

ISSN 1810-1909

Вестник

ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 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)

Н.А. Галанина, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

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

Ю.К. Евдокимов, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

А.Г. Коробейников, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, 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)

В.А. Песошин, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

А.А. Потапов, доктор физико-математических наук, профессор (Москва, Россия)

В.В. Сагарадзе, доктор технических наук, член-корреспондент РАН (Екатеринбург, Россия)

И.Г. Сидоркина, доктор технических наук, профессор (Йошкар-Ола, Россия)

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

Л.М. Шарнин, 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, vestnik@chuvsu.ru
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

ISSN 1810-1909

Vestnik

CHUVASHSKOGO UNIVERSITETA

№ 1 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)
N.A. Galanina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Cheboksary, Russia)
L.S. Zimin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Samara, Russia)
Yu.K. Evdokimov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)
A.G. Korobeinikov, Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg, 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)
V.A. Pesoshin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)
A.A. Potapov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow, Russia)
V.V. Sagaradze, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)
I.G. Sidorkina, Doctor of Technical Sciences, Professor (Yoskar-Ola, Russia)
A.I. Fedotov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)
L.M. Sharnin, 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, vestnik@chuvsu.ru
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

УДК 621.313

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ

РАСЧЁТ МАГНИТНОГО РЕДУКТОРА МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ФУРЬЕ*

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 расчета может использоваться для оценки функциональных свойств обоих названных типов этих устройств, оперируя двумя декартовыми x , y или двумя цилиндрическими координатами r , φ . В каждой из активных областей магнитного редуктора (воздушных зазорах, магнитах, ярмах 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 $x(r)$, другая – от координаты $y(\varphi)$. 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 (ярма, стержни модулятора) предполагаются фиксированными, значения которых 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, так как последние имеют принципиально разные числа полюсов и, следовательно, имеют 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, воздействующих на роторы и статор. Для его реализации достаточно набора функций, имеющихся в математической программе Mathcad.

Магнитный редуктор конструктивно представляет собой достаточно сложное электромеханическое устройство (рис. 1), содержащее в одноступенчатом исполнении два ротора и два воздушных зазора [2, 4].

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

Уточнённое определение функциональных свойств магнитного редуктора обычно производится на основе численного расчёта [1].

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

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-48-210004 р_поволжье_a.

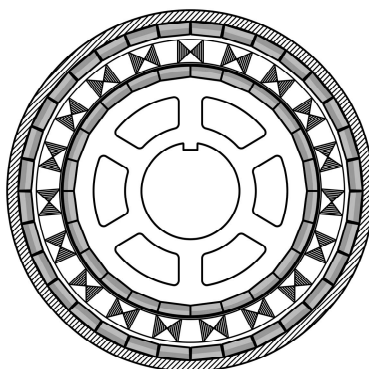


Рис. 1. Поперечный разрез магнитного редуктора на постоянных магнитах

Исходные уравнения магнитного поля магнитного редуктора. Рассматриваемое магнитное поле в магнитном редукторе с постоянными магнитами потенциально¹ и удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа $\nabla^2 u = 0$, которое будем решать методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из семи магнитных сред, стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Магнитная среда в зоне нахождения модулятора (полоса 4 шириной h_z на рис. 2) представляется состоящей из z радиальных участков с тангенциальным размером, равным зубцовому шагу t_z модулятора, одна часть которых (зубец модулятора шириной b_z) имеет относительную магнитную проницаемость μ_z , а другая (паз модулятора шириной $(t_z - b_z)$) – магнитную проницаемость, равную единице.

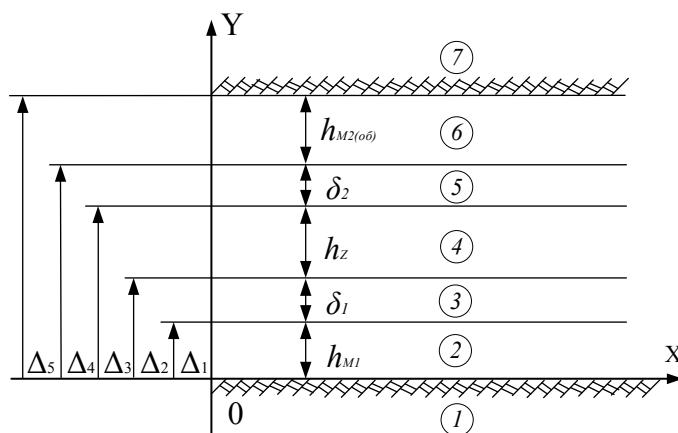


Рис. 2. Активные зоны магнитного редуктора

¹ При наличии трёхфазной обмотки на статоре регулируемого редуктора его магнитное поле будет содержать вихревую составляющую, которая локализуется в местах расположения проводников статорной обмотки.

В результате магнитная проницаемость в среде 4 будет изображаться периодической функцией $\mu_z(x)$, зависящей только от координаты x (рис. 3).

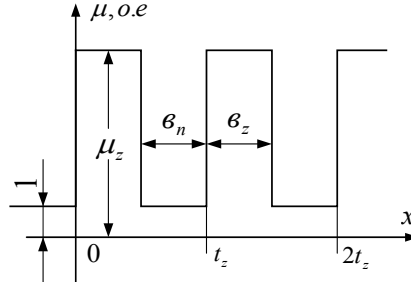


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости в области модулятора

Ищем вначале скалярные магнитные потенциалы $u_i(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{iy}(x, y)$ в средах ($i = 1 - 7$ на рис. 2), вызванные магнитами внутреннего ротора, в следующем виде:

$$u_1(x, y) = A_1 e^{k\sigma_1 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x,$$

$$B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p k\sigma_1 A_1 e^{k\sigma_1 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \quad y \leq 0, \quad (1)$$

где $\sigma_1 = 2\pi/t_{m1}$; t_{m1} – пространственный период магнитов внутреннего ротора; μ_p – относительная магнитная проницаемость ярма внутреннего ротора.

$$u_2(x, y) = (B_2 e^{k\sigma_1 y} + C_2 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x,$$

$$B_{2y}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = \mu_0 (-k\sigma_1 B_2 e^{k\sigma_1 y} + k\sigma_1 C_2 e^{-k\sigma_1 y} + M_{1k}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x = \quad (2)$$

$$= \mu_0 k\sigma_1 \left(-B_2 e^{k\sigma_1 y} + C_2 e^{-k\sigma_1 y} + \frac{M_{1k}}{k\sigma_1} \right) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \quad 0 \leq y \leq h_{m1},$$

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

$$u_3(x, y) = (B_3 e^{k\sigma_1 y} + C_3 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x,$$

$$B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_1 (B_3 e^{k\sigma_1 y} - C_3 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \quad h_{m1} \leq y \leq h_{m1} + \delta_1, \quad (3)$$

где δ_1 – длина внутреннего воздушного зазора, с учётом коэффициента этого зазора (коэффициента Картера).

$$u_4(x, y) = (B_4 e^{k\sigma_1 y} + C_4 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x,$$

$$B_{4y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_4}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_1 (B_4 e^{k\sigma_1 y} - C_4 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \quad (4)$$

$$h_{m1} + \delta_1 \leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z,$$

где h_z – толщина модулятора.

$$\begin{aligned}
u_5(x, y) &= (B_5 e^{k\sigma_1 y} + C_5 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
B_{5y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_5}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_1 (B_5 e^{k\sigma_1 y} - C_5 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
h_{m1} + \delta_1 + h_z &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2,
\end{aligned} \quad (5)$$

где δ_2 – длина наружного (от модулятора) воздушного зазора, с учётом коэффициента этого зазора (коэффициента Картера).

$$\begin{aligned}
u_6(x, y) &= (B_6 e^{k\sigma_1 y} + C_6 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
B_{6y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_6}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_1 (B_6 e^{k\sigma_1 y} - C_6 e^{-k\sigma_1 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2},
\end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned}
u_7(x, y) &= A_7 e^{-k\sigma_1 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
B_{7y}(x, y) &= -\mu_0 \mu_c \frac{\partial u_7}{\partial y} = \mu_0 \mu_c k\sigma_1 A_7 e^{-k\sigma_1 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_1 x, \\
h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2} &\leq y \leq h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2} + h_{ac},
\end{aligned} \quad (7)$$

где μ_c – относительная магнитная проницаемость ярма статора; h_{ac} – высота ярма статора.

Приравнявая магнитные потенциалы и радиальные магнитные индукции на границах сред, находим из уравнений (1)–(7) равенства, связывающие неизвестные постоянные

$$A_1 - B_2 - C_2 = 0, \quad (8)$$

$$-B_2 + C_2 - \mu_p A_1 = -m_{1k}, \quad (9)$$

$$\text{где } m_{1k} = \frac{M_{1k}}{k\sigma_1},$$

$$B_2 e^{k\sigma_1 \Delta_1} + C_2 e^{-k\sigma_1 \Delta_1} - B_3 e^{k\sigma_1 \Delta_1} - C_3 e^{-k\sigma_1 \Delta_1} = 0, \quad (10)$$

$$-B_2 e^{k\sigma_1 \Delta_1} + C_2 e^{-k\sigma_1 \Delta_1} + B_3 e^{k\sigma_1 \Delta_1} - C_3 e^{-k\sigma_1 \Delta_1} = -m_{1k}, \quad (11)$$

$$B_3 e^{k\sigma_1 \Delta_2} + C_3 e^{-k\sigma_1 \Delta_2} - B_4 e^{k\sigma_1 \Delta_2} - C_4 e^{-k\sigma_1 \Delta_2} = 0, \quad (12)$$

$$-B_3 e^{k\sigma_1 \Delta_2} + C_3 e^{-k\sigma_1 \Delta_2} + B_4 e^{k\sigma_1 \Delta_2} - C_4 e^{-k\sigma_1 \Delta_2} = 0, \quad (13)$$

$$B_4 e^{k\sigma_1 \Delta_3} + C_4 e^{-k\sigma_1 \Delta_3} - B_5 e^{k\sigma_1 \Delta_3} - C_5 e^{-k\sigma_1 \Delta_3} = 0, \quad (14)$$

$$-B_4 e^{k\sigma_1 \Delta_3} + C_4 e^{-k\sigma_1 \Delta_3} + B_5 e^{k\sigma_1 \Delta_3} - C_5 e^{-k\sigma_1 \Delta_3} = 0, \quad (15)$$

$$B_5 e^{k\sigma_1 \Delta_4} + C_5 e^{-k\sigma_1 \Delta_4} - B_6 e^{k\sigma_1 \Delta_4} - C_6 e^{-k\sigma_1 \Delta_4} = 0, \quad (16)$$

$$-B_5 e^{k\sigma_1 \Delta_4} + C_5 e^{-k\sigma_1 \Delta_4} + B_6 e^{k\sigma_1 \Delta_4} - C_6 e^{-k\sigma_1 \Delta_4} = 0, \quad (17)$$

$$B_6 e^{k\sigma_1 \Delta_5} + C_6 e^{-k\sigma_1 \Delta_5} - A_7 e^{-k\sigma_1 \Delta_5} = 0, \quad (18)$$

$$-B_6 e^{k\sigma_1 \Delta_5} + C_6 e^{-k\sigma_1 \Delta_5} + \mu_c A_7 e^{-k\sigma_1 \Delta_5} = 0, \quad (19)$$

где $\Delta_1 = h_{m1}$, $\Delta_2 = h_{m1} + \delta_1$, $\Delta_3 = h_{m1} + \delta_1 + h_z$, $\Delta_4 = h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2$, $\Delta_5 = h_{m1} + \delta_1 + h_z + \delta_2 + h_{m2(06)}$.

Когда источником магнитного поля в редукторе будут магниты (или обмотка) статора, находящиеся в полосе 5 (рис. 2), уравнения (1)–(7) для магнитных потенциалов и магнитных индукций будут иметь такой вид:

$$\begin{aligned} u_1(x, y) &= \tilde{A}_1 e^{k\sigma_2 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{1y}(x, y) &= -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p k\sigma_2 \tilde{A}_1 e^{k\sigma_2 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ y &\leq 0; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} u_2(x, y) &= (\tilde{B}_2 e^{k\sigma_2 y} + \tilde{C}_2 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{2y}(x, y) &= \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = \mu_0 (-k\sigma_2 \tilde{B}_2 e^{k\sigma_2 y} + k\sigma_2 \tilde{C}_2 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ 0 &\leq y \leq \Delta_1; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} u_3(x, y) &= (\tilde{B}_3 e^{k\sigma_2 y} + \tilde{C}_3 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{3y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_2 (\tilde{B}_3 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_3 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ \Delta_1 &\leq y \leq \Delta_2; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} u_4(x, y) &= (\tilde{B}_4 e^{k\sigma_2 y} + \tilde{C}_4 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{4y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_4}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_2 (\tilde{B}_4 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_4 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ \Delta_2 &\leq y \leq \Delta_3; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} u_5(x, y) &= (\tilde{B}_5 e^{k\sigma_2 y} + \tilde{C}_5 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{5y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_5}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_2 (\tilde{B}_5 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_5 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ \Delta_3 &\leq y \leq \Delta_4; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} u_6(x, y) &= (\tilde{B}_6 e^{k\sigma_2 y} + \tilde{C}_6 e^{-k\sigma_2 y}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{6y}(x, y) &= -\mu_0 \frac{\partial u_6}{\partial y} = -\mu_0 k\sigma_2 (\tilde{B}_6 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_6 e^{-k\sigma_2 y} + M_{2k}) \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ \Delta_4 &\leq y \leq \Delta_5; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} u_7(x, y) &= \tilde{A}_7 e^{-k\sigma_2 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ B_{7y}(x, y) &= -\mu_0 \mu_c \frac{\partial u_7}{\partial y} = \mu_0 \mu_c k\sigma_2 \tilde{A}_7 e^{-k\sigma_2 y} \mu_z(x) \cos k\sigma_2 x, \\ \Delta_5 &\leq y \leq \Delta_5 + h_{ac}. \end{aligned} \quad (26)$$

где $\sigma_2 = 2\pi/t_{m2}$; t_{m2} – пространственный период магнитов статора.

Новые постоянные Фурье будут находиться из системы линейных уравнений

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

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

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

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

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

$$-\tilde{B}_3 e^{k\sigma_2 \Delta_2} + \tilde{C}_3 e^{-k\sigma_2 \Delta_2} + \tilde{B}_4 e^{k\sigma_2 \Delta_2} - \tilde{C}_4 e^{-k\sigma_2 \Delta_2} = 0, \quad (32)$$

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

$$-\tilde{B}_4 e^{k\sigma_2 \Delta_3} + \tilde{C}_4 e^{-k\sigma_2 \Delta_3} + \tilde{B}_5 e^{k\sigma_2 \Delta_3} - \tilde{C}_5 e^{-k\sigma_2 \Delta_3} = 0, \quad (34)$$

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

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

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

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

где $m_{2k} = \frac{M_{2k}}{k\sigma_2}$.

После нахождения постоянных в результате решения системы линейных уравнений (8)–(19) и (27)–(38) можем найти магнитные потенциалы и магнитные индукции во всех активных областях магнитного редуктора, используя формулы (1)–(7) и (20)–(26). Например, для магнитных индукций в воздушных зазорах δ_1 и δ_2 будут справедливы выражения

$$B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \mu_z(x) \left[\sigma_1 \sum_{k=1}^{\infty} k (B_3 e^{k\sigma_1 y} - C_3 e^{-k\sigma_1 y}) \cos k\sigma_1 x + \right. \\ \left. + \sigma_2 \sum_{k=1}^{\infty} k (\tilde{B}_3 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_3 e^{-k\sigma_2 y}) \cos k\sigma_2 x \right], \quad \Delta_1 \leq y \leq \Delta_2, \quad (39)$$

$$B_{5y}(x, y) = -\mu_0 \mu_z(x) \left[\sigma_1 \sum_{k=1}^{\infty} k (B_5 e^{k\sigma_1 y} - C_5 e^{-k\sigma_1 y}) \cos k\sigma_1 x + \right. \\ \left. + \sigma_2 \sum_{k=1}^{\infty} k (\tilde{B}_5 e^{k\sigma_2 y} - \tilde{C}_5 e^{-k\sigma_2 y}) \cos k\sigma_2 x \right], \quad \Delta_3 \leq y \leq \Delta_4. \quad (40)$$

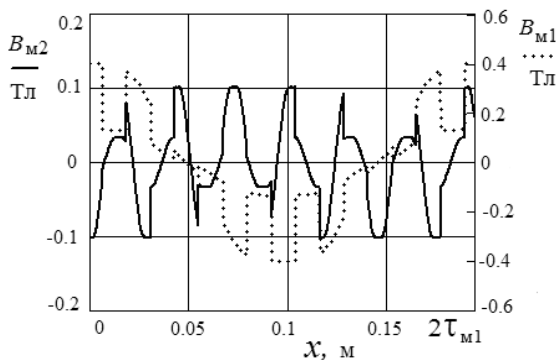


Рис. 3. Магнитная индукция в воздушном зазоре δ_1 (область 3) на интервале периода магнитов ротора, вызванная магнитами статора (сплошная линия) и магнитами ротора (пунктирная линия)

По уравнению (39) на рис. 3 построены кривые радиальных составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре δ_1^1 .

На рис. 4 построены кривые электромагнитных моментов тихоходного M_m и быстроходного M_p роторов с помощью формулы [3]

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

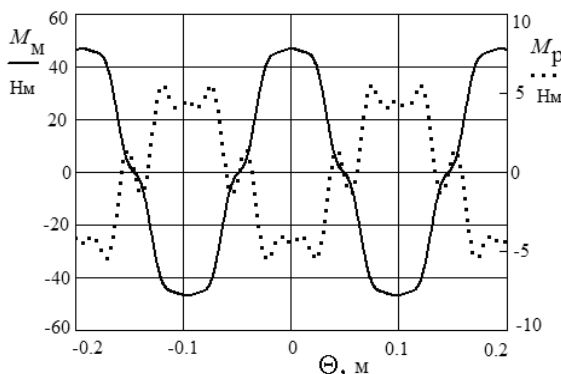


Рис. 4. Электромагнитные моменты магнитного редуктора:

M_m – модулятора, M_p – быстроходного ротора;

$\Theta = \Theta_1 - \tau/2$ – линейный сдвиг магнитов статора и ротора

Выводы. 1. Представленный в статье 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., Ефимов В.В., Никитин В.М. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора // Электричество. 2014. № 4. С. 62–68.
2. 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.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
4. 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).

¹ Рассматривается магнитный редуктор с параметрами: наружный диаметр модулятора 147,5 мм, длина 115 мм, число стержней модулятора $z = 19$, число пар полюсов статора $p_1 = 17$, число пар полюсов ротора $p_1 = 2$, остаточная индукция магнитов $B_r = 1$ Тл.

A. AFANASYEV

CALCULATION OF MAGNETIC GEAR
BY SEPARATION FOURIER VARIABLES

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

Magnetic gears can be subdivided into two groups: unmanaged, made on permanent magnets, and controlled, containing, in addition to magnets, the stator winding with a frequency converter. The first ones have a fixed coefficient of magnetic reduction, the second ones can have it to change 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 (x, y) or two cylindrical coordinates (r, φ). In each of the active regions of the magnetic gear (air gap, the magnets, the yokes of the stator and rotor, the rotor with open teeth and grooves (the modulator) required variables the magnetic potential and magnetic induction are presented in the form of product of two functions, the first of which depends on the coordinate $x(r)$, the other depends on the coordinate $y(\varphi)$. These functions are also multiplied by some unknown constants whose values are from the boundary conditions of the magnetic field on the lines of conjugation of the active regions. The magnetic permeability of ferromagnetic regions (yoke, modulator rods) is assumed to be fixed, the values of which are corrected according to the calculation of the magnetic circuit of the reducer. 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 unknown constants is performed twice for each source, since the latter have fundamentally different numbers of poles and, therefore, have 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 stator. For its implementation, a set of functions available in the Mathcad mathematical program is sufficient.

References

1. Afanasiev A.A., Yefimov V.V., Nikitin V.M. *Chislennoe matematicheskoe modelirovanie odnostupenchatogo magnitnogo reduktora* [Numerical mathematical modeling of a single-stage magnetic reducer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 4, pp. 62–68.
2. Dergachev P.A., Kiryukhin V.P., Kulaev P., Kurbatov P. A., Molokanov O. N. *Analiz dvukhstupenchatogo magnitnogo mul'tiplikatora* [Two-stage magnetic multiplier analysis]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2012, no. 5, pp. 39–46.
3. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy conversion in electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 312 p.
4. Jian Wang, Klai Atallah, magnetic Continuously Variable Device. *IEEE Transactions on magnetic*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 2815–2818.

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

Формат цитирования: Афанасьев А.А. Расчёт магнитного редуктора методом разделения переменных Фурье // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 5–12.

УДК 621.313

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ, В.А. ВАТКИН, В.С. ГЕНИН,
В.В. ЕФИМОВ, В.А. НЕСТЕРИН, Р.А. РОМАНОВ**АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ БЕСПАЗОВОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ,
НЕ ИМЕЮЩЕГО СТАТОРНОГО СЕРДЕЧНИКА**

Ключевые слова: граничные условия, стыковочные постоянные, магнитные проницаемости, бесконечные ряды, плотность тока, вихревая компонента поля.

На базе метода разделения переменных Фурье получена двухмерная аналитическая модель беспазового вентильного двигателя с постоянными магнитами. В общую расчетную область модели входят как участки с постоянным магнитом, немагнитными зазорами, так и ферромагнитное ярмо сердечника ротора со своей магнитной проницаемостью. Намагниченность магнитов считается заданной и выражается тригонометрическим рядом с известными коэффициентами. Магнитное поле обмотки статора представлено как потенциальной, так и дополнительной составляющей, учитывающей вихревой характер поля в обмоточном слое. Источником потенциального магнитного поля статора является бесконечно тонкий магнитный лист, расположенный на внешней стороне токового слоя обмотки статора. В качестве потенциала магнитного листа выступает МДС обмотки статора, представленная тригонометрическим рядом.

Метод разделения переменных Фурье позволяет получить математическую модель беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя с учётом реальной геометрии высокоэнергетических постоянных магнитов и конечной магнитной проницаемости ярм сердечников статора и ротора. Эта двухмерная задача была решена К.М. Поливановым применительно к расчёту магнитного поля намагниченной ленты [3]. Полученное решение соответствует устройству без статорной обмотки.

Расчётная схема индуктора беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя, содержащая три среды, показана на рис. 1.

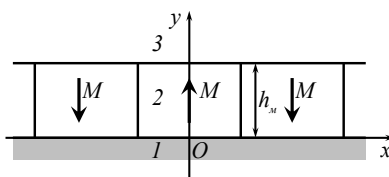


Рис. 1. Расчётная схема задачи с тремя средами:

- 1 – ферромагнитное ярмо ротора; 2 – постоянные магниты с намагниченностью M ;
3 – воздушная среда

Решаем задачу при следующих допущениях:

- 1) ферромагнитные среды линейны (их магнитные проницаемости постоянны);
- 2) вектор намагниченности магнитов имеет только одну компоненту $M = M_y$;
- 3) справедлив принцип суперпозиции магнитных полей магнитов ротора (индуктора) и токов обмотки статора.

1. Расчёт магнитного поля магнитов ротора

1.1. Исходные уравнения. Рассматриваемое магнитное поле потенциально и удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа $\nabla^2 u = 0$, которое будем решать методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из трёх названных выше сред, стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Ищем скалярные магнитные потенциалы $u_n(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(x, y)$ в средах ($n = 1, 2, 3$) в следующем виде:

$$\begin{cases} u_1(x, y) = Ae^{k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p k\sigma A e^{k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ y \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_2(x, y) = (Be^{k\sigma y} + Ce^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x, \\ B_{2y}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial y} + M_{yk} \cos k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 (-k\sigma B e^{k\sigma y} + k\sigma C e^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x + \mu_0 M_{yk} \cos k\sigma x, \\ 0 \leq y \leq h_m, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_3(x, y) = De^{-k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0 k\sigma D e^{-k\sigma y} \cos k\sigma x, \\ h_m \leq y \leq \infty, \end{cases} \quad (3)$$

где μ_p – относительная магнитная проницаемость ярма ферромагнитного сердечника ротора; $\sigma = \frac{\pi}{\tau}$.

Предполагается, что зависимость намагниченности $M = M(x)$ магнитов ротора известна и может быть представлена тригонометрическим рядом¹

$$M(x) = \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \cos k\sigma x. \quad (4)$$

1.2. Расчёт постоянных. Входящие в уравнения (1)–(4) четыре постоянных A, B, C, D находим из следующих четырёх граничных условий:

$$\begin{aligned} u_1(x, 0) &= u_2(x, 0), \\ A &= B + C, \\ B_{1y}(x, 0) &= B_{2y}(x, 0), \end{aligned} \quad (5)$$

¹ Намагниченность магнита можно представить равенством $M = M_r + k_m H$. Тогда выражение для магнитной индукции имеет вид: $B = \mu_0 [M_r + (1 + k_m) H]$. У высокоэнергетических магнитов относительная магнитная проницаемость магнитов $(1 + k_m)$ близка к единице (коэффициент восприимчивости $k_m \approx 0$). Поэтому намагниченность M в формуле (4) можно принять равной остаточной намагниченности M_r .

$$-\mu_p A = -B + C + m_k, \quad (6)$$

$$u_2(x, h_m) = u_3(x, h_m),$$

$$B\varepsilon + C\varepsilon^{-1} = D\varepsilon^{-1}, \quad (7)$$

$$B_{2y}(x, h_m) = B_{3y}(x, h_m),$$

$$-B\varepsilon + C\varepsilon^{-1} + m_k = D\varepsilon^{-1}, \quad (8)$$

где $m_k = \frac{M_{yk}}{k\sigma}$; $\varepsilon = e^{k\sigma h_m}$; $\varepsilon^{-1} = e^{-k\sigma h_m}$; μ_p – относительная магнитная проницаемость ярма ротора.

Из решения системы четырёх алгебраических уравнений (5)–(8) находим искомые постоянные

$$A = \frac{m_k}{2}(\varepsilon^{-1} - 1 + \alpha\varepsilon^{-1} - \alpha), \quad (9)$$

$$B = \frac{m_k \varepsilon^{-1}}{2}, \quad (10)$$

$$C = \frac{m_k}{2}(-1 + \alpha\varepsilon^{-1} - \alpha), \quad (11)$$

$$D = \frac{m_k}{2}(-1 + \alpha\varepsilon^{-1} - \alpha + \varepsilon), \quad (12)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1 - \mu_p}{1 + \mu_p}.$$

Если принять для ярма сердечника ротора относительную магнитную проницаемость $\mu_p = \infty$, то постоянные (9)–(12) будут равны

$$A = 0, \quad (13)$$

$$B = -C = \frac{m_k}{2}\varepsilon^{-1}, \quad (14)$$

$$D = \frac{m_k}{2}(\varepsilon - \varepsilon^{-1}). \quad (15)$$

1.3. Магнитная индукция в средах 2 и 3. Применительно к значениям постоянных (13)–(15) будем иметь следующие выражения для магнитной индукции в среде 3 ($h_m \leq y \leq \infty$), создаваемой магнитами ротора:

$$B_{3x}^p(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial x} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} k\sigma D e^{-k\sigma y} \sin k\sigma x =$$

$$= \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \operatorname{sh}(k\sigma h_m) e^{-k\sigma y} \sin k\sigma x, \quad (16)$$

$$B_{3y}^p(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} k\sigma (D e^{-k\sigma y}) \cos k\sigma x =$$

$$= \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \operatorname{sh}(k\sigma h_m) e^{-k\sigma y} \cos k\sigma x. \quad (17)$$

По формулам (16), (17) рассчитаны значения магнитной индукции в немагнитной среде 3 микродвигателя¹, показанные на рис. 2. Видим, что максимум радиальной составляющей магнитной индукции на окружности, по которой располагаются проводники обмотки статора, составляет 0,3 Тл. Максимум тангенциальной индукции, приходящийся на межполюсную ось, равен 0,5 Тл.

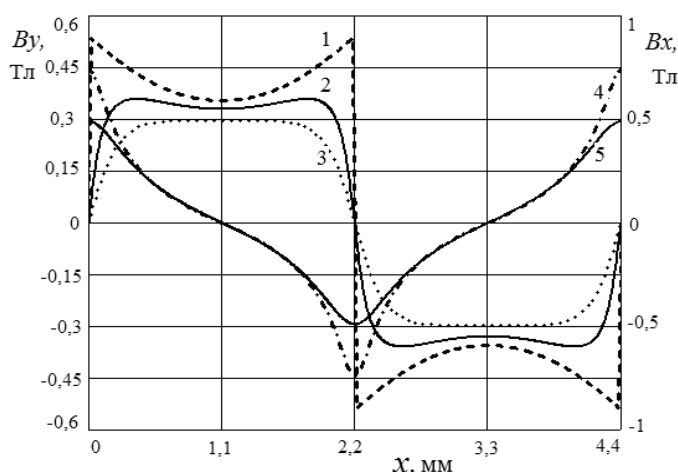


Рис. 2. Магнитная индукция в воздушном зазоре.

Составляющие по оси y : 1 – на поверхности магнитов;

2 – на внутренней поверхности каркаса обмотки ($y = 0,55$ мм);

3 – на окружности с проводниками обмотки ($y = 0,68$ мм).

Составляющие по оси x : 4 – на внутренней поверхности каркаса обмотки ($y = 0,55$ мм);

5 – на окружности с проводниками обмотки ($y = 0,68$ мм)

Используя значения постоянных (13)–(15), можно по формулам (2) найти также выражения для магнитной индукции в среде 2 ($0 \leq y \leq h_m$)

$$B_{2x}^p(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_2}{\partial x} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} e^{-k\sigma h_m} \operatorname{sh} k\sigma y \sin k\sigma x, \quad (18)$$

$$B_{2y}^p(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \cos k\sigma x \right) = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \left(-e^{-k\sigma h_m} \operatorname{ch} k\sigma y + 1 \right) \cos k\sigma x. \quad (19)$$

2. Расчёт магнитного поля обмотки статора

Магнитное поле $\mathbf{H}^c$, созданное током обмотки статора, является суммой потенциального $\mathbf{H}_p^c$ и дополнительного $\mathbf{H}_0^c$ магнитных полей [2]

$$\mathbf{H}^c = \mathbf{H}_p^c + \mathbf{H}_0^c. \quad (20)$$

¹ Макетный образец магнитоэлектрического микродвигателя, у которого отсутствует ферромагнитный статорный сердечник, имеет следующие технические данные: диаметр ротора 1,4 мм; длина ротора 8 мм; высота магнита 0,45 мм; диаметр вала 0,5 мм; диаметр окружности с проводниками обмотки статора 1,8 мм; остаточная индукция неодим-железо-борового магнита 1,08 Тл.

Вектор дополнительного поля $\mathbf{H}_0^c$ находится по несложной формуле

$$\mathbf{H}_0^c = \int_{l_0}^l [\Delta d\mathbf{l}], \quad (21)$$

где Δ – вектор плотности тока в проводниках обмотки.

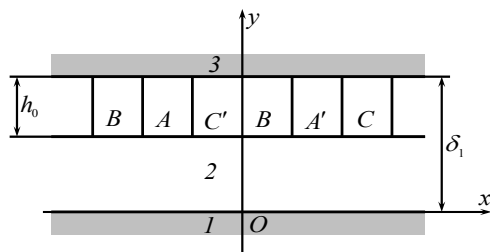


Рис. 3. Немагнитные среды 2 и 3 с фазными зонами обмотки статора и ферромагнитная среда 1 ярма сердечника ротора

При взятии интеграла в формуле (21) в направлении координаты y вектор дополнительного поля $\mathbf{H}_0^c$ будет параллелен координате x , а магнитные листы с потенциалами МДС катушек обмотки статора будут расположены на верхней границе токового слоя¹ (рис. 3)

$$H_0^c = H_{0x}^c = \Delta[y - (\delta_1 - h_0)], \quad (22)$$

где h_0 – толщина медного слоя обмотки статора.

Для бесконечно тонкого магнитного листа (МДС) m фазной обмотки статора справедливо выражение для бегущих волн основной и высших гармоник [4]

$$F^c = \frac{m}{2} \sum_{k=0}^{\infty} F_{\max(2mk \pm 1)} [\sin \omega t \cos(2mk \pm 1)\sigma x \mp \cos \omega t \sin(2mk \pm 1)\sigma x], \quad (23)$$

где $F_{\max(2mk \pm 1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \frac{wk_{w(2mk \pm 1)}}{(2mk \pm 1)p}$; $\sigma = \frac{\pi}{\tau}$.

2.1. Расчёт потенциального магнитного поля обмотки статора. Потенциальное магнитное поле, создаваемое магнитным листом с МДС, будем находить методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из трёх областей на рис. 3, стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Вначале ищем скалярные магнитные потенциалы $u_k(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ky}(x, y)$ в областях ($k = 1, 2, 3$), вызванные косинусной составляющей МДС в формуле (23):

$$F_1 = F_{cv} \cos v\sigma x, \quad (24)$$

где $F_{cv} = \frac{m}{2} F_{\max v} \sin \omega t$; $v = 2mk \pm 1$.

¹ Для расположения дополнительного поля только в токовом слое обмотки устанавливаем на его верхней границе два магнитных листа МДС с противоположными знаками (они, очевидно, в совокупности не будут источниками магнитного поля), линейные плотности токов которых равны $\mp H_{0\max}$. Магнитный лист с плотностью $(-H_{0\max})$, являющийся дельта-функцией $\delta(y - \delta_1)$, при взятии интеграла (21) обнулит дополнительное поле на линии $y = \delta_1$. Второй магнитный лист МДС будет источником потенциального магнитного поля обмотки статора [4].

Будем иметь

$$\begin{cases} u_1(x, y) = A_1 e^{v\sigma y} \cos v\sigma x, \\ B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_p v\sigma A_1 e^{v\sigma y} \cos v\sigma x, \\ y \leq 0, \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} u_2(x, y) = (B_1 e^{v\sigma y} + C_1 e^{-v\sigma y}) \cos v\sigma x, \\ B_{2y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_2}{\partial y} = \mu_0 (-v\sigma B_1 e^{v\sigma y} + v\sigma C_1 e^{-v\sigma y}) \cos v\sigma x, \\ 0 \leq y < \delta_1, \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} u_2(x, \delta_1) = (B_1 e^{v\sigma \delta_1} + C_1 e^{-v\sigma \delta_1} + F_{cv}) \cos v\sigma x, \\ B_{2y}(x, \delta_1) = \mu_0 (-v\sigma B_1 e^{v\sigma \delta_1} + v\sigma C_1 e^{-v\sigma \delta_1}) \cos v\sigma x, \\ y = \delta_1, \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} u_3(x, y) = D_1 e^{-v\sigma y} \cos v\sigma x, \\ B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \mu_c \frac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0 \mu_c v\sigma D_1 e^{-v\sigma y} \cos v\sigma x, \\ y \geq \delta_1, \end{cases} \quad (28)$$

Входящие в эти уравнения четыре постоянных A_1 , B_1 , C_1 , D_1 находим из следующих четырёх граничных условий:

$$\begin{aligned} u_1(x, 0) &= u_2(x, 0), & B_{1y}(x, 0) &= B_{2y}(x, 0), \\ A_1 &= B_1 + C_1, & -\mu_p A_1 &= -B_1 + C_1, \end{aligned} \quad (29) \quad (30)$$

$$\begin{aligned} u_2(x, \delta_1) &= u_3(x, \delta_1), & B_{2y}(x, \delta_1) &= B_{3y}(x, \delta_1), \\ B_1 \varepsilon_1 + C_1 \varepsilon_1^{-1} + F_{cv} &= D_1 \varepsilon_1^{-1}, & -B_1 \varepsilon_1 + C_1 \varepsilon_1^{-1} + F_{cv} &= D_1 \varepsilon_1^{-1}, \end{aligned} \quad (31) \quad (32)$$

где $\varepsilon_1 = e^{v\sigma \delta_1}$.

Уравнения, аналогичные (29)–(32), могли бы получить для синусных составляющих МДС (30)

$$F_2 = F_{sv} \sin v\sigma x, \quad (33)$$

где

$$F_{sv} = \frac{m}{2} F_{maxv} \cos \omega t.$$

Поэтому из решения системы четырёх линейных алгебраических уравнений (29)–(32) можем найти искомые постоянные, которые будут одинаково зависеть как от F_{cv} , так и от F_{sv} . Будем иметь

$$A_1 = -\frac{\varepsilon_1^{-1}}{(1 + \mu_p)} F_{cv(sv)}, \quad (34)$$

$$B_1 = -\frac{\varepsilon_1^{-1}}{2} F_{cv(sv)}, \quad (35)$$

$$C_1 = -\frac{\alpha \varepsilon_1^{-1}}{2} F_{cv(sv)}, \quad (36)$$

$$D_1 = \frac{\varepsilon_1 - \alpha \varepsilon_1^{-1}}{1 + \mu_c} F_{cv(sv)}. \quad (37)$$

Если принять для ярма сердечника ротора относительную магнитную проницаемость $\mu_p = \infty$, то постоянные (34)–(37)

$$A_1 = D_1 = 0, \quad (38)$$

$$B_1 = -C_1 = -\frac{\varepsilon_1^{-1}}{2} F_{cv(sv)}. \quad (39)$$

Применительно к этим значениям постоянных (38)–(39) будем иметь следующие выражения для координатных составляющих магнитной индукции в среде 2 ($0 \leq y \leq \delta_1$), полученные из формул (26):

$$\begin{aligned} B_x^c(x, y) = & \frac{\sqrt{2} m \mu_0 \sigma}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left(k_{w1} e^{-\sigma \delta_1} sh \sigma y \cos(\omega t + \sigma x) - \right. \\ & - \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk-1)} e^{-(2mk-1)\sigma \delta_1} [\sin(2mk-1)\sigma x sh(2mk-1)\sigma y] + \\ & + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk-1)} e^{-(2mk-1)\sigma \delta_1} [\cos(2mk-1)\sigma x sh(2mk-1)\sigma y] - \\ & - \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk+1)} e^{-(2mk+1)\sigma \delta_1} [\sin(2mk+1)\sigma x sh(2mk+1)\sigma y] - \\ & \left. - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk+1)} e^{-(2mk+1)\sigma \delta_1} [\cos(2mk+1)\sigma x sh(2mk+1)\sigma y] \right), \quad (40) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_y^c(x, y) = & \frac{\sqrt{2} m \mu_0 \sigma}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left(k_{w1} e^{-\sigma \delta_1} ch \sigma y \sin(\omega t - \sigma x) + \right. \\ & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk-1)} e^{-(2mk-1)\sigma \delta_1} [\cos(2mk-1)\sigma x ch(2mk-1)\sigma y] + \\ & + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk-1)} e^{-(2mk-1)\sigma \delta_1} [\sin(2mk-1)\sigma x ch(2mk-1)\sigma y] + \\ & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk+1)} e^{-(2mk+1)\sigma \delta_1} [\cos(2mk+1)\sigma x ch(2mk+1)\sigma y] - \\ & \left. - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} k_{w(2mk+1)} e^{-(2mk+1)\sigma \delta_1} [\sin(2mk+1)\sigma x ch(2mk+1)\sigma y] \right). \quad (41) \end{aligned}$$

2.2. Расчёт дополнительного магнитного поля обмотки статора. В соответствии с формулой (22) для дополнительного магнитного поля катушки с переменным током (рис. 4) можно записать выражение для этого поля, создаваемого двухслойной обмоткой фазы А, не имеющей укорочения [1]:

$$B_{0x}^A(x, y) = \frac{4}{\pi} \mu_0 H_A(y) \sum_{k=1}^{\infty} \cos\left(\frac{2k-1}{3} \pi\right) \frac{\sin(2k-1)\sigma x}{2k-1}, \quad (42)$$

где

$$H_A(y) = \frac{3\sqrt{2}Iw}{h_0\tau} [y - (\delta_1 - h_0)] \sin \omega t, \quad \delta_1 - h_0 \leq y \leq \delta_1. \quad (43)$$

Формула (42) получена в результате представления зависимости $H_{0x}^A(x, y)$ на рис. 5 тригонометрическим рядом Фурье.

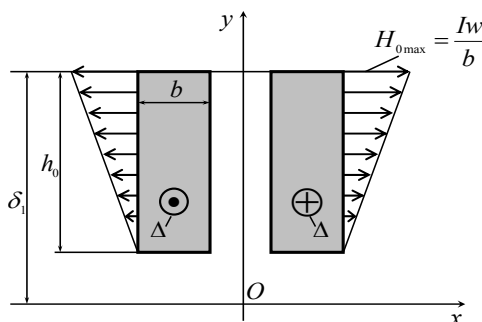


Рис. 4. Дополнительное магнитное поле в токовом сечении катушки, имеющем плотность тока Δ

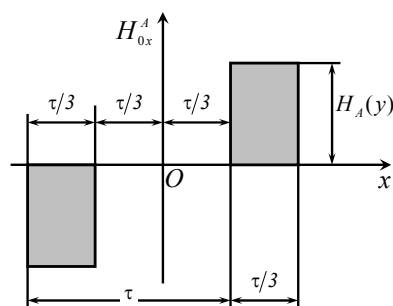


Рис. 5. Дополнительное магнитное поле обмотки фазы А

При укорочении шага катушек y_k на величину $\gamma = \tau - y_k$ обмотку представляем состоящей из двух слоёв, сдвинутых также на эту величину.

Для нижнего, несдвинутого, слоя формула (42) остаётся в силе, только выражение (43) принимает вид

$$H_A(y) = H_{A1}(y) = \frac{3\sqrt{2}Iw}{h_0\tau} [y - (\delta_1 - h_0/2)] \sin \omega t, \quad \delta_1 - h_0/2 \leq y \leq \delta_1. \quad (44)$$

Для верхнего, сдвинутого, слоя будем иметь

$$B_{0x}^A(x, y) = \frac{4}{\pi} \mu_0 H_{A2}(y) \sum_{k=1}^{\infty} \cos\left(\frac{2k-1}{3} \pi\right) \frac{\sin(2k-1)\sigma(x-\gamma)}{2k-1}, \quad (45)$$

где

$$\begin{cases} H_{A2}(y) = \frac{3\sqrt{2}Iw}{h_0\tau} [y - (\delta_1 - h_0)] \sin \omega t; & \delta_1 - h_0 \leq y \leq \delta_1 - h_0/2, \\ H_{A2}(y) = \frac{3\sqrt{2}Iw}{h_0\tau} \frac{h_0}{2} \sin \omega t; & \delta_1 - h_0/2 \leq y \leq \delta_1. \end{cases} \quad (46)$$

Для двух других фаз В и С дополнительное магнитное поле $B_{0x}^B(x, y)$ и $B_{0x}^C(x, y)$ будет вычисляться по формулам (42)–(46), в которых вместо x следует подставить, соответственно, $\left(x - \frac{2}{3}\tau\right)$ и $\left(x - \frac{4}{3}\tau\right)$, вместо $t - (t - T/3)$ и $(t - 2T/3)$.

