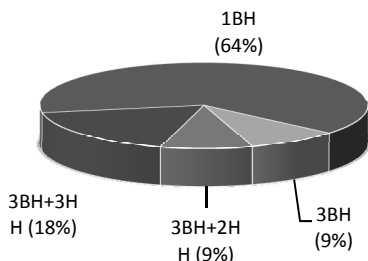


Рис. 10. Комбинация повреждений обмоток ВН и НН силового трансформатора ТМ 250 кВ·А

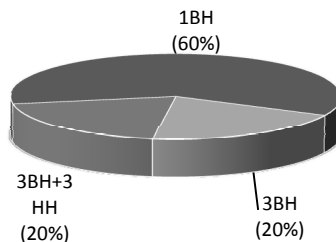


Рис. 11. Комбинация повреждений обмоток ВН и НН силового трансформатора ТМ 400 кВ·А

Как видно из табл. 5 и рис. 8–11, процент повреждаемости одной фазы высоковольтной обмотки колеблется от 30 до 64.

Анализ эксплуатации силовых трансформаторов показывает, что повреждение изоляции одной из катушек высокого напряжения могло быть вызвано поступлением в обмотку трансформатора резонансных частот из питающей сети, которые генерируются при ненормальных режимах в сети. Этими же ненормальными режимами, видимо, вызвано повреждение 13,4% трансформаторов по невыясненным причинам.

Исследования надежности в сельских распределительных сетях в настоящее время проводятся обособленно для отдельных видов оборудования и элементов [5, 6]. Нет работ, посвященных исследованию системы «распределительная сеть – трансформатор». Необходимо рассматривать комплекс «распределительная сеть – трансформатор» как единую систему.

В настоящее время все распределительные сети 6–35 кВ работают в режиме с изолированной нейтралью. В редких случаях используются заземление нейтрали через дугогасящий реактор или через резистор. Согласно существующим нормативным документам (п. 5.11.7), «в сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения. При этом к отысканию места повреждения на ВЛ, проходящих в населенной местности, где возникает опасность поражения током людей и животных, следует приступать немедленно и ликвидировать повреждение в кратчайший срок»<sup>1</sup>.

В системах электроснабжения районов с низкой плотностью энергопотребления распределительные сети имеют большую протяженность воздушных линий от центров питания до конечных потребителей и большое количество силовых трансформаторов [6]. Количество повреждений растет пропорционально длине воздушных линий. В населенных пунктах с описанными системами ликвидация однофазного замыкания на землю затягивается на длительное время по климатическим условиям (труднопроходимые дорожные условия, снегопады и другое).

Для рассматриваемой системы «распределительная сеть – трансформатор» рекомендуется выполнить следующие исследования для выявления влияния сети на повреждаемость трансформаторов [3]:

1. Выполнить экспериментальные исследования в распределительной сети 10 В при ненормальных режимах работы сети по выявлению характерных частот для различных видов однофазных повреждений.

2. Разработать программу для расчета высоких частот, генерируемых в распределительных сетях при моделировании ненормальных режимов.

3. Сравнить результаты расчета с полученными экспериментальными данными.

4. Выполнить анализ полученных значений спектров резонансных частот силовых трансформатора 63–400 кВ·А и генерируемых частот в распределительных сетях.

---

<sup>1</sup>Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: утв. приказом Министерства энергетики РФ № 229 от 19.06.2003 г. URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/norma/250783](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/250783).

тельной электрической сети 10 кВ и определить диапазоны совпадения с резонансными частотами силовых трансформаторов.

При совпадении частот для рассматриваемой системы «распределительная сеть – трансформатор» разработать меры по предотвращению поступления частот, близких к резонансной частоте защищаемых силовых трансформаторов, из распределительной сети.

Для рассматриваемой системы «распределительная сеть – трансформатор» нами предлагается использование фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) и ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН) [5], представленных на рис. 12, установленных в нейтрали трансформатора обмоток высокого напряжения и в нулевом проводе низкого напряжения. Параметры фазы ФКУ подбираются из условия срабатывания фазы защищаемой высоковольтной обмотки трансформатора путем отвода высокого высокочастотного напряжения, поступающего с линии на землю за счет подбора комплексного сопротивления фазы ФКУ меньше входного сопротивления фазы защищаемой обмотки трансформатора, что способствует невозможности появления резонанса в обмотке силового трансформатора и сохранению работоспособности трансформатора.

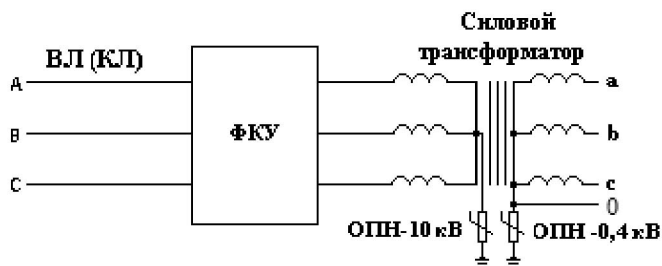


Рис. 12. Схема защиты от поступления высокочастотных сигналов в трансформатор с использованием ФКУ

При изменении схемы системы «распределительная сеть – трансформатор» автоматическое регулирование параметров элементов ФКУ позволит предотвратить возникновение перенапряжения при изменившихся характеристиках системы. Переключения в ФКУ выполняют при помощи коммутационных аппаратов, управляемых с устройства телемеханики, задающими параметрами для которого являются данные о собственных частотах силовых трансформаторов и распределительной сети, взятых с баз данных. Таким образом, установленное ФКУ позволит для рассматриваемой системы «распределительная сеть–трансформатор» предотвратить отказы силовых трансформаторов.

#### Литература

1. Макарова Н.Л., Ахметшин Р.С. Диагностирование состояния изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. 90 с.
2. Макарова Н.Л. Разработка технических средств и методов диагностирования изоляции трансформаторов I, II габаритов // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск: ЧГАА, 2011. Ч. 5. С. 74–80.



3. Макарова Н.Л. Анализ отказов силовых трансформаторов 10/0,4 кВ // Актуальные решения современной науки: сб. науч. работ аспирантов / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2010. Вып. 1. С. 150–155.

4. Рыбаков Л.М., Каныгин О.И., Халтурин С.А. Требования к выбору нелинейных ограничителей перенапряжения для защиты изоляции воздушных линий и оборудования трансформаторных подстанций напряжением 6-10 кВ // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы X Междунар.науч.-практ. конф. Саратов: ЦеСАин, 2019. С. 179–185.

5. Рыбаков Л.М., Иванова З.Г., Макарова Н.Л. Обслуживание элементов и оборудования электроустановок по результатам диагностирования технического состояния. Йошкар-Ола: Мар.гос.ун-т, 2015. 318 с.

6. Сартисон А.А., Сартисон А.Х., Юлдашев З.Ш. Надежность работы силовых трансформаторов предприятий АПК и сельских потребителей // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 11–4. С. 609–611.

---

**РЫБАКОВ ЛЕОНИД МАКСИМОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (diagnoz@marsu.ru).

**КАНЫГИН ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (kanyugin@mail.ru).

**ЛАСТОЧКИН СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (sergejlastochkin86@mail.ru).

---

**L. RYBAKOV, S. LASTOCHKIN, O. KANYUGIN**  
**ON THE ISSUE OF SINGLE-PHASE DAMAGE TO WINDINGS**  
**OF POWER TRANSFORMERS IN THE SYSTEM**  
**«DISTRIBUTION NETWORK-TRANSFORMER» AND DEVELOPMENT OF**  
**MEANS TO PREVENT THEIR FAILURE**

**Key words:** power transformer, distribution network, resonant frequency, filter-compensating devices, amplitude-frequency characteristics, non-linear overvoltage suppressor.

*The article considers the statistics of failures in power transformers, the most common in power supply systems with low energy density, which is typical of rural distribution networks. It is shown that 30-64% of failures are caused by damage to one phase of transformers. The frequency characteristics of power transformers I and II dimensions have been experimentally investigated. A program has also been drawn up for calculating the frequency characteristics of the noted above types of transformers. It is revealed that calculated and experimental values of resonance frequencies differ insignificantly. The analysis of failures in elements of 10 kV rural distribution networks was performed. The most common cause of damage in aerial networks is a single-phase circuit. The authors propose a scheme with the use of a filter-compensating device to protect high-voltage windings of transformers from resonant overvoltages in case of coincidence of incoming frequencies into the transformer from the network.*

References

1. Makarova N.L., Akhmetshin R.S. *Diagnostirovanie sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov selskikh elektricheskikh setei* [Diagnosis of insulation condition of power transformers rural power networks]. Moscow, 2012, 90 p.

2. Makarova N.L. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv i metodov diagnostirovaniya izolyatsii transformatorov I, II gabaritov* [Development of technical means and methods of diagnostics of insula-

tion of transformers I, II dimensions]. *Dostizheniya nauki-agropromyshlennomu proizvodstvu: materialy L Mezhdunar. nauch. tekhn. konf.* [Proc. of L Int. Sci. and Techn. Conf. «Achievements of science-agro-industrial production»]. Chelyabinsk, 2011, part 5, pp. 74–80.

3. Makarova N.L. *Analiz otkazov silovykh transformatorov 10/0,4 kV* [Failure analysis of power transformers 10/0, 4 kV]. *Aktualnye resheniya sovremennoi nauki: sb. nauch. rabot aspirantov* [Actual solutions of modern science: collection of scientific works of postgraduates]. Yoshkar-Ola, 2010, iss. 1, pp. 150–155.

4. Rybakov L.M., Kanyugin O.I., Khalturin S.A. *Trebovaniya k vyboru nelineinykh ogranichitelei perenapryazheniya dlya zashchity izolyatsii vozdushnykh linii i oborudovaniya transformatornykh podstantsii napryazheniem 6-10 kV* [Requirements for the selection of non-linear surge protectors to protect the insulation of overhead lines and equipment transformer substations voltage 6-10 kV]. *Aktualnye problemy energetiki APK: materialy X Mezhdunar. nauch. prakt. konf.* [Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. «Actual problems of agroindustrial energy»]. Saratov, TseSAin Publ., 2019, pp. 179–185.

5. Rybakov L.M., Ivanova Z.G., Makarova N.L. *Obsluzhivanie elementov i oborudovaniya elektroustanovok po rezul'tatam diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya* [Maintenance of elements and equipment of electrical installations according to the results of diagnosing the technical condition]. Yoshkar-Ola, 2015, 318 p.

6. Sartison A.A., Sartison A. Kh., Yuldashev Z. Sh. *Nadezhnost raboty silovykh transformatorov predpriyatii APK i selskikh potrebitelei* [Reliability of power transformers of agricultural enterprises and rural consumers]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* [International journal of experimental education], 2015, no. 11-4, pp. 609–611.

---

**RYBAKOV LEONID – Doctor of Technical Sciences, Professor of Power Supply and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (diagnoz@marsu.ru).**

**LASTOCHKIN SERGEY – Post-Graduate Student of Electrical and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (kanyugin@mail.ru).**

**KANYUGIN OLEG – Post-Graduate Student of Electrical and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (sergejlastochkin86@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** Рыбаков Л.М., Ласточкин С. В., Каныгин О.И. К вопросу однофазных повреждений обмоток силовых трансформаторов в системе «распределительная сеть–трансформатор» и разработка средства предотвращения их отказов // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 206–218.

УДК 621.314.58  
ББК 31.264.5

В.М. ФИЛИППОВ, С.О. ПОДГОРНАЯ

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**Ключевые слова:** выпрямительно-инверторный преобразователь, конструктивная несимметрия, циркуляционные токи, реактор.

*На сегодняшний день повышение энергетической эффективности оборудования и снижение уровня электропотребления во всех отраслях экономики, в том числе и на железнодорожном транспорте, является приоритетной задачей. В статье рассмотрен вопрос повышения энергетической эффективности выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) тяговой подстанции Яя Западно-Сибирской железной дороги. Ввиду конструктивной несимметрии вследствие наличия гальванической связи между обмотками выпрямителя и инвертора ВИП не позволяют обеспечить бесперебойную работу выпрямителя и инвертора одновременно по причине протекания через тиристорные и диодные мосты значительных циркуляционных токов. Для снижения значений протекающих циркуляционных токов предлагается установить токоограничивающий реактор между мостами инвертора. В статье приведены результаты расчета циркуляционных токов в виде кривых изменения их максимальных значений без токоограничивающего реактора и с учетом установки реакторов с различной индуктивностью при различных углах опережения ВИП.*

В настоящее время все более актуальной проблемой являются повышение энергетической эффективности и снижение уровня электропотребления во всех отраслях экономики. В соответствии с энергетической стратегией ОАО «РЖД» одной из приоритетных задач являются существенное повышение уровня рекуперированной энергии и эффективности ее использования, оборудование тяговых подстанций инверторами<sup>1</sup>.

На тяговых подстанциях постоянного тока наиболее широкое распространение получили преобразователи, выполненные по двенадцатипульсовым схемам, что позволяет увеличить коэффициент мощности, уменьшить наклон внешней характеристики выпрямителя и ослабить электромагнитное влияние на линии связи [1].

В соответствии с утвержденной программой «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД» «Обновление устройств электроснабжения, участвующих в передаче электроэнергии»<sup>2</sup> в 2016 г. по проекту ОАО «Томгипротранс» на тяговой подстанции Яя Западно-Сибирской железной дороги произведен монтаж выпрямительно-инверторного преобразователя производства ООО «НИИ-ЭФА-ЭНЕРГО» с выпрямителем В-МПП-3,15к-3,3к-УХЛ4 и инвертором И-ПМП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4.

<sup>1</sup> Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года: распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р / ОАО «РЖД». М., 2016.

<sup>2</sup> Проект «Техническое перевооружение тяговой подстанции Яя. Монтаж выпрямительно-инверторного преобразователя Западно-Сибирской железной дороги» / ОАО «Томгипротранс». Томск, 2017.

Выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) подключен к преобразовательному сухому трансформатору ТРСЗП-12500/10ЖУХЛ1 с дополнительными секциями вентильной обмотки.

При совместной работе указанных ВИП и трансформатора наблюдается наличие гальванической связи между обмотками выпрямителя и инвертора, и при использовании дополнительных секций вентильных обмоток возникает конструктивная (угловая) несимметрия (рис. 1).

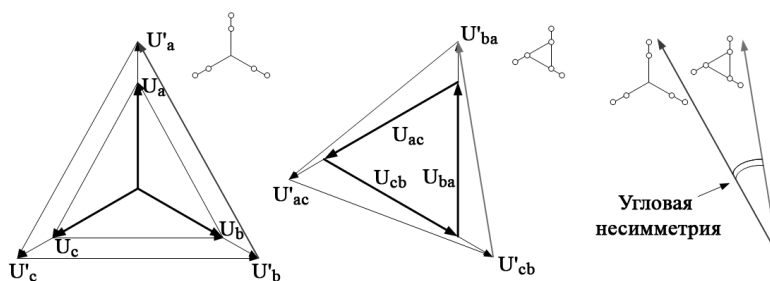


Рис. 1. Конструктивная (угловая) несимметрия ВИП

Кроме того, угловая несимметрия и отсутствие токоограничивающего реактора между мостами инвертора не позволяют обеспечить бесперебойную работу выпрямительно-инверторного преобразователя как в режиме инвертора, так и в режиме выпрямителя вследствие протекания через тиристоры и диоды мостов циркуляционных токов [2], достигающих 1 кА.

Работа инвертора установленного ВИП на межподстанционной зоне характеризуется небольшим объемом электроэнергии, возвращаемой во внешнюю сеть. Таким образом, главной задачей эксплуатации ВИП на тяговой подстанции Яя является обеспечение устойчивого режима рекуперативного торможения электроподвижного состава [5].

Инвертор ВИП тяговой подстанции Яя возвращает в энергосистему лишь небольшой процент от потребленной электроподвижным составом энергии вследствие пологого профиля железнодорожного пути. Именно поэтому большие потери энергии в инверторе обусловлены значительными циркуляционными токами, которые протекают по трем контурам, схематично изображенным на рис. 2.

Первый контур протекания: вентильные обмотки преобразовательного трансформатора – диоды левого моста выпрямителя – левый токоограничивающий реактор – тиристоры левого моста инвертора. Второй контур протекания: вентильные обмотки преобразовательного трансформатора – тиристоры правого моста инвертора – правый токоограничивающий реактор – диоды правого моста выпрямителя. Третий контур: тиристоры левого моста инвертора – тиристоры правого моста инвертора – вентильные обмотки трансформатора – диоды правого моста выпрямителя – диоды левого моста выпрямителя – вентильные обмотки преобразовательного трансформатора.

Из проекта технического перевооружения тяговой подстанции Яя следует, что величина электрических потерь в большей степени зависит от техни-

ческих параметров токоограничивающих реакторов, частично выполняющих функцию ограничения циркуляционных токов между анодными и катодными группами выпрямителя и инвертора [4].

Для снижения значений протекающих циркуляционных токов предлагается дополнительно установить еще один токоограничивающий реактор между мостами инвертора (рис. 3). Реактор позволит не только ограничить циркулярный ток, но и уменьшить величину высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения на тяговой подстанции [3].

Установка реактора позволит повысить энергетическую эффективность ВИП и снизить потери электроэнергии, возникающие от протекания циркуляционных токов.

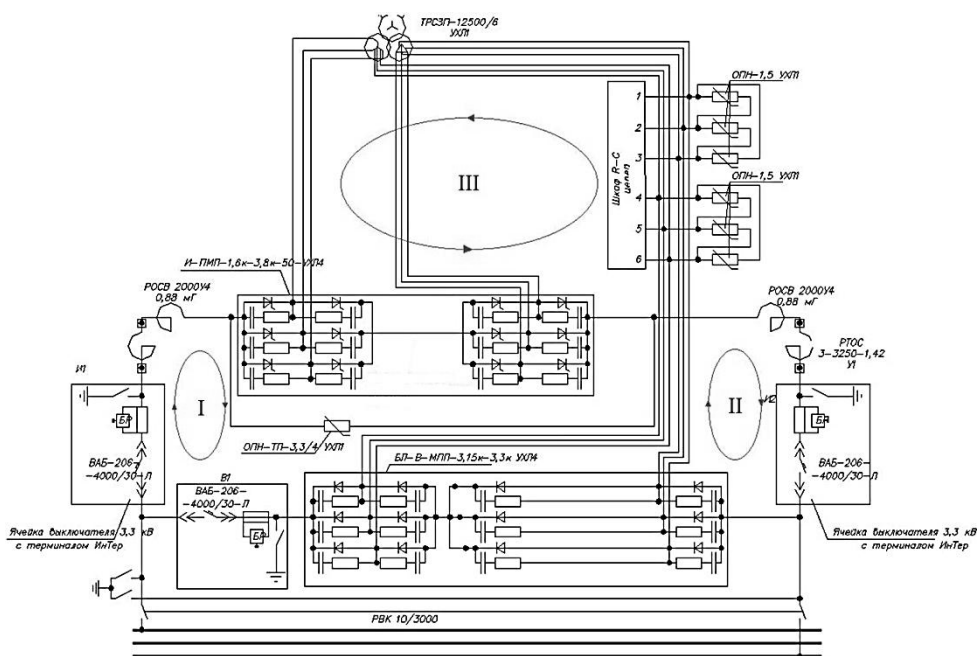


Рис. 2. Контуры протекания циркуляционных токов

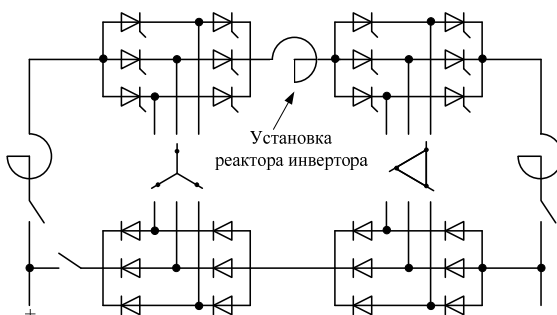


Рис. 3. Предлагаемая схема установки реактора

Расчет значений циркуляционных токов производился по формулам, приведенным в работе И.П. Неугодникова [1]. Кривые изменения максимального значения циркуляционного тока, протекающего в обозначенных контурах, без токоограничивающего реактора с учетом установки реактора типа РТОС 3-3250-1,42 УХЛ1 индуктивностью 4,7 мГн и произвольного реактора индуктивностью 10 мГн при различных углах опережения  $\beta$  ВИП, приведены на рис. 4 и 5.