Выводы. 1. На базе метода разделения переменных Фурье получена двухмерная аналитическая модель беспазового вентильного двигателя с постоянными магнитами.

2. В общую расчетную область модели входят ферромагнитные ярма сердечников статора и ротора со своими магнитными проницаемостями.

3. Магнитное поле обмотки статора представлено как потенциальной, так и дополнительной составляющей, учитывающей вихревой характер поля в обмоточном слое.

Литература

1. Афанасьев А.А. Расчёт магнитного поля проводника в пазу электрической машины // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 4. С. 14–22.
2. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / под ред. А.В. Иванова-Смоленского. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969. 352 с.
4. Сергеев П.С. Электрические машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 280 с.

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

ВАТКИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, главный конструктор по электрическим машинам, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары.

ГЕНИН ВАЛЕРИЙ СЕМЁНОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

ЕФИМОВ ВЯЧЕСЛАВ ВАЛЕРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, главный специалист отдела электрических машин, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (vwyec@mail.ru).

НЕСТЕРИН ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики и технологии электротехнических производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

РОМАНОВ РОМАН АРТЕМЬЕВИЧ – руководитель отдела инновационных разработок, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары.

A. AFANASYEV, V. VATKIN, V. GENIN,
V. EFIMOV, V. NESTERIN, R. ROMANOV

ANALYTICAL CALCULATION OF SLOTLESS MICROMOTOR WITHOUT STATOR CORE

Key words: boundary conditions, joining constants, magnetic permeability, infinite series, current density, vortex field component.

Two-dimensional analytical model of a slotless valve motor with permanent magnets is obtained by the Fourier variable separation method. The general calculation area of the model includes both permanent magnet sections, non-magnetic gaps, and a ferromagnetic core of the rotor with its own magnetic permeability. The magnet magnetization is considered to be given and is expressed in terms of a trigonometric sequence with known coefficients. The magnetic field of the stator winding is presented to be both potential and additional component taking into account the vortex nature of the field in the winding layer. The source of the potential magnetic plate of the stator is an infinitely thin magnetic layer located on the outer side of the current layer of the stator winding. The potential of the magnetic layer is the magnetomotive force of stator winding, represented by a trigonometric sequence.

References

1. Afanasyev A.A. *Raschot magnitnogo polya provodnika v pazu elektricheskoy mashiny* [Calculation of the magnetic field of the conductor in the slot of an electrical machine]. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport* [News of the Academy of Sciences of the USSR. Energy and transport], 1985, no 4, p. 14–22.
2. Ivanov-Smolenskiy A.V., ed., Ivanov-Smolenskiy A.V., Abramkin Yu.V., Vlasov A.I., Kuznetsov V.A. *Universal'nyy metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh* [Universal method of calculating electromagnetic processes in electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 216 p.
3. Polivanov K.M. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Ch. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Chapter 3. The theory of the electromagnetic field]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 352 p.
4. Sergeyev P.S. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical machines]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962, 280 p.

AFANASYEV ALEXANDER – Doctor of Technical Sciences, Professor of Management and computer science in Technical Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).

VATKIN VLADIMOR – Candidate of Technical Sciences, Chief Designer of Electrical Machines, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary.

GENIN VALERIY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Management and Computer Science in Technical Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

EFIMOV VYACHESLAV – Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Department of Electrical Machines, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary (vvye@mail.ru).

NESTERIN VALERIY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electromechanics and Electrical Engineering Technologies Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

ROMANOV ROMAN – Chief of Innovation Department, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary.

Формат цитирования: Афанасьев А.А., Ваткин В.А., Генин В.С., Ефимов В.В., Нестерин В.А., Романов Р.А. Аналитический расчёт беспазового микродвигателя, не имеющего статорного сердечника // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 13–22.

УДК 621.311.019

ББК 3211

Н.М. ЕРМОЛАЕВА, Н.А. КОКОРЕВ, В.А. ЩЕДРИН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРНЫМИ СВЯЗЯМИ

Ключевые слова: методика моделирования, алгоритм расчёта, коэффициенты трансформации, вольтодобавочные трансформаторы, оптимизация режима, системы электроснабжения, неоднородные сети.

Стратегическим направлением современного развития системы электроснабжения является концепция Smart Grid, согласно которой должна кардинально измениться традиционная иерархическая структура электрических сетей с односторонними радиальными потоками электрической энергии и мощности. Питающие и распределительные сети систем электроснабжения постепенно будут преобразованы в сложно-замкнутые, неоднородные, разветвлённые и неструктурированные распределительные сетевые комплексы. Помимо совершенствования основного электрооборудования, новых технологий передачи и распределения электрической электроэнергии, внедрения регуляторов напряжения, компенсаторов реактивной мощности, устройств ограничения токов короткого замыкания, создаваемых на базе силовой электроники, начинают интенсивно разрабатываться автоматизированные системы управления нормальными и аварийными режимами. Такие системы EMS (Energy Management System) управления нормальными режимами созданы и практически используются за рубежом. В состав объектов систем EMS входят комплексы средств расчёта и анализа состояния систем электроснабжения и комплексы средств текущего планирования электрических нагрузок, выбора состава работающих агрегатов различных источников ЭЭ и оптимизации их режимов работы.

Оптимизация режимов электрических систем – один из важнейших факторов экономии топливно-энергетических ресурсов, обеспечивающих снижение потерь активной электроэнергии и обеспечение качества электроэнергии в электрических сетях за счёт малозатратных мероприятий [1, 2].

Оперативная оптимизация рабочих режимов сложноразветвлённых и неоднородных электрических сетей в процессе текущей эксплуатации путём комплексного использования регулирования источников реактивной мощности, коэффициентов трансформации основных и вольтодобавочных трансформаторов остаётся во многих случаях нереализованной [7, 8].

В статье предлагается методика определения оптимальных коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов с продольно-поперечным регулированием, осуществляемым включением в нейтраль вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ).

Из-за неоднородности сети и наличия в контурах трансформаторных связей возникают уравнивающие токи, вызывающие дополнительные потери активной мощности. Уравнивающие потоки мощности можно устранить или уменьшить путём создания принудительного потокораспределения с помощью ВДТ, осуществляющего продольно-поперечное регулирование [3]. Поэтому в условиях эксплуатации экономически целесообразно оптимизировать установившиеся режимы работы электроэнергетической системы путём комплексного использования ВДТ в нейтральных и регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) основных

трансформаторов и автотрансформаторов, причём такое изменение коэффициентов трансформации в пределах диапазона регулирования не требует дополнительных капитальных вложений, если ВДТ уже установлены.

Экономичным потокораспределением [6] принято называть потокораспределение, соответствующее минимуму потерь активной мощности. Режим с минимумом потерь активной мощности в сетях с высокой степенью неоднородности обеспечивается при условии распределения потоков мощности в ветвях обратно пропорционально их активным сопротивлениям. На основании данного критерия предлагается реализованный на практике алгоритм выбора оптимальных комплексных коэффициентов трансформации с учётом регулирующего воздействия ВДТ:

1. Рассчитывается потокораспределение с учётом реальных коэффициентов трансформации в схеме замещения оптимизируемой системы электроснабжения (СЭС) при равенстве нулю реактивных сопротивлений ($X=0$) всех её элементов.

2. Определяются точки потококораздела, в которых размыкается сеть. В этих точках задаются нагрузки, равные мощностям, проходящим по ветвям, примыкающим к точкам потококораздела, и рассчитанным на этапе 1. Заметим, что при разделении одного узла в месте размыкания появляется несколько новых, количество которых равно числу примыкаемых к точке потококораздела ветвей.

3. Рассчитываются напряжения и новое потокораспределение в разомкнутой схеме с учётом полных сопротивлений.

4. Вычисляются комплексные коэффициенты трансформации трансформаторов связи, соответствующие минимуму потерь активной мощности, по выражению:

$$\dot{K}_i = K_{Ti} \frac{\dot{U}_{Ti}}{\dot{U}_{Ti} + \dot{U}_{Ti,ж} - \dot{U}_{Ti,р}},$$

где K_{Ti} – реальные (заданные) коэффициенты трансформации; $\dot{U}_{Ti}$ – напряжения на зажимах обмоток i -го трансформатора, полученные при расчёте разомкнутой сети; $\dot{U}_{Ti,ж}$ – желаемые напряжения в местах размыкания схемы (точках потококораздела), выбираемые равными одному из значений напряжений (желательно максимальному) в узлах размыкания $\dot{U}_{Ti,р}$.

5. По величинам рассчитанных $\dot{K}_i$ выбираются ближайшие из возможных (по регулировочной способности устройств регулирования напряжения – РПН) действительные K_{Ti} (рекомендуемые) для установки в трансформаторах или автотрансформаторах без ВДТ. При наличии в нейтрали автотрансформаторов ВДТ следует принимать ближайшие из возможных комплексных значений коэффициентов трансформации $\underline{K}_{Ti}$ (рекомендуемые), рассчитанных по выражениям (12) и (13) в [3].

Для решения таких задач требуется проводить серии расчётов установившихся режимов электрических систем. В данной работе расчёты проводятся с помощью «Программы для расчёта установившихся режимов, структуры потерь мощности и электроэнергии в сложно-замкнутых электрических системах «NADEGDA» [5]. Расчёт установившихся режимов ведётся мето-

дом узловых напряжений без приведения параметров сети к одной ступени трансформации путём введения в схему замещения дополнительных элементов – идеальных трансформаторов с действительными или комплексными значениями коэффициентов трансформации [4].

В случае одновременного расчёта электрических сетей с участками разных номинальных напряжений возможны два различных приёма составления схем замещения: 1) с приведением параметров к одной ступени напряжения; 2) без приведения к одной ступени напряжения. Несмотря на то, что приём приведения всей сети к одной ступени напряжения является наиболее распространённым, он обладает некоторыми недостатками, а именно: операция приведения схемы к одному напряжению выполняется сравнительно просто только при одинаковых коэффициентах трансформации, но затруднена при различных значениях, особенно в случае соединения сетей разных номинальных напряжений в нескольких местах. Также по приведённым величинам параметров режима трудно судить о качестве рассматриваемого режима. Для получения действительных результатов приходится производить обратный пересчёт величин, что также затрудняет расчёт. Эти затруднения особенно значительны при расчёте систем, в которых установлены вольтодобавочные трансформаторы с продольно-поперечным регулированием напряжения. Все перечисленные недостатки приводят к целесообразности использования другой возможности – составления и расчёта схемы замещения, содержащей элементы трансформации – без предварительного приведения к одному напряжению. При этом все параметры и результаты расчёта получаются в натуральных значениях.

Как известно, в матричной форме метод узловых потенциалов записывается в виде $\dot{\mathbf{Y}}_y \cdot \dot{\mathbf{U}}_\Delta = \dot{\mathbf{J}}$. Учёт коэффициентов трансформации в работе осуществляется при формировании матрицы узловых проводимостей $\dot{\mathbf{Y}}_y$. Определение элементов матрицы $\dot{\mathbf{Y}}_y$ проиллюстрируем на примере простейшей схемы (рис.1).

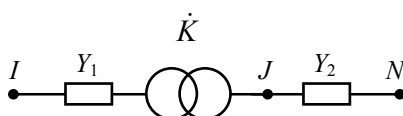


Рис. 1. Цепь с идеальным трансформатором

Недиагональные элементы матрицы, расположенные между узлами I и J (ветвь содержит идеальный трансформатор с комплексным коэффициентом трансформации), рассчитываются по выражениям

$$\dot{Y}_{I,J} = -\dot{Y}_1 \cdot \dot{K}; \quad \dot{Y}_{J,I} = -\dot{Y}_1 \cdot \dot{K}^*,$$

где $\dot{K}^*$ – комплексно-сопряжённое значение коэффициента трансформации.

Недиагональные элементы матрицы, расположенные между узлами J и N (ветвь не содержит трансформатор):

$$\dot{Y}_{J,N} = -\dot{Y}_2; \quad \dot{Y}_{N,J} = -\dot{Y}_2.$$

Диагональные элементы матрицы $\dot{\mathbf{Y}}_y$ определяются следующим образом:

$$\dot{Y}_{I,I} = \dot{Y}_1; \quad \dot{Y}_{J,J} = \dot{K} \cdot \dot{Y}_1 \cdot \dot{K}^* + \dot{Y}_2; \quad \dot{Y}_{N,N} = \dot{Y}_2.$$

Для схемы, содержащей шесть узлов и семь ветвей (рис. 2), матрица узловых проводимостей с учётом комплексных коэффициентов трансформации имеет вид (за базисный принят узел 6):

$$\dot{\mathbf{Y}}_y = \begin{array}{ccccc} \dot{y}_{14} + \dot{y}_{16} & 0 & 0 & -\dot{y}_{14} \cdot \dot{k}_{T2} & 0 \\ 0 & \dot{y}_{23} + \dot{y}_{26} & -\dot{y}_{23} \cdot \dot{k}_{T3} & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{y}_{32} \cdot \dot{k}_{T3}^* & \dot{k}_{T3} \cdot \dot{y}_{32} \cdot \dot{k}_{T3}^* + \dot{y}_{34} & -\dot{y}_{34} & 0 \\ -\dot{y}_{41} \cdot \dot{k}_{T2}^* & 0 & -\dot{y}_{43} & \dot{k}_{T2} \cdot \dot{y}_{41} \cdot \dot{k}_{T2}^* + \dot{y}_{43} + \dot{y}_{45} & -\dot{y}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{y}_{54} & \dot{k}_{T1} \cdot \dot{y}_{56} \cdot \dot{k}_{T1}^* + \dot{y}_{54} \end{array}$$

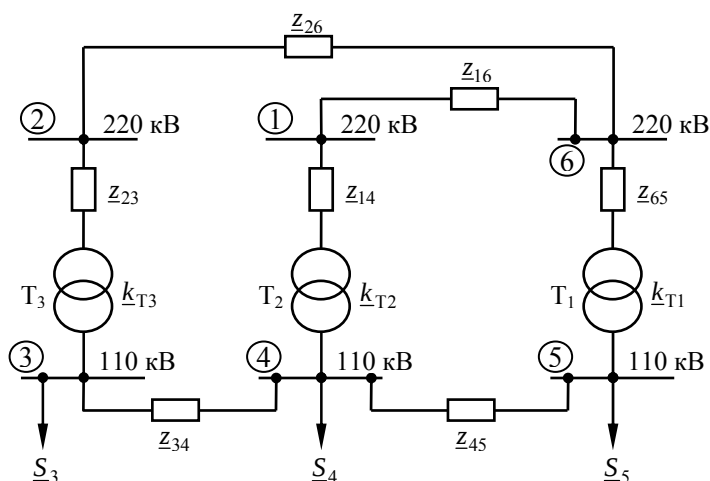


Рис. 2. Исследуемая схема

Исходной информацией для формирования элементов матрицы $\dot{\mathbf{Y}}_y$ являются: сопротивления ветвей, коэффициенты трансформации и конфигурация схемы (номера узлов начала и конца ветвей). С целью упрощения формирования матрицы $\dot{\mathbf{Y}}_y$ рекомендуется принять условие: узлом начала ветви, где есть трансформатор, берётся узел, к которому в схеме замещения подключён идеальный трансформатор. В общем случае идеальный трансформатор можно подключить к любому из двух узлов ветви, но целесообразно подключить к узлу с меньшим напряжением, тогда коэффициент трансформации будет больше 1 и будет выполняться соотношение $\dot{y}_{ii} \geq \sum_j \dot{y}_{ij}$, которое, как известно, является одним из

условий сходимости итерационного процесса.

Важным этапом при расчёте напряжений в узлах с учётом реальных коэффициентов трансформации является выбор начальных напряжений в узлах,

от которых в значительной степени зависит сходимость итерационного процесса. В предлагаемой реализации начальные напряжения определяются из расчёта режима, когда во всех узлах, кроме узлов, связанных с базисным узлом, задающие токи равны нулю. В узлах, имеющих связь с базисным узлом, задающие токи определяются по выражению

$$j_i = \frac{U_6 K_{T,i6}}{\dot{Z}_{i6}},$$

где U_6 – напряжение в базисном узле; $K_{T,i6}$, $\dot{Z}_{i6}$ – коэффициент трансформации трансформатора и сопротивление ветви, связывающей узел i с базисным узлом, соответственно.

На основе предложенной методики выполнен расчёт фрагмента реальной электрической системы, схема замещения которого представлена на рис. 3.

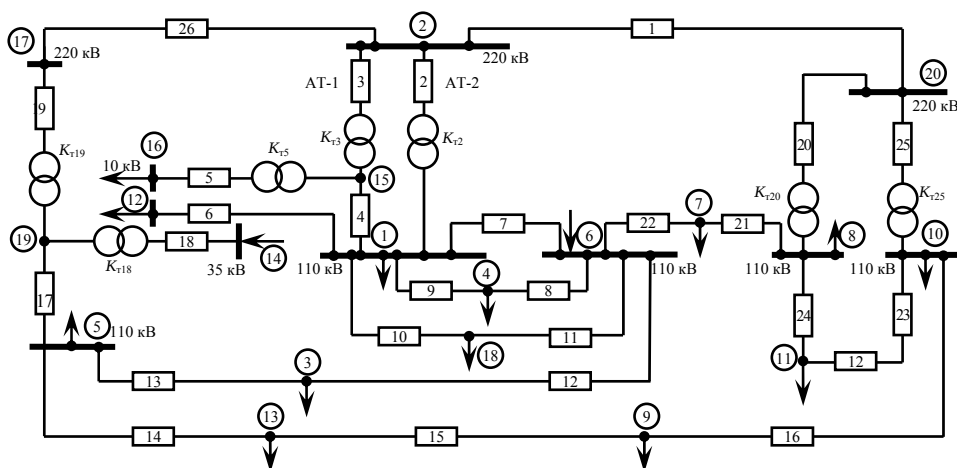


Рис. 3. Исследуемая схема

Вольтодобавочные трансформаторы в этой схеме включены в нейтрали двух автотрансформаторов. Автотрансформатор № 1 (АТ-1) на схеме замещения представлен тремя ветвями 3, 4, 5, а автотрансформатор № 2 (АТ-2) – только ветвью 2, так как обмотка низшего напряжения АТ-2 не нагружена. Исходными данными для расчёта по программе «NADEGDA» являются массивы, описывающие конфигурацию схемы замещения и параметры её ветвей, в том числе и заданные (исходные) коэффициенты трансформации $K_{исх}$, а также нагрузки в узлах.

Рекомендуемые коэффициенты трансформации $K_{реком}$ определены по вышеизложенной методике. В табл. 1 выделена исходная информация для ветвей, представляющих на схеме замещения автотрансформаторы связи.

В табл. 2 приведены исходные нагрузки соответствующих узлов схемы и рассчитанные напряжения во всех узлах схемы замещения при исходных $K_{исх}$ и рекомендуемых $K_{реком}$ коэффициентах трансформации.

В табл. 3 представлена информация о перетоках мощностей, соответствующих исходным и выбранным коэффициентам трансформации с учётом ВДТ.

Таблица 1

Исходная информация для ветвей

Номер ветви	Узел начала ветви	Узел конца ветви	Сопротивление ветви, Ом
2	2	1	$1,55 + j43,53$
3	2	15	$0,53 + j47,75$
5	15	16	$0,009 + j0,24$
18	19	14	$0,169 + j4,725$
19	17	19	$0,77 + j34,65$
20	20	8	$12,68 + j77,82$
25	20	10	$0,60 + j15,95$

Таблица 2

Мощности нагрузок и напряжения в узлах

Номер узла	Мощности нагрузок узлов, МВ·А	Напряжения в узлах, кВ	
		при $K_{исх}$	при $K_{реком}$
1	$113,9 + j68,5$	$107,84 - j17,68$	$107,11 - j17,34$
2	$0,0 - j9,45$	$192,00 - j25,58$	$194,20 - j26,66$
3	$9,6 + j4,4$	$106,79 - j19,19$	$108,16 - j16,32$
4	$7,7 + j4,1$	$109,28 - j18,43$	$109,09 - j13,50$
5	$62,0 + j17,2$	$103,78 - j18,60$	$106,62 - j18,37$
6	$-58,0 - j148,0$	$110,35 - j18,72$	$110,46 - j14,02$
7	$6,0 + j3,3$	$108,10 - j17,86$	$109,07 - j13,93$
8	$73,5 + j37,5$	$100,94 - j12,08$	$104,97 - j11,89$
9	$9,6 + j4,8$	$106,24 - j9,93$	$108,73 - j9,85$
10	$20,6 - j12,8$	$110,44 - j4,19$	$112,67 - j4,19$
11	$12,5 + j0,4$	$104,90 - j10,15$	$108,09 - j9,92$
12	$-2,0 + j2,0$	$107,88 - j17,70$	$107,16 - j12,36$
13	$4,0 + j1,3$	$105,11 - j13,13$	$107,75 - j13,19$
14	$0,15 - j27,0$	$36,53 - j6,75$	$37,35 - j6,63$
15	$0,0 + j0,0$	$107,91 - j18,31$	$107,42 - j13,05$
16	$11,2 + j5,7$	$10,61 - j2,05$	$10,57 - j1,53$
17	$0,0 - j4,65$	$192,06 - j30,34$	$192,18 - j29,84$
18	$25,6 + j13,1$	$107,04 - j9,19$	$106,78 - j14,30$
19	$0,0 + j0,0$	$103,69 - j18,2$	$106,46 - j18,47$
20		$201,00 - j0,0$	$201,00 - j0,0$

Таблица 3

Потокораспределение при исходных и рекомендованных коэффициентах трансформации

Номер ветви	Исходные коэффициенты трансформации	Перетоки мощности в ветвях при исходных коэффициентах трансформации, МВ·А	Рекомендованный коэффициент трансформации	Перетоки мощности в ветвях при рекомендованных коэффициентах трансформации, МВ·А
2	$1,762 - j0,076$	$58,05 + j36,43$	$1,959 - j0,116$	$51,57 + j29,06$
3	$1,762 - j0,076$	$51,06 + j36,56$	$1,959 - j0,116$	$51,80 + j29,57$
5	$0,100 + j0,000$	$6,60 + j3,90$	$0,100 + j0,000$	$6,60 + j3,90$
18	$0,320 + j0,000$	$0,30 + j28,1$	$0,320 + j0,000$	$0,30 + j28,1$
19	$1,855 + j0,000$	$13,66 + j2,71$	$2,040 - j0,000$	$12,26 + j6,11$
20	$1,925 + j0,000$	$46,72 + j13,92$	$2,040 - j0,000$	$43,37 + j11,69$
25	$1,819 + j0,000$	$66,80 + j19,48$	$2,041 - j0,000$	$74,16 + j4,50$

Как показывают расчёты (табл. 2), напряжения во многих узлах при рекомендуемых коэффициентах трансформации увеличиваются по сравнению с рассчитанными по (исходным) коэффициентам трансформации, заданным электрической системой.

Следует отметить, что повышение напряжения и перераспределение мощностей при выбранных коэффициентах трансформации приводят к снижению потерь активной мощности в исследуемой системе на 2,6%. Таким образом, применение ВДТ улучшает один из важнейших показателей качества электроэнергии – повышает уровень напряжения и приводит к снижению потерь электроэнергии в системе.

Литература

1. Бушуев В.В. Энергетика России: в 3 т. Т. 2. Энергетическая политика России (Энергетическая безопасность, энергоэффективность, региональная эффективность и электроэнергетика). М.: Энергия, 2012. 616 с.
2. Гуревич В.И. Интеллектуальные сети: Новые перспективы или новые проблемы // Электротехнический рынок. 2012. № 6(36). С. 62–66.
3. Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Щедрин В.А. Анализ и оптимизация режимов работы систем электроснабжения с трансформаторными связями // Вестник Чувашского университета. 2017. № 3. С. 30–37.
4. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. М.: Энергия. 1979. 416 с.
5. Свидетельство № 2010614486 РФ. Программа для расчёта установившихся режимов, структуры потерь мощности и электроэнергии в сложно-замкнутых электрических системах – «NADEGDA» / Ермолаева Н.М., Щедрин В.А.; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 08.07.2010.
6. Холмский В.Г. Расчёт и оптимизация режимов электрических сетей. М.: Высш. шк., 1975. 280 с.
7. Kundur P. Power Systems Stability and Control. New York, McGraw-Hill, Inc., 1994, 1196 p.
8. Masters G.M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey, Wiley-Interscience, 2004, 654 p.

ЕРМОЛАЕВА НАДЕЖДА МИХАЙЛОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (n.m.ermolaeva@mail.ru).

КОКОРЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – старший преподаватель кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (kokorev1952@yandex.ru).

ЩЕДРИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (chedrin@chuvsu.ru).

N. ERMOLAEVA, N. KOKOREV, V. SHCHEDRIN MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF HETEROGENEOUS POWER SYSTEMS WITH TRANSFORMER CONNECTIONS

Key words: modeling, computation algorithm, coefficients of transformation, booster transformers, regime optimization, power systems, heterogeneous networks.

The strategic direction of the modern development of the power supply system is the concept of Smart Grid, to which should radically change the traditional hierarchical struc-

ture of electric networks with one-way radial flows of electric energy and power. The supply and distribution network of power supply system will be gradually transformed into a hard-confined, heterogeneous, branched and unstructured distribution grid complexes. In addition to improving the main electrical equipment, new technologies of transmission and distribution of electric power, the introduction of voltage regulators, reactive power compensators, devices for limiting short-circuit currents created on the basis of power electronics, automated control systems for normal and emergency modes are being intensively developed. Such EMS (Energy Management System) control systems of normal modes are created and practically used abroad. The structure of the objects of EMS systems includes complexes of means of calculation and analysis of the power supply systems state and complexes of means of current planning of power loads, choosing the structure of working aggregates of different electric energy sources and optimization of their working regimes.

References

1. Bushuev V.V. *Energetika Rossii: v 3 t. T. 2. Energeticheskaya politika Rossii (Energeticheskaya bezopasnost'. energoeffektivnost'. regional'naya effektivnost' i elektroenergetika)* [Energy of Russia. 3 vols. Vol. 2. Energy policy of Russia (Energy security. energy efficiency. Regional efficiency and electric power industry)]. Moscow, Energiya Publ., 2012, 616 p.
2. Gurevich V.I. *Intellektual'nye seti: Novye perspektivy ili novye problemy* [Smart grids: new prospects or New problems]. *Elektrotekhnicheskii rynek*, 2012, no. 6(36), pp. 62–66.
3. Ermolaeva N.M., Kokorev N.A., Shchedrin V.A. *Analiz i optimizatsiya rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya s transformatornymi svyaziyami* [Analysis and optimization of operating modes of power supply systems with transformer connections]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 30–37.
4. Zhukov L.A., Stratan I.P. *Ustanovivshiesya rezhimy slozhnykh elektricheskikh setei i sistem*. [Steady-state modes of complex electrical networks and systems]. Moscow, Energiya Publ., 1979, 416 p.
5. Ermolayeva N.M., Shchedrin V.A. *Svidetelstvo № 2010614486 RF. Programma rascheta ustanovivshikhsya rezhimov. struktury poter moshchnosti i elektroenergii v slozhno-zamknutykh elektricheskikh sistemakh «NADEGDA»: zaregistrirvano v reyestre programm dlya EVM* [Certificate No. 2010614486 of the Russian Federation. The program of calculation of the established modes, structure of power losses and electrical energy losses in hard-closed electrical systems "NADEGDA". Registered in the register of computer programs]. 2010, July 8.
6. Kholmiskiy V.G. *Raschet i optimizatsiya rezhimov elektricheskikh setey* [Calculation and optimization of modes of electrical networks]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1975, 280 p.
7. Kundur P. *Power Systems Stability and Control*. New York, McGraw-Hill, Inc., 1994, 1196 p.
8. Masters G.M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. New Jersey, Wiley-Interscience, 2004, 654 p.

ERMOLAEVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Supply and Intelligent Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (n.m.ermolaeva@mail.ru).

KOKOREV NIKOLAY – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (kokorev1952@yandex.ru).

SHCHEDRIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (chedrin@chuvsu.ru).

Формат цитирования: Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Щедрин В.А. Математическое моделирование и оптимизация неоднородных систем электроснабжения с трансформаторными связями // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 23–30.

УДК 621.316.719.3

ББК 31.291-04

С.А. ЁРОХОВ

КОМБИНИРОВАННОЕ ТОРМОЖЕНИЕ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВОЙ ЛЕБЕДКИ

Ключевые слова: способы торможения, электрическое торможение, рекуперативное торможение, устройство рекуперации электроэнергии, метод вычисления, активный выпрямитель, асинхронный двигатель, система управления.

В статье описаны существующие способы торможения асинхронных электродвигателей, проведено сравнение представленных способов. Предложен способ комбинированного торможения асинхронного электродвигателя в составе электропривода буровой лебедки. Приведен метод вычисления мощности рекуперации электроэнергии в сеть при осуществлении комбинированного торможения асинхронным электродвигателем. Представлена схема замещения асинхронного электродвигателя, осуществляющего комбинированное торможение. Приведена функциональная схема системы электропривода, содержащая в себе активный выпрямитель со своей системой управления, управляемый инвертор, блок выбора режимов работы буровой лебедки. Данная система электропривода позволяет осуществлять рекуперацию энергии в сеть при спуске колонны буровых труб, когда асинхронный электродвигатель работает в генераторном режиме. Обосновано применение активного выпрямителя в составе преобразователя частоты с целью повышения энергоэффективности системы электропривода.

В настоящее время наблюдается тенденция снижения мировой добычи нефти на традиционных месторождениях. По данным Economist Intelligence она составляет в процентном выражении около 2–6% в год. Более 75% месторождений нефти и газа на суше уже вовлечены в освоение. В связи с этим в России прогнозируется снижение добычи нефти в традиционном российском нефтяном регионе – Западной Сибири. На старых месторождениях добыча будет падать до 2020 г. в среднем на 1,7% в год [1]. В связи с этим перспективным является вопрос разработки морских месторождений нефти, большая часть которых расположена на территории арктического шельфа, при этом Российская Федерация в данной ситуации имеет преимущество, так как обладает наибольшей площадью континентального шельфа, содержащего около 20% запасов нефти и газа России [9].

В качестве средства освоения шельфа используются морские буровые платформы различных видов. Электроэнергетическая система буровых платформ является автономной, в качестве источников электроэнергии используются дизель-генераторы. В качестве основных потребителей выступают электроприводы технологического комплекса, такие как электропривод буровых насосов, лебедки, роторы, системы позиционирования, также потребителями электроэнергии выступают вспомогательные системы. Всё это создает боль-

шую нагрузку на систему электроснабжения. В связи с этим перспективными являются разработка структур и алгоритмов эффективного управления электроприводом технологического комплекса.

На морских буровых платформах и судах в составе технологического комплекса для привода буровой лебедки используются электроприводы большой мощности. Причём электропривод буровой лебедки работает как в двигательном, так и в тормозном режиме. В первом случае происходит подъем буровой колонны, а во втором – опускание при поддержании определенной скорости. В связи с этим перспективным представляются разработки в области рекуперативного режима работы электропривода лебедки.

Ранее было рассмотрено и доказано, что электропривод на базе асинхронного двигателя является эффективным и экономичным при использовании его в качестве главного электродвигателя основных механизмов технологического комплекса [6].

Благодаря свойству обратимости электрической машины данный тип двигателя может работать и в качестве генератора. Асинхронный электродвигатель конструктивно прост, надежен, обладает высокими энергетическими показателями и невысокой стоимостью. В связи с этим применение асинхронных двигателей, работающих в генераторном режиме, весьма перспективно. Форма кривой напряжения на выходе у него ближе к синусоидальной по сравнению с таковой синхронного генератора при той же нагрузке [5]. Основным условием эффективного использования данного типа машин в качестве генераторов является обязательное наличие управляемых полупроводниковых ключей в составе выпрямителя. Однако в силу специфики работы судовой энергосистемы полная отдача энергии в сеть невозможна. Поэтому предлагается использовать комбинированное торможение.

Для начала рассмотрим существующие способы электрического торможения асинхронного электродвигателя. При данных способах кинетическая энергия, преобразованная в электрическую, отдается в сеть или рассеивается в окружающей среде путём нагрева сопротивлений. Торможение может осуществляться путём противовключения электродвигателя, рекуперации, динамическим или конденсаторным торможением.

Динамическое торможение заключается в отключении якоря от сети и подключении его к нагрузочному сопротивлению, в котором вся получаемая энергия торможения превращается в тепло. В связи с этим данный способ не является экономичным и эффективным, так как требует больших сопротивлений и переключателей, рассчитанных на большой ток и довольно громоздких [5].

Торможение путём противовключения асинхронного электродвигателя возможно только для машин с фазным ротором. Торможение электродвигателя происходит путём переключения обмоток двигателя таким образом, чтобы создаваемый вращающий момент действовал в обратном направлении. Недостатками данного способа являются трудность получения малых скоро-

стей при опускании груза и её значительные отклонения при изменении массы груза.

Конденсаторное торможение, или торможение самовозбуждением, является ещё одним способом торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АДКР). Данный тип торможения осуществляется путем подключения параллельно к обмоткам статора конденсаторов. Машина начинает работать как самовозбужденный асинхронный генератор.

Рекуперативное торможение часто используют в подъемно-транспортных механизмах при спуске тяжелых грузов. Груз, который опускается, развивает на валу машины отрицательный момент, и скорость становится $n > n_0$. Тем самым машина переходит в режим рекуперативного торможения и создает тормозной момент на валу. Другими словами, рекуперативное торможение основано на свойстве обратимости электрических машин. При переходе асинхронного электродвигателя в режим рекуперативного торможения магнитное поле пересекает роторные проводники при $n > n_0$ – в противоположном направлении. При этом ЭДС ротора изменяет свой знак на обратный. Энергия, полученная в результате торможения, возвращается в сеть или накапливается в аккумуляторах.

Метод вычисления мощности комбинированного торможения в электроприводе буровой лебедки. Для улучшения энергетических показателей электропривода целесообразно использовать не один определенный тип торможения, а комбинацию нескольких способов. Наиболее эффективным является использование рекуперативного и динамического способов торможения [8]. Произведем оценку мощности рекуперации при спуске буровой колонны асинхронным электродвигателем. Для нахождения мощности, отдаваемой в сеть в режиме рекуперации асинхронного электродвигателя, воспользуемся расчётом установившегося режима торможения по упрощенной схеме замещения электродвигателя, представленной на рис. 1. Влияние высших гармоник и потери мощности в инверторе и выпрямителе не учитываются. На рис. 1: I_d – фазный ток статора, I_μ – ток намагничивания, I_r – приведенный ток ротора; R_1 , R'_r , R_μ , R_π , R_d – активные сопротивления статора, ротора, контура намагничивания, преобразователя, динамического торможения, соответственно; x_1 , x'_r , x_μ , x_π – реактивное сопротивление статора, ротора, контура намагничивания, преобразователя, соответственно, E_π и I_π – среднее значение ЭДС и тока преобразователя; I_d – ток, образующийся в результате протекания через R_d ; s – скольжение асинхронного электродвигателя.

При переходе асинхронного двигателя в генераторный режим работы сопротивление $\frac{R'_r}{s}$ в схеме замещения (рис. 1) становится отрицательным, что связано с изменением знаков мощностей [2]. Следовательно, на эквивалентной схеме сопротивление $\frac{R'_r}{s}$ можно заменить источником ЭДС. В таком случае эквивалентная схема примет вид, представленный на рис. 2.

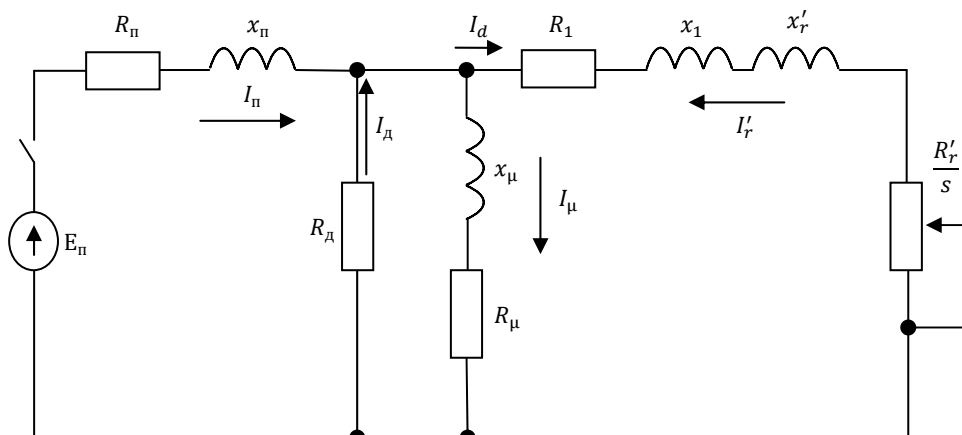
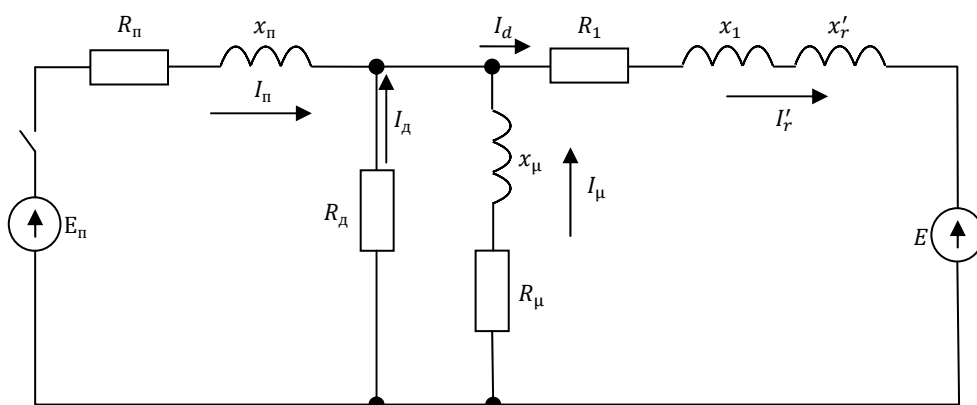


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя

Рис. 2. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя в режиме комбинированного торможения (E – ЭДС ротора)

Согласно принятой схеме можно составить уравнение для нахождения мощности рекуперативного торможения асинхронного электродвигателя при комбинированном торможении:

$$\begin{aligned}
 P &= (E_n + I_n \cdot R_n) \cdot I_n = \\
 &= -I_r'^2 \cdot \left(R_1 + R_n + \frac{R_1 \cdot R_n \cdot (R_d + R_\mu)}{R_d \cdot R_\mu} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_1 \cdot (R_d \cdot R_\mu)}{R_d \cdot R_\mu} \right) - \\
 &- I_r'^2 \cdot E \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (R_d + R_\mu)}{R_d \cdot R_\mu} \cdot \left(R_1 + R_n + \frac{R_1 \cdot R_n \cdot (R_d + R_\mu)}{R_d \cdot R_\mu} \right) \right) - \\
 &- E^2 \cdot \frac{R_d + R_\mu}{R_d \cdot R_\mu} \cdot \left(1 + \frac{R_n \cdot (R_d + R_\mu)}{R_d \cdot R_\mu} \right).
 \end{aligned}$$

Для облегчения записи введем следующие коэффициенты:

$$a = \left(R_1 + R_{\pi} + \frac{R_1 \cdot R_{\pi} \cdot (R_d + R_{\mu})}{R_d \cdot R_{\mu}} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_1 \cdot (R_d + R_{\mu})}{R_d \cdot R_{\mu}} \right)$$

$$b = 1 + \frac{2 \cdot (R_d + R_{\mu})}{R_d \cdot R_{\mu}} \cdot \left(R_1 + R_{\pi} + \frac{R_1 \cdot R_{\pi} \cdot (R_d + R_{\mu})}{R_d \cdot R_{\mu}} \right)$$

$$c = \frac{R_d + R_{\mu}}{R_d \cdot R_{\mu}} \cdot \left(1 + \frac{R_{\pi} \cdot (R_d + R_{\mu})}{R_d \cdot R_{\mu}} \right)$$

В таком случае уравнение примет вид

$$P = -(I_r'^2 \cdot a + I_r' \cdot E \cdot b + E^2 \cdot c).$$

Реализация режима комбинированного торможения электропривода буровой лебедки в составе технологического комплекса морской буровой платформы. Для осуществления торможения с отдачей энергии в сеть необходимо в системе электропривода буровой лебедки использовать активный выпрямитель (АВ), так как он позволяет осуществлять поддержание коэффициента мощности близким к единице, а также осуществлять рекуперацию электроэнергии [4]. Помимо управляемого активного выпрямителя в систему электропривода также необходимо ввести блок режима работы буровой лебедки (БРБЛ). На рис. 3 представлена данная функциональная схема. На вход вычислителя координат (ВК) поступают найденные значения сетевых токов и напряжений, которые в дальнейшем преобразуются в систему координат, вращающуюся со скоростью ω_b и ориентированную по обобщенному вектору напряжения. Выходными сигналами ВК являются компоненты сетевого тока (I_x и I_y), модуль вектора входного напряжения $U_{вх}$ и его скорость вращения ω_b .

Блок управления АВ (БУАВ) в соответствии с заданными управляющими воздействиями (I_{dz}, I_{yz}) обеспечивает регулирование значения выпрямленного тока I_d и реактивной составляющей сетевого тока I_y . Рассчитанные значения входных токов (I_{xzv} и I_{yzv}) поступают на вход обратного преобразователя координат (ОПК), который формирует значение необходимого тока в каждой из фаз (i_a', i_b', i_c') для коммутации соответствующих полупроводниковых ключей при помощи схемы управления активным выпрямителем (СУАВ).