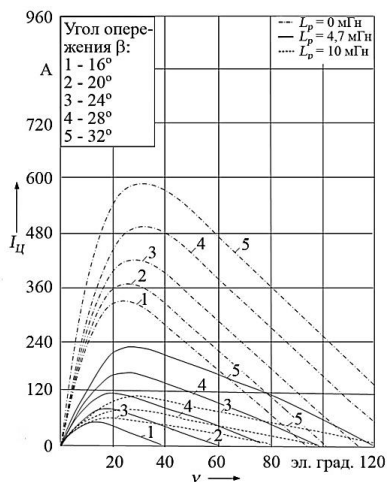


Рис. 4. Кривые изменения значения циркуляционных токов первого и второго контуров ВИП

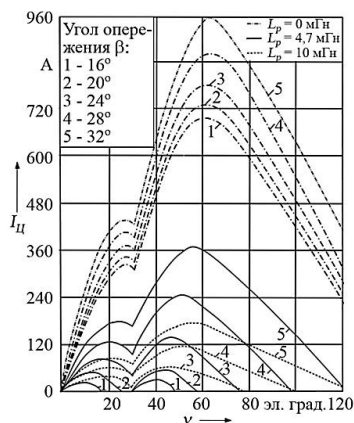


Рис. 5. Кривые изменения значения циркуляционного тока третьего контура ВИП

Результаты расчета показывают, что величина циркуляционного тока зависит не только от контура его протекания, но и от угла опережения открытия тиристорov. Максимальные значения циркуляционных токов по расчетным данным при угле опережения 32° для первого и второго контуров составили около 580 А, для третьего контура – почти 960 А. По данным экспериментальных исследований, выполненных в рамках гранта Западно-Сибирской дороги – филиала ОАО «РЖД» с помощью специализированного программного комплекса АИИС КУЭ «Энергия Альфа», результаты измерений составили для первого и второго контуров 580 А (рис. 5), для третьего контура – 900 А. Погрешность вычислений составила 6,6%.

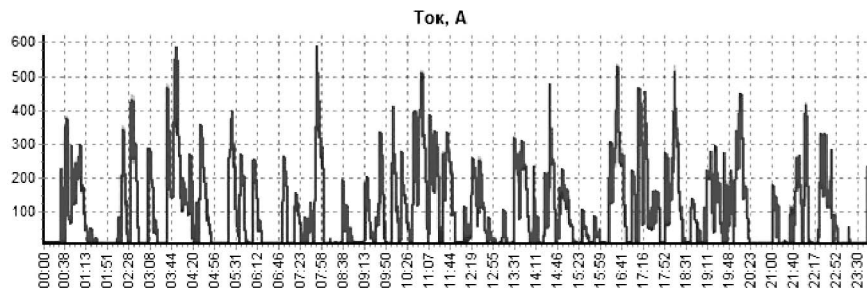


Рис. 6. Результаты измерений циркуляционных токов первого и второго контуров ВИП

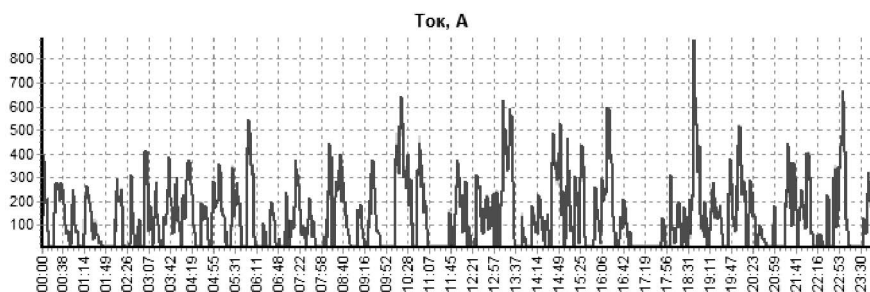


Рис. 7. Результаты измерений циркуляционных токов третьего контура ВИП

Установка реактора позволит снизить циркуляционные токи более чем в 2,5 раза, в пределе – до 160 А при установке реактора с индуктивностью 10 мГн.

Таким образом, в схеме преобразователя для ограничения циркуляционных токов требуется установка между анодными и катодными группами выпрямителя и инвертора дополнительного реактора, который позволит повысить энергетические показатели и надежность работы ВИП, снизить потери электроэнергии.

#### Литература

1. Барковский Б.С., Володин В.В., Грачев В.А. Результаты экспериментального исследования двенадцатипульсовых выпрямителей // Повышение качества электрической энергии на тяговых подстанциях: сб. научных трудов. Омск, 1983. С. 97–100.
2. Неугодинов И.П. Токи циркуляции в двенадцатифазных схемах // Вестник ВНИИЖТа. 1987. № 8. С. 21–25.
3. Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. М.: Транспорт, 1979. 264 с.
4. Соколов С.Д., Руденский В.В. Циркуляционный ток в схеме непереключаемого выпрямительно-инверторного агрегата // Повышение эффективности полупроводниковых преобразовательных агрегатов: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1976. С. 79–85.
5. Хусаинов Е.К. Опыт эксплуатации выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции на двухпутном участке // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. С. 349–356.

---

**ФИЛИППОВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (fvvm-omgups@mail.ru).

**ПОДГОРНАЯ СВЕТЛАНА ОЛЕГОВНА** – старший преподаватель кафедры информатики, прикладной математики и механики, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (ps.light@mail.ru).

---

V. PHILIPPOV, S. PODGORNAIA

#### ON THE PROBLEM OF INCREASE IN ENERGY EFFICIENCY OF RECTIFIED-INVERTER CONVERTERS

*Key words:* rectifier-inverter converter, structural asymmetry, circulation currents, reactor.

To date, improving energy efficiency of equipment and reducing power consumption in all sectors of the economy including railroad transport is considered to be a priority. The arti-

cle deals with the issue of increase in energy efficiency of the direct-inverter converter (DIC) for the traction substation Yaya of the West-Siberian Railroad. Due to the constructive asymmetry caused by the presence of galvanic coupling between the rectifier and DIC inverter windings, it appears impracticable to ensure uninterrupted operation of the rectifier and inverter simultaneously because of significant circulating currents flowing through the thyristor and diode bridges. To reduce the values of the flowing circulation currents, installation of a current-limiting reactor between the inverter bridges is proposed. The article presents the results of the calculation of circulating currents in the form of curves of changes in their maximum values without a current-limiting reactor, the installation of reactors with different inductances at different DIC lead advance angles being taken into account.

#### References

1. Barkovskii B.S., Volodin V.V., Grachev V.A. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei* [The results of an experimental study of twelve-pulse rectifiers]. In: *Povyshenie kachestva elektricheskoi energii na tyagovykh podstantsiyakh: Sbornik nauchnykh trudov* [Improving the quality of electrical energy in traction substations: Collected papers]. Omsk, 1983, pp. 97–100.
2. Neugodnikov I.P. *Toki tsirkulyatsii v dvenadtsatifaznykh skhemakh* [Circulation currents in twelve-phase circuits]. *Vestnik VNIIZhTa*, 1987, no. 8, pp. 21–25.
3. Sokolov S.D., Bei Yu.M., Gural'nik Ya.D., Chausov O.G. *Poluprovodnikovye preobrazovatel'nye agregaty tyagovykh podstantsii* [Semiconductor converter units of traction substations]. Moscow, Transport Publ., 1979, 264 c.
4. Sokolov S.D., Rudenskii V.V. *Tsirkulyatsionnyi tok v skheme nepereklyuchayemogo vypryamitel'no-invertornogo agregata* [Circulating current in the circuit of a non-switchable rectifier-inverter unit]. *Povyshenie effektivnosti poluprovodnikovyykh preobrazovatel'nykh agregatov: sb. nauch. Tr.* [Improving the efficiency of semiconductor converter units: Collected papers]. Moscow, Transport Publ., 1976, pp. 79–85.
5. Khusainov E.K. *Opyt ekspluatatsii vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya tyagovoi podstantsii na dvukhputnom uchastke* [Operating experience of a rectifier-inverter converter traction substation on a double track] // *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoi konferentsii* [Proc. of Rus. Conf. «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»]. Omsk, 2018, pp. 349–356.

---

**PHILIPPOV VICTOR** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Supply of Railway Transport, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (fvm-omgups@mail.ru).

**PODGORNAIA SVETLANA** – Senior Lecturer, Department of Informatics, Applied Mathematics and Mechanics, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (ps.light@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Филиппов В.М., Подгорная С. О. К вопросу о повышении энергетической эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 219–224.



УДК 629.423.1

ББК 31.27-05

В.Т. ЧЕРЕМИСИН, Е.А. ТРЕТЬЯКОВ, Г.Е. ГОЛОВНЕВ

## УПРАВЛЕНИЕ СЕКЦИОНИРОВАНИЕМ И РЕЖИМАМИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*Ключевые слова:* перегрузка, распределительные электрические сети, распределенная генерация активной и реактивной мощности, реконфигурация, управление спросом.

В нормальном режиме работы распределительные электрические сети железных дорог напряжением 35/10(6) кВ имеют разомкнутую структуру и секционированы таким образом, чтобы иметь возможность подключения группы подстанций к другому источнику питания в аварийных или ремонтных режимах. Существующие технологии управления режимами в указанных электрических сетях не предполагают возможности изменения их топологии для обеспечения задач по снижению перегрузки и потерь электроэнергии в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию в нормальных режимах. Важнейшую задачу по повышению пропускной способности распределительных электрических сетей можно решить путем их реконфигурации в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию в нормальных режимах, ни прибегая к дорогостоящей реконструкции и увеличению установленной мощности электроустановок и линий.

Представлены подходы к повышению пропускной способности, снижению потерь электрической энергии перспективных распределительных электрических сетей железных дорог за счет управления секционированием электрических схем, изменения предложения источников активной и реактивной мощности и управления спросом активных потребителей. Разработан алгоритм реконфигурации электрической сети для повышения ее пропускной способности на основе решения задач оптимизации нормальных режимов (статическая реконфигурация) и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию (динамическая реконфигурация). При этом в качестве критерия оптимизации топологии электрической сети выступает минимальное потребление электроэнергии при эксплуатационных ограничениях по схемам электроснабжения, допустимым параметрам режима, перегрузкам линий и т.д. Для обеспечения допустимости режимов распределительных электрических сетей представлены подходы к управлению предложением активных и реактивных мощностей и спросом активных потребителей. Полученные результаты для реконфигурации тестовой схемы на основе предлагаемого алгоритма свидетельствуют о повышении пропускной способности электрической сети за счет балансировки нагрузок в линиях, об устранении перегрузки линий и снижении потерь мощности на 32%.