Измеренные значения тока и напряжений в каждой фазе на выходе АИН и значения U_d, I_d в звене постоянного тока поступают на вход БРБЛ, в котором на основании полученных величин вырабатывается управляющее воздействие для СУАИН (i_h', i_g', i_f') и задается необходимое значение напряжения и тока (U_{dz}, I_{dz}). Также БРБЛ управляет коммутацией ключа К в зависимости от режима работы буровой лебедки. СУАИН, в свою очередь, управляет полупроводниковыми ключами АИН. Ключ К необходим для реализации динамического торможения путём подключения сопротивления динамического торможения (СДТ).

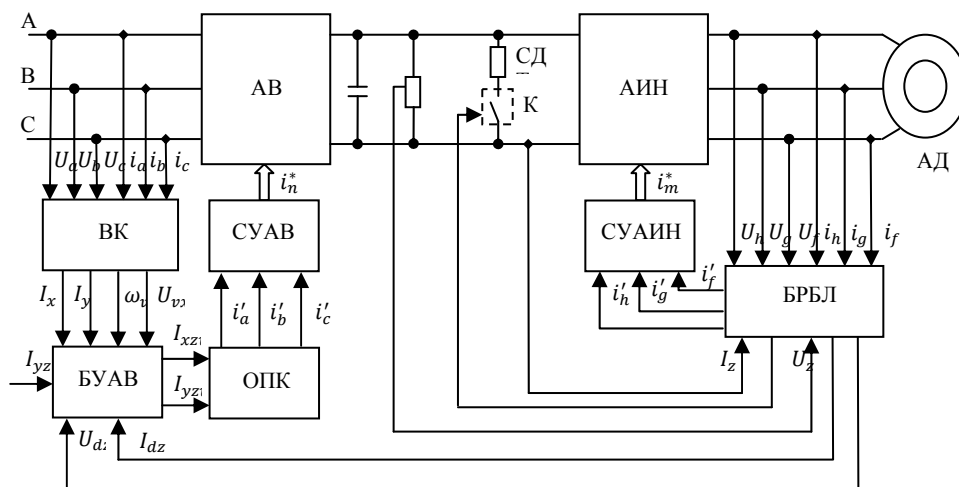


Рис. 3. Функциональная схема комбинированного торможения

Сегодня наиболее разработанными и распространенными являются системы векторного и гистерезисного управления активным выпрямителем. Нельзя не отметить тот факт, что гистерезисная система проще в настройке, чем векторная, однако обладает худшими энергетическими показателями [7]. В связи с этим в качестве системы управления активным выпрямителем было выбрано векторное управление. Данное управление позволяет обеспечивать высокую электромагнитную совместимость, регулировать коэффициент мощности [3].

В векторной системе управления активным выпрямителем используется синхронная ортогональная система координат (x, y) , ориентированная по вектору напряжения сети. Синтез регуляторов тока и выходного напряжения выпрямителя (U_d) осуществлен при помощи подчиненного регулирования. Управление значением коэффициента мощности осуществляется заданием активной и реактивной составляющих входного тока (I_{dz}, I_{yz}). При $I_{yz} = 0$ выпрямитель обменивается с сетью только активной энергией.

Выводы. Комбинированное торможение позволяет более полно использовать буровую лебедку в режиме опускания груза, что, в свою очередь, положительно сказывается на эффективности всей буровой платформы. Предложенный метод вычисления мощности комбинированного торможения может быть использован при проектировании энергосистемы буровой платформы или установки, а также при разработке алгоритмов и систем управления электроприводом. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются имитационное моделирование представленной системы и решение вопросов согласования режима работы дизель-генераторных установок и мощных электроприводов технологического комплекса морской буровой платформы при работе электропривода буровой лебедки в рекуперативном режиме.

Литература

1. Васильцова В.М. Проблемы освоения шельфовых месторождений нефти и газа // Записки Горного института. 2016. № 2. С. 345–350.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
3. Ёрохов С.А. Выбор способа обеспечения электромагнитной совместимости системы электропривода с автономным источником энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 231–235.
4. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойберггер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
5. Кацман М.М. Электрический привод. М.: Академия, 2005. 384 с.
6. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами // Вестник ЮУрГУ. 2015. Т. 15, № 1. С. 47–53.
7. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. СПб.: Питер, 2006. 336 с.
8. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2004. 368 с.
9. Мочалов Р.А. Экономические аспекты освоения углеводородных ресурсов российского континентального шельфа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3, № 1. С. 32–38.

ЁРОХОВ СТАНИСЛАВ АЛЕКСЕЕВИЧ – аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург (Stanislav.Erokhov@zippelin.com).

**S. EROKHOV
COMPOSITE BRAKING
TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVE
OF DRAWWORKS WINCH**

Key words: braking methods, electric braking, regenerative braking, electric energy recovery device, calculation method, active rectifier, asynchronous motor, control system.

The article describes the existing methods of braking asynchronous electric motors, a comparison of the presented methods is carried out. It proposes the method of the composite braking of an asynchronous electric motor as part of an electric drawworks winch drive. The article gives the method of calculating the power of recovery of electricity into the network in the implementation of the combined braking asynchronous electric motor. The equivalent circuit of the asynchronous electric motor performing the combined braking is presented. A functional diagram of the electric drive system, containing an active rectifier with its control system, a controlled inverter, and a unit for selecting the operating modes of the drawworks, is shown. This electric drive system allows energy recovery to the network during the descent of the drill pipe string, when the asynchronous electric motor operates in generator mode. The use of an active rectifier as part of a frequency converter to improve the energy efficiency of the electric drive system is substantiated.

References

1. Vasil'tsova V.M. *Problemy osvoeniya shel'fovykh mestorozhdenii nefii i gaza* [Problems of offshore oil and gas fields development]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, no. 2, pp. 345–350.
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny*. St. Petersburg, Energiya Publ., 1974, 840 p.
3. Erokhov S.A. *Vybor sposoba obespecheniya elektromagnitnoi sovместимости системы электропривода с автономным источником энергии* [Selection of a method for ensuring electromagnetic compatibility of the electric drive system with an autonomous energy source]. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2017, no. 8, pp. 231–235.

4. Zhezhelenko I.V., Shidlovskii A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L., Noiberger N.A. *Elektromagnitnaya sovместimost' potrebitelei* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 351 p.
5. Katsman M.M. *Elektricheskii privod* [Electric drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2005, 384 p.
6. Kozyaruk A.E., Vasil'ev B.Yu. *Metody i sredstva povysheniya energoehffektivnosti mashin i tekhnologiy asinhronnymi elektroprivodami* [Methods and means of increasing energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drives]. *Vestnik YUUrGU*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 47–53.
7. Miroshnik I. V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Nelinejnye i optimal'nye sistemy* [Automatic control theory. Nonlinear and optimal systems]. St. Petersburg, Piter ubl., 2006, 336 p.
8. Moskalenko V.V. *Elektricheskijprivod* [Electric drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 368 p.
9. Mochalov R.A. *Ekonomicheskie aspekty osvoeniya uglevodorodnyh resursov rossijskogo kontinental'nogo shel'fa* [Economic aspects of development of hydrocarbon resources of the Russian continental shelf]. *Interehkspo Geo-Sibir'*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 32–38.

EROKHOV STANISLAV – Post-Graduate Student of Electricity and Electrical Engineers Department, St. Petersburg Mining University, Russia, St. Petersburg (Stanislav.Erokhov@zeppelin.com).

Формат цитирования: *Ёрохов С.А.* Комбинированное торможение как способ повышения энергоэффективности электропривода буровой лебедки // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 31–38.

УДК 621.3.018.782.3

ББК 31.19

В.К. КОЗЛОВ, Е.Р. КИРЖАЦКИХ, Р.А. ГИНИАТУЛЛИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, определение места повреждения, переходное сопротивление.

На распределительные сети 6-35 кВ приходится половина от длины всех линий электропередачи. Однофазные замыкания на землю в сетях среднего напряжения – это наиболее распространенный вид повреждения, на его долю приходится более 70% от всех видов повреждений. Несвоевременное устранение повреждения приводит к перенапряжению двух здоровых фаз, следствием чего являются двойные замыкания, двухфазные, трехфазные короткие замыкания, что способствует отключению потребителей. На сегодняшний день существует два метода по поиску замыкания: топографический (обход оперативно-выездной бригадой вдоль трассы линии со специальными устройствами) и дистанционный (когда на подстанции устанавливаются специальные устройства). Дистанционное определение места замыкания в сетях с древовидной формой является наиболее актуальным, так как эти сети распространены на большой территории, пересекают реки, овраги, озера, леса и т.п. Способы определения расстояния до места повреждения по параметрам аварийных режимов на линии под напряжением не отработаны. Все используемые приборы имеют низкую точность и чувствительность не более 20% от тока замыкания, значение которого в сетях с изолированной нейтралью составляет от 0,5 до 5 А. В данной работе представлен метод определения места повреждения по установившемуся значению фазного напряжения поврежденной фазы, получена зависимость данного напряжения от расстояния до места замыкания. Устройства для измерения напряжения на линии с дистанционной передачей информации устанавливаются в начале и по концам линии электропередачи. Рассмотрено также влияние переходного сопротивления в месте аварии на определение расстояния до места однофазного замыкания. В расчетах, в основном, принимают металлическое замыкание, равное 0,1 Ом, но это только частный случай. При моделировании однофазного замыкания на землю нужно учитывать реальные значения сопротивлений. В статье показано, что определение места однофазного замыкания не зависит от переходного сопротивления в месте аварии.

Опыт эксплуатации распределительных сетей 6-35 кВ показывает, что замыкание одной фазы на землю является одним из самых распространенных повреждений на линиях электропередачи. Если в сетях более высокого класса напряжения эти повреждения приводят к тяжелым последствиям вследствие протекания больших токов короткого замыкания и, в основном, сопровождаются отключением поврежденного участка линии, в сетях среднего напряжения питание потребителей не нарушается, и сеть может работать относительно длительное время. Однако несвоевременное определение места замыкания приводит к переходу в двойные, двух-, трехфазные короткие замыкания с последующим отключением потребителей. Замыкание на землю представляет большую опасность для находящихся вблизи места повреждения людей и

домашнего скота, а также для оперативно-выездного персонала по поиску замыкания.

Дистанционное определение расстояния до места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) является на сегодняшний день актуальной задачей, особенно во время внедрения «умных» интеллектуальных сетей. Данный вопрос исследуется в [1, 2, 4, 5, 7, 9, 10, 12]. Однако все они используют зависимость места замыкания от параметров аварийного режима в переходном процессе. Мы же исследуем установившийся режим, что позволяет нам не синхронизировать данные и использовать малогабаритные устройства для измерения напряжения.

Целью и задачами исследования является моделирование ОЗЗ и изучение влияния переходного сопротивления на определение места повреждения (ОМП).

Определение места повреждения линий электропередачи является неотъемлемой функцией современных систем автоматизации подстанции. Как показывает практика, большая часть времени восстановления поврежденного элемента линии идёт на ОМП, поэтому для ускорения времени отыскания повреждения необходимо совершенствование методов ОМП. Дистанционные методы дают значительный экономический эффект, обусловленный предотвращением перехода однофазного замыкания в более сложные, сокращением перерывов электроснабжения, уменьшением объема ремонтных работ, снижением транспортных расходов по объезду трасс линий. В данной работе рассмотрен метод дистанционного ОМП по параметрам фазного напряжения в установившемся режиме. Для этого, согласно работе [8], достаточно установить автономные устройства для измерения напряжения с дистанционной передачей информации в начале и по концам линии электропередачи, которые работают в режиме реального времени. Все данные с устройств обрабатываются в диспетчерском пункте и по заданному алгоритму определяют место повреждения.

Рассмотрим линию электропередачи 10 кВ с изолированной нейтралью в программном пакете MatLab Simulink (рис. 1). Исходные данные: трансформатор типа ТДН 16000/110; входное сопротивление – 0,4 Ом; входная индуктивность – 0,276 Гн; базовое напряжение – 10 кВ.

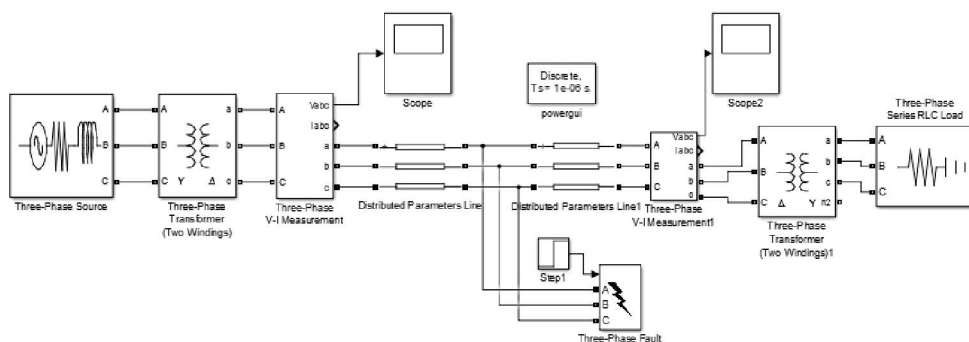


Рис. 1. Общая схема модели

Линия принята длиной 10 км, выполнена проводами марки АС 95/16 [6]. ОЗЗ происходит на расстоянии 0,5 / 5 / 9,5 км от начала линии. Нагрузка $P = 2,5$ МВА, сопротивление земли $R_z = 50$ Ом·м, сопротивление повреждения – 0,1 Ом (металлическое) [3].

Моделируем однофазное замыкание фазы А на землю. На рис. 2 представлены осциллограммы напряжений поврежденной фазы А в установившемся режиме.

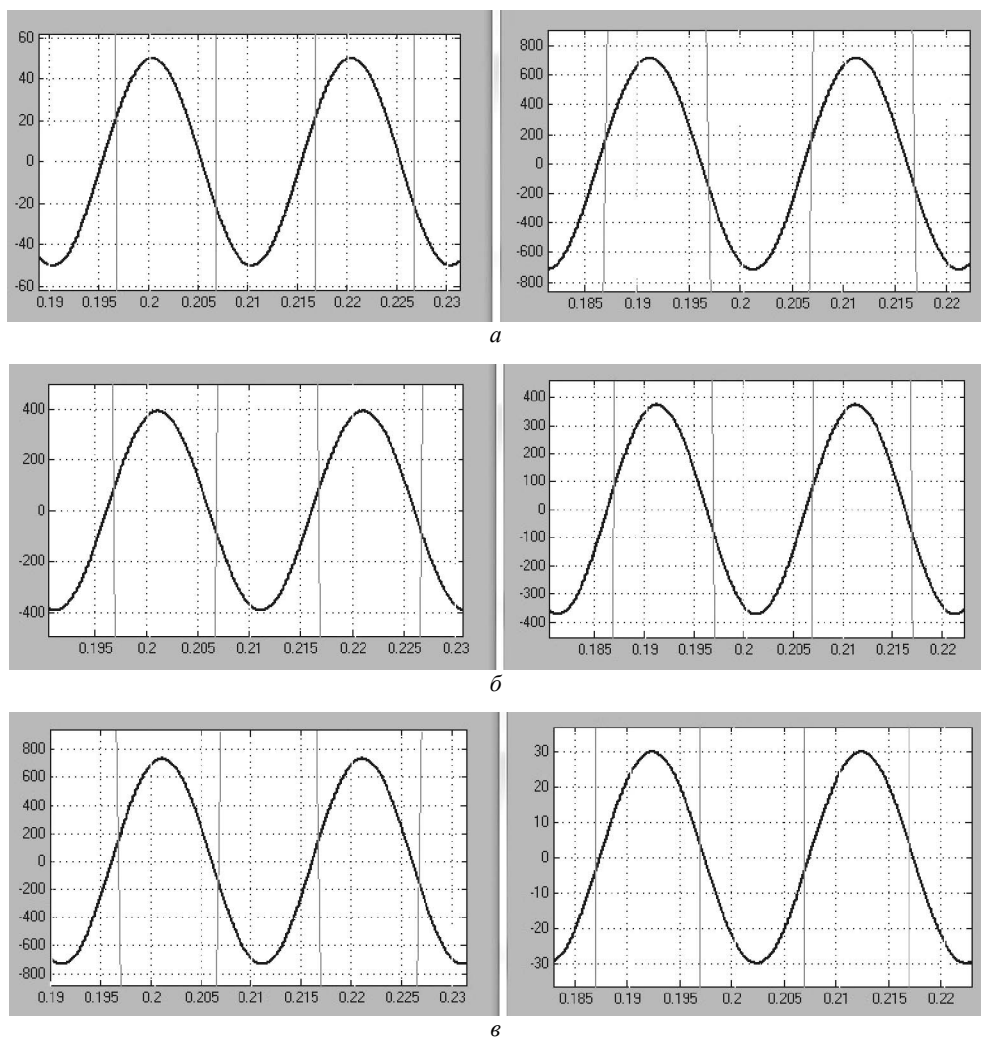


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на фазе А в начале и в конце линии электропередачи 10 кВ при однофазном замыкании на землю на расстоянии 0,5 км (а), 5 км (б), 9,5 км (в) от начала линии

Из осциллограмм, представленных на рис. 2, а, видно, что при ОЗЗ в начале линии значение фазного напряжения поврежденной фазы А не равно

нулю, как это считается в методе симметричных составляющих, более того, значение напряжения в начале отличается от значения в конце линии электропередачи.

Промоделируем ОЗЗ на расстоянии 5 км от начала линии. Из рис. 2, б видно, что при возникновении ОЗЗ в середине линии напряжение в начале и в конце имеет примерно одинаковое значение, в нашем случае 380 В.

Промоделируем ОЗЗ на расстоянии 9,5 км от начала линии (рис. 2, в).

По осциллограммам, представленным на рис. 2, в, легко заметить, что при ОЗЗ в конце линии установившееся значение напряжения поврежденной фазы в конце линии равно 29,9 В, а в начале линии – 735,8 В, что обратно ситуации при ОЗЗ в начале линии.

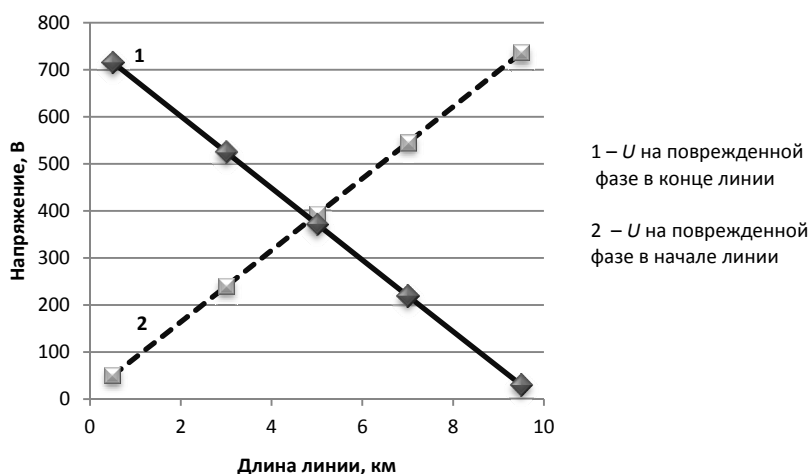


Рис. 3. Зависимость напряжения поврежденной фазы от места возникновения ОЗЗ:
1, 2 – зависимость измеренного напряжения в конце и начале линии электропередачи от расстояния до места повреждения

Из рис. 3 можно сделать вывод, что по установившемуся значению фазного напряжения поврежденной фазы А в начале и в конце линии электропередачи можно определить место замыкания. Данный рисунок представлен для переходного сопротивления, равного 0,1 Ом, что соответствует металлическому замыканию, но в действительности оно может быть существенно выше.

Наиболее важным фактором можно считать переходное сопротивление в месте повреждения. В задаче определения места замыкания переходное сопротивление снижает точность оценки места повреждения, поэтому внимание к этому параметру является приоритетным в разработке алгоритмов ОМП. Авторами работы [11] выполнена оценка переходного сопротивления в реальных условиях эксплуатации на основе данных о зарегистрированных повреждениях линий электропередачи с известным местом повреждения. Оценка производилась по соотношениям расчетных токов и напряжений в истинном месте повреждения с использованием алгоритмических моделей.

Ниже приведена статистика переходных сопротивлений при однофазном замыкании на землю:

- 80% – до 5 Ом;
- 10% – от 5 до 10 Ом;
- 4% – от 10 до 15 Ом;
- 6% – более 15 Ом.

Таким образом, для проведения нашего исследования можно принять переходное сопротивление, равное 0,1 Ом, 5 и 10 Ом.

Промоделируем ОЗЗ при различных значениях переходного сопротивления, полученные данные приведены в таблице.

Результаты моделирования
при различных значениях переходного сопротивления

Напряжение, В						Расстояние от начала линии до ОЗЗ, км
в начале линии			в конце линии			
0,1 Ом	5 Ом	10 Ом	0,1 Ом	5 Ом	10 Ом	
50,1	51,5	52,9	715,8	714,7	713,6	0,5
239,8	240,8	242,1	524,7	523,6	522,5	3
392,4	393,5	394,7	372	370,8	369,7	5
545	546,2	547,3	219,1	218,1	217	7
735,8	737	738,1	29,9	29,3	28,7	9,5

Построим по таблице зависимость значений напряжения поврежденной фазы, измеренных в конце линии (1) и в начале линии (2) от расстояния до места замыкания при различных значениях переходного сопротивления. Для получения наглядного сравнительного графика предварительно сделаем нормировку полученных значений напряжения, разделив каждое значение напряжения на максимальное, что позволит нам все графики свести к единой шкале (рис. 4).

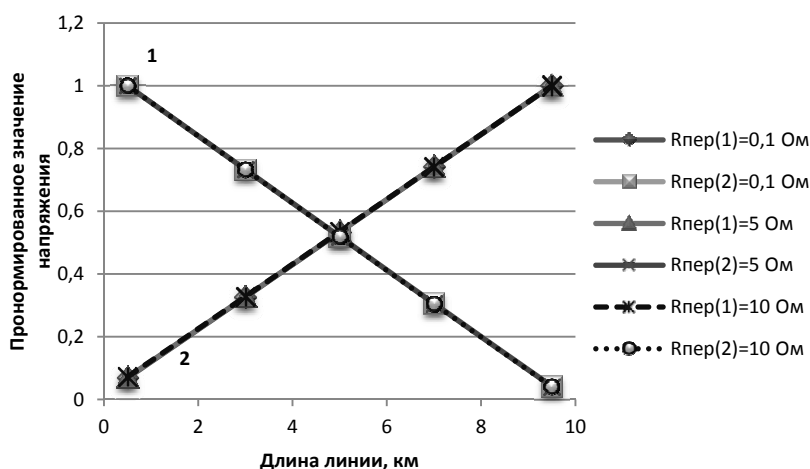


Рис. 4. Зависимость нормированного напряжения поврежденной фазы от места возникновения ОЗЗ при различных значениях переходного сопротивления

Из рис. 4 можно сделать вывод, что при приведении всех графиков к единой шкале зависимости значений напряжения в начале и в конце линии от расстояния до однофазного замыкания накладываются друг на друга при любом значении переходного сопротивления. Это важный вывод, так как это позволяет утверждать, что определение места замыкания не зависит от переходного сопротивления в месте аварии.

Практическая значимость данного исследования – это использование предложенного метода для дистанционного определения места замыкания по значениям фазного напряжения поврежденной фазы в установившемся режиме.

Выводы. 1. По установившемуся значению фазного напряжения поврежденной фазы А в начале и в конце линии можно определить место однофазного замыкания на землю в распределительной сети 10 кВ с изолированной нейтралью.

2. Определение места замыкания не зависит от переходного сопротивления в месте аварии. Значит, при любом переходном сопротивлении можно использовать данный метод по определению расстояния до однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью.

Литература

1. Абатуров А.В., Кривошеин И.Л. Способ определения места однофазного замыкания в распределительной сети напряжением 6–35 кВ, выполненной воздушными линиями // Общество. Наука. Инновации: сб. ст. Всерос. ежегодн. науч.-практ. конф. / Вятский гос. ун-т. Киров, 2017. С. 592–598.
2. Абдуллазянов Р.Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: автореф. дис. канд. техн. наук. Казань, 2013. 24 с.
3. Веселовский А.Н., Климов Н.А., Климов С.А. Влияние переходного сопротивления в месте замыкания на аварийные режимы фидера 35 кВ с трехобмоточным трансформатором // Труды КГСХА. 2015. Вып. 82. С. 175–179.
4. Дунаев А.И. О новой технологии определения места повреждения на ВЛ // Энергетик. 2001. № 2. С. 17–20.
5. Закамский Е.В. Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6–35 кВ: дис. канд. тех. наук. Казань, 2004.
6. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.
7. Киржацких Е.Р., Козлов В.К. Обзор методов определения места повреждения в сетях 6–35 кВ // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы докл. XIII Открытой молодежной науч.-практ. конф. / Казанский гос. энергет. ун-т. Казань, 2018. С. 66–70.
8. Киржацких Е.Р., Козлов В.К., Гиниятуллин Р.А. Моделирование однофазного замыкания в распределительных сетях 10 кВ с изолированной нейтралью в программе MATLAB // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева. 2018. № 4(94). С. 18–23.
9. Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М. Диагностический комплекс по исследованию линий электропередач // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. № 7–8. С. 17–22.
10. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования / под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2009. 162 с.
11. Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 3–7 июня 2013). URL: <https://book/3208751/87a52e>.
12. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И. Определение расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью 6–35 кВ по частоте свободных колебаний // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: 18-е Бенардосовские чтения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГЭУ, 2015. С. 452–456.

КОЗЛОВ ВЛАДИМИР КОНСТАНТИНОВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроэнергетические системы и сети, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (kozlov_vk@bk.ru).

КИРЖАЦКИХ ЕЛЕНА РИНАТОВНА – аспирантка кафедры электроэнергетические системы и сети, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (Ukaneeva1991@mail.ru).

ГИНИАТУЛЛИН РУСЛАН АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электротехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань (g_ruslan7@mail.ru).

V. KOZLOV, E. KIRZHATSKIKH, R. GINIATULLIN
TRANSIENT RESISTANCE INFLUENCE
ON ONE-PHASE GROUND FAULT LOCATION
IN DISTRIBUTION GRIDS WITH ISOLATED NEUTRAL WIRE

Key words: one-phase ground fault, fault location, transient resistance.

Half of the whole power transmission lines come to distribution grids of 6-35 kV. One-phase ground faults in grids with the average stress is the common type of damage; it accounts for 70% of all types of damages. Tardy damage elimination causes overvoltage of two undamaged phases, resulting in double shorts, two-phase, three-phase shorts, consequently, in consumer disconnection. At present, there are two ways to determine the short: the topographical method (passing-around by operational team with special instruments along the cable run) and the distance one (when special installations are set at the substation). Distance fault location in the tree-like networks is more relevant, as these networks are widely spread on a huge territory, cross rivers, ravines, ponds, forests, etc. The ways to determine the distance to the damaged place according to the parameters of emergency mode on the voltage line are not developed. All applied instruments have low accuracy and sensitivity not more than 20% of the short current, the value of which is from 0,5 to 5A in the networks with isolated neutral wire. This paper introduced the method to define the fault location according to the set value of phase voltage of the damaged phase, there is a this voltage-distance dependence to the short. Installations to calculate the voltage on the line with distance information transmission are established at the beginning and at the ends of power transmission lines. Transient resistance at the damaged place affects defining the distance to the point of one-phase short. In calculations metal circuit is assumed to be 0,1 Ohm, but it is only a single case. When simulating one-phase ground fault, it is necessary to take into account real values of resistance. The article showed that one-phase ground fault location doesn't depend on transient resistance at the damaged point.

References

1. Abaturov A.V., Krivoshein I.L. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'noi seti napryazheniem 6–35 kv, vypolnennoi vozduzhnymi liniyami* [The method of determining the location of single-phase short circuit to earth in the distribution network voltage of 6–35 kV performed by aerial lines]. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii: sb. st. Vseros. ezhegodn. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of Rus. Sci. Conf. «Society. Science. Innovation»]. Kirov, Vyatka University Publ., 2017, pp. 592–598.
2. Abdullazyanov R.E. *Metodika obnaruzheniya mesta povrezhdeniya pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV po ikh chastotnykh kharakteristikam: avtoref. ... dis. kand. tekhn. nauk* [Methods of detecting damage sites in single-phase earth faults in distribution electric networks with voltage of 6–35 kV according to their frequency characteristics. Diss. Abstract]. Kazan, 2013.
3. Veselovskii A.N., Klimov N.A., Klimov S.A. *Vliyanie perekhodnogo soprotivleniya v meste zamykaniya na avariynye rezhimy fidera 35 kV s trekhobmotochnym transformatorom* [Influence of transitional resistance in the place of short circuit on emergency modes of a feeder of 35 kV with a three-winding transformer.]. *Trudy KGSKhA*, 2015, iss. 82, pp. 175–179.

4. Dunaev A.I. *O novoi tekhnologii opredelenii opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL* [On a new technology for determining the location of damage on the overhead line.]. *Enregetik*, 2001, no. 2, pp. 17–20.
5. Zakamskii E.V. *Lokatsionnyi metod obnaruzheniya povrezhdenii v elektricheskikh raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 6-35 kV: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Locational method of detecting damage in electrical distribution networks with voltage of 6-35 kV. Doct. Diss.]. Kazan, 2004.
6. Faibisovich D.L., ed., Karapetyan I.G., Faibisovich D.L., Shapiro I.M. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei* [Handbook of electrical network design.]. Moscow, ENAS Publ., 2012, 376 p.
7. Kirzhatskikh E.R., Kozlov V.K. *Obzor metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya v setyakh 6-35 kV* [Overview of methods for determining the location of damage in the networks of 6-35 kV.]. *Dispatcherizatsiya i upravlenie v elektroenergetike: materialy dokl. XIII Otkrytoi molodezhnoi nauch.-prakt. konf.* [Proc. of 13th Open Youth Sci. Conf. «Dispatching and management in electric power industry»]. Kazan, 2018, pp. 66–70.
8. Kirzhatskikh E.R., Kozlov V.K., Giniatullin R.A. *Modelirovanie odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh 10 kV s izolirovannoi neitral'yu v programme MATLAB* [Simulation of single-phase short circuit in distribution networks of 10 kV with isolated neutral in the MATLAB program]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N.Tupoleva*, 2018, no. 4(94), pp. 18–23.
9. 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*, 2007, no. 7–8, pp. 17–22.
10. Shuin V.A., ed., Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh., Petrukhin A.A., Kudryavtsev D.M. *Opredelenie mest povrezhdenii LEP 6-35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya* [Locating damage to power lines 6-35 kV by active sensing methods]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2009, 162 p.
11. Podshivalin A.N., Ismukov G.N. *Adaptatsiya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii linii elektroperedachi* [Adaptation of methods for determining the location of damage to modern requirements of operation of power lines]. *Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releinoi zashchity i avtomatiki energosistem: materialy IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Ekaterinburg, 3–7 iyunya 2013)* [Proc. of 4th Int. Sci. Conf. «Modern trends of development of relay protection and automation of power systems» (Ekaterinburg, 3–7 July 2013)]. Available at: <https://b-ok.org/book/3208751/87a52e>.
12. Khuzyashev R.G., Kuz'min I.L., Novikov S.I. *Opredelenie rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neitral'yu 6–35 kV po chastote svobodnykh kolebaniy* [Determination of the distance to the site of single-phase earth fault in networks with insulated neutral 6–35 kV by the frequency of free oscillations]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii: 18-e Benardosovskie chteniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Status and development prospects of electric and thermal technology»]. Ivanovo, 2015. pp. 452–456.

KOZLOV VLADIMIR – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Electric Power Systems and Networks, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (kozlov_vk@bk.ru).

KIRZHATSKIKH ELENA – Post-Graduate Student, Department of Electric Power Systems and Networks, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (Ukaneeva1991@mail.ru).

GINIATULLIN RUSLAN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical and Electrical Engineering, Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan (g_ruslan7@mail.ru).

Формат цитирования: Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниатуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 39–46.

УДК 621.316.91

ББК 31.247

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ НЕЙРОАЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ВТОРИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ*

Ключевые слова: адаптивные алгоритмы, нейронные сети, распознавание аномалий, вторичное оборудование, информационная безопасность.

Высокая интеграция информационных сетей электроэнергетики с Ethernet протоколами делает их уязвимыми для сбоев в информационном обмене, вирусных атак и сетевого взлома. Существующие системы защиты – административные меры, системы обнаружения вторжения и т.д. не всегда эффективны в силу человеческого фактора или запаздывания обновления сигнатурных баз. Более эффективной мерой может служить выявление аномалий в работе информационных сетей энергообъектов. Выявление аномалий возможно на основе статистических выбросов или путем обнаружения «новизны» в данных или параметрах работы системы. Для задачи поиска «новизны» могут эффективно применяться методы интеллектуального анализа данных (МИАД). Одним из методов МИАД является применение искусственных нейронных сетей (ИНС). Предлагается обучить ИНС на данных, получаемых из сетевого трафика информационной сети энергообъекта. Обучение проводится на максимально возможном количестве нормальных режимов с точки зрения функционирования информационной сети. Такой подход позволяет получить информацию о появлении аномалий в информационном обмене. В качестве данных для обучения сети целесообразно использовать агрегатные параметры работы сети и данные о режиме работы силовой части, поскольку они являются ключевыми в работе всей системы. Показано, что обучение ИНС может проводиться на выборке данных, полученных на лабораторном стенде, состоящем из модели цифровой сети и математической модели силовой части энергообъекта.

Введение. Современная общемировая тенденция автоматизации и информатизации всех сфер деятельности человека привела к значительному увеличению роли и усложнению автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) в электроэнергетике. Раньше системы управления ограничивались телемеханикой, сейчас же появилась необходимость в целой объединенной высокоскоростной цифровой инфраструктуре управления электроэнергетическими объектами.

Вкупе с растущим количеством киберугроз [1, 12] и возрастанием количества уязвимостей в информационных системах обеспечение информационной безопасности становится всё более актуальной задачей [3, 8]. В настоящее время наиболее частыми причинами сбоев в АСУ ТП являются вредоносные программы и целенаправленный взлом системы, причём существует тренд на повышение количества попыток взлома и вредоносных программ [3].

Существует множество разновидностей взлома, от простого несанкционированного доступа к управлению электроэнергетическим объектом до поддел-

* Работа поддержана грантом Фонда Содействия Инновациям (конкурс «УМНИК»), договор 11555ГУ/2017.

ки показаний измерительного оборудования и приборов учета, поступающих в центральное управление (ЦУ). Последний вид взлома наиболее опасен, поскольку не позволяет вовремя среагировать на отказ релейной защиты и может привести к огромным потерям в электроэнергетической инфраструктуре.

Возрастающая интеграция систем релейной защиты автоматизации (РЗА) и АСУ-ТП делают все менее возможной полную изоляцию технологической сети от внешних цифровых сетей. Ранее эта проблема не стояла так остро, поскольку использовались специфические промышленные протоколы и нестандартные каналы связи (последовательные каналы, интерфейсы, не совместимые с Ethernet сетями). Это приводило к необходимости физического взаимодействия потенциального нарушителя с сетевым и технологическим оборудованием, а значит, значительно затрудняло вредоносные воздействия и снижало привлекательность действий такого рода. В настоящее время широко внедрены протоколы связи, работающие в сетях Ethernet и передающие информацию поверх стандартных сетевых протоколов TCP/IP, UDP и т.д. Этот факт делает взлом информационных сетей электроэнергетики доступным для более широкого круга злоумышленников, для которых не требуется глубоких знаний в области электроэнергетики [12, 16].

Наиболее распространёнными и очевидными решениями для защиты от киберугроз являются сегментирование сети, часто полная изоляция отдельных сегментов, а также установка различных антивирусных программ и систем обнаружения вторжения, таких как Kaspersky Industrial CyberSecurity for Networks¹ [3, 15, 17]. В условиях промышленных сетей помимо ограничений, налагаемых на средства информационной безопасности требованием целостности и непрерывности техпроцесса, серьёзные затруднения вызывают сложность и слабое документирование сетевых взаимодействий. Если сигнатурный анализ в промышленных сетях осуществим так же легко, как и в корпоративных, то применение эвристических алгоритмов сталкивается с необходимостью понимания и принципов кибербезопасности, и специфики техпроцесса, и принципов построения сетевых взаимодействий в промышленных сетях. В то же время промышленный техпроцесс поддаётся детальному моделированию в стендовых условиях. Таким образом, наиболее перспективным представляется создание эвристических алгоритмов путём машинного обучения систем кибербезопасности на стендовых моделях с целью однозначного распознавания нормального течения техпроцесса с точки зрения анализа сетевого трафика.

Обнаружение аномалий в работе систем вторичного оборудования. Определение аномалий в работе электрооборудования является ключевым в релейной защите. Под аномалией в данном случае понимается аварийная ситуация, которая может привести к повреждениям оборудования.

¹ О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Фед. закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».

В анализе данных можно выделить два направления поиска аномалий:

- 1) поиск статистических выбросов;
- 2) поиск «новизны».

Обнаружение статистических выбросов уже давно изучено, но оно не подходит для поиска аномалий в случае электроэнергетики, поскольку многие «аномальные» режимы работы оборудования, при которых возникают крайне значительные флуктуации значений параметров его работы, на самом деле являются нормальными режимами работы (например, срабатывание защиты при коротких замыканиях (КЗ)) [9, 10]. С точки зрения данной работы и нормальные, и аварийные режимы в энергосистеме считаются нормальными для информационной сети. Задача состоит в обнаружении аномального поведения цифровой системы управления (цифровой подстанции).

Обнаружение «новизны» – значительно более сложная задача. Под «новизной», в частности, понимаются коллективные и, в особенности, контекстуальные аномалии в данных, под которыми понимается совокупность параметров электрооборудования, таких как ток, напряжение, мощность, фазы и др., сигналы состояния оборудования и команды управления, передающиеся по цифровым сетям энергообъекта. В случае коллективной аномалии данные считаются аномальными только тогда, когда последовательность связанных между собой данных является аномальной к общей выборке данных. В случае контекстуальной аномалии данные считаются аномальными только в определённом контексте (определённая совокупность величин или последовательность их изменения), а в ином случае считаются нормальными.

Кроме того, обнаружение выбросов не позволит определить аномалии, которые находятся не близко к границам определения данных (не близко к максимуму или минимуму).

Методы интеллектуального анализа данных (МИАД), предлагаемые в настоящей работе, широко используются для обработки информации и выявления в ней тенденций развития, а также – для создания моделей, способных оказать помощь при принятии решений [2, 22]. Они применяются при решении таких задач, с которыми не справляется классический статистический анализ.

Важной особенностью МИАД является способность обрабатывать огромные массивы данных, в том числе в реальном времени. Это позволяет частично автоматизировать принятие решений на критически важных инфраструктурных объектах, в частности, при обеспечении производственной и информационной безопасности в электроэнергетике. Практически все МИАД требуют для работы размеченной выборки данных и позволяют решать задачи классификации, кластеризации и прогнозирования [22].

В связи с тем, что не существует способа заранее знать все возможные поломки и сбои в работе оборудования, а также в связи с наличием возможности (в лабораторных условиях или с помощью компьютерного моделирования) получить значительное количество данных о штатной и аварийной работе электроустановки, предлагается использование одного из методов

МИАД – искусственной нейронной сети (ИНС) [7, 11]. Она позволит определять аномалии в работе электроэнергетического объекта, в частности в системах вторичного оборудования электроэнергетики.

В современных АСУ ТП, подключенных к ЦУ, каждая аварийная ситуация значительно меняет сетевой трафик¹. Таким образом, если обучить ИНС на основании нормальных режимов работы в сочетании с интернет-трафиком, который генерируется АСУ ТП для передачи в ЦУ, можно получить модель, которая определяет аномальность сетевого трафика (информационного потока) при разных режимах работы электроэнергетического объекта [6, 18].

Важно отметить, что информационные потоки затруднительно аналитически разобрать в реальном времени из-за их чрезмерной сложности. Тем не менее имеется возможность собрать агрегатные параметры сетевого потока, такие как количество пакетов, количество запросов на определённый адрес, количество одновременных подключений и другие.

В связи с вышесказанным задачи исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Моделирование данных режимов работы первичного электрооборудования.

2. Воспроизведение физических величин моделируемых режимов посредством испытательного оборудования для РЗА, например – РЕТОМ, посредством имитации работы первичного оборудования и получения реакции вторичного оборудования цифровой подстанции – сетевого трафика нормальной работы вторичного оборудования.

3. Обучение ИНС на основе полученных данных, что позволит определять несоответствия между отправленным трафиком и реальным состоянием электроэнергетического объекта.

Численное моделирование силовой части энергообъекта. Для генерации данных нормальной работы первичного оборудования объекта сформирована математическая модель энергообъекта, схема которой показана на рис. 1. При моделировании переходных процессов в силовых электрических цепях можно использовать численные алгоритмы, например, метод синтетических схем [4], также известный как алгоритм Доммеля [14]. В результате применения данного алгоритма расчета переходных процессов на выходе получают мгновенные значения параметров моделируемого объекта [5, 21], что позволяет сразу генерировать записи осциллограмм в формате Comtrade, удобном для воспроизведения на оборудовании для тестирования устройств РЗА.

Указанная методика хорошо подходит для целей данной работы, поскольку позволяет получать данные в виде массивов выборок мгновенных значений параметров в нужных точках схемы с заданным шагом. Применение

¹ Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 25.040.40.227-2016. Типовые технические требования к функциональной структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций Единой национальной электрической сети (АСУ ТП ПС ЕНЭС) 26.09.2016.

моделей силового оборудования в базе фазных координат позволяет моделировать переходные процессы [13, 20] в различных сложных и несимметричных режимах энергосистемы. При необходимости методика позволяет вводить в схему нелинейные элементы [9].



Рис 1. Схема моделируемого участка

В качестве примера приведены кривые токов и напряжений в рассматриваемой схеме, полученные в результате моделирования с применением указанной методики. Пример результатов моделирования представлен на рис. 2.