**Введение.** В настоящее время цифровизация системы электроснабжения железных дорог открывает новые возможности для повышения эффективности транспорта и распределения электрической энергии.

Задача по оптимизации структуры электрической сети при изменении активных и реактивных мощностей в последние годы широко прорабатывается в зарубежных и отечественных научных кругах.

В целом представленную задачу можно рассматривать как оптимизационную нелинейную смешанного целочисленного программирования [19].

Часть исследователей придерживаются эвристических методов решения задачи оптимальной реконфигурации электрической сети [7, 9, 11, 15], кото-

рые позволяют существенно уменьшить вычислительные и временные ресурсы, но получить приближенные решения. Оптимизационная задача комбинаторного типа решается некоторыми авторами с помощью алгоритмов салюта (фейерверка), нейронных сетей, нечетких множеств [12–14, 18] в основном в условиях ограниченной исходной информации. Эвристические методы решения комбинаторных оптимизационных задач показали свою высокую эффективность в сравнении с классическими методами перебора, когда определяющим является не точность, а скорость вычислений.

Методы оптимизации, связанные с поиском на графах, также находят все большее применение при решении задач поиска оптимальной топологии электрической сети в первую очередь из-за своей однозначной разрешимости [2]. Хотя проблема минимального дерева в теории графов хорошо изучена [8], решение представленной задачи не является простой в силу того, что для построения оптимальной топологии необходимо минимизировать не только сопротивления линий распределительной сети, но и потери электроэнергии, определять потоки мощности для всех вариантов структуры сети, а также учитывать ограничения параметров режима и эксплуатации, надежность электроснабжения и прочее.

**Постановка задачи.** В данном исследовании рассмотрим реализацию подходов к реконфигурации электрических схем и управлению потоками мощности в системе электроснабжения железных дорог нетяговых и сторонних потребителей для обеспечения задач по снижению перегрузки и потерь электроэнергии в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию в нормальных режимах. Отличительной особенностью работы является то, что в качестве критерия оптимизации топологии электрической сети выступает минимальное потребление электроэнергии при эксплуатационных ограничениях по схемам электроснабжения, допустимым параметрам режима, перегрузкам линий и т.д. Кроме того, данная задача при оперативном управлении решается без расчета установившихся режимов с учетом ограничения спроса и предложения мощности.

**Теоретическая часть.** Распределительные электрические сети железных дорог 6–10 кВ выполнены разомкнутыми, как правило, по петлевым и комбинированным схемам, поэтому количество вариантов их реконфигурации достаточно ограничено, в том числе по эксплуатационным режимам.

Если для всех комбинационных вариантов положений выключателей выполнять полный расчет токораспределения и/или решать оптимизационную нелинейную задачу целочисленного программирования, то это окажется неприемлемым для оперативного управления реконфигурацией электрической сети при перегрузке и/или для снижения потерь электроэнергии.

Поэтому разработка более эффективных с точки зрения скорости и точности вычислений способов построения остова графа электрической сети при рассматриваемой реконфигурации является актуальной. Предлагается задачу реконфигурации разомкнутой распределительной электрической сети разбить на две подзадачи, как динамическую и статическую реконфигурацию, и решать их разными методами.

Реконфигурация электрической сети для быстрого снятия перегрузки элементов осуществляется на основе агентного подхода методом ветвей и границ с использованием рекуррентных соотношений для определения потерь электроэнергии для всех участков без полного расчета установившегося режима (в отличие от [6]). В нормальном режиме для выбора топологии электрической сети с минимальным потреблением электроэнергии (с минимальными потерями электроэнергии) решается нелинейная задача оптимизации установившихся режимов, имитирующих реконфигурацию, с учетом прогнозных значений нагрузок.

Модель потоков мощности для указанной радиальной электрической сети может быть представлена в виде

$$P = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (P_{nj} - P_{rj}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta P_{ij}); \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (Q_{nj} - Q_{rj}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta Q_{ij}),$$

где  $P_{nj}, P_{rj}$  и  $Q_{nj}, Q_{rj}$  – активные и реактивные мощности нагрузки и инъекции (от возобновляемых источников энергии) на шине  $j$ ;

$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_j^2} r_{ij}$ ;  $\Delta Q_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_j^2} x_{ij}$  – потери активной и реактивной мощности в линиях  $ij$ ;  $P_{ij}, Q_{ij}$  – перетоки активной и реактивной мощности в линиях  $ij$ ;  $r_{ij}, x_{ij}$  – активные и индуктивные сопротивления линий  $ij$ ;  $\delta_{ij}$  – двоичная переменная ( $\delta_{ij} = 0, 1 (i, j) \in E$ ).

Для рассматриваемой (рис. 1) разомкнутой электрической сети с четырьмя центрами питания оптимизационная задача динамической реконфигурации на основе (1) может быть записана в виде

$$\sum_{k=1}^4 P_k (\delta_{ij}) \rightarrow \min, \quad \delta_{ij} = 0, 1 (i, j) \in E \quad (2)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \in N_3}} P_{ij} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \in N_4}} P_{ji} \begin{cases} \leq P_i^{\text{нст}}, i \in N_1, N_2, N_3, N_4 \\ \leq -(P_{nj} - P_{rj}), j \in N_{\text{н}}, \end{cases} \\ & \sum P_j^{\text{нст}} > \sum_{i=j} (P_{nj} - P_{rj}), \Delta P_{ij} = 0; \\ & 0 \leq P_{ij} < P_{ij}^{\text{max}}; 0 \leq Q_{ij} < Q_{ij}^{\text{max}}; \\ & U_j^{\text{min}} \leq U_j < U_j^{\text{max}}; \\ & \sum_{i \neq j} \delta_{ij} = a, a = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение представленной оптимизационной задачи (2) методом ветвей и границ позволит получить значения двоичной переменной, которая описывает состояние ветви графа электрической сети: 0 – линия разомкнута, 1 – линия замкнута.

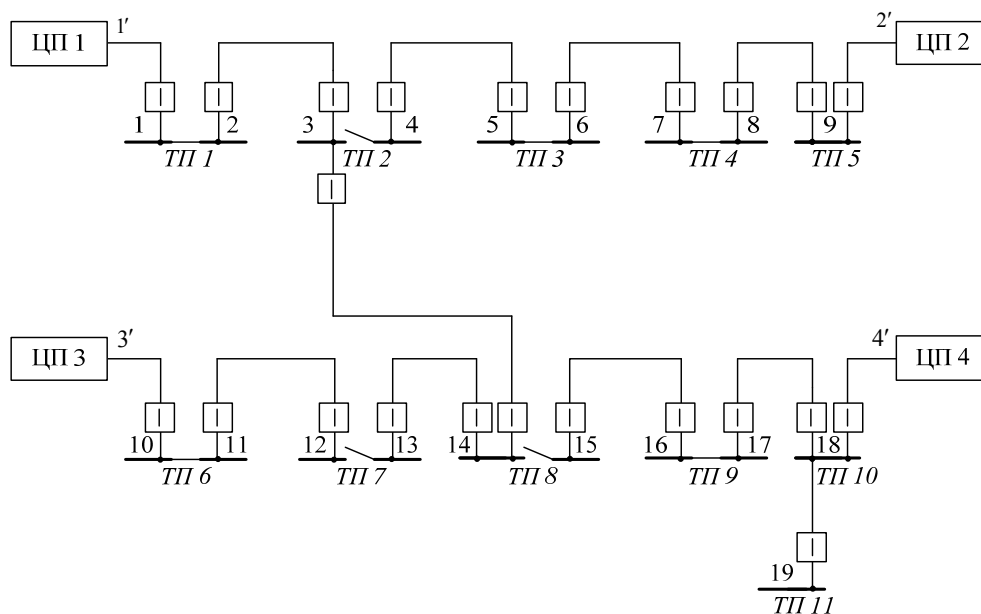


Рис. 1. Схема распределительной электрической сети 10 кВ железнодорожного узла

Определение потоков мощности выполняется без расчета установившегося режима по заданным инъекциям в узлах и топологии электрической сети. Допустимые параметры режима электрической сети по напряжению оцениваются по модулю в конце линии на шине  $j$  по данным в начале линии на шине  $i$  в виде [1]

$$U_j = \sqrt{\left(U_i - \frac{r_{ij}P_i + x_{ij}Q_i}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{x_{ij}P_i - r_{ij}Q_i}{U_i}\right)^2}. \quad (4)$$

Реконфигурация электрической сети для исключения перегрузки линий должна обеспечивать допустимый новый режим, если это возможно, иначе – прибегать к управлению предложением и спросом, вплоть до отключения нагрузок.

Критерии реконфигурации:

- обеспечение баланса мощности, включая резерв;
- исключение перегрузки электрооборудования;
- исключение недопустимых уровней напряжения и частоты;
- обеспечение требуемого уровня надежности электроснабжения;
- обеспечение требуемой частоты реконфигурации (порог).

Схема предлагаемого алгоритма рассматриваемой реконфигурации электрической сети представлена на рис. 2.

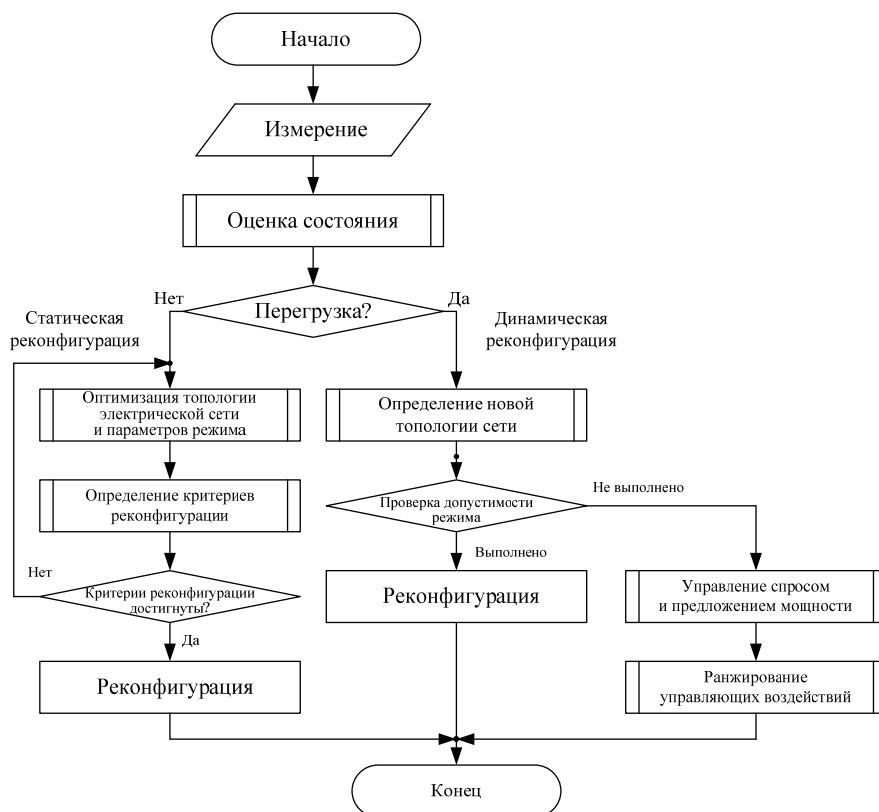


Рис. 2. Схема алгоритма реконфигурации электрической сети

Система управления реконфигурацией обеспечивает непрерывный контроль и оценку состояния сети, а в случае отсутствия перегрузки элементов электрической сети выполняет оптимизацию новой топологии электрической сети и параметров режима с учетом прогнозных значений спроса и предложения мощности (статическая реконфигурация), например, как показано в работах [4, 17].

Определение новой топологии электрической сети при динамической реконфигурации осуществляется на основе решения задачи (2) методом ветвей и границ при соблюдении условий допустимости режима (3). При этом для каждого ветвления дерева электрической сети потери мощности вычисляются рекурсивно по представленным в (1) выражениям без расчета нелинейных уравнений установившихся режимов.

Некоторыми авторами при поиске точки потокораздела электрической сети используются подход, основанный на определении знака потоков мощности в ветвях схемы [10, 16] с полным их перебором. При этом возникает необходимость в дополнительных преобразованиях схемы электрической сети для исключения тупиковых ответвлений ветвей.

В соответствии с представленным на рис. 2 алгоритмом, если исключение перегрузки за счет реконфигурации невозможно по условиям допустимости режима (3), то осуществляется управление спросом и предложением мощности (распределенные источники генерации, накопители – при наличии) в электрической сети вплоть до отключения нагрузки.

В данном случае под перегрузкой линий понимается превышение не предельной токовой нагрузки для конкретных типов проводов, а предельных значений токов с учетом обеспечения статической устойчивости и минимально необходимого резерва мощности [1].

Наряду с ограничением мощности потребителей в аварийных режимах соответствующей автоматикой (отключением) предлагается подход с более тщательным ранжированием потребителей с точки зрения возможного ущерба (стоимости) их отключения в реальном времени и их гибкости в управлении спросом.

Подробнее рассмотрим подходы к снижению перегрузки элементов распределительной электрической сети по активной мощности, так как баланс реактивной мощности может быть обеспечен установленными устройствами компенсации реактивной мощности (отдельная задача за пределами данного исследования).

В рамках реализации распределенного агентного управления потоками мощности в электрической сети [5] при перегрузке предлагаются следующие этапы разрешения указанной проблемы:

- предупреждение (наличие потенциальных условий для возникновения перегрузки с учетом прогнозных значений, структуры балансов мощности и прочих факторов);
- оповещение (превышение установленных динамических пороговых значений);
- аварийный режим;
- исключение перегрузки.

Основные способы снижения перегрузки линий:

- регулирование активной мощности генератора, солнечной электростанции, накопителя (при наличии);
- регулирование фазового угла (при технической возможности);
- настройка графика транзита мощности (импорт/экспорт);
- изменение топологии электрической сети;
- сброс нагрузки потребителей;
- управление спросом активных потребителей.

Сброс нагрузки является последним вариантом, когда перегрузка линий не может быть уменьшена другими методами.

Регулирование активной мощности распределенных источников генерации, накопителя осуществляется на основе оптимального выбора управляющих воздействий с учетом весовых коэффициентов и стоимости приращений генерации и изменения нагрузки и подробнее представлено в работе [10].

В качестве основного метода управляемого отключения потребителей при перегрузке элементов электрической сети предлагается использовать чувствительность потоков мощности в линиях к изменению нагрузки на шинах и приоритет нагрузки для указания важности нагрузки в какой-то момент времени.

Метод расчета чувствительности может быть основан на известных соотношениях в матричной форме, связанных с топологией электрической сети [10].

Многие авторы управление спросом активных потребителей рассматривают исходя из экономических интересов генерации, распределения и потребления электроэнергии, развивая различные рыночные модели их взаимодействия<sup>1</sup> [3]. Считаем, что управление спросом активных потребителей может осуществляться с учетом следующих факторов: чувствительность перегрузки линии к изменению нагрузки потребителей; ценовая характеристика нагрузки; приоритет нагрузки. Приоритет нагрузки определяется путем ранжирования потребителей по важности нагрузки. Подробные соотношения по управлению спросом потребителей представлены в [10].

**Практическая часть.** Рассмотрим реализацию представленных подходов к реконфигурации электрической сети 10 кВ (рис. 2). Основные параметры линий и расчетные нагрузки представлены в табл. 1–2.

Таблица 1

Сопротивления линий

Показатель	Линии						
	1-1	2-3	3-14	4-5	6-7	8-9	9-2
$r$ , Ом	0,33	0,27	1,12	0,42	0,46	0,36	0,29
$x$ , Ом	0,1	0,08	0,14	0,10	0,11	0,06	0,09

Окончание табл. 1

Показатель	Линии						
	3-10	11-12	13-14	15-16	17-18	18-19	18-4
$r$ , Ом	0,25	0,16	0,16	0,38	0,28	0,22	0,25
$x$ , Ом	0,08	0,04	0,04	0,09	0,08	0,04	0,08

Таблица 2

Расчетные нагрузки

Нагрузка	Шины подстанций									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P$ , кВт	1200	930	1270	1100	820	910	830	560	780	860
$Q$ , квар	1100	870	1140	930	620	820	730	420	650	760

Продолжение табл. 2

Нагрузка	Шины подстанций								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$P$ , кВт	760	370	1200	1270	560	715	810	1100	390
$Q$ , квар	650	290	1150	1100	430	550	725	970	300

Окончание табл. 2

Генерация	Шины подстанций									
	3	4	5	6	7	8	12	13	14	15
$P$ , кВт	–	–	–	150	–	–	–	–	–	–
$Q$ , квар	400	400	–	–	–	–	–	–	–	200

<sup>1</sup> О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности: постановление Правительства РФ от 20.07.2016 г. № 699 // Собрание законодательства РФ. 2016. № 31. Ст. 5017.

Моделирование рассматриваемой распределительной электрической сети выполнялось на имитационной модели в Matlab/Simulink. Нагрузка задавалась с учетом типовых промышленно-бытовых статических характеристик по напряжению.

Для предварительной оценки снижения уровня потерь на участке электрической сети в результате реконфигурации был исследован участок с центрами питания ЦП 1 и ЦП 2, исключая ветвь 3-14 (рис. 1). Результаты имитационного моделирования с определением потребляемых мощностей по центрам питания ЦП 1 и ЦП 2 при различных местах потокораздела ( $\delta_{ij} = 0$ : 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9) представлены на рис. 3, 4.

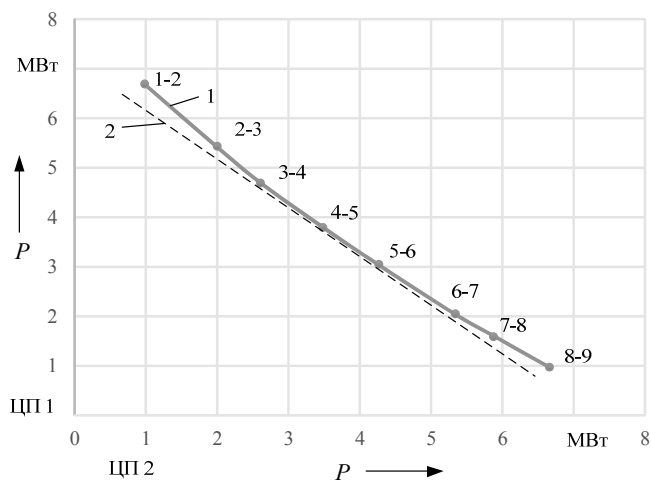


Рис. 3. Потребление мощности центрами питания ЦП 1 и ЦП 2 при разделении электрической сети на два участка с раздельным питанием: 1 – кривая, соединяющая расчетные точки; 2 – касательная к кривой 1 в точке 4-5

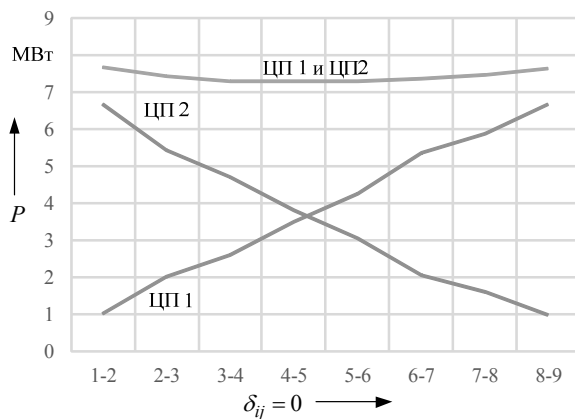


Рис. 4. Потребление мощности центрами питания ЦП 1 и ЦП 2 при различных местах потокораздела



Как следует из рис. 3, минимальное потребление мощности от ЦП 1 и ЦП 2 достигается при раздельном питании рассматриваемого участка электрической сети с местом потокораздела 4-5 ( $\delta_{45} = 0$ ). Очевидно, что перераспределение нагрузки в какой-то момент времени между шинами может привести к изменению оптимального места потокораздела.

В соответствии с представленным на рис. 2 алгоритмом для электрической схемы с четырьмя центрами питания в результате решения оптимизационной задачи реконфигурации (2) были получены оптимальные места размыкания линий и количественные оценки параметров режима (табл. 3).