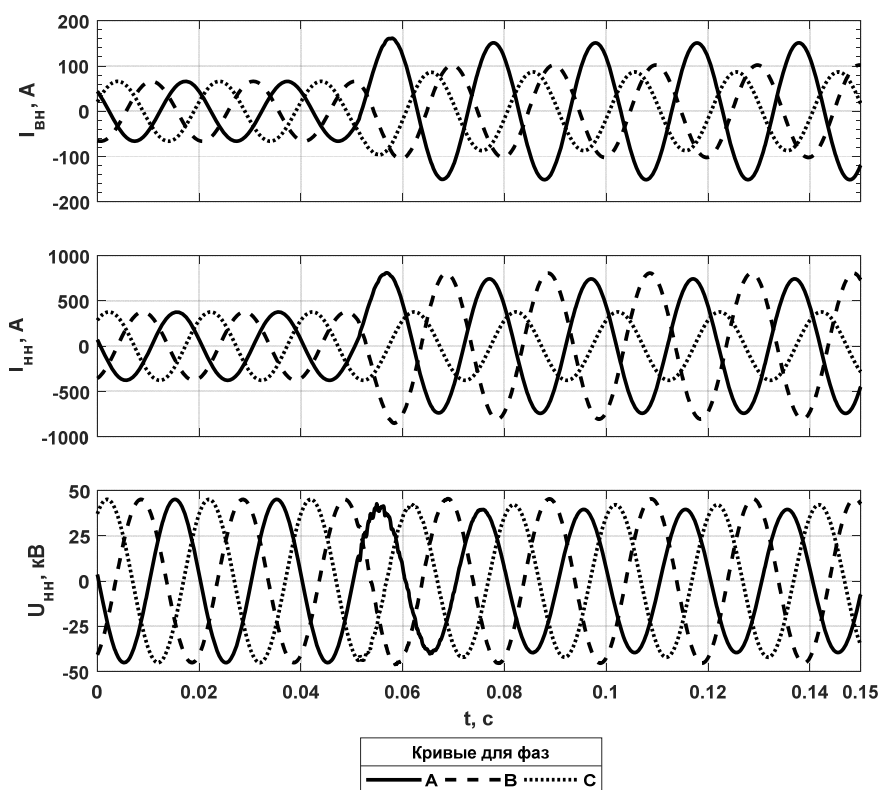


Рис. 2. Замыкание фаз *A-B* на нагрузку $I_{НН}$ — токи фаз в месте наблюдения (присоединение линии 35 кВ к шинам питающей подстанции),

$I_{ВН}$ — токи на вводах трансформатора 110 кВ,

$U_{НН}$ — линейные напряжения в месте наблюдения

В качестве основы для моделирования режимов рассматривается участок электросети, представляющий собой силовой трансформатор 110/35 кВ с подключенной к нему линией 35 кВ. Со стороны 110 кВ участок подключен к эквивалентному источнику мощности, со стороны 35 кВ подключена нагрузка с коэффициентом мощности 0,8. На стороне 110 кВ и стороне 35 кВ располагаются силовые выключатели. Моделируются режимы работы участка энергосети с учетом переходных процессов. Результаты моделирования преобразуются в файлы формата COMTRADE в соответствии со стандартом IEEE Std C37.111-1999 для последующего использования на стенде.

Примеры режимов работы участка энергосети, выбранных для моделирования:

1. Нормальные режимы:
 - включение силового трансформатора на холостой ход;
 - включение линии на холостой ход;
 - включение линии на нормальную нагрузку (~70% от мощности трансформатора);
 - отключение нагрузки с переводом линии на холостой ход.
2. Утяжелённые режимы:
 - переключение на повышенную нагрузку (до уровня 130% номинальной мощности трансформатора);
 - резкий сброс избыточной нагрузки до номинального значения;
 - потеря напряжения в системе (при включённых выключателях происходит полная потеря напряжения и тока);
 - однофазное замыкание на землю на линии 35 кВ;
 - междуфазное замыкание на стороне 110 кВ силового трансформатора вне зоны действия защит («за спиной»).
3. Аварийные режимы:
 - трёхфазное КЗ на вводах силового трансформатора;
 - трёхфазное КЗ на линии;
 - междуфазное КЗ на вводах силового трансформатора;
 - междуфазное КЗ на линии;
 - однофазное замыкание на вводах стороны 35 кВ силового трансформатора;
 - двойное замыкание на землю на стороне 35 кВ силового трансформатора и на линии;
 - однофазное короткое замыкание на стороне 110 кВ трансформатора.

Отдельно рассматривается утяжелённый режим работы участка электросети – работа с избыточной нагрузкой линии. Ввиду статического характера и длительности протекания режима моделирование производится непосредственно на стенде.

Моделирование вторичного оборудования. Стенд представляет собой панель с установленными на ней устройствами релейной защиты, двухпозиционными реле, моделирующими силовые выключатели, и сетевым оборудованием. Основная и резервная защита силового трансформатора выполнена

на устройствах дифференциальной защиты трансформатора 7UT63 производства SIEMENS. Основная и резервная защита линии 6 кВ выполнена на устройствах токовых защит 7SJ64 производства SIEMENS. Алгоритмы защит устройств РЗА настроены в соответствии с параметрами модели.

К устройствам релейной защиты подключены двухпозиционные реле, моделирующие силовые выключатели. Между собой устройства РЗА связаны посредством GOOSE-сигналов в соответствии со стандартом МЭК-61850. Устройства РЗА подключаются к SCADA-серверу в соответствии со стандартом МЭК-61850 (рис. 3)¹.

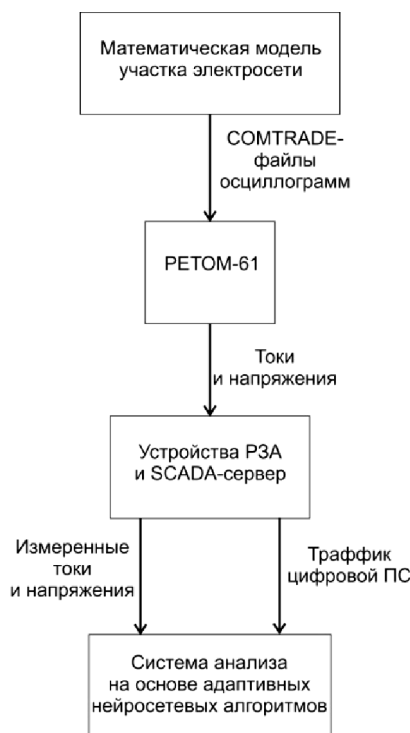


Рис 3. Схема программно-аппаратной модели вторичного оборудования и обработки сигналов

Для моделирования работы устройств РЗА в рассматриваемых режимах работы участка энергосети к аналоговым цепям устройств РЗА подключается устройство РЕТОМ-61 (ТУ 4258-024-13092133-2008) производства НПП «Динамика».

¹ Сети связи и системы связи для автоматизации электрического энергоснабжения – часть 8-1: Специальное изображение коммуникационных услуг (SCSM) – изображения на MMS (после ИЗО в 9506-1 и ИЗО в 9506-2) и ИЗО / ИЕС в 8802-3 (Международная комиссия по электротехнике 61850 8 1:2011); английская формулировка 61850 EN 8 1:2011.

COMTRADE-файлы с результатами моделирования на математической модели загружаются в специализированное ПО управления РЕТОМ-61. Таким образом, воспроизводятся полученные в результате моделирования режимы работы участка энергосети путём подачи токов и напряжений в аналоговые цепи устройств РЗА. По светоиндикационным панелям устройств РЗА и полученным SCADA-сервером сигналам контролируется правильность поведения устройств РЗА в условиях смоделированного режима. Устройства РЗА обрабатывают поданные аналоговые сигналы и, в соответствии с заложенными в них алгоритмами, формируют сигналы управления и сигнализации, передаваемые затем в виде GOOSE-сообщений между устройствами РЗА и MMS-сообщений в SCADA-сервер. Данные сетевые взаимодействия фиксируются с помощью специального ПО и используются для обучения нейросети.

Использование ИНС для обнаружения аномалий. АСУ ТП постоянно генерирует значительное количество сигналов, таких как информация о переключении выключателей, показания датчиков и т.д. Эти сигналы неизбежно коррелируют между собой из-за того, что находятся в относительно замкнутой системе техпроцесса. В связи с этим аномалии в информационном обеспечении вторичного оборудования или киберинцидент в одной части техпроцесса скорее всего повлияют и на информационное обеспечение техпроцесса в целом [18]. Следовательно, если применить методы машинного обучения к данным, соответствующим нормальным режимам работы (в том числе – аварийным, соответствующим адекватному срабатыванию РЗА), то можно получить модель, содержащую взаимосвязи разных элементов техпроцесса и, как следствие, определить изменения, вызванные киберинцидентами и нарушениями в информационном обеспечении.

В частности, можно использовать один из МИАД – рекуррентную нейронную сеть с LSTM (Long short-term memory) архитектурой. После обучения она сможет предсказывать значения всех сигналов в реальном времени, после чего их можно будет сравнить с реальными. Если разница между реальными и предсказываемыми значениями слишком велика, то можно считать, что в техпроцессе существует аномалия.

Кроме того, сам процесс обучения и тестирования ИНС любой архитектуры, контроль качества ее обучения («обучаемости») могут служить критериями и использоваться для анализа внутрисистемных связей [19]. Изменения в самом процессе обучения ИНС также могут служить для обнаружения возникающих информационных аномалий.

Выводы. Предлагаемый подход, основанный на численном и программно-аппаратном моделировании технологического процесса энергообъекта, позволяет генерировать значительный поток данных, максимально приближенных к реальным условиям его функционирования. Эти данные могут использоваться для выбора архитектуры одной или нескольких ИНС, их обучения и тестирования для задач обнаружения и идентификации информационных аномалий в работе вторичного оборудования. При этом дальнейшее использование нейросетевых алгоритмов может не включаться в систему авто-

материзованного управления, а выполнять функцию «наблюдателя». Для энергообъектов это исключает вмешательство системы в технологический процесс и не приведет к «ложным» срабатываниям РЗА.

Литература

1. Алымов И. Проблемы информационной безопасности подстанции и способы их решения [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2016/02/17/problemu-informatsionnoj-bezopasnosti-podstantsii-i-sposoby-ih-resheniya> (дата обращения: 09.01.2019).
2. Боровиков В.П. Нейронные сети. Методология и технологии современного анализа данных / под ред. В.П. Боровикова. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 392 с.
3. Гусев И. Вопросы информационной безопасности современных систем РЗА [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2013/12/16/voprosy-informatsionnoj-bezopasnosti-sovremennykh-sistem-rza/> (дата обращения: 09.01.2019).
4. Демирчан К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988. 355 с.
5. Законьшек Я., Славутский А.Л. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 1. С. 66–72.
6. Коцеев М.И., Никаноров М.В. Машинное обучение при определении аномалий в работе электроэнергетического объекта для обеспечения информационной безопасности // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 221–226.
7. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 382 с.
8. Назаров И.Г., Суслов Д.В., Никаноров М.В., Славутский Л.А. Комплекс обеспечения контролируемой деградации системы управления энергообъекта при киберинцидентах // Вестник Чувашского университета. 2018. № 1. С. 146–152.
9. 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.
10. Славутский А.Л. Оценка динамических характеристик измерительных органов при переходных процессах в энергосистеме // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 161–165.
11. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: 2-е изд.: пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1104 с.
12. Шеметов А.С., Никаноров М.В., Брагута М.В. Киберугрозы современной электроэнергетики: доступность и открытость информационно-технологических систем // Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей. 2016. № 1. С. 56–64.
13. Щедрин В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. 422 с.
14. 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.
15. Hohlbaum F., Braendle M., Alvarez F. Cyber Security Practical considerations for implementing IEC 62351. PAC World Conference, 2010, 8 p.
16. Hoyos J., Dehus M., Brown T. X. Exploiting the GOOSE protocol: A practical attack on cyber-infrastructure. Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012, pp. 1508–1513.
17. Kaspersky Industrial CyberSecurity, «Кибербезопасность АСУ ТП» [Электронный ресурс]. URL: <https://ics.kaspersky.ru/solution-overview>.
18. MLAD: Machine Learning for Anomaly Detection [Электронный ресурс]. Available at: <https://ics-cert.kaspersky.com/reports/2018/01/16/mlad-machine-learning-for-anomaly-detection>.
19. Slavutskaya, E.V., Slavutskii, L.A. Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models. Society. Integration. Education. Proceedings of the Scientific Conference, 2018, vol. 5, pp. 455–464.

20. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26.

21. Watson N., Arillaga J. Power System Electromagnetic Transients Simulation. London, The Institution of Engineering and Technology, 2007, 621 p.

22. Witten I.H., Eibe F., Hall M., Pal C. Data Mining: Practical machine learning tools and techniques. Morgan Kaufmann, 2016, 621 p.

КОЩЕЕВ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ – аспирант кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (maxkoshe5@gmail.com).

ЛАРИУХИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – заместитель директора по управлению проектами, ООО «Интеллектуальные Сети», Россия, Чебоксары (laruhin@igrids.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).

M. KOSHCHEEV, A. LARIUKHIN, A. SLAVUTSKIY
APPLICATION OF ADAPTIVE NEURO ALGORITHMS
FOR RECOGNITION OF ANOMALOUS BEHAVIOUR
OF SECONDARY EQUIPMENT SYSTEMS IN ELECTRIC POWER INDUSTRY

Key words: *adaptive algorithms, neural networks, anomaly recognition, secondary equipment, cybersecurity.*

The high integration of information networks of the power industry with Ethernet protocols makes them vulnerable to disruptions in information exchange, virus attacks and network hacking. Existing security systems are administrative measures, intrusion detection systems, etc. are not always effective because of the human factor or late update of the signature database. Identification of anomalies in the operation of information networks of power facilities can serve as a more effective approach. Anomaly detection is possible on the basis of statistical outliers or by detecting "novelty" in the data or system operation parameters. Data mining methods can be effective to search the "novelty". One of such methods is the use of artificial neural networks (ANN). It is proposed to train the ANN on data obtained from the network traffic of the information network of the power facility. Training is conducted on the maximum possible number of normal modes in terms of the functioning of the information network. Such an approach allows obtaining information on the occurrence of anomalies in the information exchange. As data for network training, it is advisable to use the aggregate parameters of the network and data on the operation of the power unit, since they are key in the operation of the entire system. It is shown that ANN training can be conducted on a sample of data obtained on a laboratory bench consisting of a digital network model and a mathematical model of a power unit of a power facility.

References

1. Alymov I. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti podstantsii i sposoby ikh resheniya* [Information security problems of the substations and their solutions]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2016/02/17/problemy-informatsionnoj-bezopasnosti-podstantsii-i-sposoby-ih-resheniya> (Accessed 09.01.2019).

2. Borovikov V.P. *Neironnye seti. Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh* [Neural networks. Methodology and technologies of modern data analysis]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2008, 392 p.

3. Gusev I. *Voprosy informatsionnoi bezopasnosti sovremennykh sistem RZA* [Information security issues of modern systems of relay protection]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2013/12/16/voprosy-informacionnoj-bezopasnosti-sovremennykh-sistem-rza> (Accessed 09.01.2019).
4. Demirchan K.S., Butyrin P.A. *Modelirovanie i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei* [Simulation and machine calculation of electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 355 p.
5. Zakon'shek Ya. *Cifrovoye modelirovanie sovremennykh energosistem v real'nom vremeni* [Digital simulation of modern power grids in real time]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2012, no. 1, pp. 66–72.
6. Koshcheev M.I., Nikandrov M.V. *Mashinnoe obucheniye pri opredelenii anomalii v rabote elektroenergeticheskogo ob"ekta dlya obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti* [Machine learning in determining anomalies in the operation of an electric power facility to ensure cybersecurity]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti : Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proc. of 2nd Int. Sci. Conf. «Problems and perspectives for the development of electric infrastructure, electrical engineering and energy efficiency». Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2018, pp. 221–226.
7. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennyye neironnyye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2001, 382 p.
8. Nazarov I.G., Suslov D.V., Nikandrov M.V., Slavutskii L.A. *Kompleks obespecheniya kontroliruemoi degradatsii sistemy upravleniya energoob"ekta pri kiberinsidentakh* [Complex to ensure the controlled degradation of the control system of the power facility in case of cyber incidents]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 146–152.
9. 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*, 2017, vol. 88, no. 7, pp. 412–415.
10. Slavutskiy A.L. *Otsenka dinamicheskikh kharakteristik izmeritel'nykh organov pri perekhodnykh protsessakh v energosisteme* [The estimate of dynamic characteristics of measuring elements to transient processes in power systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 161–165.
11. Khaikin S. *Neironnyye seti: polnyi kurs* [Neural networks: full course]. Moscow, Vil'yams Publ., 2006, 1104 p.
12. Shemetov A.S., Nikandrov M.V., Braguta M.V. *Kiberugrozi sovremennoi elektroenergetiki: dostupnost' i otkrytost' informacionno-tehnologicheskikh sistem* [Cyber threats of modern electric power industry: availability and openness of information technology systems]. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu i ekspluatacii elektricheskikh setei* [Guidance on the design and operation of electrical networks], 2016, no. 1, pp. 56–64.
13. Shchedrin V.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2007, 422 p.
14. 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.
15. Hohlbaum F., Braendle M., Alvarez F. Cyber Security Practical considerations for implementing IEC 62351. PAC World Conference, 2010, 8 p.
16. Hoyos J., Dehus M., Brown T. X. Exploiting the GOOSE protocol: A practical attack on cyber-infrastructure. Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012, pp. 1508–1513.
17. «Kiberbezopasnost ASU TP» [Kaspersky Industrial CyberSecurity. «CyberSecurity APCS»]. Available at: <https://ics.kaspersky.ru/solution-overview>.
18. MLAD: Machine Learning for Anomaly Detection. Available at: <https://ics-cert.kaspersky.com/reports/2018/01/16/mlad-machine-learning-for-anomaly-detection>.
19. Slavutskaya, E.V., Slavutskii, L.A. Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psychodiagnostic Data Based On Neural Network Models. Society. Integration. Education. Proceedings of the Scientific Conference, 2018, vol. 5, pp. 455–464.

20. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26.

21. Watson N., Arillaga J. *Power System Electromagnetic Transients Simulation*. London, The Institution of Engineering and Technology, 2007, 621 p. Witten I.H., Eibe F., Hall M., Pal C. *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann, 2016, 621 p.

22. Witten I.H., Eibe F., Hall M., Pal C. *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann, 2016, 621 p.

KOSHCHEEV MAKSIM – Post-Graduate Student of the Department of Automation and Electronics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (maxkoshe5@gmail.com).

LARIUKHIN ALEKSANDR – Deputy Director of Project Management, LLC «Intellectual Networks», Russia, Cheboksary (laruhin@igrids.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).

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

УДК 621.365.2.016.3-047.72

ББК 3292.2-5

Э.Л. ЛЬВОВА, А.Н. МИРОНОВА

РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, показатели качества электрической энергии, искажение напряжения, высшие гармоники, вероятностные характеристики, реактивная мощность, суммарный график нагрузки.

Дуговые печи являются источниками помех, ухудшающих показатели качества электрической энергии. Вопросы влияния дуговых печей на питающую сеть и методов улучшения режимов питающего напряжения в системы электроснабжения актуальны. При работе печей появляются значительные случайные нерегулярные колебания тока. В статье предложен метод оценки вероятностных характеристик уровня несинусоидальности напряжения группы дуговых печей на основе расчета гармонических составляющих тока ввода. Поставлена задача нахождения относительного уровня каждой гармоники в случае питания ДСП по групповому принципу. Рассмотрены вопросы анализа реактивной мощности с учетом стохастичности дуги для системы электроснабжения ДСП. Предложена методика расчета суммарной реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей. Рассмотрена целесообразность устройства компенсации реактивной мощности в сетях с дуговыми печами совместно с фильтрами высших гармоник.

Интенсификация производства, развитие электротехнологии обуславливают на современном этапе и в перспективе применение промышленных электроприемников, негативно влияющих на режимы питающего напряжения в системе электроснабжения (СЭС) и тем самым ухудшающих показатели качества электрической энергии. К таким потребителям относятся дуговые сталеплавильные печи (ДСП), работа которых приводит к увеличению высших гармоник тока и напряжения в питающей сети, что ухудшает технические характеристики остальных потребителей. Обеспечение экономии материальных и энергетических ресурсов можно достичь за счет оптимизации режимов работы СЭС с ДСП.

ДСП относятся к крупным потребителям реактивной мощности. Оценить значения реактивной мощности, потребляемой ДСП, затруднительно из-за влияния несимметрии и несинусоидальности режима.

Решение вопросов рационального построения систем электроснабжения промышленных предприятий, эксплуатирующих ДСП, позволит обеспечить электромагнитную совместимость нагрузки ДСП с питающей сетью, оценить вклад гармонических составляющих тока, вызванных нелинейной нагрузкой ДСП, в несинусоидальность напряжения системы электроснабжения.

Известно, что для снижения отрицательного влияния ДСП необходимо применять устройства динамической и статической компенсации реактивной мощности и целесообразно сделать это в сочетании с фильтрами высших гармоник (ФКУ) [1]. Принудительный сдвиг циклов плавки печей для выравнивания графиков нагрузки группы ДСП позволяют снизить мощность ком-

пенсирующего устройства и дополнительно изменить режим напряжения в питающей сети.

При работе ДСП на основании вероятностных характеристик токов дуг не удастся учесть влияние несинусоидальности напряжения дуги. Это объясняется тем, что при расчете электрической цепи ДСП с учетом несинусоидальности токов и напряжений необходимо задавать напряжения на дугах. Вследствие наличия высших гармоник появляются дополнительные напряжения U_v и потери мощности в подводящей сети. Все это возникает из-за нелинейной вольт-амперной характеристики дуги.

Активная мощность потерь может быть определена как сумма активных мощностей всех гармоник тока $I_{дв}$ и напряжения U_v :

$$P_{\text{пот}} = \sum_{v=1}^n U_v \cdot I_{дв} \cdot \cos \varphi_v = \sum_{v=1}^n P_{\text{пот}v},$$

где n – номер последней из учитываемых гармоник; v – номер гармоники.

В данной работе приводятся результаты исследования совместной работы электрической сети и печей с учетом их взаимовлияния в установившихся режимах. При этом ставилась задача нахождения относительного уровня каждой гармоники в случае питания ДСП по групповому принципу.

Групповая схема по ряду экономических факторов находит широкое применение для питания дуговых печей малой и средней мощности на машиностроительных заводах.

При значительной суммарной мощности ДСП взаимовлияние печей вызывает изменение гармонического состава сетевого тока, а увеличивающийся уровень гармоник, при совпадении стадий расплава нескольких печей, может привести к выходу из строя конденсаторов в установленных на ГПП компенсирующих устройствах.

Этого можно избежать, если правильно рассчитать коэффициент искажения синусоидальности кривых напряжения и тока в сети и предусмотреть меры для его снижения.

Увеличение коэффициента несинусоидальности напряжения и тока в сети определяется по выражению

$$K_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n A_v^2}}{A_1 / \sqrt{3}} 100, \quad (1)$$

где A_1 и A_v – действующие значения тока или напряжения, соответственно, первой и v -й гармоники; n – номер последней из учитываемых гармоник.

Были рассмотрены ДСП машиностроительных предприятий вместимостью 6 и 25 т с трансформаторами мощностью 4000 и 15 000 кВ·А, работающие в условиях литейного цеха. Основой для разработки методики экспериментальных исследований послужили работы [1, 4, 9], по результатам которых были приняты вероятностные принципы в исследуемых процессах.

При работе нескольких печей одновременно рассматривались следующие характерные режимы: проплавление и расширение колодцев, обвалы шихты, окончание расплавления, доводка металла. Результаты измерений уровней гармоник тока и напряжений показывают, что наибольший уровень имеют гармоники с номерами от 2 до 7 на стороне высокого напряжения печных трансформаторов [4].

Вторая, третья и пятая гармоники тока преобладают над другими высшими и имеют максимальное среднестатистическое значение в распределительной сети при увеличении количества работающих печей. Содержание четных гармоник тока практически увеличивается на порядок при работе нескольких печей в режиме расплавления, однако, как показывает результаты измерений, увеличение коэффициента несинусоидальности напряжения главным образом происходит за счет нечетных гармоник. Это имеет существенное значение при проектировании и обосновании применения устройств компенсации реактивной мощности, так как позволит в ряде случаев снизить необходимую мощность фильтров в ФКУ.

В настоящее время при подключении к электрическим сетям общего назначения пользуются рекомендациями ПУЭ по соотношению суммарной мощности N электропечных трансформаторов S_{Ti} и мощности короткого замыкания S_k сети в точке присоединения печной нагрузки [1, 5, 9]:

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N S_{Ti}^2}}{S_k} = \frac{S_{Ti \max}}{S_k} \cdot K_m \leq 0,01.$$

В этом случае проверку на колебательность напряжения можно не выполнять.

При определении $K_{нс}$ необходимо в расчетной точке питающей сети определить токи гармоник I_v и фазное напряжение U_v , которые зависят от числа и мощности дуговых печей.

Для группы одинаковых по мощности печей имеем [2, 5, 9]

$$I_{vGP} = I_v \cdot K_m = I_v m^{0,28},$$

где m – число печей, одновременно работающих в режиме расплавления;

для группы печей разных по мощности

$$I_{vGP} = I_{v \max} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{Ti}}{S_{Ti \max}} \right)}, \quad (2)$$

где $I_{v \max}$ – ток v -й гармоники печного трансформатора наибольшей мощности.

Фазное напряжение U_v определяется по известным формулам [5].

Выражения (1) и (2) позволяют оценить степень влияния колебаний напряжения на уровень коэффициента несинусоидальности, если известны параметры распределения тока нагрузки.

Задача нахождения уровня каждой гармоники в случае питания произвольных групп ДСП от различных схем электроснабжения может быть решена,

если будет возможность получения исходных данных о гармоническом составе токов для различных схем питания ДСП.

Дуга рассматривается как нелинейное инерционное сопротивление и представляется в виде функции

$$u_d = f(i_d, U_d, \theta),$$

где U_d – действующее значение напряжения дуги; θ – тепловая инерционность дуги, зависящая от изменения режима работы ДСП; i_d – ток дуги.

Поскольку процентное содержание высших гармоник в токе дуги не превышает 15%, при решении поставленной задачи использован метод последовательных приближений [6].

Использование данного метода позволило дать оценку коэффициента не-синусоидальности напряжения. Для сетевого тока в уравнении напряжения распределительной сети по v -й гармонике имеем [7]

$$I_{Bv}^2 = \sum_{k=1}^N I_{kv}^2 + 2 \cdot \sum_{k>l}^N I_{kv} \cdot I_{lv} \cdot \cos(\varphi_{kv} - \varphi_{lv}), \quad (3)$$

где $k, l = 1, 2, \dots, N$; N – количество ДСП.

В выражении (3) ток k -й ДСП и сдвиг фазы тока φ_{kv} по v -й гармонике зависят от напряжения дуги U_{dk} :

$$I_{kv} = \frac{|\bar{E}_v|}{\sqrt{r_k^2 + (v \cdot \omega L_k)^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{kv} = \frac{r_k \cdot \operatorname{tg}(v \cdot \varphi_k) + v \cdot \omega L_k}{r_k - v \cdot \omega L_k \cdot \operatorname{tg}(v \cdot \varphi_k)},$$

где $\bar{E}_v = \bar{U}_{kv} - \bar{U}_{dkv} - \bar{U}_{0kv}$; $\operatorname{tg} \varphi_k = -\frac{\omega L_k}{r_k + R_{dk}(U_{dk})}$; L_k, r_k – параметры печных контуров; R_d – сопротивление дуги.

Оценка вероятностных характеристик сетевого тока ввода осуществляется в предположении о малости отклонения напряжения дуги от среднего значения $\bar{U}_{dk}$ для предельного случая работы группы однотипных ДСП в режиме расплавления.

Зависимость сдвига фаз φ_{kv} от U_{dk} аппроксимируется линейной функцией. Допуская, что и ток I_{kv} есть линейная функция, соотношение (3) можно представить в линеаризованном виде:

$$I_{Bv}^2 = \tilde{I}_0^2 - c \cdot I_{\Pi v}^2 \cdot \sigma U_d^2 \cdot \sum_{k>l}^N \frac{(U_{dk} - U_{dl})^2}{\sigma U_d^2}, \quad (4)$$

где σU_d – среднеквадратическое отклонение напряжения дуги; c – некоторая

константа $\left(c = \frac{\varphi}{U_d} \right)$;

$$I_{\Pi v} \approx I_{1v} \approx I_{2v} \approx \dots \approx I_{kv} \approx \dots \approx I_{Nv};$$

$$\tilde{I}_0^2 = \sum_{k=1}^N I_{kl}^2 + 2 \sum_{k>l}^N I_{kv} \cdot I_{lv} = \left(\sum_{k=1}^N I_{kv} \right)^2;$$

Преобразуем выражение (4) к виду

$$-\frac{I_{Bv}^2 - \tilde{I}_0^2}{c \cdot I_{lv}^2 \cdot \sigma U_d^2} = \chi^2,$$

где $\chi^2 = \sigma U_d^2 \cdot \sum_{k>l}^N \frac{(U_{dk} - U_{dl})^2}{\sigma U_d^2}$.

Величина χ^2 подчиняется распределению со степенями свободы $\rho = (N^2 - N)/2$ [6]. Используя данный закон, можно получить вероятностные характеристики напряжения распределительной сети U_{kv} и тока ввода I_{Bv} .

Для сетевого тока ввода получены следующие выражения [7]:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Bv} &\approx \sqrt{\tilde{I}_0^2 - c \cdot I_{lv}^2 \cdot \rho \cdot \sigma U_d^2}; \\ DI_{Bv} &\approx \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c \cdot I_{lv}^2 \cdot \sigma U_d^2}{\sqrt{\tilde{I}_0^2 - c \cdot I_{lv}^2 \cdot \rho \cdot \sigma U_d^2}} \right)^2 \cdot 2\rho. \end{aligned} \quad (5)$$

Примером могут послужить расчеты вероятностных характеристик для I_{Bv} , полученные при одновременной работе двух печей (таблица).

Оценки вероятностных характеристик сетевого тока ввода

Количество работающих ДСП в периоде расплавления N	Действующее значение напряжения дуги U_d на 1-й ступени печного трансформатора, В	Средне-квадратическое отклонение напряжение дуги σU_d , В	Математические ожидания и среднеквадратические отклонения гармоник тока ввода, $\bar{I}_{Bv} / \sigma I_{Bv}$, %			
			5-й	7-й	11-й	13-й
2	149	1	6,9/0,63	3,28/0,35	1,43/0,13	1,02/0,09
2	149	5	13,84/767	7,06/3,92	2,86/1,59	2,05/1,14

Результаты расчета модели СЭС для I_{Bv} показывают, что с увеличением σU_d возрастают искажения параметров сети (I_{Bv}).

Наличие случайных колебаний σU_{dk} в симметричной цепи ДСП приводит к появлению гармоник, кратных трем, и их вероятностные характеристики зависят от номера гармоники и дисперсии напряжения дуги:

$$\bar{I}_{Bv} \approx 1/v; \quad DI_{Bv} = (\sigma U_d)^2,$$

где $v = 3, 9, 15$.

Амплитуда четных гармоник определяется, в основном, величиной выпрямляющего эффекта ВАХ дуги и слабо зависит от напряжения дуги.

На стадии проектирования электроснабжения группы печей использование регулирования графиков нагрузки для повышения качества электриче-

ской энергии не позволяет добиться удовлетворительных значений без использования дополнительных технических средств.

Представление суммарного графика реактивной нагрузки числовыми характеристиками случайных процессов производится исходя из того, что индивидуальные графики строго детерминированы. Стохастичность дуги при этом не учитывается.

В предложенной методике расчет суммарной реактивной мощности нагрузки, характеризующейся математическим ожиданием $\bar{Q}$ и дисперсией $D(Q)$, осуществляется методом математического моделирования случайных режимов дуговой нагрузки с учетом стохастичности дуги.

Для разработки рекомендаций по рациональному использованию средств компенсации реактивной мощности при анализе графиков нагрузки с учетом стохастичности дуги ДСП необходимо использовать следующие показатели:

- 1) вероятность совместной работы группы печей в режиме α

$$f_{\alpha_{1,N}} = \prod_{k=1}^N W_{\alpha k},$$

где $W_{\alpha k}$ – вероятность нахождения k – печи в режиме α ;

- 2) функцию распределения плотности вероятности $F(Q)$ суммарной мощности нагрузки по множеству сочетаний режимов

$$F(Q) = \sum_s f_{\alpha_{1,N}} \cdot \psi_{\alpha_{1,N}}(Q),$$

где $\psi_{\alpha_{1,N}}(Q)$ – функция распределения плотности вероятности суммарной мощности соответствующего сочетания режимов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$; S – количество сочетаний;

- 3) среднее значение суммарной мощности $Q_{cp\alpha_{1,N}}$ и дисперсию $D(Q)_{\alpha_{1,N}}$ каждого конкретного сочетания режимов работы ДСП, определяемые с заданной вероятностью [3, 4].

Тогда с учетом $\sum_s f_{\alpha_{1,N}} = 1$ среднее значение суммарной реактивной мощности $\bar{Q}$ за цикл плавки и ее дисперсия $D(Q)$ определяется из формул [8]:

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \sum_s f_{\alpha_{1,N}} Q_{cp\alpha_{1,N}}; \\ D(Q) &= \sum_s f_{\alpha_{1,N}} \left[D(Q)_{\alpha_{1,N}} + Q_{cp\alpha_{1,N}}^2 \right] - \bar{Q}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

В формуле (6) стохастичность напряжения дуги учитывается дисперсией $D(Q)_{\alpha_{1,N}}$.

Активные и реактивные мощности подсчитываются по формулам

$$P = \sum_{v=1}^n P_v; \quad Q = \sum_{v=1}^n Q_v,$$

где $P_v = \frac{1}{2}(A_v \cdot a_v + B_v \cdot b_v)$; $Q_v = \frac{1}{2}(A_v \cdot b_v - B_v \cdot a_v)$; a_v, b_v – амплитуды тока печи; A_v и B_v – амплитуды напряжения печи.

Анализ значений реактивной мощности и гармонического состава сетевого тока ввода печей с учетом стохастичности напряжения дуги позволяет рекомендовать сочетание устройства компенсации реактивной мощности с фильтрами высших гармоник тока и оценить необходимый диапазон регулирования переменной составляющей компенсирующего устройства.

Учет вероятностного характера изменения нагрузки и нормального закона распределения тока ввода в соответствии с (5) позволит правильно сформулировать электромагнитную среду при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий с дуговыми сталеплавильными печами.

Литература

1. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Юртаев С.Н. Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения // Труды Нижегородского государственного университета им. Р.Е.Алексеева. 2010. № 2(81). С. 202–210.
2. Волков Л.Т., Новоселов Н.А. Новая методика расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с дуговыми сталеплавильными печами // Промышленная энергетика. 2009. № 1. С. 45–47.
3. Денисов Г.Н., Иоша Н.Б., Львова Э.Л. Разработка инженерной методики суммарной мощности нагрузки дуговых печей // Автоматизированные электротехнологические установки и системы: межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1989. С. 68–73.
4. Денисов Г.Н., Львова Э.Л. Инженерная методика расчета высших гармоник токов в системах электроснабжения дуговых сталеплавильных печей // Исследование электротермических процессов и установок: межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1987. С. 46–51.
5. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 873 с.
7. Львова Э.Л. Оценка вероятностных характеристик высших гармоник тока группы дуговых электропечей // Автоматизированные электротехнологические установки и системы: межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1989. С. 29–34.
8. Львова Э.Л., Иоша Н.Б., Немцев Г.А. Определение реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей // Промышленная энергетика. 1991. № 5. С. 39–42.
9. Львова Э.Л., Миронова А.Н. Экспериментальные исследования влияния группы дуговых печей на питающее напряжение // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 67–78.

ЛЬВОВА ЭЛЬВИРА ЛЬВОВНА – старший преподаватель, кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elyalvov1@yandex.ru).

МИРОНОВА АЛЬВИНА НИКОЛАЕВНА – доктор технических наук, профессор кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (anmir37@mail.ru).

E. LVOVA, A. MIRONOVA

CALCULATION OF HIGHER HARMONIC CURRENT AND REACTIVE POWER OF ARC STEEL-MELTING FURNACES

Key words: electric arc furnace, quality indicators of electrical energy, voltage distortion, higher harmonics, probabilistic characteristics, reactive power, total load curve.

Arc furnaces are sources of interference degrading the quality of electrical energy. The influence of arc furnaces on the power supply network and methods of improving the supply voltage modes in power supply systems is relevant. Significant random irregular current oscillations appear when the furnaces operate. The article proposes the method to estimate probable characteristics of the level of non-sinusoidal voltage of the group of arc

furnaces based on the calculation of the harmonic components of the input current. The task is to find the relative level of each harmonic in case of arc steel-melting furnaces feeding on the group principle. The issues of reactive power analysis are considered taking into account the arc stochasticity for the arc steel-melting furnaces power supply system. A method of calculating the total reactive power of arc steel-melting furnaces is proposed. The feasibility of the device compensation of reactive power in networks with arc furnaces, together with filters of higher harmonics is considered.

References

1. Vagin G.Ya., Sevost'yanov A.A., Yurtaev S.N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' dugovykh pechei i sistem elektrosnabzheniya* [Electromagnetic compatibility of arc furnaces and power supply systems]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2010, no. 2(81), pp. 202–210.
2. Volkov L.T., Novoselov N.A. *Novaya metodika rascheta koeffitsienta iskazheniya sinusoidal'nosti krivoi napryazheniya v setyakh s dugovymi staleplavil'nymi pechami* [New method for calculating the distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve in networks with arc steel-smelting furnaces]. *Promyshlennaya energetika*, 2009, no. 1, pp. 45–47.
3. Denisov G.N., Iosha N.B., Lvova E.L. *Razrabotka inzhenernoi metodiki summarnoi moshchnosti nagruzki dugovykh pechei* [Development of engineering techniques for the total load power of arc furnaces]. In: *Avtomatizirovannye elektrotehnologicheskie ustanovki i sistemy: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automated electrotechnological installations and systems: interuniversity collection of scientific works]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 1989, pp. 68–73.
4. Denisov G.N., Lvova E.L. *Inzhenernaya metodika rascheta vysshikh garmonik tokov v sistemakh elektrosnabzheniya dugovykh staleplavil'nykh pechei* [Engineering method for calculating the higher harmonics of currents in the power supply systems of electric arc steel-smelting furnaces]. In: *Issledovanie elektrotermicheskikh processov i ustanovok: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Research of electrothermal processes and installations: interuniversity collection of scientific works]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 1987, pp. 46–51.
5. Ivanov V.S., Sokolov V.I. *Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektroenergii sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Consumption modes and power quality of power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 336 p.
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Math Handbook]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 873 p.
7. Lvova E.L. *Otsenka veroyatnostnykh kharakteristik vysshikh garmonik toka gruppy dugovykh elektropечеi* [Evaluation of the probabilistic characteristics of the higher harmonics of the current group of electric arc furnaces]. In: *Avtomatizirovannye elektrotehnologicheskie ustanovki i sistemy: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automated Electrotechnological Installations and Systems: interuniversity collection of scientific works]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 1989, pp. 29–34.
8. Lvova E.L., Iosha N.B., Nemcev G.A. *Opreделение reaktivnoi moshchnosti dugovykh staleplavil'nykh pechei* [Determination of reactive power of arc steel-smelting furnaces]. *Promyshlennaya energetika*, 1991, no. 5, pp. 39–42.
9. Lvova E.L., Mironova A.N. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya gruppy dugovykh pechei na pitayushchee napryazhenie* [Experimental studies of the influence of arc furnaces on the supply voltage]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 3, pp. 67–78.

LVOVA ELVIRA – Senior Lecturer, Departments of Electrical Engineering, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elyalvov1@yandex.ru).

MIRONOVA ALVINA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (anmir37@mail.ru).

Формат цитирования: Львова Э.Л., Миронова А.Н. Расчет высших гармоник тока и реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 59–66.

УДК 621.314.58

ББК 31.15

Г.В. МАЛИНИН, Д.А. СОФРОНОВ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ БЕЗ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые слова: фотовольтаическая система, солнечная энергия, инвертор, преобразователь частоты, система управления, фазовое управление, широтно-импульсная модуляция.

В статье рассматривается преобразователь постоянного напряжения в переменное для построения фотовольтаических систем, связанных с промышленной сетью. Преобразователь состоит из инвертора, высокочастотного трансформатора и преобразователя частоты. Инвертор и преобразователь частоты работают с одинаковой частотой и коэффициентом заполнения силовых ключей. Формирование выходного напряжения осуществляется методом фазового регулирования. Импульсы широтно-импульсного модулятора генерируются с удвоенной частотой работы силовых ключей и имеют различную ширину в зависимости от полярности формируемой полуволны тока нагрузки. Представлены силовая часть преобразователя напряжения, поинтервальное рассмотрение режимов работы, принцип построения системы управления, иллюстрируемые временными диаграммами функционирования, и результаты моделирования преобразователя автономной нагрузки. Предложенная модель преобразователя может найти применение в фотовольтаических системах, построенных по технологии встраиваемого в солнечный модуль преобразователя.

В настоящее время распространение получили следующие структуры фотовольтаических систем, генерирующих и передающих электроэнергию в промышленную сеть [3]:

1) централизованные преобразователи, получающие питание от большого числа солнечных модулей, включенных последовательно-параллельно, содержащие один преобразователь постоянного напряжения и инвертор, работающий на сеть переменного тока;

2) структура с отдельными цепочками последовательно соединенных солнечных модулей, каждая из которых работает на свой инвертор;

3) многоцепочечная структура, в которой каждая цепочка работает на свой преобразователь постоянного напряжения, присоединенный к общему для всех цепочек инвертору;

4) структура с отдельным преобразователем для каждого солнечного модуля.

Наиболее перспективной и интересной является четвертая структура, связанная с технологией встроенного в солнечный модуль преобразователя солнечной энергии в энергию постоянного или переменного тока (MIC – module integrated converter), поскольку MIC-системы поддерживают концепцию «plug and play» и имеют повышенный КПД [5].

По конфигурации звена постоянного тока MIC-системы делятся на три основные топологии: MIC со звеном постоянного тока; MIC с псевдозвеном постоянного тока; MIC без звена постоянного тока. В преобразователях со звеном постоянного тока выходное напряжение солнечного модуля усиливается до более высокого уровня, совместимого с сетью переменного тока с

помощью следующих друг за другом преобразователя постоянного напряжения и инвертора [1, 2, 5]. Аналогичными энергетическими характеристиками обладают преобразователи с псевдозвеном постоянного тока [5], содержащие преобразователь постоянного напряжения и преобразователь частоты, выполненный, например, на базе инвертора тока. В преобразователях без звена постоянного тока напряжение солнечного модуля преобразуется в переменное напряжение или ток высокой частоты. Следующий далее преобразователь частоты непосредственно трансформирует напряжение или ток высокой частоты в напряжение промышленной частоты без промежуточной ступени преобразования энергии [4, 5].