Таблица 3

Потребление мощности в электрической сети до и после реконфигурации

Режим электрической сети	Потребление мощности					
	активная реактивная	ЦП 1	ЦП 2	ЦП 3	ЦП 4	всего
Исходный $\delta_{34}, \delta_{1213}, \delta_{1415} = 0$	$P$ , МВт	6,225	5,391	2,343	4,134	18,093
	$Q$ , Мвар	6,12	4,808	2,011	3,527	16,466
После реконфигурации $\delta_{45}, \delta_{314}, \delta_{1415} = 0$	$P$ , МВт	5,017	4,064	4,688	3,809	17,578
	$Q$ , Мвар	4,447	3,59	4,463	3,344	15,844

Цель реконфигурации – исключение перегрузки линий 1'-1 и 9-2' (менее 90%). Реконфигурация электрической сети для быстрого снятия перегрузки элементов осуществляется на основе агентного подхода (подробнее в [3]) путем решения оптимизационной задачи (2) методом ветвей и границ с использованием рекуррентных соотношений для определения потерь электроэнергии для всех участков без расчета установившегося режима.

Из представленных в табл. 3 данных следует, что после реконфигурации потребляемая мощность в электрической сети снизилась на 2,9 %.

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования напряжений на шинах электрической сети, на рис. 6 и 7 – загрузка линий и потери мощности в них.

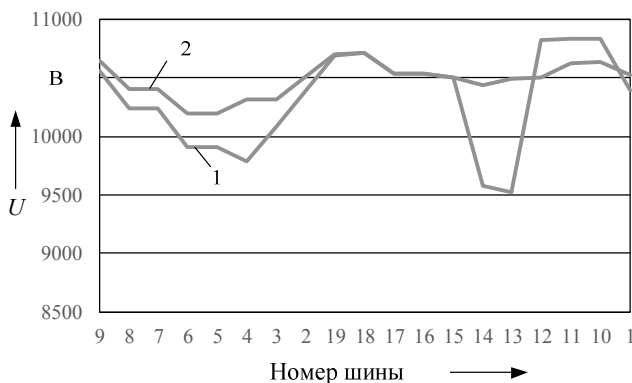


Рис. 5. Напряжения на шинах электрической сети до (линия 1) и после (линия 2) реконфигурации

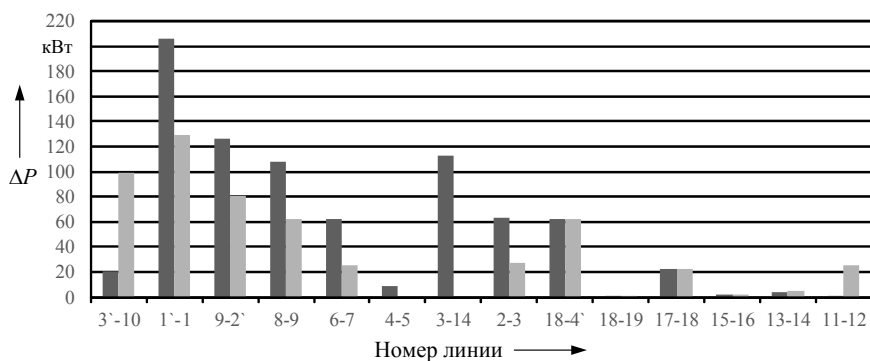


Рис. 6. Потери активной мощности в линиях электрической сети до (левый столбец) и после (правый столбец) реконфигурации

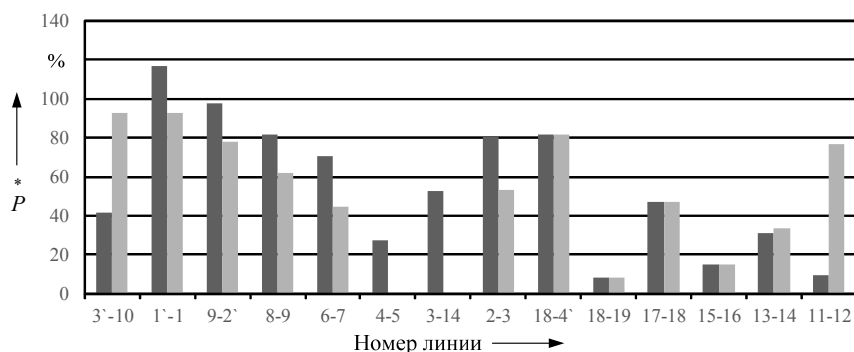


Рис. 7. Загрузка линий электрической сети до (левый столбец) и после (правый столбец) реконфигурации

Общие нагрузочные потери активной мощности в линиях электрической сети составили: 798,08 кВт до реконфигурации и 541,9 кВт после.

Как указывалось ранее, загрузка линий определяется с учетом запаса для обеспечения статической устойчивости (принято 10%) и минимально необходимого резерва мощности (при необходимости).

Таким образом, оптимальная реконфигурация для рассматриваемого случая обеспечила как допустимость режима по напряжению (рис. 5), так и исключение перегрузки линий. Поэтому в данном случае нет необходимости прибегать к ограничению мощности нагрузок и управлению спросом активных потребителей, что является предметом исследований авторов в других работах.

**Выводы.** Результаты исследований показали обоснованность предлагаемых решений к динамической реконфигурации электрической сети для ограничения перегрузки и снижения потерь электроэнергии без расчёта нелинейных уравнений установившихся режимов для каждого варианта изменения топологии сети. При этом в качестве критерия оптимизации топологии электрической сети выступает минимальное потребление электроэнергии при эксплуатационных ограничениях по схемам электроснабжения, допустимым парамет-

рам режима, перегрузкам линий и т.д. Практическая ценность представленных подходов заключается в том, что реконфигурация тестовой схемы позволила повысить пропускную способность электрической сети за счет балансировки нагрузок между линиями, устранить перегрузку линий и снизить потери мощности на 32%. Важным вопросом является также проработка критериев реконфигурации электрической сети во временной области с учетом прогнозных значений нагрузок, ограничений количества переключений и прочих факторов, что является предметом дальнейших исследований авторов.

#### Литература

1. *Веников В.А.* Электрические системы. Электрические сети. М.: Высш. шк., 1998. 511 с.
2. *Гребанюк Г.Г., Крыгин А.А.* Предельные графы в структурной оптимизации режимов распределительных сетей // *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 1. С. 147–162.
3. *Кучеров Ю.Н., Иванов А.В., Корев Д.А., Уткин Н.А., Жук А.З.* Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования // *Энергетическая политика*. 2018. № 5. С. 73–86.
4. *Лукьянов Д.В., Васильев Д.А., Иващенко В.А., Лукьянов Д.В., Шабельникова А.Ю.* Выбор структуры электрических сетей промышленных предприятий в условиях автоматизированного управления электропотреблением // *Известия вузов. Поволжский регион. Сер. Технические науки*. 2010. № 2. С. 52–61.
5. *Третьяков Е.А., Головнев Г.Е., Галкин А.Г., Сидорова Е.А.* Перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в электрических сетях железных дорог // *Известия Транссиба*. 2018. № 2(34). С. 113–124.
6. *Фишов А.Г., Мукатов Б.Б.* Реконфигурация электрических сетей с распределенной генерацией и мультиагентным управлением // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2015. Т. 326, № 9. С. 143–152.
7. *Aman M.M., Jasmon G.B., Naidu K.* Discrete evolutionary programming to solve network reconfiguration problem. In: Proc. of the TENCON Spring Conference, 17-19 April 2013. Sydney, pp. 23–29.
8. *Diestel R.* Graph Theory. Springer-Verlag, 2005, 422 p.
9. *Huang S., Wu Q., Cheng L., Liu Z.* Optimal Reconfiguration Based Dynamic Tariff for Congestion Management and Line Loss Reduction in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015. DOI: 10.1109/TSG.2015.2419080.
10. *Jizhong Z.* Optimization of Power System Operation. In: IEEE Press Series on Power Engineering, 2009, vol. 49, 624 p.
11. *Manju M., Leena G., Saxena N.S.* Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm. *Engineering and Manufacturing*, 2016, no. 2, pp. 234–239.
12. *Mostafa S., Reza B.* Optimal Multi-objective Reconfiguration and Capacitor Placement of Distribution Systems with the Hybrid Big Bang–Big Crunch Algorithm in the Fuzzy Framework. *Shams Engineering Journal*, 2016, no. 7, pp. 113–129.
13. *Niknam T.* An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm Based on PSO and ACO for Distribution Feeder Reconfiguration. *Eur. Trans. Electr. Power.*, 2010, no. 20, pp. 575–590.
14. *Ola B., Saad M., Hazlie M., Wardiah D.* Optimal Reconfiguration of Distribution System Connected with Distributed Generations: A Review of Different Methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, no. 73, pp. 854–867.
15. *Pang R.* Parallel Power System Restoration Planning Using Heuristic Initialization and Discrete Evolutionary Programming. *Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, no. 5, iss. 6, pp. 991–1003.
16. *Peng Q., Low S. H.* Optimal Branch Exchange for Feeder Reconfiguration in Distribution Networks. In: Decision and Control (CDC): IEEE 52<sup>nd</sup> Annual Conf. on. IEEE, 2013, pp. 2960–2965.
17. *Reza J.-S., Seyed-Masoud M.-T., Seyed-Sattar M.* Microgrid Operation and Management using Probabilistic Reconfiguration and unit Commitment. *Electrical Power and Energy Systems*, 2016, no. 75, pp. 328–336.
18. *Santos A.C., Delbem C.B., London B.A., Bretas N.G.* Node Depth Encoding And multi-objective Evolutionary Algorithm Applied to Large Scale Distribution System Reconfiguration. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2010, no. 25(3), pp. 1254–1265.
19. *Williams H.P.* Logic and integer programming. Springer, 2009, 464 p.

**ЧЕРЕМИСИН ВАСИЛИЙ ТИТОВИЧ** – доктор технических наук, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, директор научно-исследовательского института энергосбережения, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (cheremisinvt@gmail.com).

**ТРЕТЬЯКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (eugentr@mail.ru).

**ГОЛОВНЕВ ГРИГОРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – аспирант кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (grishantiy@gmail.com).

V. CHEREMISIN, E. TRETYAKOV, G. GOLOVNEV

**CONTROL OF SECTIONING AND POWER FLOW MODES  
IN INTELLIGENT DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS FOR RAILWAYS**

*Keywords: overload, distribution electric networks, distributed generation of active and reactive power, reconfiguration, demand management.*

*In normal mode, the 35/10 (6) kV distribution electric networks of railways are open-circuited and partitioned so as to be able to connect a group of substations to another power source in emergency or repair modes. Existing technologies for controlling the modes in these electrical networks do not imply the possibility of changing their topology to meet the challenges for reducing overload and energy loss in the pace of demand change processes for electricity in normal modes. The most important task of increasing throughput capacity of distribution networks can be solved by reconfiguring them at the pace of changing the demand for electricity in normal conditions without resorting to costly reconstruction and increase in the installed capacity of electrical installations and lines.*

*The article presents approaches to increase in throughput capacity, reduction of electric loss in prospective distribution electric networks of railways by controlling the separation of electrical circuits, changing the supply of active and reactive power sources and by managing the demand of active consumers. An algorithm for reconfiguring the electrical network has been developed to increase its capacity based on solving problems of optimizing normal modes (static reconfiguration) and minimizing power consumption without calculating steady-state modes at a rate of change in electricity demand (dynamic reconfiguration). At the same time, the criterion for optimizing the topology of the electrical network is the minimum power consumption following the operating limitations under the power supply schemes, acceptable mode parameters, line overloads, etc. To ensure the admissibility of the modes in distribution electric networks, approaches to managing the supply of active and reactive capacities and demand of active consumers are presented. The results obtained for reconfiguration of the test circuit based on the proposed algorithm indicate an increase in the capacity of the electrical network due to balancing the loads in the lines, as well as eliminating line overload and reducing power loss by 32%.*

References

1. Venikov V.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti* [Electrical systems. Electricity of the Net]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998, 511 p.
2. Grebanyuk G.G., Krygin A.A. *Predel'nye grafy v strukturnoj optimizacii rezhimov raspredeitel'nyh setej* [Limit graphs in structural optimization of distribution network modes]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2015, no. 1, pp. 147–162.
3. Kucherov YU.N. Ivanov A.V., Korev D.A., Utkin N.A., Zhuk A.Z. *Razvitie tekhnologii aktivnogo potrebitelya i ih integraciya v elektricheskuyu set' obshchego pol'zovaniya* [The development of active consumer technologies and their integration into the public electrical network]. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], 2018, no. 5, pp. 73–86.

4. Lukyanov D.V., Vasilev D.A., Ivashchenko V.A., Lukyanov D.V., Shabelnikova A.YU. *Vybor struktury elektricheskikh setej promyshlennykh predpriyatij v usloviyakh avtomatizirovannogo upravleniya elektropotrebleniem* [The choice of the structure of electrical networks of industrial enterprises in the conditions of automated power consumption management]. *Izvestiya vuzov. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki* [News of universities. Volga region. Technical science], 2010, no. 2, pp. 52–61.
5. Tretyakov E.A., Golovnev G.E., Galkin A.G., Sidorova E.A. *Perspektivnye metody upravleniya transportom i raspredeleniem elektroenergii v elektricheskikh setyah zheleznykh dorog* [Perspective methods of transport management and distribution of electricity in electric networks of railways]. *Izvestiya transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2018, no. 2 (34), pp. 113–124.
6. Fishov A.G., Mukatov B.B. *Rekonfiguraciya elektricheskikh setej s raspredelennoj ge-neraciej i mul'tiagentnym upravleniem* [Reconfiguration of electrical networks with distributed generation and multi-agent control]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2015, vol. 326, no. 9, pp. 143–152.
7. Aman M.M., Jasmon G.B., Naidu K. Discrete evolutionary programming to solve network reconfiguration problem. In: Proc. of the TENCON Spring Conference, 17-19 April 2013. Sydney, pp. 23–29.
8. Diestel R. *Graph Theory*. Springer-Verlag, 2005, 422 p.
9. Huang S., Wu Q., Cheng L., Liu Z. Optimal Reconfiguration Based Dynamic Tariff for Congestion Management and Line Loss Reduction in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015. DOI: 10.1109/TSG.2015.2419080.
10. Jizhong Z. Optimization of Power System Operation. In: IEEE Press Series on Power Engineering, 2009, vol. 49, 624 p.
11. Manju M., Leena G., Saxena N.S. Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm. *Engineering and Manufacturing*, 2016, no. 2, pp. 234–239.
12. Mostafa S., Reza B. Optimal Multi-objective Reconfiguration and Capacitor Placement of Distribution Systems with the Hybrid Big Bang–Big Crunch Algorithm in the Fuzzy Framework. *Shams Engineering Journal*, 2016, no. 7, pp. 113–129.
13. Niknam T. An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm Based on PSO and ACO for Distribution Feeder Reconfiguration. *Eur. Trans. Electr. Power.*, 2010, no. 20, pp. 575–590.
14. Ola B., Saad M., Hazlie M., Wardiah D. Optimal Reconfiguration of Distribution System Connected with Distributed Generations: A Review of Different Methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, no. 73, pp. 854–867.
15. Pang R. Parallel Power System Restoration Planning Using Heuristic Initialization and Discrete Evolutionary Programming. *Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, no. 5, iss. 6, pp. 991–1003.
16. Peng Q., Low S.H. Optimal Branch Exchange for Feeder Reconfiguration in Distribution Networks. In: Decision and Control (CDC): IEEE 52<sup>nd</sup> Annual Conf. on. IEEE, 2013, pp. 2960–2965.
17. Reza J.-S., Seyed-Masoud M.-T., Seyed-Sattar M. Microgrid Operation and Management using Probabilistic Reconfiguration and unit Commitment. *Electrical Power and Energy Systems*, 2016, no. 75, pp. 328–336.
18. Santos A.C., Delbem C.B., London B.A., Bretas N.G. Node Depth Encoding And multi-objective Evolutionary Algorithm Applied to Large Scale Distribution System Reconfiguration. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2010, no. 25(3), pp. 1254–1265.
19. Williams H.P. *Logic and integer programming*. Springer, 2009, 464 p.

---

**CHEREMISIN VASILYIY – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of the Rolling Stock of Electric Railways, Director of the Research Institute of Energy Saving, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (cheremisinvt@gmail.com).**

**TRETYAKOV EVGENIY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (eugentr@mail.ru).**

**GOLOVNEV GRIGORIY – Post-Graduate Student of the Department of the Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (grishantiy@gmail.com).**

---

**Формат цитирования:** Черемисин В.Т., Третьяков Е.А., Головнев Г.Е. Управление секционированием и режимами потоков мощности в интеллектуальных распределительных электрических сетях железных дорог // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 225–237.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Чувашского университета» просит авторов руководствоваться нижеприведенными правилами.

**1.** Авторские оригиналы представляются на бумажном и электронном носителе. Авторский текстовый оригинал должен быть пронумерован и подписан авторами на титульном листе с указанием даты.

**2.** К статьям, направляемым в редакцию, прилагаются:

- 1) *заявление автора на имя главного редактора;*
- 2) *анкета авторов;*
- 3) *две внешние рецензии;*
- 4) *ходатайство научного руководителя;*
- 5) *экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.*

**3.** Авторы должны указать рубрику, в которой следует поместить статью.

**4. Оформление статьи:**

- 1) *классификационные индексы Универсальной десятичной классификации (УДК), Библиотечно-библиографического классификатора (ББК);*
- 2) *инициалы и фамилия авторов;*
- 3) *название статьи;*
- 4) *ключевые слова;*
- 5) *аннотация статьи;*
- 6) *название статьи, инициалы и фамилия автора на английском языке;*
- 7) *ключевые слова на английском языке;*
- 8) *аннотация на английском языке;*
- 9) *текст статьи;*
- 10) *пристатейный библиографический список;*
- 11) *транслитерированный библиографический список References;*
- 11) *сведения об авторе.*

Авторские оригиналы подготавливаются с помощью компьютера в среде Microsoft Word (файлы типа doc). Формат бумаги А4, поля: справа и слева 4 см, сверху 4,5 см, снизу 5,7 см, от края до верхнего колонтитула 3 см, красная строка 0,75 см. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размера 11 пт через 1 интервал.

Текст статьи представляется в двух экземплярах с приложением файла в электронном виде.

**5. Рисунки.** Количество рисунков не более 4. На рисунки должны быть ссылки. Рисунки должны быть внедрены в режиме Вставка Объект Рисунок Microsoft Word. Подрисуночные подписи выполняются шрифтом размера 9 пт.

**6. Формулы и буквенные обозначения по тексту.** Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Шрифт для греческих букв – Symbol, для всех остальных – Times New Roman, основной размер 11 пт, крупный индекс 7 пт, мелкий 5 пт.

Латинские буквы набираются курсивом, буквы греческого алфавита и кириллицы – прямым шрифтом, обозначения матриц, векторов, операторов – прямым полужирным шрифтом.

Формулы располагаются по центру страницы. Номер формулы ставится у правого края. Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

При выборе единиц физических величин рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

**7. Таблицы.** Текст в таблицах набирается шрифтом размером 9 пт, заголовки выделяются полужирным шрифтом. На таблицы должны быть ссылки.

**8. Список литературы.** Список строится по алфавиту, записи рекомендуется располагать сначала на языке издания, в которое включен список, затем на других языках. Источники набираются шрифтом Times New Roman размера 9 пт. При оформлении списка литературы необходимо руководствоваться ГОСТом Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления».

Ссылки на источники в тексте даются в квадратных скобках, например [1], [1. С. 5].

**9. Список References.** Транслитерацию русского текста в латиницу следует производить в соответствии со стандартом BSI.

**10. Сведения об авторах** набираются полужирным шрифтом размера 10 пт *на русском и английском языках в именительном падеже* по следующей форме: *Фамилия, имя, отчество – ученая степень, должность, место работы, страна, город. Контактная информация (e-mail).*

**11.** Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, возвращаются без рассмотрения. Возвращение рукописи автору на доработку не означает, что статья принята к печати. После получения доработанного текста рукопись вновь рассматривается редколлегией. Доработанный текст автор должен вернуть вместе с первоначальным экземпляром статьи, а также ответами на все замечания. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

**12.** Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**13.** В одном номере журнала может быть опубликовано, как правило, не более двух статей одного автора, в том числе в соавторстве.