В работе рассматривается одна из топологий преобразователя без звена постоянного тока, основным преимуществом которой является сокращение этапов преобразования энергии до двух: преобразование постоянного напряжения солнечного модуля в напряжение повышенной частоты и выделение напряжения промышленной частоты.

Схема и принцип действия преобразователя. Схема рассматриваемого преобразователя (рис. 1) представляет интерес по следующим причинам:

- 1) высоковольтная часть гальванически развязана от солнечного модуля;
- 2) используется высокочастотный трансформатор Т, характеризующийся лучшими массогабаритными показателями по сравнению с аналогами сетевого трансформатора;
- 3) отсутствует звено постоянного тока, что способствует повышению надежности и снижению стоимости схемы преобразователя.

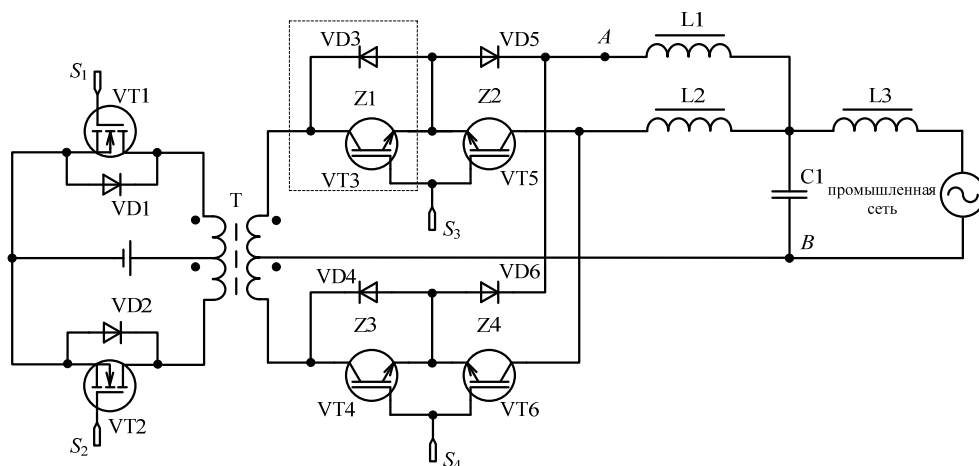


Рис. 1. Силовая схема преобразователя напряжения

Преобразователь напряжения состоит из двух каскадов. Каскад, построенный на транзисторах VT1 и VT2, подключенных между солнечным модулем и первичной обмоткой высокочастотного трансформатора Т, представляет собой инвертор напряжения, формирующий двухполярные прямоугольные импульсы на первичной обмотке трансформатора. Управление транзисторами

осуществляется импульсами S_1 и S_2 с частотой f_s и коэффициентом заполнения $\gamma_s = 0,5$. Второй каскад, выполненный на двунаправленных ключах $Z1 \div Z4$, представляет собой преобразователь частоты (циклоконвертор) f_s в промышленную частоту $f_c = 50$ Гц. Управление транзисторами ключей осуществляется импульсами S_3 и S_4 с частотой f_s и коэффициентом заполнения $\gamma_s = 0,5$. Модуляция выходного напряжения u_{AB} обеспечивается смещением по времени сигналов управления $S_2(S_1)$ транзисторами инвертора относительно сигналов управления $S_3(S_4)$ транзисторами циклоконвертора, что характерно для фазового способа регулирования выходного сигнала.

На рис. 2 представлены временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя, анализ которых начнем с момента t_0 .

Интервал I ($t_0 - t_1$). Под действием управляющих импульсов S_2 и S_3 открыты транзисторы VT2, VT3 и VT5. Согласно схеме замещения преобразователя (рис. 3, а)

$$i_{L1} = i_{L2} + i_{VT3}, i_{VD5} = i_{L1}, i_{VT5} = i_{L2}, u_{AB} = E_2,$$

где E_2 – амплитуда импульсов напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Вследствие накопления электромагнитной энергии в дросселе L1 под действием напряжения E_2 и передачи энергии от дросселя L2 ток i_{L1} на этом интервале возрастает, а ток i_{L2} спадает.

Интервал II ($t_1 - t_2$). В момент t_1 происходят отключение транзисторов VT3, VT5 и включение транзисторов VT4, VT6 при открытом транзисторе VT2 (рис. 3, б). Справедливы равенства

$$i_{L1} = i_{L2} + i_{VT4}, i_{VD6} = i_{L1}, i_{VT6} = i_{L2}, u_{AB} = -E_2.$$

На этом интервале протекают два процесса:

- 1) рекуперация энергии во вторичную обмотку трансформатора;
- 2) передача электромагнитной энергии от дросселя L1 в дроссель L2, благодаря чему ток i_{L1} спадает, а ток i_{L2} возрастает.

Интервал III ($t_2 - t_3$). В момент t_2 ток $i_{VT4} = 0$, $i_{L1} = i_{L2}$. Транзистор VT4 запирается, открывается диод VD4, создавая контур для протекания тока i_{L2} (рис. 3, в). На этом интервале в дросселе L2 происходит накопление электромагнитной энергии от источника питания E_2 и передача электромагнитной энергии из дросселя L1:

$$i_{VD4} = i_{L2} - i_{L1}, i_{VD6} = i_{L1}, u_{AB} = -E_2.$$

Интервал IV ($t_3 - t_4$). В момент t_3 поступает сигнал на запирацию транзистора VT2 и отпирацию транзистора VT1. Полярность напряжений на обмотках трансформатора меняется на противоположную (рис. 3, г). Диод VD4 остается в открытом состоянии, пока ток через него не спадет до нуля. Дроссель L2 отдает запасенную в нем электромагнитную энергию в дроссель L1 и вторичную обмотку трансформатора, поэтому ток i_{L1} на этом интервале возрастает, а токи i_{L2} и i_{VD4} спадают:

$$i_{VD4} = i_{L2} - i_{L1}, i_{VD6} = i_{L1}, i_{VT6} = i_{L2}, u_{AB} = E_2.$$

Интервал V ($t_4 - t_5$). В момент t_4 ток $i_{VD4} = 0$. Вновь открывается транзистор VT4, ток через вторичную обмотку меняет свое направление (рис. 3, д). Этот интервал работы идентичен рассмотренному интервалу I:

$$i_{L1} = i_{L2} + i_{VT4}, i_{VD6} = i_{L1}, i_{VT6} = i_{L2}, u_{AB} = E_2.$$

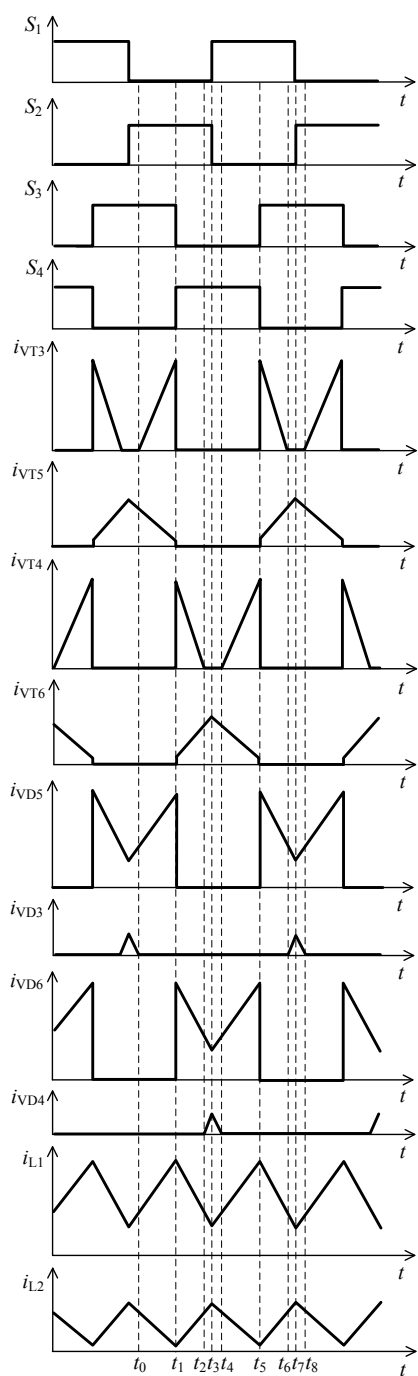


Рис. 2. Временные диаграммы работы

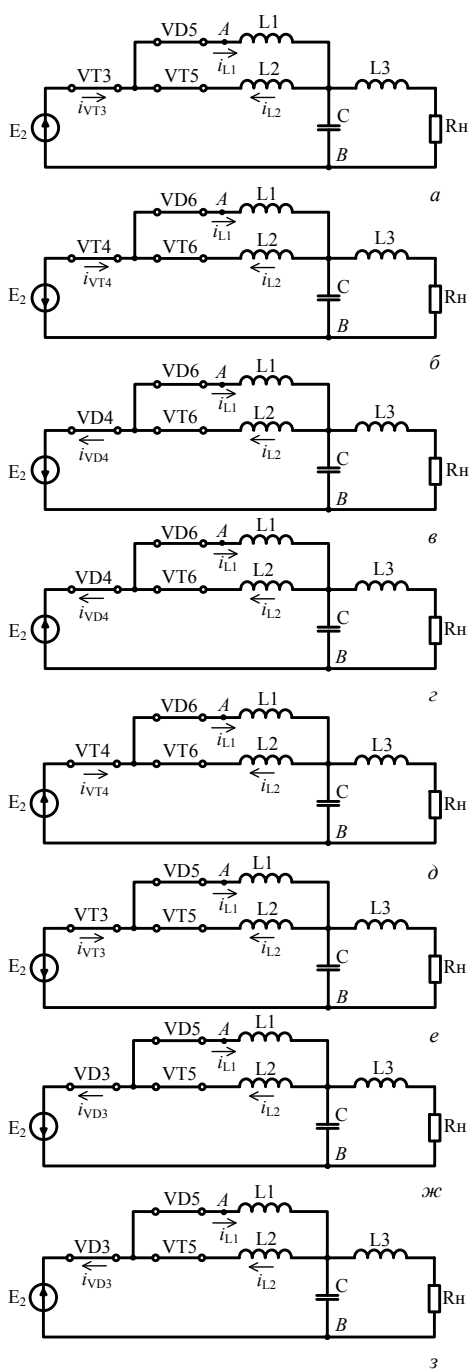


Рис. 3. Схемы замещения преобразователя

Интервал VI ($t_5 - t_6$). В момент t_5 под действием сигналов управления S_3 и S_4 запираются транзисторы VT4, VT6 и отпираются транзисторы VT3 и VT5 (рис. 3, е). Процессы, протекающие в схеме на этом интервале, идентичны процессам на интервале II:

$$i_{L1} = i_{L2} + i_{VT3}, i_{VD5} = i_{L1}, i_{VT5} = i_{L2}, u_{AB} = -E_2.$$

Интервал VII ($t_6 - t_7$). В момент t_6 ток $i_{VT3} = 0$, $i_{L1} = i_{L2}$. Транзистор VT3 запирается, открывается диод VD3 (рис. 3, ж). Процессы, протекающие в схеме на этом интервале, идентичны процессам на интервале III:

$$i_{VD3} = i_{L2} - i_{L1}, i_{VD5} = i_{L1}, u_{AB} = -E_2.$$

Интервал VIII ($t_7 - t_8$). В момент t_7 происходит коммутация транзисторов инвертора: VT1 запирается, VT2 открывается. Полярность напряжений на обмотках трансформатора меняется на противоположную (рис. 3, з). Процессы, протекающие в схеме на этом интервале, идентичны процессам на интервале IV:

$$i_{VD3} = i_{L2} - i_{L1}, i_{VD5} = i_{L1}, i_{VT5} = i_{L2}, u_{AB} = E_2.$$

В момент t_8 запирается диод VD3, вновь открывается транзистор VT3, и процессы в схеме далее повторяются.

На рис. 4 приведены обобщенные диаграммы сигналов управления, напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора и на входе фильтра u_{AB} . Сигналы S_1 и S_4 сдвинуты по фазе на π относительно сигналов S_2 и S_3 , соответственно, и на рисунке не показаны.

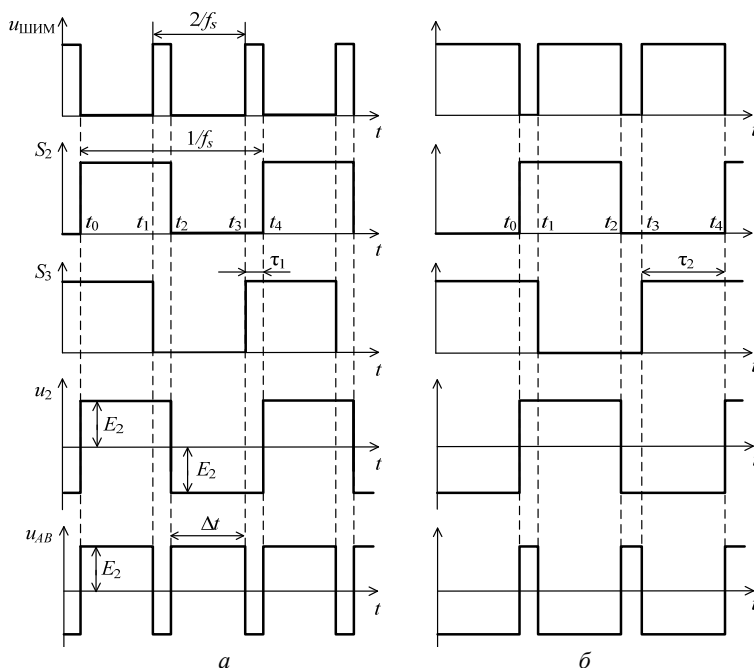


Рис. 4. Диаграммы импульсов управления для двух значений фазовых сдвигов: τ_1 (а) и $\tau_2 > \tau_1$ (б)

Импульсы $u_{\text{ШИМ}}$ широтно-импульсного модулятора (ШИМ) генерируются с частотой $2f_s$ и имеют различную ширину в зависимости от полярности формируемой полуволны тока нагрузки. Импульсы управления силовыми транзисторами инвертора (S_2) и преобразователя частоты (S_3) формируются с помощью счетного триггера по срезу и фронту импульсов ШИМ, соответственно. Как видно из диаграмм, положительной полярности напряжения на входе фильтра соответствует совпадение уровней управляющих импульсов S_2 и S_3 .

Длительность положительного импульса напряжения u_{AB} определяется фазовым сдвигом τ между сигналами управления ключами инвертора и преобразователя частоты. Рассматривая Δt как ширину модулированного напряжения на входе фильтра, находим коэффициент заполнения напряжения u_{AB} : $\gamma = 2f_s \Delta t$. Среднее значение напряжения на входе фильтра преобразователя определяется из равенства $U_{ABcp} = E_2(2\gamma - 1)$. Поскольку Δt изменяется по синусоидальному закону, определяемому схемой управления, среднее значение U_{ABcp} изменяется также, обеспечивая синусоидальную модуляцию напряжения на конденсаторе $C1$ фильтра с частотой, в два раза превышающей частоту переключения силовых ключей.

Моделирование преобразователя. Моделирование схемы в среде Matlab/Simulink проводилось при следующих параметрах схемы (рис. 5):

- номинальное напряжение солнечного модуля 40 В;
- номинальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора $E_2 = 350$ В;
- частота переключения транзисторов $f_s = 40$ кГц;
- индуктивности дросселей $L_1 = L_2 = L_3 = 0,6$ мГн;
- емкость конденсатора $C_1 = 27$ мкФ.

Моделирование проводилось для преобразователя, работающего на автономную нагрузку R_n .

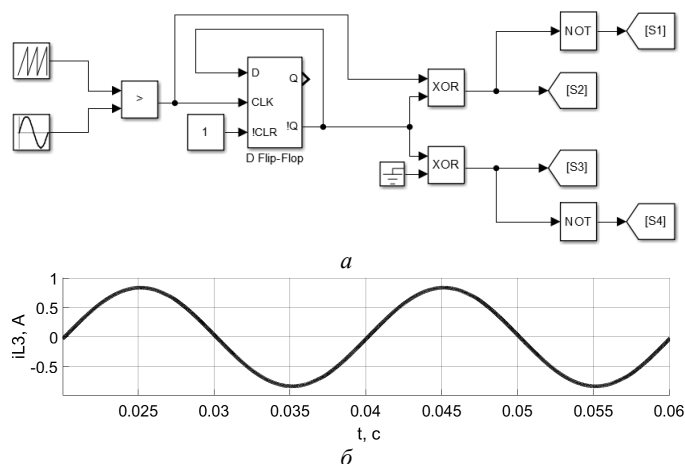


Рис. 5. Виртуальная модель системы управления (а) и осциллограмма тока нагрузки (б)

Синусоидальный ШИМ-сигнал $u_{\text{ШИМ}}$, поступающий на вход счетного триггера (рис. 5, а), имеет несущую частоту 80 кГц. Сигнал с выхода триггера, изменяющийся с частотой $f_s = 40$ кГц, посредством логики преобразуется в сигналы $S_1 \div S_4$ управления транзисторами инвертора и преобразователя частоты с коэффициентом заполнения $\gamma_s = 0,5$ и фазовым сдвигом τ , равным ширине импульса $u_{\text{ШИМ}}$.

Поскольку назначением рассматриваемой схемы является передача энергии в электрическую сеть, в качестве результата моделирования представлена осциллограмма тока нагрузки (рис. 5, б). Анализ показывает, что пульсации тока частотой 40 кГц не превышают 0,5 мА.

Выводы. Рассмотренный преобразователь солнечной энергии в энергию переменного тока может быть с успехом использован при построении МПС-систем, поскольку удовлетворяет следующим требованиям: наличие гальванической развязки с промышленной сетью, простая стратегия управления силовыми ключами, хорошие массогабаритные показатели.

Литература

1. Белов Г.А., Серебрянников А.В., Павлова А.А. Анализ и расчет характеристик установившегося режима в преобразователе постоянного напряжения с последовательным резонансным инвертором // Практическая силовая электроника. 2015. № 4(60). С. 27–37.
2. Малинин Г.В., Белов Г.А. Системы управления преобразователями для солнечных модулей на базе инверторов с ШИМ // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 68–80.
3. Chowdhury A.S.K., Abdur Razzak M. Single phase grid-connected photovoltaic inverter for residential application with maximum power point tracking. Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEV.2013.6572648.
4. De Souza K.C.A., de Castro M.R., Antunes F. A DC/AC converter for single-phase grid-connected photovoltaic systems. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, vol. 4, pp. 3268–3273. doi: 10.1109/IECON.2002.1182922.
5. Quan Li, Wolfs P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations. IEEE Transactions on power electronics, vol. 23, no. 3, 2008, pp. 1320-1333. doi: 10.1109/TPEL.2008.920883.

МАЛИНИН ГРИГОРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (malgrig6@mail.ru).

СОФРОНОВ ДИМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – магистрант кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (dimon-batyr@mail.ru).

G. MALININ, D. SOFRONOV

SOLAR POWER CONVERTER WITHOUT DC LINK

Key words: photovoltaic system, solar power, inverter, frequency converter, control system, phase control, pulse-width modulation.

This paper considers DC/AC converter for grid-connected PV systems. The converter consists of an inverter, a high-frequency transformer and a frequency converter. The inverter and the frequency converter operate at the same frequency and block coeffi-

cient of the power keys. The formation of the output voltage is carried out by the method of phase control. Pulses of a pulse-width modulation are generated with a doubled frequency of the power switches operation and have a different width depending on the polarity of the generated half-wave load current. There is a power section of the voltage convertor, interval consideration of operating modes, the control system principle, illustrated by the time diagrams of work, and the results of the converter simulation of autonomous load. The considered converter can find application in photovoltaic systems constructed according to the built into the module integrated converter technology.

References

1. Belov G.A., Serebryannikov A.V., Pavlova A.A. *Analiz i raschet kharakteristik ustanovivshegosya rezhima v preobrazovatele postoyannogo napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym invertorom* [Analysis and calculation of the steady state characteristics in a DC / DC converter with a series resonant inverter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2015, no. 4(60), pp. 27–37.
2. Malinin G.V., Belov G.A. *Sistemy upravleniya preobrazovatelyami dlya solnechnykh modulei na baze invertorov s ShIM* [Converters control systems for solar modules based on the PWM inverter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 68–80.
3. Chowdhury A.S.K., Abdur Razzak M. Single phase grid-connected photovoltaic inverter for residential application with maximum power point tracking. *Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2013 International Conference, 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIEV.2013.6572648.
4. De Souza K. C. A., de Castro M. R., and Antunes F. A DC/AC converter for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, 2002, vol. 4, pp. 3268–3273. doi: 10.1109/IECON.2002.1182922.
5. Quan Li, Peter Wolfs. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations. *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 23, no. 3, 2008, pp. 1320–1333. doi: 10.1109/TPEL.2008.920883.

MALININ GRIGORIY – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (malgrig6@mail.ru).

SOFRONOV DIMITRIY – Master's Program Student of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (dimon-batyr@mail.ru).

Формат цитирования: *Малинин Г.В., Софронов Д.А. Преобразователь солнечной энергии без звена постоянного тока // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 67–74.*

УДК 621.65.03-83-531.9

ББК 3565.9:3291

А.В. МУРАВЬЕВ, А.Г. КАЛИНИН, Т.В. МЯСНИКОВА

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ РЕЖИМАМИ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПО КРИТЕРИЮ «БАЛАНС МОЩНОСТИ»

Ключевые слова: многоагрегатная насосная установка, регулируемый электропривод, баланс мощности, минимизация избыточных напоров, регулирование по давлению, характеристика магистрального трубопровода.

Приводится теоретическое обоснование адаптивного управления многоагрегатной насосной установкой по критерию «баланс мощности». Цель исследования – создание нового энерго- и ресурсосберегающего алгоритма управления многоагрегатной насосной станцией. При эксплуатации таких насосных станций имеет место выход из рабочей зоны регулируемых насосов при вводе или выводе дополнительных нерегулируемых насосов. Работа регулятора по уставке давления на магистральный трубопровод оправдана при больших статических напорах и противодавлении, однако при крутых расходно-напорных характеристиках, при значительных перепадах нагрузки и сменной конфигурации трубопроводной сети имеет место избыточный напор в зоне малых нагрузок. Повышение эффективности и надежности регулирования центробежных насосов в составе многоагрегатных насосных установок малой и средней мощности особенно актуально в системах водоподачи с переменной составляющей нагрузки, например в оросительных мелиоративных системах и системах с малым статическим напором. Использованы результаты отечественных исследований в данной области техники, применена теория оптимальных и адаптивных систем управления для известных методов и средств регулируемых электроприводов. В статье дается сопоставительная оценка применяющихся способов регулирования подачи центробежных насосов и предлагаемого авторами алгоритма их управления в составе многоагрегатных насосных установок. В основе предлагаемого принципа управления насосов по критерию «баланс мощности» используется впервые введенное В.Г. Николаевым понятие «минимизация избыточных напоров», а также предложенное авторами обязательное автоматическое регулирование давления в напорных патрубках насосов с помощью гидравлических регулирующих клапанов «до себя» вместо использования в этих патрубках стандартной комбинации «обратный клапан–затвор». Установлено, что скольжение рабочей точки насосов по напорно-расходной характеристике трубопровода – наиболее эффективный метод управления регулируемы центробежными насосами. Предложены критерии ввода и вывода дополнительных нерегулируемых насосов для обеспечения номинальных режимов их эксплуатации и сохранения критерия энергосбережения.

При регулировании подачи центробежных насосов сформировалось три устойчивых энергосберегающих решения: регулируемый электропривод насосов с уставкой по давлению; регулируемый электропривод насосов с расходомерией в обратной связи; дискретное управление с пневмокомпенсатором в напорной магистрали.

Ручное или автоматическое управление дросселированием потока рассматривается как резервное или аварийное управление. Дискретное управление методом плавного пуска с пневмокомпенсатором могло бы быть самым эффективным, но крайне затруднено в магистральных трубопроводных сетях среднего и большого диаметра вследствие сложности конструктивных реше-

ний бака-аккумулятора, обусловленных его габаритами для обеспечения необходимого запаса потенциальной энергии в динамике водоразбора, обслуживания больших емкостей для передвижных насосных станций и установок, а также из-за работы с переменной пульсацией давления.

В напорных оросительных сетях мелиоративных систем часто применяются многоагрегатные насосные установки, состоящие из нескольких насосных агрегатов, часть из которых регулируемые, а часть – нерегулируемые. Задача энергосбережения в таких насосных установках имеет важное значение, особенно при большой их установленной мощности.

Электропривод насосов с преобразователем частоты, ведомый уставкой регулятора давления, наиболее распространенный и надежный метод энергосбережения, доказанный множеством практик со средним водоразбором ниже расчетного на 20–30%. Однако при использовании регулируемого насоса в группе из двух и более нерегулируемых насосов, могут иметь место недопустимые режимы их работы с точки зрения рабочей зоны расходно-напорных характеристик всех или отдельных насосов: помпаж и кавитация. Рациональное решение для обеспечения работы всех насосов в своей рабочей зоне заключается в применении в напорном патрубке каждого насоса специальных гидравлических регулирующих клапанов, например, модели WW-743 фирмы Bermad (Израиль) (рис. 1). Данный клапан является автономным регулирующим устройством, выполняющим две функции: классического обратного клапана и клапана регулирования давления «до себя».

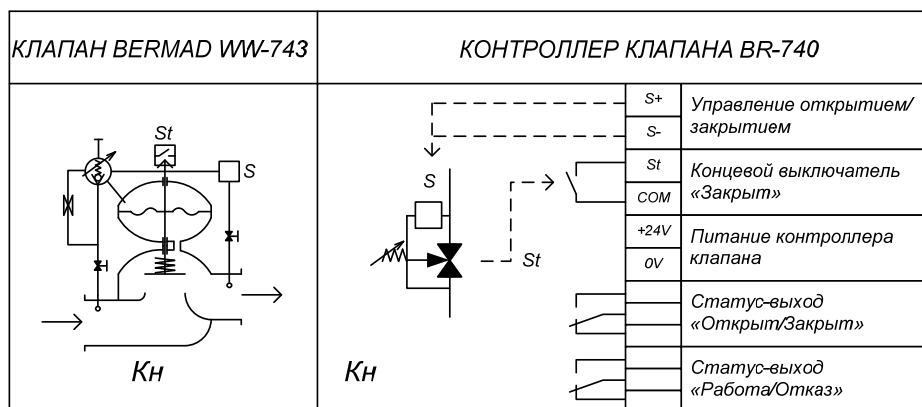
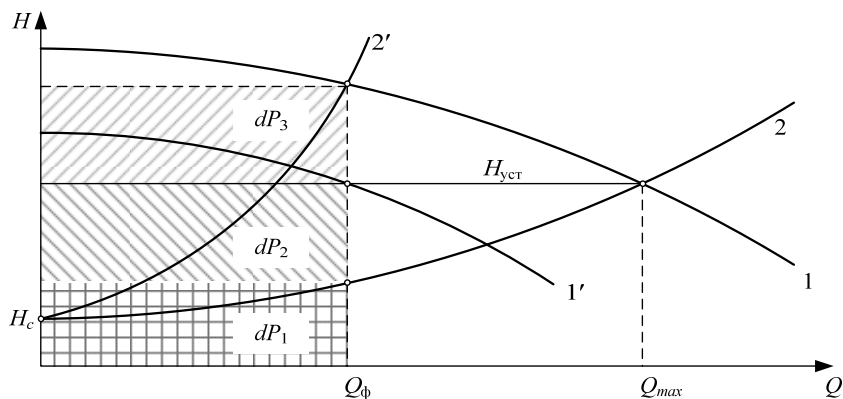


Рис. 1. Гидравлический регулирующий клапан с контроллером

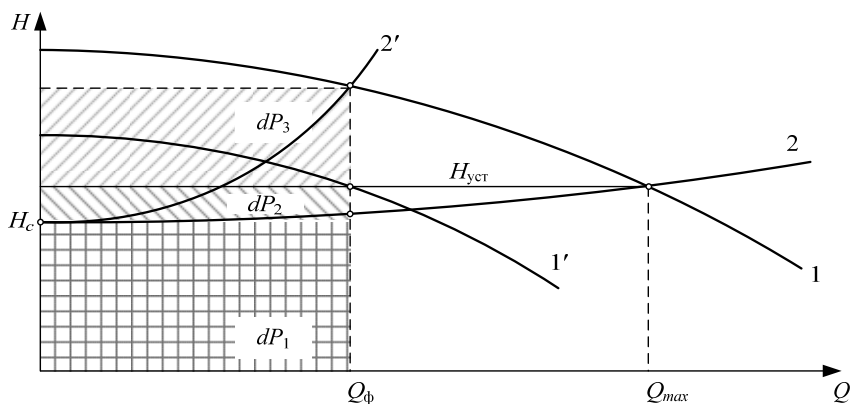
Общий недостаток всех регулируемых электроприводов насосов с преобразователями частоты – наличие постоянных потерь энергии в данных преобразователях, обусловленных его КПД. При дискретном управлении методом плавного пуска – потери кратковременные и существуют только до выхода двигателя на номинальную частоту вращения.

Второй недостаток заложен в неполном использовании потенциала энергосбережения в силу наличия динамического напора в магистрали, состав-

ляющего величину избыточной мощности при фактическом расходе. Причем форма характеристики магистрали диктует разные правила определения корректной уставки давления для фактического водоразбора (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Понятие избыточного напора с растущей (а) и пологой (б) характеристикой трубопровода:

dP_1 – полезная мощность при фактическом водоразборе; dP_2 – избыточная мощность при заданной уставке давления; dP_3 – потери мощности в запорной арматуре при управлении методом дросселирования потока; 1 – регулируемый насос при номинальной частоте вращения; 1' – регулируемый насос при частоте вращения ниже номинальной; 2 – характеристика трубопровода при максимальном водоразборе, 2' – характеристика трубопровода в режиме регулирования затвором

В работе В.Г. Николаева введены понятия «избыточный напор» и «минимизация избыточных напоров» [1]. Процесс следует понимать как устранение избыточного напора в магистральном трубопроводе на величину динамического напора при водоразборе ниже максимального (расчетного). Под

избыточным напором понимается значение давления воды в системе, превышающее потребное значение на величину динамического напора dP_2 при фактическом водоразборе. Избыточный напор отсутствует при максимуме водоразбора, имеет место при дросселировании в нерегулируемых насосных агрегатах из-за свойств гидравлической характеристики вентиля (регулятора), и в регулируемых насосах, ведомых постоянной уставкой давления, покрывающей переменный водоразбор, из-за свойств характеристики магистрали без влияния регулирующих затворов.

Принцип минимизации избыточных напоров основан на скольжении по траектории расходно-напорной характеристики магистрального трубопровода в функции водоразбора с предустановкой запаса давления для узлов потребителя (рис. 3).

Множество значений водоразбора насосной установки и множество значений соответствующего ему давления объединяет понятие мощность как $\frac{\gamma g H Q}{3600}$ [Вт]. При задании управляющей траектории рабочих точек в виде линейного уравнения или таблицы $Q = f(H)$ для конкретного объекта величина потребной мощности может быть сопоставлена с мощностью, фактически потребляемой насосной установкой из электросети. Разница мощностей вводит сигнал управления на регулятор расхода при известных показаниях давления в напорном коллекторе и при рассчитанном водоразборе. Фактически принцип управления означает регулирование подачи насосной установки по потребной мощности.

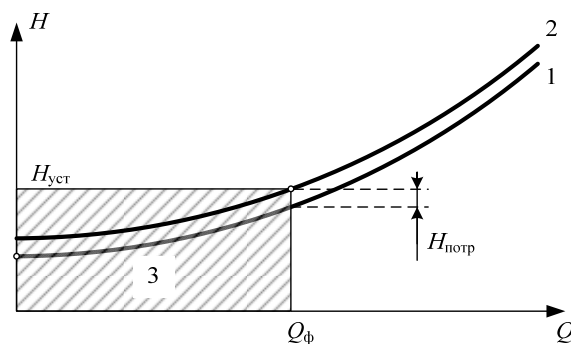


Рис. 3. Понятие потребной мощности:

- 1 — характеристика магистрального трубопровода; 2 — характеристика потребления при регулировании по расходу; $H_{уст}$ — давление, принимаемое датчиком давления в напорном коллекторе; $H_{потр}$ — потребное давление (запас по давлению); $Q_ф$ — фактический водоразбор (заведомо неизвестен)

Величина фактического водоразбора априори не известна, но может быть оценена по косвенным параметрам, отражающим технологический процесс транспортировки жидкости центробежными насосами:

- 1) по току статора нерегулируемого асинхронного короткозамкнутого двигателя, питаемого от сети;
- 2) по мощности на выходе инвертора преобразователя частоты, управляющего асинхронным двигателем в регулируемом режиме.

В первом случае есть ряд исследований, доказывающих однозначную зависимость тока статора нерегулируемого асинхронного короткозамкнутого двигателя от расхода в следующем порядке [2, 3]:

- Известно номинальное напряжение U_n двигателя, номинальный ток $I_{сн}$, коэффициент мощности $\cos\phi$, КПД двигателя η_d , напорная характеристика насоса с кривой мощности и КПД при номинальной частоте вращения η_n .

Ток намагничивания с погрешностью до 3% по Г-образной схеме замещения условно-постоянный и связан с номинальным током $I_\mu = I_{сн} \sin\phi = I_{сн} \sqrt{1 - \cos^2\phi}$.

- Активный ток (действующее значение), потребляемый двигателем из электросети и определяемый векторной разностью фактического измеренного полного тока и тока намагничивания $I_a = \sqrt{I_c^2 - I_\mu^2}$.

- Активная мощность, потребляемая двигателем из сети и передаваемая на вал исполнительного механизма, связана с КПД двигателя, принимаемым в диапазоне загрузки от 60 до 100% условно-постоянным и равным номинальному, $P_a = U_n I_a \eta_d \eta_n$. Для группы однотипных приводов активная мощность вычисляется суммой токов.

- Величина объемного расхода Q через насосный агрегат определяется по кривой мощности или из выражения $P = \frac{\gamma g H Q}{3600 \eta_n}$.

Во втором случае активная мощность рассчитывается в контроллере на борту преобразователя частоты, исходя из фактического тока в звене постоянного тока и закона управления инвертором преобразователя. Функция расчета мощности имеется на большинстве выпускаемых преобразователей с векторным управлением. Величина вводится в баланс мощности через КПД двигателя, насоса и преобразователя частоты.

Алгоритм управления может быть реализован только по принципу адаптивного управления с критерием адаптации – баланс потребной и фактической мощности (рис. 4):

- Моделью эталонной системы выступает характеристика магистрального трубопровода с запасом по давлению. Диктующей точкой является измеренное давление в напорном коллекторе.

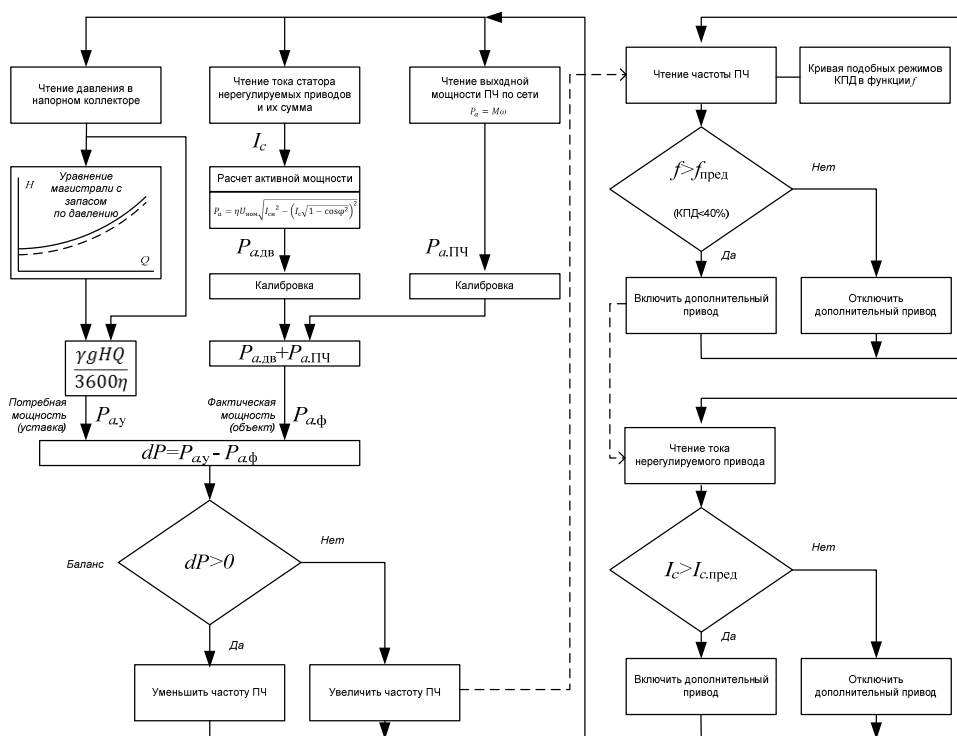
- Объектом управления выступает насосная установка с регулируемым электроприводом.

- Основанием небаланса выступает измеряемый ток статора нерегулируемого привода и измеряемая активная мощность регулируемого привода.

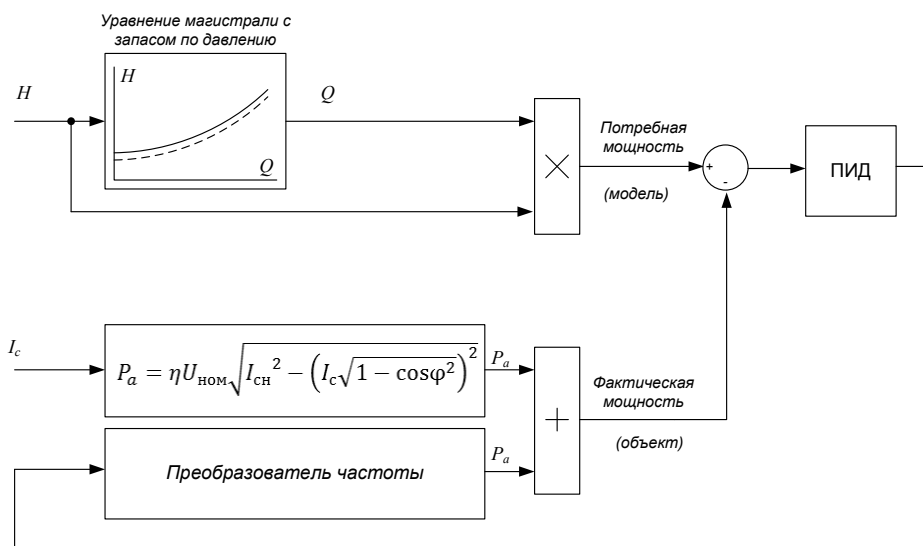
- Сигналом управления является выходная частота инвертора преобразователя частоты.

- Сигналом воздействия выступает аналоговый вход преобразователя частоты, принимающий сигнал рассогласования (небаланса мощности).

Критерием управления нерегулируемыми насосами в многоагрегатных насосных установках могут выступить: недопустимо высокая частота преобразователя частоты, недопустимо высокий ток статора двигателя нерегулируемого насоса, срабатывание концевого выключателя на гидроуправляемом клапане.



а



б

Рис. 4. Система адаптивного управления по критерию «баланс мощности»: а – алгоритм; б – структура САУ

Выводы. Минимизация избыточных напоров – один из наиболее эффективных методов управления регулируемыми насосными станциями и установками. При использовании гидроуправляемых клапанов метод управления технически реализуем, критерий оптимальности «баланс мощности» выполним. Применимость метода наиболее эффективна в системах с выраженной растущей характеристикой магистрали или при малом статическом напоре. Недостаток: регулируемый электропривод с преобразователем частоты сохраняет постоянные потери энергии, обусловленные его КПД.

Литература

1. Николаев В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 375 с.
2. Ларионов В.Н., Калинин А.Г. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. 2-е изд., доп. и перераб. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. 145 с.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

МУРАВЬЕВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ – заместитель директора, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», п. Радужный (Коломенский район), Московская область, Россия (awm1@mail.ru).

КАЛИНИН АЛЕКСЕЙ GERMAHOVИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (humanoid1984@yandex.ru).

МЯСНИКОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА – кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tatyana.myasnikova@yandex.ru).

A. MURAVYEV, A. KALININ, T. MYASNIKOVA ENERGY SAVING OF CONTROLLED PUMPS ACCORDING TO POWER BALANCE

Key words: multimodular pumping system, regulated electric driving, balance of power, minimization of overpressure, pressure regulation, characteristic of the main pipeline.

There is a substantiation of the adaptive control of a multi-unit pumping plant according to the criterion "power balance". The goal is to create a new energy- and resource-saving algorithm control for a multi-unit pumping station. During operation of multi-unit pumping stations, there is a fall out the working area of adjustable pumps when switching additional unregulated pumps.

The operation of the regulator to set pressure regulator on the main pipeline is justified in case of large static pressures and a back pressure, however, in case of steep flow-pressure characteristics, significant load differences and a replaceable configuration of the pipeline network there is an excess pressure in the area of small loads. Improving the efficiency and reliability of the regulation of centrifugal pumps as part of multi-unit pump installations of low and medium power is especially important in water supply systems with a variable component of the load, for example, in irrigation systems and in systems with a small static head. The results of Russian studies in this field of technology are used, the theory of optimal and adaptive control systems is used for known methods and means of adjustable electric drives. The article provides a comparative assessment of the available methods of regulating the flow of centrifugal pumps and of the proposed algorithm of their control as a part of multi-unit pumping units. The proposed principle of pump control according to the "power

balance” criterion is based on the introduced by V.G. Nikolayev concept of “minimizing excess pressure”, as well as the mandatory automatic pressure regulation proposed by the authors in the pressure pipes of pumps using hydraulic control valves “before themselves”, instead of using the standard combination “non-return valve – valve” in these pipes. It has been established that sliding the operating point of pumps along the pressure-flow characteristic of the pipeline is the most effective method of controlling adjustable centrifugal pumps. The article proposes criteria for the input and output of additional unregulated pumps from operation to ensure the nominal modes of their operation and to preserve the criterion of energy saving.

References

1. Nikolaev V.G. *Energoberegayushchie metody upravleniya rezhimami raboty nasosnykh ustanovok sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy-saving methods of controlling the operating modes of pumping installations of water supply and wastewater systems. Doct. Diss.]. Moscow, 2010, 375 p.
2. Larionov V.N., Kalinin A.G. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v elektroprivodakh s ventilyatornoi nagruzkoi. 2-e izd., dop. i pererab.* [Energy efficiency and energy saving in electric drives with fan load. 2nd ed.]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2017, 145 p.
3. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemiyi privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pump and blower installations]. Moscow Energoatomizdat Publ., 2006, 360 p.

MURAVYEV ALEXANDER – Deputy Director, Russian Federal Research Institute «Raduga», Raduzhny Village (Kolomna District), Moscow Region, Russia (awm1@mail.ru).

KALININ ALEKSEI – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (humanoid1984@yandex.ru).

MYASNIKOVA TATYANA – Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor, Department of the Automated Electrotechnological Installations and Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (tatyanamysnikova@yandex.ru).

Формат цитирования: Муравьев А.В., Калинин А.Г., Мясникова Т.В. Управление энерго-сберегающими режимами насосных установок по критерию «баланс мощности» // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 75–82.

УДК 620.91:621.383.8

ББК 3854.1

Т.В. МЯСНИКОВА, А.Н. МАТЮНИН, А.А. КИРИЛЛОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная батарея, солнечный элемент, вольт-амперная характеристика, моделирование, фотоэлектрическая панель.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), к которым принято относить энергию солнца, ветра, воды и др., имеют большое значение в решении потребностей электроэнергетики. Основным источником энергии на земле является Солнце. В настоящее время солнечная энергетика является одним из самых перспективных направлений в развитии ВИЭ, но еще не получила широкого применения в России. Производство электроэнергии преобразованием солнечной энергии по сравнению с производством за счет ископаемых видов топлива приводит к значительному сокращению загрязнения окружающей среды. В настоящее время солнечные панели не очень результативны. Для эффективного использования солнечной энергии необходимо иметь возможность предсказать их мощность под действием разнообразных факторов окружающей среды, оценить поведение фотоэлектрических преобразователей в различных режимах работы. Задача моделирования фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в настоящий момент является особенно актуальной в связи с тенденцией постепенного перехода на возобновляемые источники энергии. Нами смоделирована солнечная панель типа Mitsubishi PV-MLE255HD в программно-аппаратном комплексе реального времени типа «RTDS». Модель разработана с использованием основных уравнений фотоэлектрических солнечных элементов, которые учитывают воздействия уровня солнечного излучения и перепадов температур.

Солнечная энергетика пока занимает небольшую долю в структуре мирового производства электроэнергии, но ее роль стремительно растет. При этом в последнее время она получает распространение не только благодаря разнообразным мерам государственной поддержки, но и вследствие видимых результатов ее эксплуатации – технологической зрелости отрасли и в отдельных случаях экономической конкурентоспособности [1].

Bloomberg New Energy Finance (BNEF) отмечает высокий уровень проникновения ВИЭ на многих мировых рынках (87% от общего объема поставок электроэнергии в Европу к 2050 г. и 55% в США, 62% в Китае и 75% в Индии). Прогнозируется, что к 2050 г. нормированная стоимость электроэнергии (Levelized Cost of Energy (LCOE)) от новых фотоэлектрических станций снизится на 71%¹. Эта технология показала снижение LCOE на 77% в период с 2009 по 2018 г.²

Россия не осталась в стороне от мировых трендов развития солнечной энергетики – в России есть производство солнечных модулей, строятся большие сетевые и малые автономные солнечные электростанции, разработана и запатентована собственная высокоэффективная технология производства ге-

¹ Cost of electricity by source. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source (дата обращения: 12.08.2018).

² BloombergNEF. URL <https://about.bnef.com/blog/batteries-boom-enables-world-get-half-electricity-wind-solar-2050> (дата обращения: 12.08.2018).

тероструктурных модулей. Установленная мощность солнечных электростанций в России достигает порядка 500 МВт, а до 2024 г. планируется довести эти показатели до 1,5 ГВт¹.

Российские специалисты оценили потенциал ВИЭ в России, учитывая доступность ресурсов, техническую осуществимость и экономическую обоснованность применения технологий альтернативной энергетики. Экономический потенциал ВИЭ в России оценивают более чем в 270 млн т условного топлива (млн т.у.т.) [4].

Основным элементом солнечной батареи является солнечный элемент. Однако мощность одного солнечного элемента очень мала, и для того, чтобы производить достаточно мощности для обеспечения традиционной нагрузки, отдельные элементы соединяют последовательно, образуя модуль. Затем из модулей можно сформировать солнечную батарею, которая будет соответствовать спецификации проекта солнечных генерирующих систем. Батарея состоит из модулей, которые соединены последовательно и параллельно [5].

Число элементов в модуле обозначается N_c ; число параллельных модулей обозначается N_p , а число последовательно соединенных модулей обозначается N_s .

Идеальный фотоэлектрический солнечный элемент представляется как источник тока, подключенный параллельно с одним диодом. Модель солнечного элемента с четырьмя параметрами представлена на рис. 1.

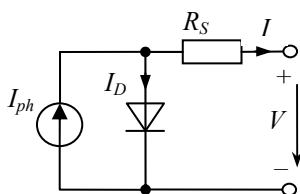


Рис. 1. Модель солнечного элемента с четырьмя параметрами

Зависимость тока от напряжения для модели солнечного элемента на рис. 1 определяется по формуле

$$I = I_{ph} - I_D,$$

где I_{ph} – ток, индуцированный падением солнечного света на солнечный элемент; I_D – ток диода.

Ток диода определяется выражением:

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{N_c \alpha V_t} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_0 – обратный ток насыщения диода; α – коэффициент идеальности диода; N_c – число последовательно соединенных элементов в модуле; V_t – тепловое напряжение диода, которое является константой и определяется при любой

¹ ГК «Хевел» [Электронный ресурс]. URL <http://www.hevelsolar.com/solar/faq> (дата обращения: 12.08.2018).

заданной температуре, К; $V + R_s I$ – общее напряжение смещения диода (R_s – сумма нескольких структурных сопротивлений в солнечном элементе).

Тепловое напряжение диода определяется по формуле

$$V_t = \frac{kT}{q}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); q – величина заряда электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); T – заданная температура, К.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента зависит от изменения солнечных параметров с заданной инсоляцией G (солнечная интенсивность Вт/м²) и температуры T (К), как описано в уравнениях (1) и (2).

Индуктированный фотоэлектрический ток можно найти по формуле

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{scref} + k_i (T - T_{ref})),$$

где I_{scref} – ток короткого замыкания, А; k_i – температурный коэффициент тока короткого замыкания, % / °С; G_{ref} – эталонная солнечная интенсивность (обычно $G_{ref} = 1000$ Вт/м²); T_{ref} – эталонная температура при стандартных условиях испытания (обычно $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$).

Обратный ток насыщения диода находится по формуле

$$I_0 = I_{oref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{E_g}{\alpha V_t} \left(1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \right),$$

где I_{oref} – опорный ток насыщения диода, А; E_g – ширина запрещенной зоны выбранного полупроводникового материала солнечного элемента, эВ, которая определяется выражением

$$E_g = 1,16 - 0,000702 \frac{T^2}{T - 1108}.$$

Коэффициент идеальности диода можно определить по формуле

$$\alpha = \alpha_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right),$$

где α_{ref} – температурный коэффициент тока насыщения диода.

Как правило, параметры I_{oref} , α_{ref} , R_s не предоставляются производителями фотоэлектрических батарей и должны оцениваться по имеющимся данным (I_{scref} , V_{ocref} , I_{mpref}), которые указаны в характеристиках фотоэлектрических батарей при «стандартных условиях теста»: при $G_{ref} = 1000$ Вт/м² и $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$.

Температурный коэффициент тока насыщения диода определяется по формуле

$$\alpha_{ref} = \frac{g(2V_{mpref} - V_{ocref})}{N_c k T_{ref} \left(\frac{I_{scref}}{I_{scref} - I_{mpref}} + \ln \left(1 - \frac{I_{mpref}}{I_{scref}} \right) \right)},$$

где V_{mpref} – напряжение при максимальной мощности, В; V_{ocref} – напряжение холостого хода, В; I_{mpref} – ток при максимальной мощности, А.

Обратный ток насыщения диода при нормальных условиях определится в соответствии с выражением

$$I_{oref} = \frac{I_{scref}}{\exp\left(\frac{V_{ocref}}{N_c \alpha_{ref} V_t}\right) - 1}.$$

Сопротивление солнечного элемента находится по формуле

$$R_s = \frac{N_c \alpha_{ref} V_t \ln\left(1 - \frac{I_{mpref}}{I_{scref}}\right) + (V_{ocref} - V_{mpref})}{I_{mpref}}.$$

Задача моделирования процессов генерации солнечной энергии в настоящий момент является особенно актуальной в связи с тенденцией постепенного перехода на ВИЭ.

Нами была смоделирована солнечная панель типа Mitsubishi PV-MLE255HD в программно-аппаратном комплексе реального времени типа «RTDS».

RTDS – это специализированный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе в реальном времени [2].

Для того чтобы смоделировать солнечную панель в RTDS, необходимо задать следующие параметры: N_c – число последовательно соединенных элементов в модуле; N_{cp} – число параллельно соединенных элементов в модуле; V_{ocref} – напряжение холостого хода, В; I_{scref} – ток короткого замыкания, А; V_{mpref} – напряжение при максимальной мощности, В; I_{mpref} – ток при максимальной мощности, А; E_g – ширина запрещенной зоны; $J_{imp}(k_i)$ – температурный коэффициент тока короткого замыкания, %/°C; K_9 – температурный коэффициент напряжения холостого хода, %/°C; T_{ref} – эталонная температура при стандартных условиях испытания (обычно $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$); $INS_{ref}(G_{ref})$ – эталонная солнечная интенсивность (обычно $G_{ref} = 1000 \text{ Вт/м}^2$); N_s – количество последовательно соединенных модулей; N_p – число параллельно соединенных модулей (рис. 2).

Солнечная панель имеет следующие параметры: $N_c = 60$; $N_{cp} = 1$; $V_{ocref} = 37,8 \text{ В}$; $I_{scref} = 4,445 \text{ А}$; $V_{mpref} = 31,2 \text{ В}$; $I_{mpref} = 4,09 \text{ А}$; E_g – монокристаллический кремний; $J_{imp}(k_i) = 0,056 \text{ \%/}^\circ\text{C}$; $K_9 = -0,35 \text{ \%/}^\circ\text{C}$; $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$; $INS_{ref} = 1000 \text{ Вт/м}^2$; $N_s = 1$; $N_p = 2$.

ВАХ (рис. 3) определяет рабочую точку фотоэлектрической батареи при заданной инсоляции и температуре. Кривые варьируются от тока КЗ (I_{sc} , 0) до напряжения разомкнутой цепи (0, V_{oc}) с точкой перегиба (I_m , V_m), определяемой как точка максимальной мощности, в которой фотоэлектрическая батарея генерирует максимальную электрическую мощность $P_{\max}$ [5].

В результате моделирования получили энергетические характеристики фотоэлемента. Солнечная панель работает на шины бесконечной мощности. В данных опытах плавно менялось напряжение от 0 до 37,8 В и снимались характеристики зависимостей тока и мощности от напряжения.

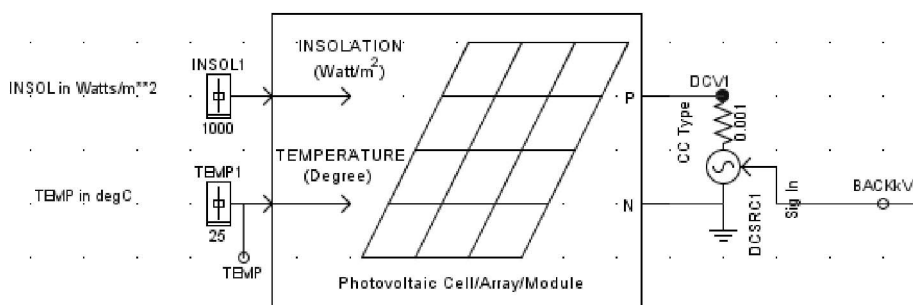


Рис. 2. Модель солнечной панели в программно-аппаратном комплексе RTDS

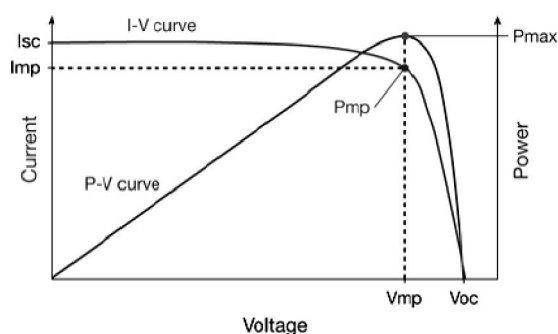


Рис. 3. ВАХ и кривая мощности солнечного элемента

Моделирование проводилось при фиксированной температуре 25°C и разных уровнях инсоляции от 200 до 1000 Вт/м^2 (рис. 4).

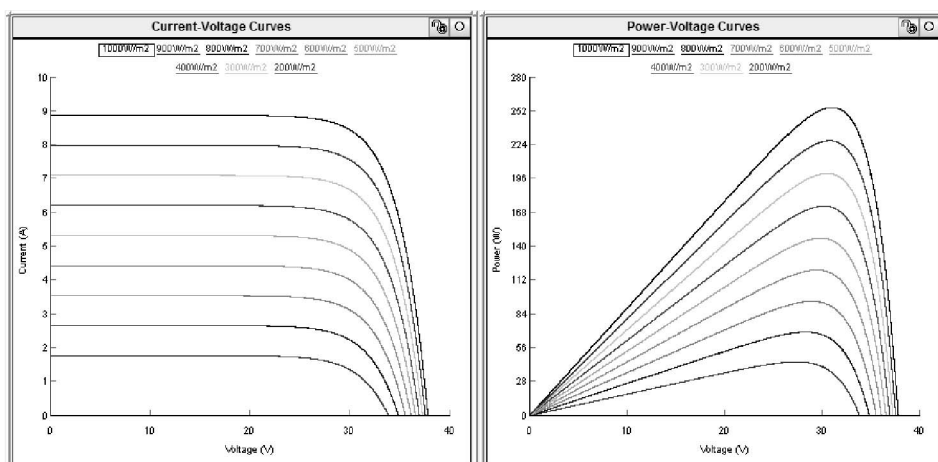


Рис. 4. Характеристики солнечной панели при температуре 25°C

По результатам моделирования видно, что чем больше инсоляция, тем больше выходные ток и мощность солнечной панели.

При снижении интенсивности инсоляции ВАХ панели сдвигается вниз, что определяет снижение тока короткого замыкания. Напряжение холостого хода при этом уменьшается незначительно.

Также моделирование проводилось при фиксированной инсоляции 1000 Вт/м^2 и разных уровнях температуры от 25 до 105°C (рис. 5).

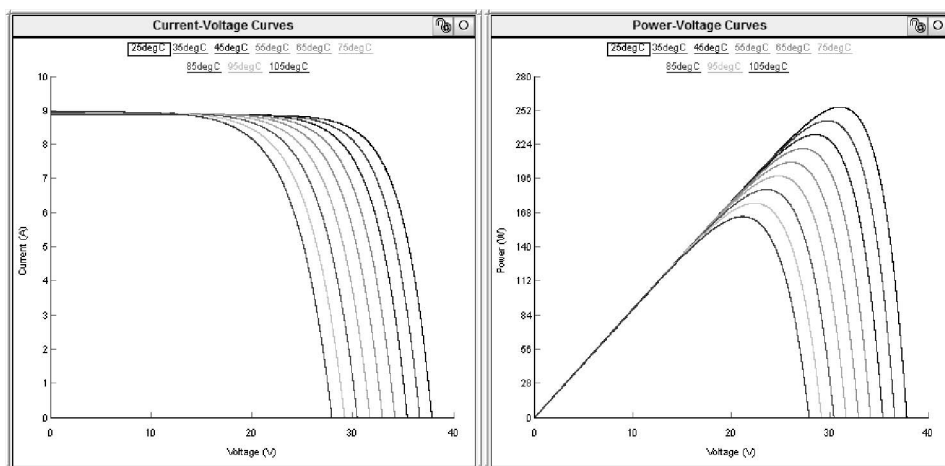


Рис. 5. Характеристики солнечной панели при инсоляции 1000 Вт/м^2

По результатам моделирования видно, что чем меньше температура, тем больше генерируемая мощность солнечной панели. Однако максимумам мощности при различных температурах соответствуют различные напряжения.

Чтобы передавать в нагрузку максимально возможную при данных условиях мощность солнечного модуля, можно использовать известные алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности (ТММ) [3].

Выводы. Моделирование солнечных модулей в программно-аппаратном комплексе реального времени RTDS и дальнейшая обработка полученных результатов могут позволить оценить технико-экономическую эффективность применения тех или иных солнечных модулей в конкретных климатических условиях.

Литература

1. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации: сайт. URL: <http://ac.gov.ru/publications> (дата обращения 12.08.2018).
2. Егоров А.Ю., Кириллова А.А., Мясникова Т.В. Испытания микропроцессорного устройства АОПЧ при аварийных режимах, приводящих к избытку активной мощности и недопустимому повышению частоты // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 114–120.

3. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашиского университета. 2016. № 3. С. 76–93.
4. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Л.С. Беляев, О.В. Марченко, С.П. Филиппов и др. Новосибирск: Наука, 2000. 269 с.
5. Snehamoy Dhar, Sridhar R., Varun Avasthy. Modeling and simulation of photovoltaic arrays. Available at: <http://www.iitk.ac.in/npsc/Papers/NPSC2012/papers/12118.pdf>.

МЯСНИКОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА – кандидат педагогических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tatyana.myasnikova@yandex.ru).

МАТЮНИН АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – старший преподаватель кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (matyunin86@mail.ru).

КИРИЛЛОВА АННА АНДРЕЕВНА – магистрант факультета энергетики и электротехники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (anyaskinooo@gmail.com).

T. MYASNIKOVA, A. MATYUNIN, A. KIRILLOVA PHOTOVOLTAIC PANEL MODELING

Key words: *renewable energy sources, solar battery, solar cell, current-voltage characteristic, simulation, photovoltaic panel.*

Renewable energy sources, which tend to include energy of the sun, wind, water, etc., are of great importance to meet the needs of electricity. The main source of energy on the earth is the sun. Currently, solar energy industry is one of the most promising areas in the development of renewable energy, but it is not widespread in Russia yet. The production of electricity by the conversion of solar energy leads to a significant reduction in environmental pollution compared to production due to fossil fuels. Solar panels are not very productive. For efficient use of solar energy, it is necessary to predict this power under the influence of various environmental factors, to evaluate the behavior of photoelectric converters in various operating modes. The task of modeling the generation of solar energy at the moment is particularly relevant due to the trend of a gradual transition to renewable energy sources. We have modeled a Mitsubishi PV-MLE255HD solar panel in a real-time software-hardware complex of the type "RTDS". The model was developed with the help of the basic equations of photovoltaic solar cells, which take into account the effects of the level of solar radiation and temperature differences.

References

1. *Analiticheskii tsentr pri pravitel'stve Rossiiskoi Federatsii: sait* [Analytical Center under the Government of the Russian Federation: site]. Available at: <http://ac.gov.ru/publications> (Accessed 12 August 2018).
2. Egorov A.Yu., Kirillova A.A., Myasnikova T.V. *Ispytaniya mikroprotessornogo ustroystva AOPCh pri avariinykh rezhimakh, privodyashchikh k izbytku aktivnoi moshchnosti i nedopustimomu povysheniyu chastoty* [Tests of the AOPC microprocessor device under emergency conditions leading to an excess of active power and an unacceptable increase in frequency]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy I mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 1st Int. Sci. and Tech. Conf. «Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2017, pp. 114–120.
3. Malinin G.V., Serebryannikov A.V. *Ispytaniya mikroprocessornogo ustrojstva AOPCH pri avariinykh rezhimakh privodyashchikh k izbytku aktivnoi moshchnosti i nedopustimomu povysheniyu*

chastoty [Maximum power point tracking for pv array]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 76–93.

4. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P. et al. *Mirovaya energetika i perekhod k ustoichivomu razvitiyu* [World energy and the transition to sustainable development]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000, 269 p.

5. Snehamoy Dhar, Sridhar R., Varun Avasthy. Modeling and simulation of photovoltaic arrays. Available at: <http://www.iitk.ac.in/npsc/Papers/NPSC2012/papers/12118.pdf>.

MYASNIKOVA TATYANA – Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor of Automated Electrotechnological Installations and Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (tatyanamiasnikova@yandex.ru).

MATYUNIN ALEKSEY – Senior Teacher of Automated Electrotechnological Installations and Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (matyunin86@mail.ru).

KIRILLOVA ANNA – Master's Program Student of Energy and Electrical Engineering Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (anyaskinooo@gmail.com).

Формат цитирования: Мясникова Т.В., Матюнин А.Н., Кириллова А.А. Моделирование фотоэлектрических панелей // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 83–90.

УДК 621.318.3

ББК 3264.36-052

В.Н. ПЕТРОВ, Н.В. РУССОВА, Д.В. САМУИЛОВ, Г.П. СВИНЦОВ

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ФОРСИРОВАННОГО КЛАПАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
В СХЕМЕ С БАЛЛАСТНЫМ РЕЗИСТОРОМ**

Ключевые слова: проектирование, форсированный клапанный электромагнит, минимизация критериев оптимальности, обобщенная нагрузочная характеристика, уравнения срабатывания, возврата и нагрева, динамические параметры и характеристики, вихревые токи, балластный резистор.

Форсированное управление электромагнитами постоянного напряжения обеспечивает существенное снижение затрат активных материалов (обмоточной меди и электротехнической стали), расходуемых на изготовление приводных электромагнитов при снижении потребляемой ими мощности. Форсировка позволяет управлять динамическими характеристиками и параметрами электромагнита, габаритными размерами. При обоснованном выборе элементов схемы питания обеспечивается высокое быстродействие при минимизации износа приводного электромагнита и коммутационного аппарата. Одним из наиболее простых и дешевых способов форсировки является использование шунтирующего на время включения балластного резистора. Разработанная методика проектного расчета форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения основана на условиях его срабатывания, удержания и нагрева, позволяющих получить размеры оптимального электромагнита, минимизированного по частному критерию. Полученные размеры из условий статики могут быть применены для расчета динамических характеристик и параметров. Введение в систему уравнений проектирования условия удержания якоря электромагнита позволило учесть влияние коэффициента заполнения обмоточного окна на число витков и диаметр провода при различных номинальных значениях напряжения питания.

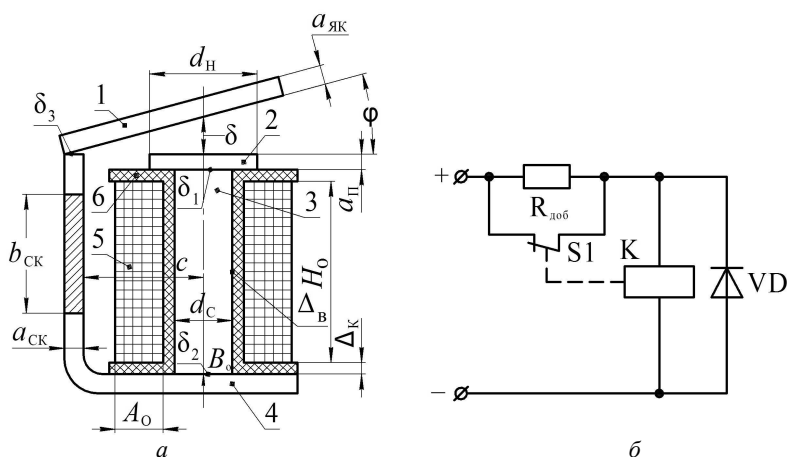
Первым этапом определения размеров форсированного электромагнита с учетом динамики является оптимизационная проектная методика его расчета, результаты которой используются при расчете динамических характеристик и параметров в рамках второго этапа проектирования.

В качестве исходных данных используется нагрузочная характеристика, полученная методами активного эксперимента и обобщенная положениями теории подобия [1]:

$$\begin{cases} M_{эм} = M_* M_{баз}; \\ F = F_* F_{баз}, \end{cases} \quad (1)$$

$$(2)$$

где $M_{эм}$, F – электромагнитный момент и магнитодвижущая сила обмотки, соответственно; $M_{баз} = B_0^2 \pi d_c^3 / 8 \mu_0$, $F_{баз} = B_0 d_c / \mu_0$ – базисные значения соответствующих функций; B_0 – магнитная индукция, усредненная в сечении основания сердечника (рис. 1, а); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума; M_* , F_* – безразмерные функции электромагнитного момента и магнитодвижущей силы обмотки [2, 3].



1 – яркорь; 2 – полюсный наконечник; 3 – цилиндрический сердечник;
4 – скоба; 5 – обмотка; 6 – каркас катушки

Рис. 1. Эскиз упрощенной магнитной системы клапанного электромагнита (а) и схема форсированного управления (б)

Кривая намагничивания магнитной системы описана в параметрической форме [3]:

$$\begin{cases} \Psi = \Psi_* \Psi_{\text{баз}}; \\ F = F_* F_{\text{баз}}, \end{cases} \quad (3)$$

где Ψ – потокосцепление обмотки; $\Psi_{\text{баз}} = B_0 N \pi d_c^2 / 4$ – базисное значение функции потокосцепления; N – число витков обмотки; Ψ_* – безразмерная функция потокосцепления обмотки.

Методика проектного расчета электромагнита базируется на нижеприведенных условиях и уравнениях:

– условие срабатывания представлено в виде

$$F_{\text{ср}} = \left(\frac{K_{U_{\min}} U_n}{K_{U_{\text{ср}}} R_{\text{гор}}} \right) \cdot N, \quad (5)$$

где U_n – номинальное напряжение питания; $R_{\text{гор}}$ – сопротивление обмотки в нагретом состоянии; $K_{U_{\min}}$ – кратность минимального напряжения, $K_{U_{\text{ср}}}$ – конструктивно-технологический запас по напряжению срабатывания;

– условие удержания яркоря

$$F_{\text{уд}} = \left(\frac{K_{U_{\min}} U_n}{K_{U_{\text{ср}}} (R_{\text{гор}} + R_{\text{доб}})} \right) \cdot N. \quad (6)$$

Оно обусловлено необходимостью обеспечения надежного удержания яркоря электромагнита при воздействии внешних механических факторов. Это достигается дополнительным увеличением электромагнитной силы (ΔP) над противодействующим усилием в конечном притянутом положении яркоря (рис. 1, а) [4];

– баланс мощностей в режиме удержания якоря

$$n_P \cdot \tau_{\text{доп}} \cdot K_T \cdot S_{\text{охл}} = \left(\frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{гор}} + R_{\text{доб}}} \right)^2 \cdot R_{\text{гор}}, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{доп}} \cdot K_T \cdot S_{\text{охл}} = (\Theta_s - \Theta_0) \cdot K_{\text{т.экв}} \cdot S_0,$$

где n_P – коэффициент перегрузки по мощности; Θ_s – среднеповерхностная температура обмотки; Θ_0 – температура окружающей среды; $K_{\text{т.экв}}$ – приведенный к геометрической площади поверхности обмотки коэффициент теплопередачи; S_0 – площадь поверхностей обмотки;

– зависимость магнитодвижущей силы отпускания (возврата) подвижной части электромагнита

$$F_{\text{отп}} = \frac{K_{U_{\text{отп}}} \cdot K_{\text{отп}} \cdot U_{\text{н}} \cdot N}{R_{\text{хол}} + R_{\text{доб}}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение питания; $R_{\text{хол}}$ – сопротивление обмотки при температуре окружающей среды; $K_{U_{\text{отп}}}$ – коэффициент запаса по напряжению отпускания; $K_{\text{отп}}$ – относительная величина напряжения отпускания.

Запишем выражение теплоотдающей способности магнитной системы [5]:

$$K_* = \frac{K_{\text{т.экв}} \cdot S_0}{K_{\text{т.баз}} \cdot S_c}, \quad (9)$$

где $K_{\text{т.баз}} = \frac{5,67 \cdot (2,73 + 0,01 \cdot \Theta_0)^4}{\Theta_0}$ – базисное значение коэффициента теплопередачи.

Выражение (7) с учетом (9) примет вид

$$\tau_{\text{доп}} \cdot K_T \cdot S_{\text{охл}} = \Theta_0 \cdot (\Theta_{s*} - 1) \cdot K_* \cdot K_{\text{т.баз}} \cdot S_c, \quad (10)$$

где Θ_{s*} – относительная температура поверхности обмотки:

$$\Theta_{s*} = \frac{\Theta_s}{\Theta_0} = (1,37 - 0,018 \cdot \alpha_{11} + 0,130 \cdot \alpha_{55} - 0,161 \cdot \alpha_{66} + 0,039 \cdot \alpha_{66}^2 - 0,021 \cdot \alpha_{55} \cdot \alpha_{66})^2; \quad (11)$$

$$K_* = (8,57 + 1,02 \cdot \alpha_{11} + 0,399 \cdot \alpha_{22} + 0,345 \cdot \alpha_{55} + 0,459 \cdot \alpha_{66} - 0,129 \cdot \alpha_{66}^2)^2. \quad (12)$$

Кодированные значения α_i определяются по выражениям

$$\alpha_{11} = 1,003 \cdot H_* - 3,01; \quad \alpha_{22} = 7,044 \cdot A_* - 3,522;$$

$$\alpha_{55} = 3,202 \cdot 0,01 \cdot \Theta_{\text{доп}} - 4,163; \quad \alpha_{66} = 6,667 \cdot 0,01 \cdot \Theta_0 - 3,667.$$

Среднеобъемная температура в толще обмотки

$$\Theta_v = \Theta_{v*} \cdot \Theta_0 = (1,44 + 0,154 \cdot \alpha_{55} - 0,184 \cdot \alpha_{66} + 0,043 \cdot \alpha_{66}^2 - 0,024 \cdot \alpha_{55} \cdot \alpha_{66})^2 \cdot \Theta_0. \quad (13)$$

Удельное среднеобъемное электрическое сопротивление

$$\rho_{\text{гор}} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta_v), \quad (14)$$

где $\alpha = 0,0043 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления меди.

Удельное электрическое сопротивление при температуре окружающей среды

$$\rho_x = 1,65 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta_0). \quad (15)$$

Из совместного решения уравнений (5), (6) определяется кратность сопротивлений

$$R_* = R_{\text{доб}} / R_{\text{гор}} = (F_{\text{ср}} / F_{\text{уд}}) - 1. \quad (16)$$

Пусковая мощность

$$P_{\text{п}} = \frac{U_{\text{max}}^2}{R_{\text{гор}}} = \frac{K_{U \text{ max}}^2 \cdot U_{\text{н}}^2}{R_{\text{гор}}} \cdot \left(\frac{R_{\text{гор}} \cdot N^2}{R_{\text{гор}} \cdot N^2} \right) = \frac{K_{\text{max}}^2 \cdot F_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot l_{\text{ср}}}{H_0 \cdot A_0 \cdot K_3}, \quad (17)$$

где $l_{\text{ср}}$ – средняя длина витков обмотки; K_3 – коэффициент заполнения обмоточного окна.

Мощность $P_{\text{уд}}$, потребляемая электромагнитом в режиме удержания якоря:

$$P_{\text{уд}} = \frac{U_{\text{max}}^2}{R_{\text{гор}} + R_{\text{доб}}} = \frac{K_{U \text{ max}}^2 \cdot U_{\text{н}}^2}{R_{\text{гор}} \cdot (1 + R_*)} = \frac{P_{\text{п}}}{(1 + R_*)}. \quad (18)$$

Мощность $P_{\text{уд.о}}$, выделяемая обмоткой в режиме удержания якоря:

$$P_{\text{уд.о}} = \left(\frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{гор}} + R_{\text{доб}}} \right)^2 \cdot R_{\text{гор}} = \frac{P_{\text{п}}}{(1 + R_*)^2}. \quad (19)$$

Из последнего выражения с учетом (7) и (17) запишем

$$(1 + R_*)^2 = \frac{K_{\text{max}}^2 \cdot F_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot l_{\text{ср}}}{H_0 \cdot A_0 \cdot K_3} \cdot \frac{1}{n_p \cdot \tau_{\text{доп}} \cdot K_{\text{т}} \cdot S_{\text{охл}}}. \quad (20)$$

Обратим внимание, что из уравнения (16) следует, что

$$1 + R_* = (F_{\text{ср}} / F_{\text{уд}}).$$

Тогда, подставив последнее выражение в (20), получим

$$\left(\frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{уд}}} \right)^2 = \frac{K_{\text{max}}^2 \cdot F_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot l_{\text{ср}}}{H_0 \cdot A_0 \cdot K_3 \cdot n_p \cdot \tau_{\text{доп}} \cdot K_{\text{т}} \cdot S_{\text{охл}}}. \quad (21)$$

В соответствии с рис. 1 средняя длина витка может быть записана в виде

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot d_{\text{с}} \cdot (1 + 2 \cdot \Delta_{\text{в*}} + 2 \cdot \Delta_{\text{*}} + A_{\text{*}}). \quad (22)$$

С учетом (10) и (22) выражение (21) запишется в виде

$$\left(\frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{уд}}} \right)^2 = \frac{K_{\text{max}}^2 \cdot F_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot \pi \cdot d_{\text{с}} \cdot (1 + 2 \cdot \Delta_{\text{в*}} + 2 \cdot \Delta_{\text{*}} + A_{\text{*}})}{H_0 \cdot A_0 \cdot K_3 \cdot n_p \cdot \Theta_0 \cdot (\Theta_{\text{с*}} - 1) \cdot K_{\text{*}} \cdot K_{\text{т.баз}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{с}}^2}{4}}. \quad (23)$$

После ряда преобразований выражение (23) записывается в виде

$$d_{\text{с}}^3 - m \cdot F_{\text{уд}}^2 = 0, \quad (24)$$

где

$$m = \frac{4 \cdot K_{\text{max}}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot (1 + 2 \cdot \Delta_{\text{в*}} + 2 \cdot \Delta_{\text{*}} + A_{\text{*}})}{H_{\text{*}} \cdot A_{\text{*}} \cdot K_3 \cdot n_p \cdot \Theta_0 \cdot (\Theta_{\text{с*}} - 1) \cdot K_{\text{*}} \cdot K_{\text{т.баз}}}.$$

Численное решение уравнения (24) сводится к определению диаметра сердечника (d_c).

По выражению (1) рассчитывается граничное значение (при магнитной индукции $B_{o,гр} = 1,1$ Тл) электромагнитного момента при критическом зазоре

$$M_{эм,гр} = M_*(B_{o,гр}) \cdot M_{баз}(B_{o,гр}). \quad (25)$$

Затем определяется соответствующая этому моменту электромагнитная сила

$$P_{эм,гр} = \frac{M_{эм,гр}}{c + a_{ск}} = \frac{M_{эм,гр}}{d_c \cdot (c_* + a_{ск*})} = \frac{M_*(B_{o,гр}) \cdot M_{баз}(B_{o,гр})}{d_c \cdot (c_* + a_{ск*})}, \quad (26)$$

где $(c + a_{ск})$ – плечо действия электромагнитной силы (рис. 1, а).

Электромагнитная сила $P_{эм,гр}$ сравнивается с механической силой $P_{мх,кр}$ в критической точке. Возможны два условия:

1) $P_{мх,кр} \leq P_{эм,гр}$ (рис. 2, б точка А). Следовательно, магнитная система в этом случае линейна и магнитная индукция $B_{o,ср}$ срабатывания определяется по формуле

$$B_{o,гр} = \sqrt{\left(\frac{P_{мх,кр} \cdot R_0}{M_*(B_{o,гр})} \right) \cdot \frac{8 \cdot \mu_0}{\pi \cdot d_c^3}}. \quad (27)$$

2) $P_{мх,кр} > P_{эм,гр}$ (рис. 2, б, точка Б). В этом случае магнитная система нелинейна и значение индукции $B_{o,ср}$ определяется путем решения численными методами уравнения

$$P_{мх,кр} \cdot (c + a_{ск}) - M_*(B_{o,ср}) \cdot M_{баз}(B_{o,ср}) = 0. \quad (28)$$

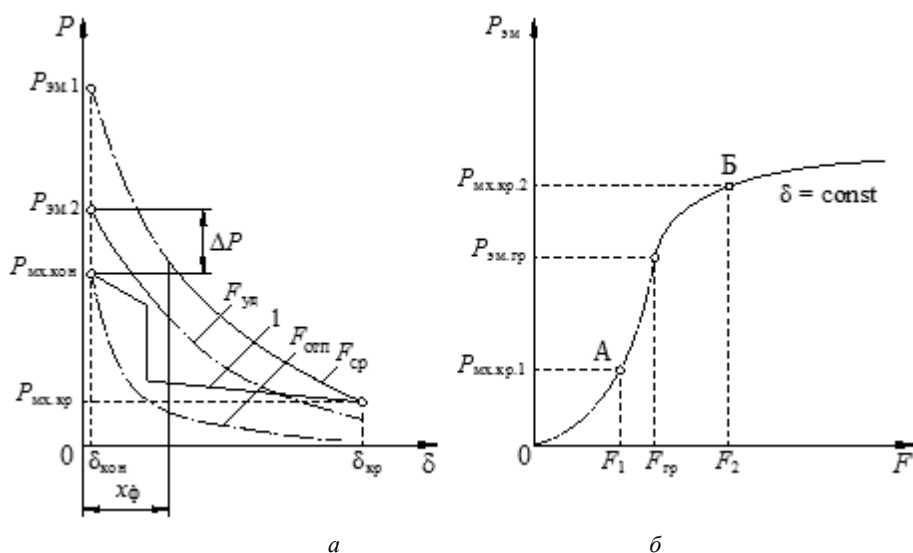


Рис. 2. Механическая (1) и тяговые характеристики при срабатывании электромагнита (а), а также нагрузочная характеристика при $\delta_{кр}$ (б)

По искомой магнитной индукции $B_{o,cr}$ определяется магнитодвижущая сила срабатывания в зависимости от двух вышеперечисленных условий:

$$F_{cr} = F_*(B_{o,гр}) \cdot F_{баз}(B_{o,cr}) \text{ при } P_{мх.кр} \leq P_{эм.гр}; \quad (29)$$

$$F_{cr} = F_*(B_{o,cr}) \cdot F_{баз}(B_{o,cr}) \text{ при } P_{мх.кр} > P_{эм.гр}. \quad (30)$$

Магнитодвижущая сила определяется из уравнения (15)

$$F_{уд} = F_{cr} / (R_* + 1), \quad (31)$$

где кратность сопротивлений R_* предварительно рассчитывается из уравнения (19) с учетом выражений (7) и (10):

$$R_* = \sqrt{\frac{P_{II}}{\Theta_0 \cdot (\Theta_{s*} - 1) \cdot K_* \cdot K_{т.баз} \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}}} - 1. \quad (32)$$

После установления магнитодвижущей силы срабатывания и магнитодвижущей силы удержания необходимо проверить правильность согласования тяговой и противодействующей характеристик, для чего рассчитываются электромагнитные силы при конечном рабочем воздушном зазоре для F_{cr} и $F_{уд}$. Порядок их определения следующий (в качестве величины F принимается магнитодвижущая сила, соответствующая расчетному режиму: срабатывания либо удержания):

1) рассчитывается граничное значение магнитодвижущей силы для конечного рабочего воздушного зазора при магнитной индукции $B_{o,гр} = 1,1$ Тл

$$F_{гр} = F_*(B_{o,гр}) \cdot F_{баз}(B_{o,гр}). \quad (33)$$

2) сравнивается расчетное значение магнитодвижущей силы F с граничным значением $F_{гр}$:

– если $F = F_1 \leq F_{гр}$ (рис. 2, б точка А), то магнитная система линейна и значение магнитной индукции B_o определяется по формуле

$$B_o = \frac{F}{F_*} \cdot \frac{\mu_0}{d_c}; \quad (34)$$

– если $F = F_2 > F_{гр}$ (рис. 2, б точка Б), то магнитная система нелинейна и значение B_o определяется путем решения уравнения одним из численных методов:

$$F - F_*(B_o) \cdot F_{баз}(B_o) = 0; \quad (35)$$

3) по найденному значению магнитной индукции B_o определяется электромагнитная сила по уравнениям

$$P_{эм} = \frac{M_*(B_{o,гр}) \cdot M_{баз}(B_o)}{c + a_{ск}} \text{ при } F_1 \leq F_{гр}; \quad (36)$$

$$P_{эм} = \frac{M_*(B_o) \cdot M_{баз}(B_o)}{c + a_{ск}} \text{ при } F_2 > F_{гр}. \quad (37)$$

Полученные значения электромагнитных сил в соответствии с рис. 2, а должны удовлетворять условиям

$$\begin{cases} (P_{\text{эм.кон}})_{\text{ср}} \geq P_{\text{эм.1}} ; \\ P_{\text{эм.2}} \leq (P_{\text{эм.кон}})_{\text{уд}} \leq (P_{\text{эм.кон}})_{\text{ср}} , \end{cases}$$

где $(P_{\text{эм.кон}})_{\text{ср}}$ – электромагнитная сила в притяннутом положении якоря при срабатывании; $P_{\text{эм.1}}$ – минимальное значение электромагнитной силы в притяннутом положении якоря при срабатывании; $P_{\text{эм.2}}$ – минимальное значение электромагнитной силы в притяннутом положении якоря в режиме удержания; $(P_{\text{эм.кон}})_{\text{уд}}$ – электромагнитная сила в притяннутом положении якоря в режиме удержания.

После определения диаметра сердечника рассчитываются все размеры электромагнита и выполняется его оптимизационный расчет.

Блок-схема алгоритма проектного и оптимизационного расчета изображена на рис. 3 и не требует детального описания.

Далее возможно произвести расчет обмоточных данных.

Рекомендуется следующий алгоритм расчета обмоточных данных. При известных значениях оптимального диаметра сердечника $d_{\text{с.опт}} = 26$ мм, высоты обмотки $H_{\text{о.опт}} = 37,91$ мм, толщины обмотки $A_{\text{о.опт}} = 14,01$ мм, магнитодвижущей силы срабатывания $F_{\text{ср}} = 1529$ А, относительного сопротивления обмотки $R_{\text{д}^*} = 0,814$ и среднеобъемной температуры нагрева обмотки $\Theta_v = 114$ °С, коэффициента заполнения $K_3 = 0,70$ расчеты выполняются в такой последовательности.