СОДЕРЖАНИЕ

<b>Афанасьев А.А.</b> Расчёт магнитного редуктора на основе остаточной магнитной индукции стержней модулятора.....	5
<b>Афанасьев В.В., Тарасов В.А., Ковалев В.Г.</b> Электрические режимы электротермических газификаторов.....	15
<b>Белянин А.А., Маслов А.Н., Смирнова И.В., Широкин М.Ю.</b> Метод локализации для распознавания внутренних повреждений силового трансформатора, происходящих на фоне внешних .....	22
<b>Белянин А.А., Маслов А.Н., Смирнова И.В., Широкин М.Ю.</b> Исследование чувствительности дифференциальной токовой защиты трансформатора к сложным видам повреждений.....	29
<b>Булычев А.В., Васильев Д.С., Силанов Д.Н.</b> Двухуровневая цифровая система управления и релейной защиты для объектов распределительного сетевого комплекса 110/35/10 кВ .....	36
<b>Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г.</b> Повышение точности измерения первичных напряжений в энергосистемах.....	46
<b>Горбачевский Н.И., Сидоров С.Н., Афлятунов И.Ф., Гаврилов Е.Н.</b> Активный выпрямитель на запираемых тиристорах на сетевом входе электропривода....	53
<b>Гущин И.А.</b> Анализ динамики послыстного разрушения углепластика токами молнии .....	63
<b>Дымов И.С., Котин Д.А., Панкрац Ю.В.</b> Алгоритм адаптивного управления активным электромагнитным подшипником по состоянию .....	69
<b>Егоров Е.Г., Егоров Г.Е., Луия Н.Ю.</b> Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока.....	78
<b>Ильгачёв А.Н., Князев В.А.</b> Влияние конструкции боковой стенки кальцинатора на электрические характеристики его камеры прокаливания .....	87
<b>Коробко Г.И., Шилов М.П., Коробко И.Г.</b> Разработка систем управления преобразователем частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и их сравнительный анализ.....	97
<b>Кощеев М.И., Славутский А.Л., Славутский Л.А.</b> Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети .....	110
<b>Кузьмин А.А., Медведев В.Г., Петров М.И., Хадыев И.Г.</b> К вопросам оценки параметров активной части реактора дугогашения с распределенными зазорами .....	119
<b>Кузьмин Д.Г., Кравченко Г.А., Львова Э.Л., Макаров А.М., Столяров С.В.</b> Метод контроля состояния кабельной линии и её основных элементов в рабочем режиме.....	127



<b>Курир В.И.</b> О моделировании гидрогенератора с турбиной в Matlab/Simulink.....	133
<b>Лицин К.В.</b> Анализ технико-экономических параметров системы высоковольтного электропривода переменного тока с промежуточными трансформаторами .....	142
<b>Макаров А.В., Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю.</b> Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства при движении с постоянной скоростью .....	150
<b>Макаров А.В., Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю.</b> Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства при движении с постоянным моментом.....	159
<b>Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.</b> Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы ....	167
<b>Нестерин В.А., Романов Р.А., Матюнин А.Н., Мясникова Т.В.</b> Бесконтактные высокотемпературные датчики углового положения на базе сверхминиатюрной магнитоэлектрической машины.....	176
<b>Обычайко Д.С., Шихин В.А.</b> Обеспечение эксплуатационной надежности энергооборудования посредством применения индикативных диаграмм принятия решений .....	185
<b>Попов Д.И.</b> Определение необходимых параметров звена постоянного тока электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин .....	195
<b>Рыбаков Л.М., Ласточкин С.В., Канюгин О.И.</b> К вопросу однофазных повреждений обмоток силовых трансформаторов в системе «распределительная сеть–трансформатор» и разработка средства предотвращения их отказов .....	206
<b>Филиппов В.М., Подгорная С.О.</b> К вопросу о повышении энергетической эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей .....	219
<b>Черемисин В.Т., Третьяков Е.А., Головнев Г.Е.</b> Управление секционированием и режимами потоков мощности в интеллектуальных распределительных электрических сетях железных дорог .....	225
<b>Правила для авторов.....</b>	238

CONTENTS

<i>Afanasyev A.</i> CALCULATION OF MAGNETIC GEAR BY METHOD OF RESIDUAL INDUCTION OF MODULATOR RODS .....	5
<i>Afanasyev V., Tarasov V., Kovalev V.</i> ELECTRIC MODES OF ELECTROTHERMAL GASIFIERS .....	15
<i>Belyanin A., Maslov A., Smirnova I., Shirokin M.</i> LOCALIZATION METHOD FOR RECOGNITION OF INTERNAL DAMAGES OF A POWER TRANSFORMER THAT HAPPEN TO THE BACKGROUND OF EXTERNAL ONES.....	22
<i>Belyanin A., Maslov A., Smirnova I., Shirokin M.</i> STUDY OF SENSITIVITY OF DIFFERENTIAL CURRENT PROTECTION OF TRANSFORMER TO COMPLEX TYPES OF DAMAGE .....	29
<i>Bulychev A., Vasilev D., Silanov D.</i> TWO-LEVEL DIGITAL CONTROL AND RELAY PROTECTION SYSTEMS OF SUBSTATION OF FACILITIES OF DISTRIBUTION GRIDS 110/35/10(6) KV .....	36
<i>Vanin V., Vanin I., Popov M.</i> IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENT OF THE PRIMARY VOLTAGE IN POWER SYSTEMS .....	46
<i>Gorbachevsky N., Sidorov S., Aflyatunov I., Gavrilov E.</i> ACTIVE RECTIFIER WITH FULLY CONTROLLED THYRISTORS ON NETWORK INPUT OF ELECTRIC DRIVE.....	53
<i>Gushchin I.</i> ANALYSIS OF DYNAMICS OF LAYER-BY-LAYER FRACTURE OF CFRP BY LIGHTNING CURRENTS .....	63
<i>Dymov I., Kotin D., Pankrats Yu.</i> STATE-FEEDBACK BASED ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM OF ACTIVE ELECTROMAGNETIC BEARING .....	69
<i>Egorov E., Egorov G., Luiya N.</i> FEATURES OF MEASUREMENT OF RECOVERABLE ELECTRICAL STRENGTH IN LOW-VOLTAGE AC CONTACTORS .....	78
<i>Ilgachev A., Knyazev V.</i> CALCINING OVEN SIDEWALL CONSTRUCTION INFLUENCE ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ITS HEATING ENCLOSURE .....	87
<i>Korobko G., Shilov M., Korobko I.</i> DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS OF FREQUENCY CONVERTER FOR DIESEL GENERATOR WITH VARIABLE FREQUENCY ROTATION AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS.....	97
<i>Koshcheev M., Slavutskiy A., Slavutskii L.</i> SIMPLE NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR WAVE METHOD OF FAULT LOCATION IN POWER NETWORKS .....	110
<i>Kuzmin A., V Medvedev., Petrov M., Khadyev I.</i> TO THE PROBLEM OF ASSESSMENT (SELECTION) OF PARAMETERS OF ACTIVE PART OF EXTINGUISHING REACTOR WITH DISTRIBUTED GAPS.....	119

<b><i>Kuzmin D., Kravchenko G., Lvova E., Makarov A., Stolyarov S.</i></b>	
METHOD OF CONTROL OF CONDITION OF CABLE LINE AND ITS BASIC ELEMENTS IN OPERATIONAL MODE.....	127
<b><i>Kurir V.</i></b>	
ON MODELING HYDROGENERATOR WITH TURBINE IN MATLAB/SIMULINK.....	133
<b><i>Litsin K.</i></b>	
ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF AC VOLTAGE ELECTRIC DRIVE SYSTEM WITH INTERMEDIATE TRANSFORMERS .....	142
<b><i>Makarov A., Makarov V., Afanasiev A.</i></b>	
OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH CONSTANT SPEED.....	150
<b><i>Makarov A., Makarov V., Afanasiev A.</i></b>	
OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH CONSTANT TORQUE.....	159
<b><i>Moiseev D., Galanina N., Ivanova N.</i></b>	
DEVELOPMENT OF METHODS FOR EXPRESS ANALYSIS OF EMERGENCY CONDITIONS OF ELECTRICAL SYSTEM.....	167
<b><i>Nesterin V., Romanov R., Matyunin A., Myasnikova T.</i></b>	
NON-CONTACT HIGH-TEMPERATURE ANGULAR SENSORS ON THE BASIS OF SUPERMINIATURE MAGNETIC ELECTRIC MACHINE .....	176
<b><i>Obychaiko D., Shikhin V.</i></b>	
POWER EQUIPMENT OPERATIONAL RELIABILITY ENSURING VIA INDICATIVE DECISION-MAKING DIAGRAMS .....	185
<b><i>Popov D.</i></b>	
DEFINITION OF NECESSARY PARAMETERS OF DC LINK OF ELECTRICAL SYSTEMS FOR TESTING INDUCTION MACHINES .....	195
<b><i>Rybakov L., Lastochkin S., Kanyugin O.</i></b>	
ON THE ISSUE OF SINGLE-PHASE DAMAGE TO WINDINGS OF POWER TRANSFORMERS IN THE SYSTEM «DISTRIBUTION NETWORK-TRANSFORMER» AND DEVELOPMENT OF MEANS TO PREVENT THEIR FAILURE.....	206
<b><i>Philippov V., Podgornaia S.</i></b>	
ON THE PROBLEM OF INCREASE IN ENERGY EFFICIENCY OF RECTIFIED-INVERTER CONVERTERS .....	219
<b><i>Cheremisin V., Tretyakov E., Golovnev G.</i></b>	
CONTROL OF SECTIONING AND POWER FLOW MODES IN INTELLIGENT DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS FOR RAILWAYS .....	225
<b>RULES FOR THE AUTHORS.....</b>	<b>238</b>

# **ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

## **Электротехника и энергетика**

**№ 3 2019**

Редактор ***Н.И. Завгородняя***  
Технический редактор ***Н.Н. Иванова***

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзоре)  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-66541 от 21.07.2016 г.

Сдано в набор 01.07.19. Подписано в печать 13.09.19. Выход в свет 25.09.19.  
Формат 70×100/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 19,59. Уч.-изд. л. 18,46.  
Тираж 200 экз. Заказ № 1096. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя  
428015, Чебоксары, Московский просп., 15

Типография Чувашского университета  
428015, Чебоксары, Московский просп., 15