По значению коэффициента заполнения, используя данные из [6], рассчитываем диаметр провода по меди:

$$d_{\text{м}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Удельное сопротивление обмотки в нагретом состоянии

$$\rho_{\text{г}} = \rho_{\text{м}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta_v) , \quad (38)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – удельное сопротивление меди при нулевой температуре, равное $1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления обмоточного провода, равный 0,0043; Θ_v – среднеобъемная температура, °С.

Подставив данные в формулу (38), получим

$$\rho_{\text{г}} = 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 114,04) = 2,41 \cdot 10^{-8} \text{ Ом·м.}$$

Средняя длина витков обмотки $l_{\text{ср}}$ определяется по формуле

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot (d_{\text{с.опт}} + 2 \cdot \Delta_{\text{к}} + A_{\text{о.опт}}) .$$

Подставив данные в формулу, получим

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot (26 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} + 14,01 \cdot 10^{-3}) = 142 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По известному диаметру провода находим его сечение $q_{\text{м}}$

$$q_{\text{м}} = \pi \cdot (1,25 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 1,226 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 .$$

Определяется количество витков обмотки N

$$N = (H_{\text{о.опт}} \cdot A_{\text{о.опт}} \cdot K_3) / q_{\text{м}} .$$

Тогда

$$N = (37,91 \cdot 10^{-3} \cdot 14,01 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7) / (1,226 \cdot 10^{-6}) = 299 \text{ витков.}$$

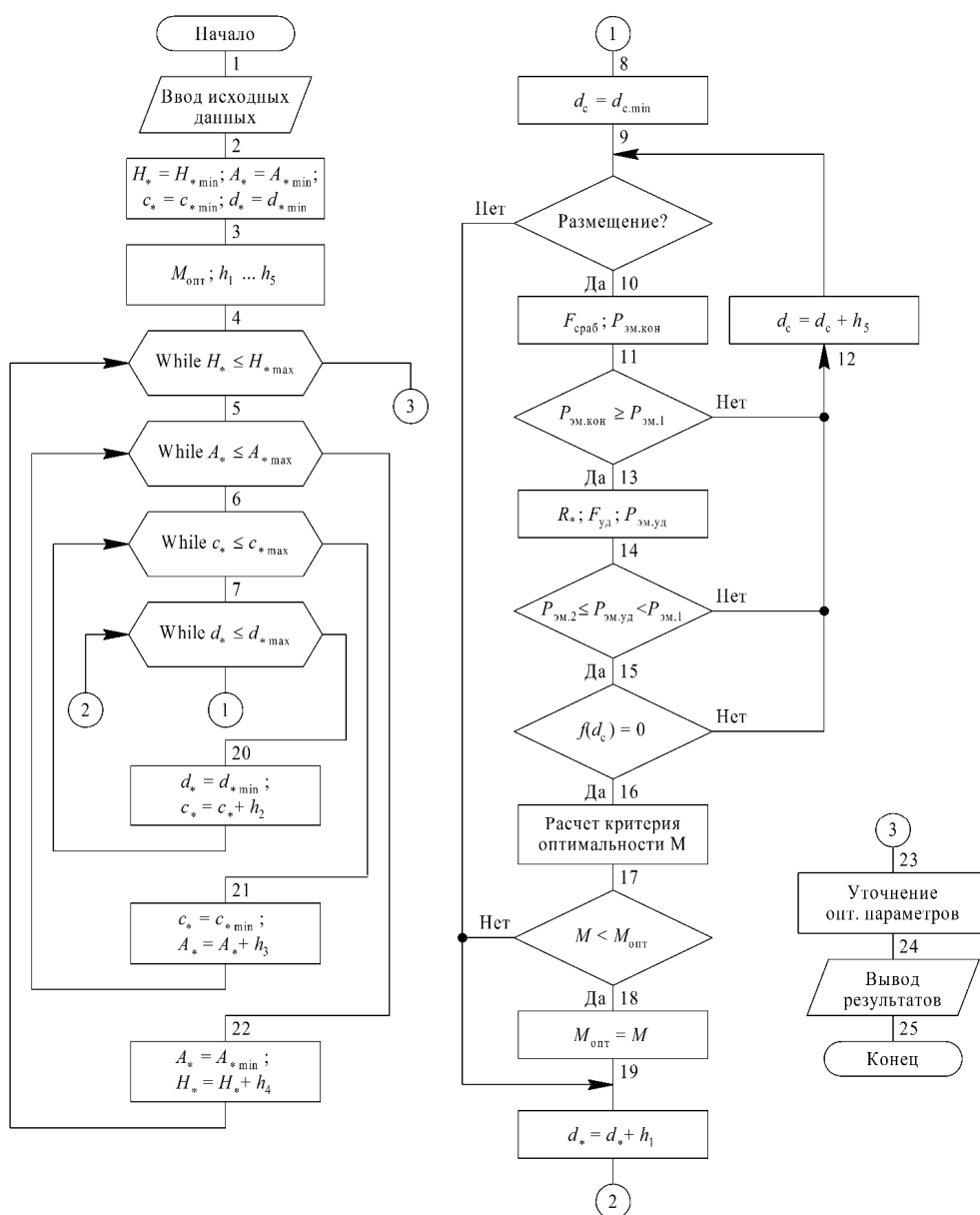


Рис. 3. Блок-схема алгоритма проектного и оптимизационного расчетов форсированного клапанного электромагнита

Рассчитывается напряжение питания при заданном коэффициенте заполнения

$$U_{\text{п}} = (K_{U_{\text{ср}}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot l_{\text{ср}} \cdot F_{\text{ср}} \cdot N) / (K_{U_{\text{мин}}} \cdot H_{\text{о.опт}} \cdot A_{\text{о.опт}} \cdot K_3) = 5,85 \text{ В.}$$

Сопротивление обмотки в горячем состоянии

$$R_{\text{Г}} = (\rho_{\text{Г}} \cdot l_{\text{ср}} \cdot N^2) / (H_{\text{о.опт}} \cdot A_{\text{о.опт}} \cdot K_3).$$

$$\text{Тогда } R_{\text{Г}} = (2,41 \cdot 10^{-8} \cdot 142 \cdot 10^{-3} \cdot 300^2) / (37,91 \cdot 10^{-3} \cdot 14,01 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7) = 0,842 \text{ Ом.}$$

Определяется сопротивление балластного резистора R_d

$$R_d = R_r \cdot R_{d*}.$$

Подставив данные в последнюю формулу, получим

$$R_d = 0,842 \cdot 0,814 = 0,685 \text{ Ом.}$$

Выполняется перерасчет диаметра провода, числа витков и сопротивления добавочного резистора, например, на стандартное номинальное напряжение $U_n = 220 \text{ В}$ [7]:

$$d_m' = d_m \cdot \sqrt{\frac{U_n}{U_n}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{5,85}{220}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$N' = N \cdot \frac{U_n}{U_n} = 300 \cdot \frac{220}{5,85} = 11300 \text{ витков.}$$

$$R_d' = R_d \cdot \left(\frac{U_n}{U_n}\right)^2 = 0,685 \cdot \left(\frac{220}{5,85}\right)^2 = 969 \text{ Ом.}$$

Полученные обмоточные данные соответствуют значению номинального напряжения 220 В.

Далее производится расчет балластного резистора.

Определяется сопротивление обмотки в горячем состоянии

$$R_r = \frac{R_d'}{R_{d*}} = \frac{969}{0,814} = 1190 \text{ Ом.}$$

Рассчитывается выделяемая мощность на балластном резисторе при максимальном напряжении питания

$$P = \left(\frac{U_n \cdot K_{U_{\max}}}{R_r + R_d'}\right)^2 \cdot R_d' = \left(\frac{220 \cdot 1,1}{1190 + 969}\right)^2 \cdot 969 = 12,17 \text{ Вт.}$$

Затем по справочнику [8] выбираются тип и величина сопротивления резистора и проводится перерасчет по мощности:

$$P = \left(\frac{U_n \cdot K_{U_{\max}}}{R_r + R_d'}\right)^2 \cdot R_d' = \left(\frac{220 \cdot 1,1}{1190 + 1000}\right)^2 \cdot 1000 = 12,21 \text{ Вт.}$$

Окончательно выбирается резистор ПЭВ-1000-15±5% сопротивлением 1000 Ом и рассеиваемой мощностью 15 Вт.

При необходимости регулирования динамических параметров срабатывания электромагнита пересчитываются обмоточные данные и параметры балластного резистора.

Для проверки гарантированного возврата подвижной системы, согласно выражению (8), в исходное состояние используются обмоточные данные, значения сопротивления балластного резистора и рассеиваемой им мощности.

Выводы. 1. Разработанная методика проектного расчета форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения основана на условиях его срабатывания, удержания и нагрева и позволяет получить размеры оптимального электромагнита, минимизированного по частному критерию (массе активных материалов).

2. Введение в систему уравнений проектирования условия удержания якоря электромагнита позволило учесть влияние коэффициента заполнения обмоточного окна на число витков и диаметр провода при различных номинальных значениях напряжения питания.

3. Предлагаемая методика позволяет поэтапно из условий статики определить оптимальные размеры форсированного клапанного электромагнита в схеме с балластным резистором, которые могут быть применены при расчете его динамических характеристик и параметров.

Литература

1. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 439 с.
2. Зайцев Ю.М., Петров В.Н., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Методика синтеза форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 103–112.
3. Кадыков В.К., Руссова Н.В., Свинцов Г.П., Сизов А.В. Обобщенные экспериментальные зависимости потокораспределения, потокосцепления и магнитодвижущей силы в клапанных электромагнитных системах постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками // Электротехника. 2007. № 4. С. 41–47.
4. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Гордон А.В., Ларионов А.Н. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М.: Оборонгиз, 1964. 516 с.
5. Кадыков В.К., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Математическое моделирование тепловых параметров клапанных электромагнитов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Тольятти, 2007. Ч. II. С. 243–245.
6. Софронов Ю.В., Руссова Н.В. Тепловой расчет катушек электрических аппаратов постоянного тока. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. 48 с.
7. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.
8. Резисторы: Справочник / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Пратусевич и др. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

ПЕТРОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ – аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (viktor912012@yandex.ru).

РУССОВА НАТАЛИЯ ВАЛЕРЬЕВНА – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

САМУИЛОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – магистрант кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

СВИНЦОВ ГЕННАДИЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (eea_chuvsu@mail.ru).

V. PETROV, N. RUSSOVA, D. SAMUILOV, G. SVINTSOV DESIGN RESULTS OF FORCED VALVE ELECTROMAGNETIC CONSTANT VOLTAGE IN THE SCHEME WITH BALLAST RESISTOR

Key words: design, forced valve electromagnet, minimization of optimality criteria, generalized load characteristics, equations of operation, return and heating, dynamic parameters and characteristics, eddy currents, ballast resistor.

The forced control of constant-voltage electromagnets provides a significant reduction in the costs of active materials (winding copper and electrical steel) spent to manufacture drive electromagnets while reducing the power they consume. Forcing allows to control

the dynamic characteristics and parameters of the electromagnet, the overall dimensions. Reasonable choice of elements of the power scheme provides high speed, the wear of the drive electromagnet and the switching device minimizing. One of the simplest and cheapest methods of boosting is the use of a ballast resistor, by-passing during switching. The developed technique of design calculation of the forced valve electromagnet of a constant voltage is based on conditions of its operation, deduction and heating, allowing to receive the dimensions of the optimum electromagnet, minimized under a particular criterion. The obtained dimensions from the static conditions can be applied to calculate the dynamic characteristics and parameters. The introduction of the containment condition into the system of design equations allowed to take into account the influence of the winding window filling factor on the number of turns and the wire diameter at different nominal values of the supply voltage.

References

1. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya*. 3-e izd., pererab. i dop. [Theory of similarity and modeling. 3rd ed.]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1984, 439 p.
2. Zaitsev Yu.M., Petrov V.N., Russova N.V., Svintsov G.P. *Metodika sinteza forsirovannogo klapannogo elektromagnita postoyannogo napryazheniya v skheme s ballastnym rezistorom* [Method of synthesis of forced valved DC electromagnets in circuit with ballast resistor]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 103–112.
3. Kadykov V.K., Russova N.V., Svintsov G.P., Sizov A.V. *Obobshchennye eksperimental'nye zavisimosti potokoraspredeleniya, potokostsepleniya i magnitodvizhushchey sily v klapannykh elektromagnitnykh sistemakh postoyannogo toka s kruglymi polyusnymi nakonechnikami* [Generalized experimental dependence of flow distribution, flux and magnetomotive force of the electromagnetic valve in systems with DC round pole pieces]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2007, no. 4, pp. 41–47.
4. Balagurov V.A., Galteev F.F., Gordon A.V., Larionov A.N. *Proektirovanie elektricheskikh apparatov aviatsionnogo elektrooborudovaniya* [Design of electrical apparatus for aircraft electrical equipment]. Moscow, Oborongiz Publ., 1964, 516 p.
5. Kadykov V.K., Russova N.V., Svintsov G.P. *Matematicheskoe modelirovanie teplovykh parametrov klapannykh elektromagnitov* [Mathematical modeling of thermal parameters of valve electromagnets]. *Problemy elektrotehniki, elektroenergetiki i elektrotekhnologii: trudy II Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. of 2nd Rus. Sci. and Tech. Conf. «Problems of electrical engineering, power engineering and electrotechnology»]. Tolyatti, 2007. Part II, pp. 243–245.
6. Sofronov Yu.V., Russova N.V. *Teplovoy raschet katushek elektricheskikh apparatov postoyannogo toka* [Thermal calculation of coils of electric devices of direct current]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2005, 48 p.
7. Slivinskaya A.G. *Elektromagnity i postoyannye magnity* [Electromagnets and permanent magnets]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 248 p.
8. Dubrovskii V.V., Ivanov D.M., Pratushevich N.Ya. *Rezistory: Spravochnik* [Resistors: Reference]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 528 p.

PETROV VIKTOR – Post-Graduate Student of Electrical and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

RUSSOVA NATALIYA – Candidate of Technical Sciences, Head of Research and Development Division, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

SAMUILOV DMITRY – Master's Program Student of Electrical and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

SVINTSOV GENNADII – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

Формат цитирования: Петров В.Н., Руссова Н.В., Самуилов Д.В., Свинцов Г.П. Результаты проектирования форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 91–101.

УДК 621.313.33:621.3.07:621.314.57

ББК 31.261.63+34.47+31.264.5

Д.И. ПОПОВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ЧЕТЫРЕХФАЗНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: испытательный комплекс, преобразователь частоты, математическое моделирование, испытания под нагрузкой, тяговый четырехфазный двигатель.

В статье обозначена тенденция внедрения асинхронных двигателей в различных системах привода, в том числе тягового. Данная тенденция влечет за собой повышение актуальности вопроса разработки испытательных комплексов для выполнения послеремонтных приемосдаточных испытаний, в частности тяговых двигателей подвижного состава. Выделен наиболее энергозатратный вид испытаний электрических двигателей – испытания на нагрев в течение часа. Обозначена проблема повышения энергоэффективности процесса испытаний. Приведен краткий обзор энергоэффективных схем, разработанных для проведения испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Отмечено, что все известные схемы взаимной нагрузки рассматривают испытания только трехфазных асинхронных двигателей. Представлена математическая модель электротехнического комплекса, подходящего для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки с обменом электрической мощностью между испытуемой машиной и нагрузочным генератором через звено постоянного тока. Приведены выражения, описывающие формирование напряжения на выходе выпрямителя, задающих напряжений в системе управления и фазных напряжений на выходе управляемых инверторов, удобные для использования в прикладных математических программах. Получены формулы для определения токов, протекающих в конденсаторе, на выходе выпрямителя, в транзисторах и диодах управляемых инверторов рассматриваемой схемы, напряжения в звене постоянного тока. Приведен пример расчета токов элементов схемы, выполненный в компьютерной системе автоматизированного проектирования Mathcad, для статического режима работы тягового асинхронного двигателя, применяемого в электровозах 2ЭС10 «Гранит» при неизменной нагрузке на валу. Отмечено, что представленная математическая модель испытательного комплекса не ограничивается возможностью выполнять расчет только статических режимов, но позволяет также моделировать динамические режимы работы установки. Результаты работы могут быть применены проектными организациями при разработке комплексов для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей, например применяемых в локомотивах электровозов 2ЭС10 «Гранит». Даны рекомендации по применению результатов исследований в организациях-разработчиках испытательных комплексов и предприятиях, осуществляющих ремонт электрического подвижного состава железных дорог.

В настоящее время происходит активное внедрение асинхронных двигателей на тяговом подвижном составе. Например, ежегодно производятся и вводятся в эксплуатацию грузовые электровозы типа 2ЭС10 «Гранит», пассажирские электровозы ЭП20 «Олимп», тепловозы 2ТЭ25А «Витязь» и др., которые оснащены тяговыми асинхронными двигателями. Достаточно тяжелые условия эксплуатации (работа в переходных режимах и при значительных изменениях температуры и влажности) приводят к выходу тяговых двигателей из строя и необходимости периодического ремонта.

При выпуске двигателей в эксплуатацию после ремонта в соответствии с нормативными документами¹ выполняют приемосдаточные испытания², которые предусматривают достаточно широкий ряд различных их видов. Наибольшие затраты электрической энергии требуют испытания на нагрев при номинальной нагрузке в установившемся длительном режиме работы в течение одного часа.

Известен ряд схем для проведения нагрузочных испытаний асинхронных машин, имеющих высокую энергетическую эффективность, за счет применения метода взаимной нагрузки [1, 5–8]. Все приведенные схемы позволяют подать на вход испытуемого двигателя электрическую мощность, которую вырабатывает нагрузочная машина, работающая в генераторном режиме, вал которой жестко соединен муфтой с валом двигателя. Такая установка из двух машин и преобразователей потребляет из сети энергию, необходимую только на покрытие потерь во всех ее элементах. Наличие у тяговых двигателей большой мощности высокого значения КПД обуславливает высокий экономический эффект применения описанных схем.

Все известные схемы, реализующие метод взаимной нагрузки, рассматривают испытания трехфазных асинхронных двигателей. В их описаниях приводятся рисунки с трехфазными схемами, хотя в тексте описаний в формулах данных технических решений отсутствуют указания на количество фаз и, следовательно, данные схемы можно обобщить и на четырехфазные двигатели. Двигатель электровоза 2ЭС10 имеет четыре фазы и рассчитан на питание от специального преобразователя (четырёхфазного инвертора). Испытание подобных двигателей по методу непосредственной нагрузки представляется возможным осуществить с применением только одного из перечисленных технических решений, приведенного в [7], так как остальные схемы предполагают питание двигателей от преобразователей частоты, а не от управляемых инверторов как отдельных устройств. При этом по сравнению со схемой, приведенной на рисунке в источнике [7], схемы обоих инверторов необходимо дополнить плечами для формирования четвертой фазы. Упрощенный вид испытательного комплекса такого типа представлен на рис. 1. Четвертая фаза обозначена латинской буквой «d» в соответствии с обозначением, принятым в [10].

Электрическая схема первого управляемого инвертора (см. рис. 1) приведена на рис. 2.

¹ О введении в действие руководства по техническому обслуживанию и текущему ремонту тяговых электродвигателей локомотивов: распоряжение ОАО «РЖД» от 02.11.2009 г. № 2229р. [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» (дата обращения: 20.11.2018); Об утверждении руководства «Электропоезда. Общее руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту»: распоряжение ОАО «РЖД» от 01.02.2008 г. № 185р. [Электронный ресурс]. URL: <http://lawru.info/dok/2008/02/01/n273979.htm> (дата обращения: 20.11.2018).

² 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 Изд-во стандартов, 2003. 31 с.

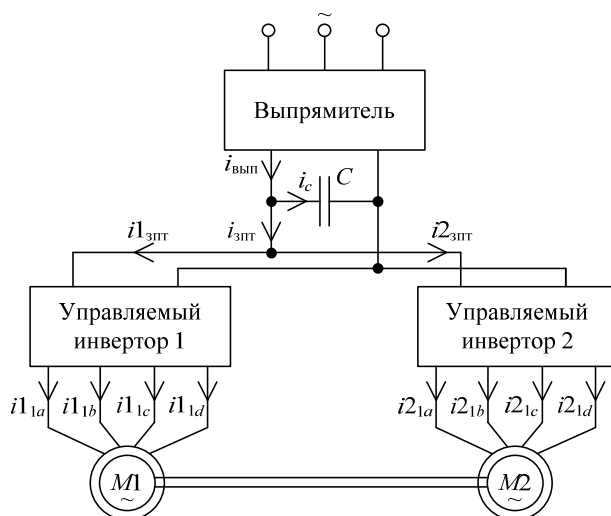


Рис. 1. Схема испытаний асинхронных четырехфазных двигателей методом взаимной нагрузки

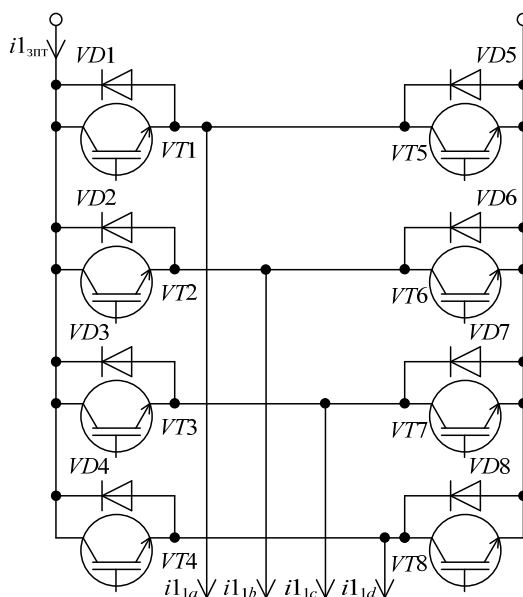


Рис. 2. Электрическая схема управляемого четырехфазного инвертора

Второй инвертор (см. рис. 1) имеет аналогичную схему, но другие обозначения токов ($i_{2зпт}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}, i_{2d}$), нумерацию транзисторов ($VT9$ – $VT16$) и диодов ($VD9$ – $VD16$).

В качестве выпрямителя в схеме (см. рис. 1) целесообразно применять трехфазный мостовой выпрямитель, работающий по схеме Ларионова, имеющий в выпрямленном напряжении шесть пульсаций за один период на-

пряжения сети. Напряжение на выходе данного выпрямителя может быть записано в следующем виде:

$$u_{\text{вып}}(t) = U_{\text{л max}} \sin(2\pi f t + \pi/3 - \text{Int}(300t)\pi/3), \quad (1)$$

где $U_{\text{л max}}$ – амплитудное значение линейного напряжения сети, В; Int – функция, выделяющая целую часть аргумента.

Управляющий сигнал системы управления транзисторами формируется путем сравнения одного пилообразного и синусоидальных задающих сигналов по каждой из четырех фаз. Задающие напряжения по четырем фазам можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} u_{3a}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi f_3 t); \\ u_{3b}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi f_3 t - \pi/2); \\ u_{3c}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi f_3 t - \pi); \\ u_{3d}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi f_3 t - 3\pi/4), \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{3 \text{ max}}$ – амплитуда задающего напряжения, определяющая действующее значение напряжения на выходе инвертора; f_3 – частота задающего напряжения, определяющая частоту тока на выходе инвертора.

Пилообразное напряжение в системы управления транзисторами может быть найдено по выражению

$$u_{\text{п}}(t) = \begin{cases} U_{\text{п max}} (4f_{\text{п}} t - 4\text{Int}(f_{\text{п}} t) - 1), \text{ если } 0 \leq \left(t - \frac{\text{Int}(f_{\text{п}} t)}{f_{\text{п}}} \right) < \frac{0,5}{f_{\text{п}}}; \\ -U_{\text{п max}} (4f_{\text{п}} t - 4\text{Int}(f_{\text{п}} t) - 3), \text{ если } \frac{0,5}{f_{\text{п}}} \leq \left(t - \frac{\text{Int}(f_{\text{п}} t)}{f_{\text{п}}} \right) < \frac{1}{f_{\text{п}}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $U_{\text{п max}}$, $f_{\text{п}}$ – амплитуда и частота пилообразного напряжения, определяющего частоту широтно-импульсной модуляции инвертора.

Напряжение на выходе инверторов по фазе «а» определяется исходя из сравнения задающего сигнала по этой фазе и пилообразного напряжения следующим образом:

$$u1_a(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} u_{\text{вып}}(t), \text{ если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{п}}(t)) \geq 0; \\ -\frac{1}{2} u_{\text{вып}}(t), \text{ если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{п}}(t)) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Напряжения на выходе инвертора по остальным фазам формируются аналогичным образом.

Пример расчета фазного напряжения с номинальной частотой тягового двигателя электровоза 2ЭС6 (60 Гц) на выходе инвертора приведен на рис. 3.

Математическая модель асинхронного двигателя известна из [3]. Математическая модель работы двух асинхронных двигателей $M1$ и $M2$, валы которых жестко соединены, аналогична модели, описанной в [9], и условно может быть разделена на три части: первая – математическая модель двигателя $M1$, вторая – математическая модель двигателя $M2$, третья – уравнение дви-

жения [2, 4]. Данные математические модели позволяют найти токи всех фаз обмоток статора обоих двигателей $M1$ и $M2$.

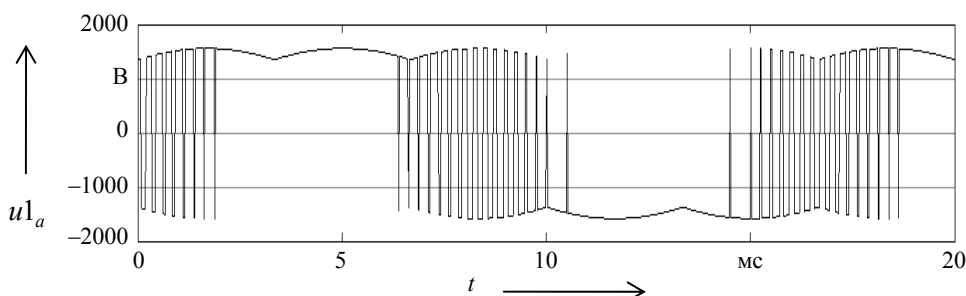


Рис. 3. Фазное напряжение на выходе инвертора

Ток в транзисторе $VT1$ протекает при положительном напряжении в фазе «a» и положительном направлении тока данной фазы:

$$i_{VT1}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) > 0] \cap (i_{1a}(t) > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Ток в транзисторе $VT5$ протекает при отрицательном напряжении в фазе «a» и отрицательном направлении тока данной фазы:

$$i_{VT5}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) < 0] \cap (i_{1a}(t) < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Токи в транзисторах $VT2 - VT4$ и $VT6 - VT8$ определяются аналогичным образом.

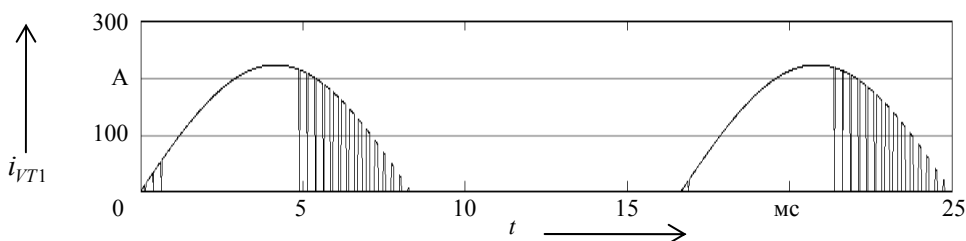


Рис. 4. Расчетный ток транзистора $VT1$

Ток диода $VD1$ протекает при положительном напряжении в фазе «a» и отрицательном направлении тока данной фазы:

$$i_{VD1}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) > 0] \cap (i_{1a}(t) < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

Ток диода $VD5$ протекает при отрицательном напряжении в фазе «a» и положительном направлении тока данной фазы:

$$i_{VD5}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) < 0] \cap (i_{1a}(t) > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (8)$$

Токи в диодах $VD2 - VD4$ и $VD6 - VD8$ определяются аналогичным образом.

Для примера на рис. 5 приведен расчетный ток диода $VD5$.

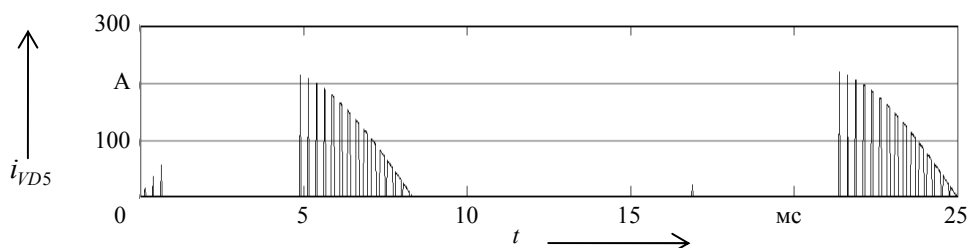


Рис. 5. Расчетный ток диода $VD5$

Токи в транзисторах $VT9 - VT16$ и диодах $VD9 - VD16$ второго управляемого инвертора (см. рис. 1) могут быть вычислены по аналогии с определением соответствующих токов первого управляемого инвертора.

Ток «левой ветви» звена постоянного тока:

$$i_{1_{\text{зпт}}}(t) = i_{VT1}(t) + i_{VT2}(t) + i_{VT3}(t) + i_{VT4}(t) - \dots - i_{VD1}(t) - i_{VD2}(t) - i_{VD3}(t) - i_{VD3}(t). \quad (9)$$

Ток «правой ветви» звена постоянного тока:

$$i_{2_{\text{зпт}}}(t) = i_{VT9}(t) + i_{VT10}(t) + i_{VT11}(t) + i_{VT12}(t) - \dots - i_{VD9}(t) - i_{VD10}(t) - i_{VD11}(t) - i_{VD12}(t). \quad (10)$$

Пример расчета токов по выражению (21) приведен на рис. 6, а по выражению (22) – на рис. 7.

Суммарный ток обеих ветвей в звене постоянного тока:

$$i_{\text{зпт}}(t) = i_{1_{\text{зпт}}}(t) + i_{2_{\text{зпт}}}(t). \quad (11)$$

Напряжение на конденсаторе определяется исходя из направления тока $i_{\text{зпт}}(t)$:

$$\begin{cases} U_c(t) = u_{\text{вып}}(t), \text{ если } i_{\text{зпт}}(t) \geq 0; \\ U_c(t) = \int \left(-\frac{i_{\text{зпт}}(t)}{C} \right) dt, \text{ если } i_{\text{зпт}}(t) < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Ток конденсатора определяется по следующему выражению:

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}. \quad (13)$$

Расчетный ток конденсатора приведен на рис. 8.

Ток выпрямителя можно определить как сумму тока конденсатора и полного тока звена постоянного тока:

$$i_{\text{вып}}(t) = i_c(t) + i_{\text{зпт}}(t). \quad (14)$$

Расчетный ток выпрямителя приведен на рис. 9.

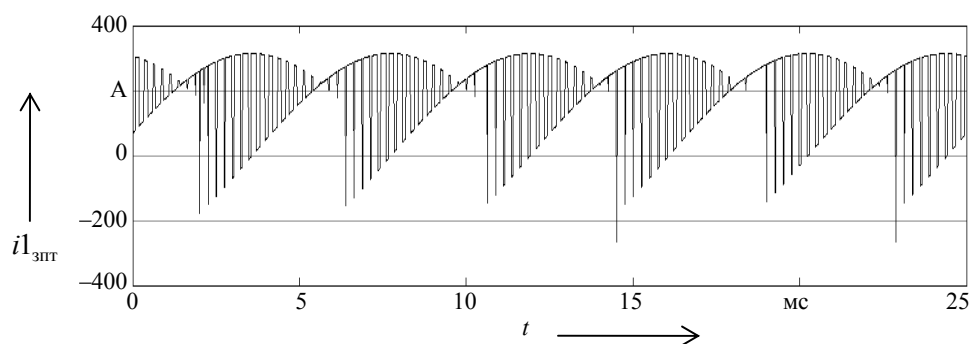


Рис. 6. Расчетные токи звена постоянного тока

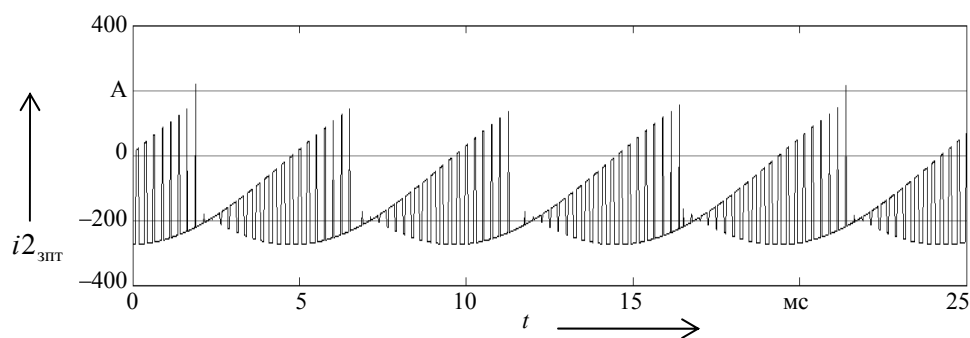


Рис. 7. Расчетные токи звена постоянного тока

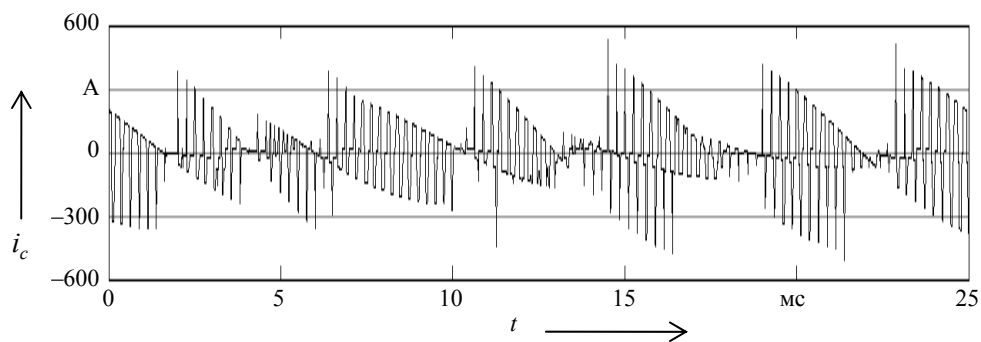


Рис. 8. Расчетный ток конденсатора

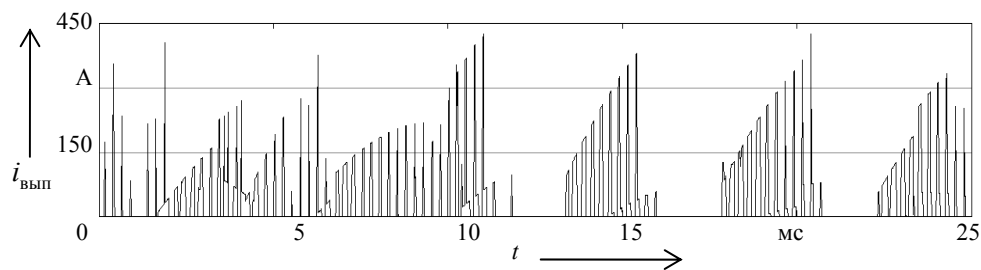


Рис. 9. Расчетный ток выпрямителя

Математическая модель рассмотренного электротехнического комплекса для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей объединяет совокупность выражений (1)–(14) и математическую модель пары асинхронных машин, работающих с валами, жестко соединенными муфтой [3, 9].

Разработанная математическая модель электротехнического комплекса для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей позволяет рассчитывать токи во всех ее элементах как в установившихся, так и в переходных режимах работы установки. Это дает возможность в дальнейшем проводить научные исследования для изучения устойчивости и надежности схемы при аварийных и других особых режимах работы.

Результаты работы могут быть применены в процессе разработки новых испытательных комплексов, обеспечивающих проведение испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей под нагрузкой. Внедрение результатов работы предполагается в организациях-разработчиках испытательных комплексов и предприятиях, осуществляющих ремонт электрического подвижного состава железных дорог.

Литература

1. Бейерлейн Е.В., Цукублин А.Б., Рапопорт О.Л. Схема испытания тяговых частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 46–48.
2. Бекшиев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Электропривод. М.: Юрайт, 2018. 301 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: в 2 т. М.: Юрайт, 2018. Т. 2. 407 с.
5. Патент 140678 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / Д.И. Попов, В.Д. Авилов, А.В. Литвинов; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2013147519/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. 2 с.
6. Патент 143348 РФ, МПК G01R31/00. Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2014112919/28; заявл. 02.04.2014; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. 2 с.
7. Патент 145998 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2014112920/07; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. 2 с.
8. Патент 178716 РФ, МПК G01R31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.В. Харламов, Д.И. Попов; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2017143232; заявл. 11.12.2017; опубл. 17.04.2018. Бюл. № 11. 5 с.
9. Харламов В.В., Попов Д.И., Литвинов А.В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2016. 160 с.
10. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями: Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] URL: <http://prolokomotiv.ru/elektrovoz-2es10-granit.html> (дата обращения: 20.11.2018).

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

COMPUTER MODELLING OF ELECTRO-TECHNICAL COMPLEX
TO TEST FOUR-PHASE INDUCTION TRACTION MOTORS

Key words: test complex, frequency converter, mathematical modeling, load testing, traction four-phase motor.

The article describes the trend of introduction of induction motors in various drive systems, including traction. This trend leads to an increase in the relevance of the issue of development of test systems for post-repair acceptance tests in particular traction motors of a rolling stock. The most energy-consuming type of electric motor tests such as heating tests for an hour are identified. The problem of increasing the energy efficiency of the testing process is indicated. A brief overview of energy-efficient schemes developed for testing induction motors by mutual load method is given. It is noted that all known schemes of mutual loading consider tests of only three-phase induction motors. The paper presents a mathematical model of an electrical complex suitable for testing induction four-phase traction motors by mutual load with the exchange of electrical power between test machine under testing and the load generator through a direct current link. The expressions describing the formation of voltage at the output of the rectifier, setting voltages in the control system and phase voltages at the output of controlled inverters, convenient to use in applied mathematical programs are given. The authors obtained formulas for determining the currents flowing in the capacitor, at the output of the rectifier, in transistors and diodes of the controlled inverters of the considered circuit, the voltage in the direct current link. There is an example to calculate currents of circuit elements, made in computer-aided design system Mathcad, for static mode of traction induction motor, used in electric locomotives 2ES10 "Granit" at constant load on the shaft. It is noted that the presented mathematical model of the test complex is not limited by the ability to calculate only static modes, but also allows to simulate the dynamic modes of the installation. The results of the work can be used by design organizations in the development of complexes for testing induction four-phase traction motors, for example, used in electric locomotives 2ES10 "Granit". Recommendations to apply results of the conducted research in the organizations-developers of test complexes and the enterprises performing repair of electric rolling stock of the railroads are given.

References

1. Beyerleyn E.V., Tsukublin A.B., Rapoport O.L. *Skhema ispytaniya tyagovykh chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh elektrodvigatelyei* [Scheme of testing of traction frequency-controlled induction motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2006, no. 2, pp. 46–48.
2. Bekishev R.F., Dementev Yu.N. *Elektroprivod* [Electric drive]. Moscow, Urait Publ., 2018, 301 p.
3. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 327 p.
4. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny: v 2 t.* [Electric machines. 2 vols.]. Moscow, Urait Publ., 2018, vol. 2, 407 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. *Ustroistvo 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 ispytaniya 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. *Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES10 s asinkhronnymi tyagovymi elektro-dvigatelyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive of direct current 2ЭС10 with induction traction motors: manual]. Available at: <http://prolokomotiv.ru/elektrovoz-2es10-granit.html> (Accessed 20 November 2018).

10. Kharlamov V.V., Popov D.I., Litvinov A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii ispytanii asinkhronnykh tyagovykh dvigatelei lokomotivov* [Improvement of testing technology of induction traction motors of locomotives]. Omsk, 2016, 160 p.

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. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 102–111.

УДК 621.313.322-049.7 (575.3)

ББК 3261.621-016 (5Тад)

Х.Н. РАСУЛЗОДА, В.А. ЩЕДРИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКЕ РОТОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В СИСТЕМЕ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ключевые слова: моделирование, синхронный генератор, автоматическое регулирование возбуждения сильного действия, переходные процессы, короткое замыкание, Matlab/Simulink.

В настоящее время исследование режимов работы синхронного генератора параллельно с энергосистемой и повышение их устойчивости являются актуальной задачей. Эффективным средством повышения устойчивости гидрогенераторов служит автоматическое регулирование возбуждения. При расчетах и анализе нормальных установившихся и переходных режимов электрических систем широко применяется среда моделирования MATLAB/Simulink. Благодаря её возможностям (существующей базе, блокам и моделям), а также с помощью описания элементов управления представляется возможным провести анализ режима работы синхронного гидрогенератора в энергосистеме в условиях различных коротких замыканий с учетом автоматического регулирования возбуждения сильного действия. В статье приведены результаты исследования переходных процессов в обмотке ротора гидрогенератора Нуρεкской ГЭС. Полученные результаты позволяют провести сравнение переходных процессов в роторе и влияния автоматического регулирования возбуждения сильного действия при различных коротких замыканиях.

Современная электроэнергетическая система представляет собой сложную структуру с постоянно изменяющимися параметрами в нормальных и аномальных режимах (напряжение, ток, генерирующая и потребляемая мощность в узлах системы). Строительство новых мощных гидроэлектростанций в энергосистеме Республики Таджикистан, например Рогунской ГЭС мощностью 3600 МВт, приводит к увеличению перетоков мощности и росту уровня токов короткого замыкания (КЗ) в системе, что предъявляет жесткие требования к сохранению устойчивости синхронных генераторов (СГ) в нормальных и аварийных режимах.

Мощным средством сохранения устойчивости СГ является применение автоматического управления и регулирования возбуждения в роторе генераторов [1, 2]. Основным назначением автоматического регулирования возбуждения сильного действия (АРВ-СД) при нарушениях нормального режима, сопровождающихся понижением напряжения и увеличением тока, является быстрое и значительное увеличение (форсировка) возбуждения генераторов до наибольшего значения, которое обеспечивается и допускается системой возбуждения [3].

В данной статье на примере анализа функционирования блока Нуρεкской ГЭС поставлена задача по определению значений токов в обмотке ротора при различных повреждениях на линии электропередачи. На Нуρεкской ГЭС установлено три объединенных энергоблока (на напряжении 500 кВ) и три энергоблока (на напряжении 220 кВ) синхронных генераторов серии ВГСВФ

940/235-30 мощностью 335 МВт (394 МВА) каждый. В полюсах ротора смонтированы демпферные обмотки.

Нами исследован режим работы одного СГ, работающего на сеть через повышающий трансформатор ТЦ-400000/500-73 У1 и двухцепную линию 500 кВ на систему неограниченной мощности. Принципиальная схема соединения элементов рассматриваемой энергосистемы приведена на рис. 1.

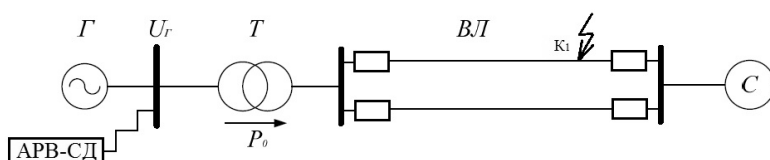


Рис. 1. Электрическая схема соединения элементов энергосистемы

Параметры электрооборудования энергосистемы приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Параметры гидрогенератора

Тип	S , МВА	P , МВт	$U_{ном}$, кВ	x_d'' , о.е.	x_d' , о.е.	x_d , о.е.	x_q'' , о.е.	x_q , о.е.	T_d' , с	T_d'' , с	$T_{qo''}$, с	T_J , с
ВГСВФ 940/235-30	394	335	15,75	0,24	0,366	1,31	0,234	0,845	1,01	0,109	0,1	2,66

Таблица 2

Параметры двухобмоточного трансформатора

Тип	$S_{ном}$, МВА	$U_{ном}$, кВ		U_k , %	I_{xx} , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	ΔQ_x , кВар	Схема, группы соединений	R , о.е.	L , о.е.	R_m , о.е.	L_m , о.е.
		ВН	НН										
ТЦ-400000/ 500-73 У1	400	525	15,75	13,1	0,45	863	366	1800	У0/Д-11	$1,08 \times 10^{-3}$	0,0655	1094,5	226,9

Таблица 3

Параметры линии электропередачи

Марка провода	Число проводов в фазе	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	b_0 10-6, См/км	Длина ЛЭП-1,2, км
АСО-400	3	0,024	0,298	3,76	114,9/110,9

Таблица 4

Параметры системы

Напряжение, кВ	500
Мощность трехфазного КЗ, кВА	12×10^6
Отношение X/R	40
Режим нейтрали	У0

Расчет параметров двухобмоточного трансформатора выполнен в соответствии с рекомендациями [4].

Исследуется режим работы генератора при трехфазном и двухфазном коротком замыкании в точке K_1 и определяются переходные токи в обмотке

возбуждения ротора генератора при этих повреждениях с учетом АРВ-СД. Для этой цели построена расчетная модель исследуемой системы в среде Matlab/Simulink (рис. 2), а также модель системы возбуждения в соответствии со стандартом СТО 59012820.29.160.20.001-2012¹.

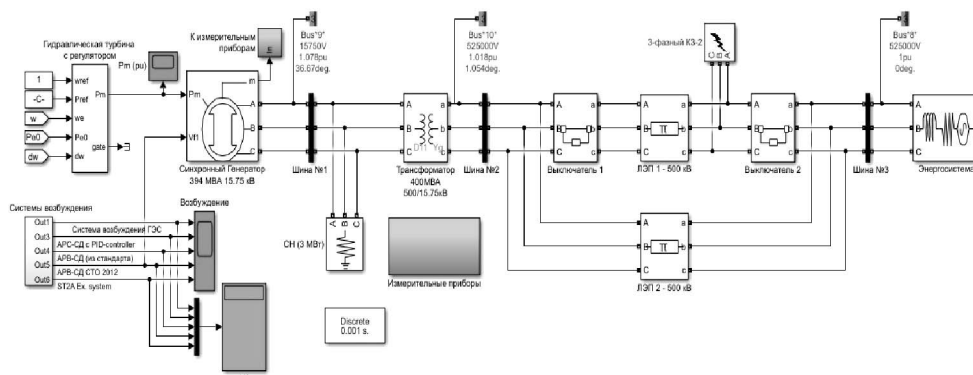


Рис. 2. Расчетная модель энергосистемы в среде Matlab / Simulink

Система возбуждения (СВ) гидрогенераторов Нурекской ГЭС выполнена по схеме самовозбуждения с серийным вольтодобавочным трансформатором и АРВ-СД. Регулятор сильного действия регулирует величину отклонения напряжения и реактивного тока статора, а также производную напряжения генератора, производную тока ротора, отклонение частоты, производную частоты. Параметры настройки АРВ-СД исследуемой модели приведены в табл. 5 [5–8].

Таблица 5

Параметры настройки АРВ-СД

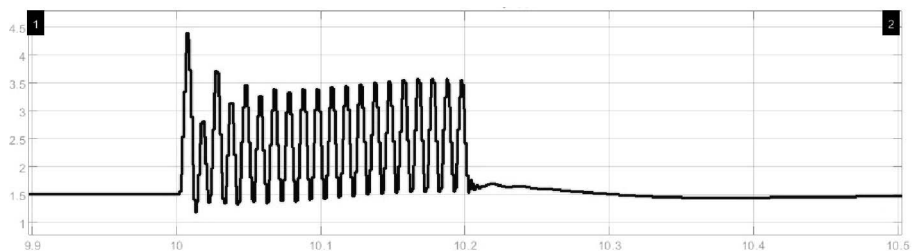
Тип СВ	Тип АРВ	Коэффициенты					$T_{СВ}$, с	$T_{АРВ}$, с	$U_{АРВmax}$, ед. ном. воз.	$U_{АРВmix}$, ед. ном. воз.
		KU	K1U	K1If	KF	K1F				
		е. в. н./ е. н. с.	е. в. н./ е. н. с./с	е. в. н./ е. т. р./с	е. в. н./ Гц	е. в. н./ Гц/с				
Тиристорная	АРВ-СД	50	4,7	0,7	2,0	3,1	0,03	0,04	6	–6

При коротких замыканиях ток в обмотке возбуждения увеличивается вследствие действия АРВ-СД, следовательно, любые изменения в роторе сопровождаются изменениями в статоре. На рис. 3 приведены осциллограммы тока ротора при трехфазном и двухфазном (фазы А – В) КЗ в конце линии (точка К₁, рис. 1), длительность которого составляет 0,2 с. Одновременно с КЗ происходит и отключение одной цепи поврежденного участка линии.

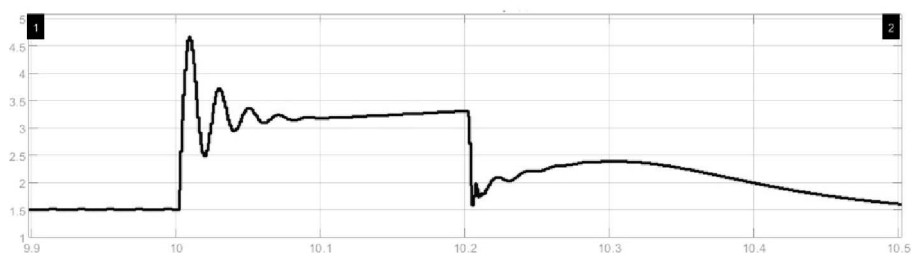
Процесс нарастания и затухания токов при переходных процессах в зависимости от вида повреждения будет протекать по-разному. В начальной стадии процесса КЗ действие АРВ-СД не очень заметно, такой процесс имеет место в обмотке возбуждения, так как обмотка возбуждения имеет большую

¹ СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Стандарт организации. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. М., 2012. URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf.

индуктивность, увеличение значения тока отстает от изменений напряжения возбуждения. Затем в течение некоторого отрезка времени оно проявляется все интенсивнее, стремясь к нормальному поддержанию напряжения на шине генератора. На рис. 4 приведены изменения напряжения возбуждения при вышеуказанных условиях.

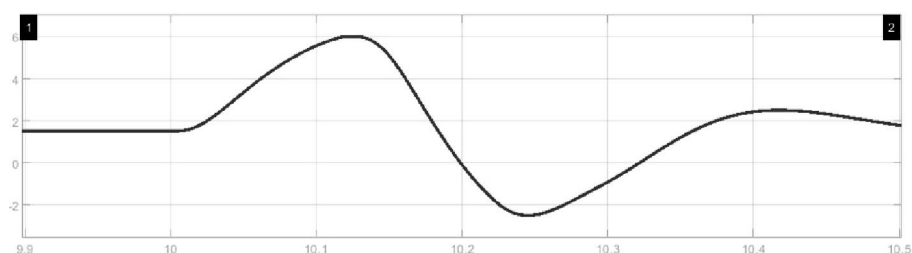


a

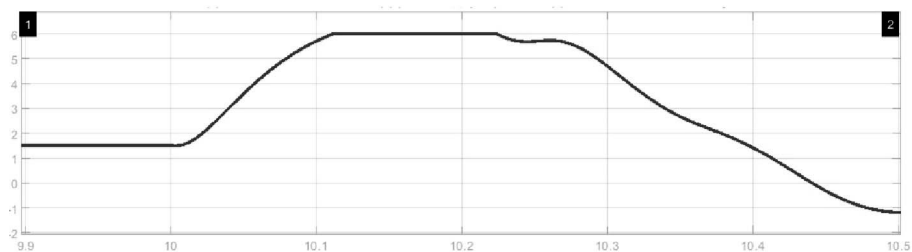


б

Рис. 3. Кривые изменения тока в обмотке возбуждения при двухфазном (*a*) и трехфазном КЗ (*б*)



a



б

Рис. 4. Кривые изменения напряжения возбуждения при двухфазном (*a*) и трехфазном КЗ (*б*)

На рис. 5 приведены амплитудные значения напряжения на шине генератора.

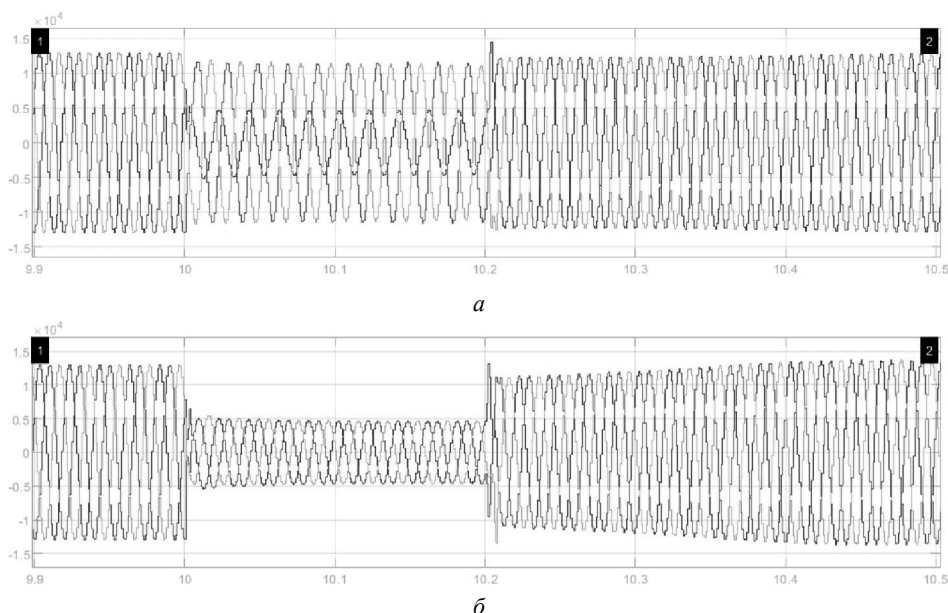


Рис. 5. Изменение амплитудного значения напряжения на шине генератора при двухфазном (а) и трехфазном (б) КЗ

Из проведенного исследования следует, что при наличии АРВ-СД затухание свободных токов, возникших в обмотке возбуждения при трехфазном и двухфазном КЗ, компенсируется увеличением напряжения от действия АРВ-СД. Из графиков видно резкое отличие токов ротора при трехфазном и двухфазном КЗ, причем при несимметричном КЗ возникают колебания тока ротора и высшие гармоники, состав которых требует специального рассмотрения. Анализируя значение напряжения на шине генератора при КЗ, можно заметить значительное понижение напряжения на шине генератора при трехфазном КЗ (рис. 5, б) по сравнению с аналогом при двухфазном КЗ (рис. 5, а). Режим поддержания напряжения на заданном уровне возможен до тех пор, пока значение тока ротора находится в допустимых пределах.

Литература

1. Беркович М.А., Комаров А.Н., Семенов В.А. Основы автоматики энергосистем. М.: Энергоиздат, 1981. 432 с.
2. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
3. Глебов И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние 1987. 344 с.
4. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.

5. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки Matlab/Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. Вып. 1. С. 12–24.

6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.; Л.: Энергия, 1964. 704 с.

7. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

8. Шойко В.П. Автоматическое регулирование в электрических системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. 195 с.

РАСУЛЗОДА ХУСРАВ НАЗИР – аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (khusrav313233@mail.ru).

ЩЕДРИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (chedrin@chuvsu.ru).

Kh. RASULZODA, V. SHCHEDRIN

**STUDIES OF TRANSIENTS IN ROTOR WINDING
OF HYDROGENERATOR WITH VARIOUS SHORT CIRCUITS
IN SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT ACTIONS OF AEC**

Key words: simulation, synchronous generator, automatic excitation control of strong-action, transients, short circuit, Matlab/Simulink.

Currently, the study of synchronous generator operating modes in parallel with the energy system and increasing their sustainability is an important task. An effective means of increasing the stability of hydrogenerators is automatic excitation control of strong-action. For calculating and analyzing normal steady-state and transient modes of electrical systems, the Matlab/Simulink simulation environment is widely used. Due to the capabilities of the existing database, blocks and its models, as well as using the description of control elements, it is possible to analyze the operation mode of a synchronous hydrogenerator in the power system under conditions of various short circuits, taking into account the effect of automatic excitation control of strong-action. The article presents the results of the study of transients in the rotor winding of the hydrogenerator of the Nurek HPP. The results obtained allow us to compare the transient processes in the rotor and the action of the automatic excitation control of strong-action for various short-circuits.

References

1. Berkovich M.A., Komarov A.N., Semenov V.A. *Osnovy avtomatiki energosistem* [Fundamentals of power systems automation]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 432 p.
2. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical processes in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 536 p.
3. Glebov I.A. *Elektromagnitnye protsessy sistem vzbuzhdeniya sinkhronnykh mashin* [Electromagnetic processes of excitation systems of synchronous machines]. Leningrad, Nauka Publ., 1987, 344 p.
4. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoichivosti i protivoavariinoi avtomatiki v energosistemakh* [Calculations of stability and emergency control in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 390 p.
5. Novash I.V., Rumyantsev Yu.V. *Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki Matlab/Simulink s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoda* [Calculation of the parameters of the model of a three-phase transformer from the Matlab / Simulink library based on the saturation of the magnetic core]. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii i energeticheskikh*

ob"edinenii SNG [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2015, iss. 1, pp. 12–24.

6. Ul'yanov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964, 704 p.

7. Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenii* [SIMULINK: engineering application creation environment]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003, 496 p.

8. Shoiko V.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie v elektricheskikh sistemakh* [Automatic control in electrical systems]. Novosibirsk, 2012, 195 p.

RASULZODA KHUSRAV NAZIR – Post-Graduate Student of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (khusrav313233@mail.ru).

SHCHEDRIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Professor of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (chedrin@chuvsu.ru).

Формат цитирования: Расулзода Х.Н., Щедрин В.А. Исследование переходных процессов в обмотке ротора гидрогенератора при коротких замыканиях в системе с учетом действия автоматического регулирования возбуждения // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 112–118.

УДК 621.316.1

ББК 3279.25

Л.М. РЫБАКОВ, С.В. ЛАСТОЧКИН, А.О. ЗАХВАТАЕВА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА
ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ
У ОСЛАБЛЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10 кВ**

***Ключевые слова:** распределительные сети, климатические факторы, грозовая деятельность, изоляторы, провода, профилактические работы, диагностирование, диагностические параметры, техническое обслуживание, текущий ремонт, беспилотные летательные аппараты.*

В статье рассмотрены вопросы совершенствования метода технического обслуживания и текущего ремонта сельских распределительных сетей 10 кВ. Показано, что на воздушные линии электропередач влияют сезонные внешние климатические факторы, наиболее опасными являются грозовые воздействия. Приведена карта районирования территории Российской Федерации по среднегодовой продолжительности гроз в часах, а также данные об интенсивности грозовой деятельности по Республике Марий Эл за период наблюдения с 2007 по 2016 г. Представлены статистические данные по отключениям воздушных линий в грозовые периоды с 2007 по 2016 г. Приведены данные об отключениях воздушных линий из-за повреждений штыревых изоляторов и проводов на территории Республики Марий Эл за период с 2007 по 2016 г. Для оценки работоспособности элементов распределительных сетей использованы двухфакторные модели погоды. Указаны основные причины повреждений элементов воздушных линий электропередач. В таблице представлены данные о количестве поврежденных элементов распределительных сетей 10 кВ Республики Марий Эл за период наблюдения 2007–2016 гг. Рассмотрены системы проведения ремонтных работ воздушных линий, которые применяются в эксплуатации. По результатам вычислений представлено распределение интенсивности отказов изоляционных элементов распределительных сетей. Разработана функциональная схема технического обслуживания и текущего ремонта распределительных сетей на основе использования диагностирования параметров дефектных элементов, регистрируемых приборами, установленными на беспилотном летательном аппарате.

Основой передачи электроэнергии потребителям служат воздушные линии напряжением 6–35 кВ с изолированной нейтралью. Из-за их протяженности и расположения на открытой местности воздушные линии подвержены влиянию различных климатических воздействий: атмосферному перенапряжению, гололедообразованию, ветру и температуры воздуха.

Надежность работы воздушных линий электропередачи зависит от многих условий: грамотной эксплуатации в различных режимах, атмосферно-климатических факторов, своевременного выявления дефектов с использованием современных средств диагностирования, позволяющих предотвратить возникновение аварийных ситуаций в сетях с изолированной нейтралью.

Анализ отказов изоляционных элементов РЭСхН-10 кВ показывает, что в летний период наибольшее число отключений распределительных сетей региона Средней Волги связано с потерей работоспособности изоляционных элементов в период грозового сезона, поэтому основная часть отключений зависит от интенсивности грозовой деятельности и внутренних перенапряжений.

Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним числом грозовых часов в году. Республика Марий Эл относится к IV району интенсивности грозовой деятельности с длительностью 40-60 грозовых часов в год [7].

В табл. 1 представлены средние значения количества грозовых часов по месяцам года за последние 10 лет в Республике Марий Эл (2007–2016 гг.) [5], а на рис. 1 показана гистограмма распределения числа отключений воздушных линий за грозовой период 2007–2016 гг.¹

Число ударов молнии на 100 км воздушных линий (ВЛ) за 100 грозовых часов определяется по формуле:

$$n = n_{\text{уд}} \cdot 100 \cdot 6h_{\text{ср}} \cdot 10^{-3} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{\text{ср}} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{уд}}=6,7$ – среднее число ударов молний на 1 км² ВЛ за 100 грозовых часов; $h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса провода.

Таблица 1

**Интенсивность грозовой деятельности по Республике Марий Эл
за период наблюдения с 2007 по 2016 г.**

Показатель	Месяц						
	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.
Количество грозовых часов, ч	0,1	2,5	7,6	13,1	6,7	1,2	0

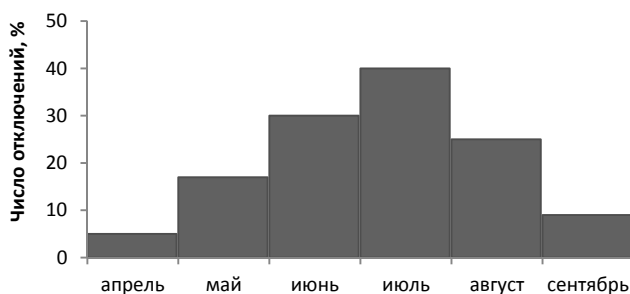


Рис. 1. Гистограмма распределения числа отключений воздушных линий в грозовой период по месяцам за период 2007–2016 гг.

Число перекрытий линейной изоляции определяется по формуле [2. С. 251]:

$$n_{\text{пер}} = n_{\text{уд}} \cdot P_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – вероятность перекрытия изоляции ВЛ; $n_{\text{уд}}$ – среднее число ударов молнии.

Число отключений ВЛ из-за перекрытия линейной изоляции на 100 км линии в районе со 100 грозовыми часами в году определяется по формуле [2. С. 252]:

$$n_{\text{откл}} = 4h_{\text{ср}} \cdot P_{\text{пер}} \cdot \eta, \quad (3)$$

где $P_{\text{пер}}$ – вероятность перекрытия линейной изоляции ВЛ; η – вероятность возникновения устойчивой дуги (принимается 0,7 для линий на железобетонных опорах).

¹ Данные взяты из ежегодных Технических отчетов ПО «Йошкар-Олинские электрические сети» филиала «Мариэнерго» за период наблюдения 2007–2016 гг.

Другими климатическими факторами, влияющими на работоспособность воздушных линий электропередач, являются гололедообразование, ветер, осадки (дождь, мокрый снег) и температура воздуха.

Поэтому многолетний опыт эксплуатации показывает, что отказы оборудования и элементов распределительной сети зависят от сезонов года. Статистическая модель отказов в РЭСсхН-10 кВ представляет собой зависимость распределения числа отказов от времени по месяцам в течение года и имеет вид

$$N_n(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n a_i \cos \frac{i\pi}{6} k + b_i \sin \frac{i\pi}{6} k; \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{1}{e} \int_0^{2e} f(t) dt = \frac{1}{6} \int_0^{12} f(t) dt \approx \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} y_i;$$

$$a_i = \frac{1}{e} \int_0^{9e} f(t) \cos \frac{i\pi}{e} t dt \approx \frac{1}{e} \sum_{i=1}^{12} y_i \cos \frac{i\pi}{e};$$

$$b_i = \frac{1}{e} \sum_{i=1}^{12} y_i \sin \frac{i\pi}{e},$$

где $k = 1, 2, \dots, 12$ – номер месяца; $n = 1, 2, \dots, 6$ – шаг для вычисления постоянной ряда Фурье; y_k – число отказов за каждый месяц; N – число отказов от времени по месяцам (i) в течении года ($i = 1, 2, \dots, 12$); i – интервал наблюдения.

Полученная модель представлена в виде графика на рис. 2.

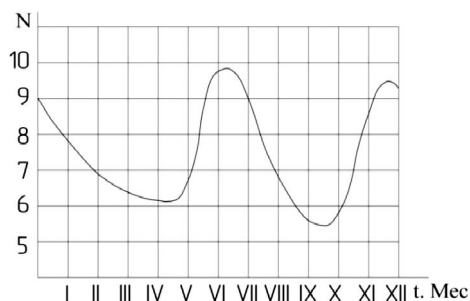


Рис. 2. Распределение отказов элементов РЭСсхН-10 кВ в течение года

Из рис. 2 видно, что число отказов в РЭСсхН-10 кВ в течение года непостоянно. Имеются два характерных пика отказов, чередующихся с периодами их спада. Первый пик приходится на летний период (апрель–июль), второй – на осенне-зимний период (октябрь–январь). Пики отказов сдвинуты относительно друг друга на 6 месяцев. Основываясь на этих особенностях, можно сделать следующее заключение относительно причин отказов в РЭСсхН-10 кВ. С апреля по июль отмечается повышение числа отказов из-за повреждения изоляционных элементов вследствие грозовой активности. Повторное повышение числа отказов с октября по январь связано с потерей работоспособности изоляторов из-за увлажнения дефектных элементов, а также вслед-

ствии воздействия на них одностороннего тяжения проводов при их обрывах. В этот же период увеличение отказов связано с накоплением начальных дефектов в изоляционных элементах в период грозовой активности. Промежуток времени между двумя максимальными количествами отказов позволяет оценивать время проявления дефекта, равное в среднем трем месяцам.

Анализ отказов в РЭСсхН-10 кВ указывает на необходимость поиска нового научно обоснованного направления к техническому обслуживанию РЭСсхН-10 кВ по фактическому состоянию с применением средств диагностирования, позволяющих не только обнаруживать дефекты, но и проводить техническое обслуживание и прогнозировать время безотказной работы.

Можно заключить, что существующие методы диагностирования изоляции РЭСсхН-10 кВ не позволяют осуществлять диагностирование без их отключения, выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии возникновения, учитывать старение и увлажнение изоляции. Эти методы не обладают универсальностью, высокой чувствительностью и однозначностью оценок. Они относительно сложны и трудоемки. Поэтому необходимы поиск новых решений и на их основе разработка методов и средств диагностирования состояния внешней изоляции РЭСсхН-10 кВ.

Рассмотрим особенности, связанные с возникновением дефектных элементов при эксплуатации сетей с изолированной нейтралью, к которым относятся распределительные сети 10 кВ. При обрыве проводов с падением на землю на двух оставшихся фазах напряжение увеличивается в 1,73 раза. При замыкании провода на землю возможны перемежающиеся замыкания, которые связаны с переходным сопротивлением в месте замыкания, величина перенапряжения в сети может достигать пятикратного значения фазного напряжения ($U_{\max}/U_{\Phi}$). При емкостных токах (5А и более) происходят перегорание проводов, перегрев изоляторов, имеющих контакт с проводом, и его последующее разрушение [2].

Рассмотрим отказы некоторых элементов в РЭСсхН -10 кВ.

Провода. Основным фактором повреждаемости проводов является их обрыв от воздействия ветровых и гололедно-ветровых воздействий. Частота обрывов проводов относительно высока за весь период времени года, однако максимальное значение отказов проводов приходится на зимний период времени из-за высокой ветровой нагрузки, обледенения и мокрого снега. Поэтому для проводов берется период времени года с декабря по февраль. На рис. 3 показана гистограмма распределения числа отключений из-за повреждения проводов по месяцам года за период наблюдения 2007–2016 гг. по производственному отделению Йошкар-Олинских электрических сетей Республики Марий Эл¹.

¹ Данные взяты из ежегодных Технических отчетов ПО «Йошкар-Олинские электрические сети» филиала «Мариэнерго» за период наблюдения 2007 – 2016гг.

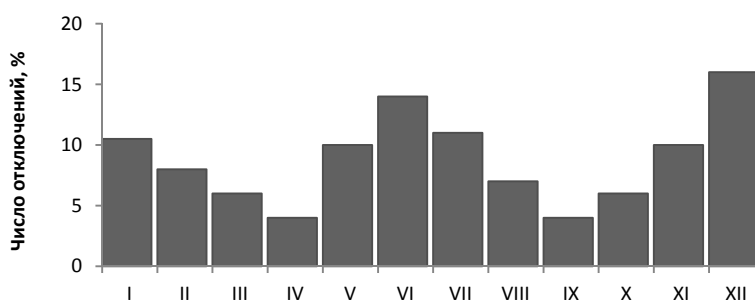


Рис. 3. Гистограмма распределения числа отключений из-за повреждения проводов по месяцам

Изоляторы. Наиболее частой причиной отказов изоляторов является их механическое разрушение от одностороннего воздействия при обрыве проводов в пролетах из-за высокой температуры, возникающей при перекрытии электрической дугой, а также электрический пробой при разрядах молнии или коммутационных перенапряжений [9, 10]. На рис. 4 показана гистограмма распределения числа отключений из-за повреждения штыревых изоляторов по месяцам года за период наблюдения 2007–2016 гг. по производственному отделению Йошкар-Олинских электрических сетей Республики Марий Эл.

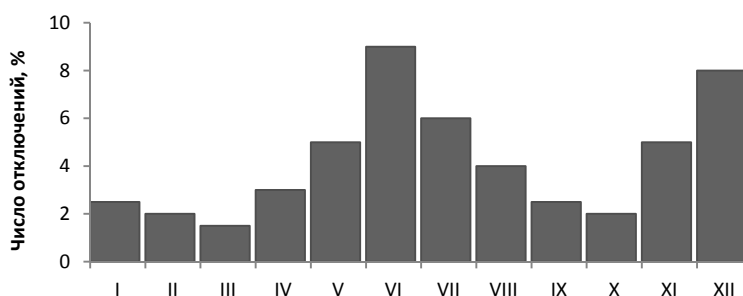


Рис. 4. Гистограмма распределения числа отключений из-за повреждения штыревых изоляторов по месяцам

На основании экспериментальных исследований построены двухфакторные модели погоды для оценки работоспособности штыревых изоляторов (рис. 5 и 6).

На рис. 7 и в табл. 2 приведены основные причины и процент повреждений элементов от общего значения в распределительных сетях 10 кВ, обслуживаемых производственным отделением Йошкар-Олинских электрических сетей Республики Марий Эл за 10 лет (даны средние значения по месяцам года за исследуемые 2007–2016 гг.) из-за которых произошли отказы¹.

¹ Данные взяты из ежегодных Технических отчетов ПО «Йошкар-Олинские электрические сети» филиала «Мариэнерго» за период наблюдения 2007–2016 гг.

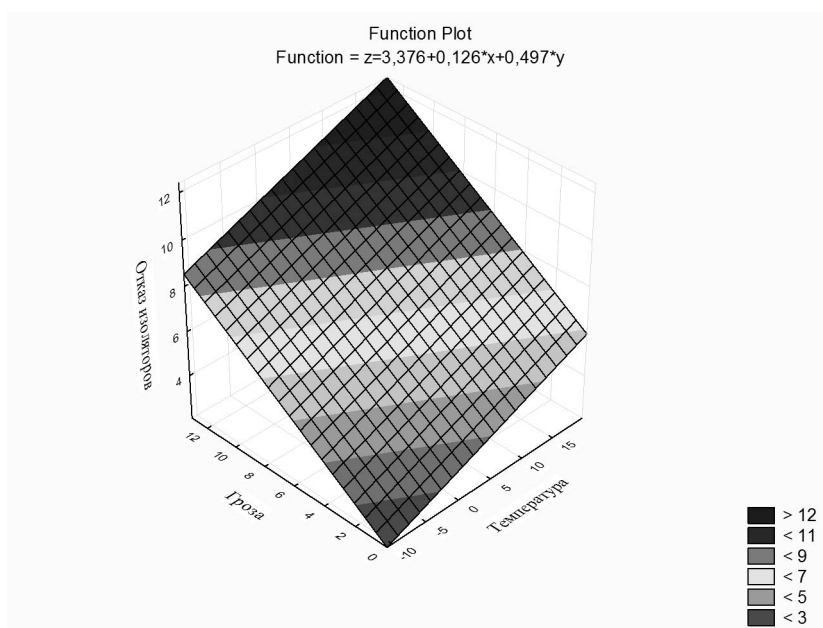


Рис. 5. Двухфакторная модель погоды (температура(x) + гроза(y))
для оценки работоспособности
штыревых изоляторов сельских распределительных сетей

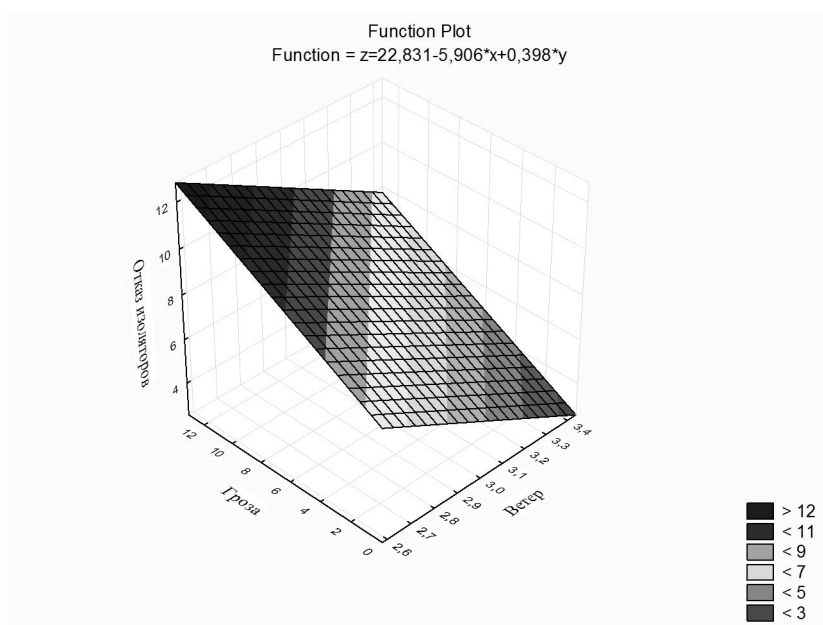


Рис. 6. Двухфакторная модель погоды (ветер(x)+гроза(y))
для оценки работоспособности штыревых изоляторов
распределительных сетей

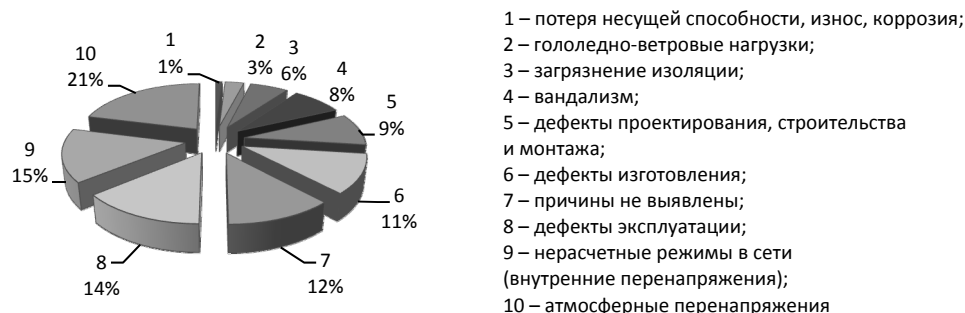


Рис. 7. Основные причины повреждений элементов ВЛ:

Из приведенных в табл. 2 значений видно, что наибольшее количество отказов в распределительных сетях происходит из-за повреждений штыревых изоляторов и проводов (рис. 8).

Надежное функционирование РЭСсхН-10 кВ зависит от качественного проведения планово-предупредительных ремонтов, своевременного диагностирования и прогнозирования работоспособности элементов. В настоящее время проектирование, эксплуатация и диагностирование РЭСсхН-10 кВ производятся согласно таких нормативных документов, как ГОСТ 839-80, ГОСТ 6490-2017, ГОСТ 18322-2016, ГОСТ 26656-85, ГОСТ 1516.3-96, РД 34.20.566.16¹.

Таблица 2

Количество поврежденных элементов распределительных сетей 10 кВ Республики Марий Эл за период наблюдения 2007–2016 года по месяцам (даны средние значения), %

Элемент распределительной сети 10 кВ		Месяц											
		январь	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.	нояб.	дек.
Изолятор	штыревой	2,0	1,75	1,0	2,25	3,75	7,0	4	3,25	2,25	1,5	3,5	5,5
	проходной	0,5	0,25	0,5	0,75	1,25	2	2	0,75	0,25	0,5	1,5	2,5
Разрядник		0,25	0,25	0,25	0,5	1,5	0,75	3	0,5	1	0	0	0,25
Разъединитель, выключатель, ПК		0,75	0,5	0,5	2,5	0,75	2,25	3,75	3,5	1	0,75	0,5	0,5
Опора		0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1,75	1	1,5	4,25	1,25	0,25
Провод		10,5	8	6	4	10	14	11	7	4	6	10	16

Примечание. Количество поврежденных элементов в сетях с изолированной нейтралью не вызывает отключения воздушных линий. При длительной работе сетей с изолированной нейтралью с однофазным замыканием возможно значительное перенапряжение на двух других «здоровых» фазах из-за перемежающихся дуговых замыканий, которые вызывают пробой изоляционных элементов с отключением сети.

¹ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередач / Минэлектротехпром СССР. М., 1980. 23 с.; ГОСТ 6490-2017. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.; ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.; ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. М.: Стандартинформ, 2009. 10 с.; ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Минск: Изд-во стандартов, 1998. 50 с.; РД 34.20.566. Типовая инструкция по ликвидации нарушений в работе распределительных электрических сетей 0,38-20 кВ с воздушными линиями электропередачи, 1987. 16 с.

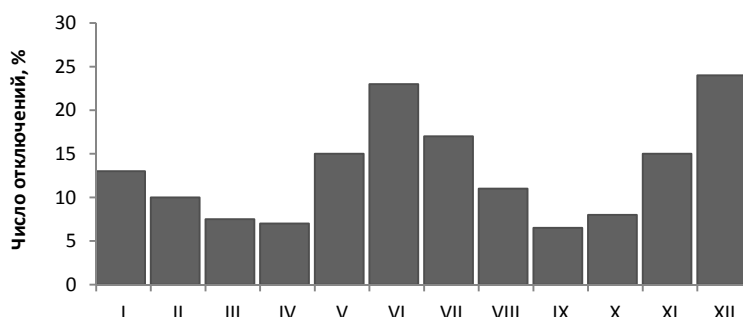


Рис. 8. Гистограмма числа суммарных значений отключений из-за отказа проводов и изоляторов по месяцам за период 2007–2016 гг.

В практике эксплуатации используются следующие системы проведения ремонтных работ: планово-предупредительные ремонты (ППР) РЭСсхН-10кВ, которые выполняются по истечении определенного периода эксплуатации. Метод ППР не всегда является оптимальным, так как способствует неоправданным отключениям работоспособного объекта. Иногда используются аварийно-восстановительные ремонты и ремонты по техническому состоянию на основе диагностирования, когда необходимо знать действительное состояние эксплуатируемого объекта. Решая проблемы технической диагностики, можно поддержать нормальное функционирование, а в отдельных случаях повысить надежность работы РЭСсхН-10 кВ, которые более всего подвержены природно-климатическим воздействиям.

Метод испытания изоляции сетей под рабочим напряжением неоднократно рассматривался в производственных журналах [3, 4, 8]. Однако данный метод не нашел широкого применения из-за сложности отыскания мест повреждения дефектных элементов во время испытаний, а также вследствие больших затрат, связанных с поиском дефектных элементов из-за большой протяженности испытываемых РЭСсхН-10 кВ и отсутствия проездных дорог вдоль трасс.

Аэроинспекция состояния ВЛ 110 кВ и выше нашла отражение в работах ученых Новосибирского государственного технического университета под руководством профессора А.Г. Овсянникова с использованием диагностической аппаратуры, установленной на вертолетах и самолетах для поиска дефектных элементов [1]. Аналогичные работы выполняются в Уфимском государственном авиационном техническом университете [6]. Однако использование летательных аппаратов (самолетов, вертолетов), оснащенных диагностической аппаратурой для облета ВЛ 10-35 кВ в период испытания, экономически неоправданно.

Современное использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в различных отраслях промышленности (нефтегазовой отрасли, лесном хозяйстве и т.д.) позволяет применять их также для сокращения времени определения места нахождения поврежденных элементов в РЭСсхН-10 кВ, что способствует быстрой замене дефектных элементов. Наиболее приемлемым для использования в процессе технического обслуживания и ремонта

РЭСсхН-10 кВ можно рекомендовать БЛА вертолетного типа ZALA 421-02X со средним радиусом действия 25–50 км, взлетной массой 90 кг¹, оснащенные средствами регистрации диагностических параметров и видеосъемки, которые приведены в табл. 3.

Возникает необходимость технико-экономического обоснования перехода на систему технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) с совмещением диагностирования (испытания) состояния элементов сетей под рабочим напряжением. Для оперативного отыскания дефектных элементов в процессе испытания необходимо использовать БЛА. Для устранения выявленных дефектов в процессе испытания и их замены создается ремонтная бригада, которая комплектуется необходимыми запасными элементами [11].

Таблица 3

Состав бортового оборудования комплекса БЛА

Наименование и выполняемая функция блока	Комплект приборов
Система оптической регистрации коронных разрядов, разрядов на поверхности изоляторов и записи изображения локальных перегревов, состоящая из видеокамеры, тепловизора, оптической системы ультрафиолетовой камеры (дефектоскопа)	«AirCAM»
Пакет программного обеспечения, позволяющий эффективно обрабатывать полученные изображения коронных разрядов, а также создавать отчеты по прогнозированию потенциальных неисправностей исследуемого оборудования	CoroSOFT
Портативный персональный компьютер	Тип: NoteBook

На рис. 9 приведена схема испытания изоляции распределительных сетей 10 кВ под рабочим напряжением.

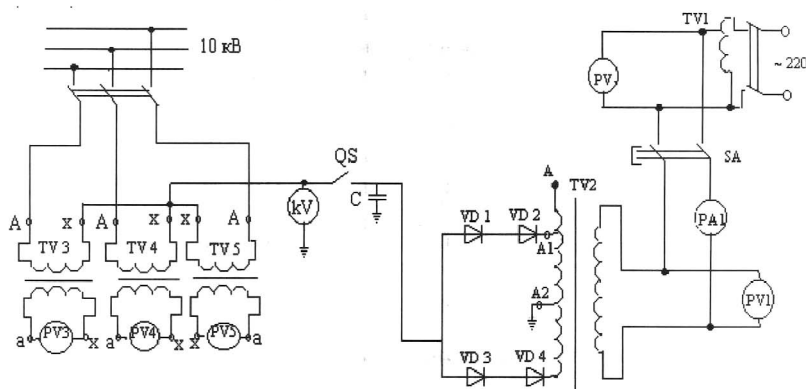


Рис. 9. Схема испытания изоляции оборудования распределительных сетей 10 кВ под рабочим напряжением:

TV1 – регулировочный автотрансформатор РНО; SA – автоматический выключатель АП-50-2М; PV1-PV5 – вольтметры Э-59/1; PA1 – амперметр Э-30; kV – киловольтметр С-197; C – конденсатор К75-29А 40 кВ 0,3 мкФ±10%; QS – однофазный разъединитель на РВО-10/400 кВ; TV2 – высоковольтный испытательный трансформатор типа РЕО – 8/100 (100 кВ, 8 кВА); TV3-TV5 – трансформаторы напряжения НОМ-10 кВ; VD1-VD4 – выпрямители 60 кВ

¹ БЛА вертолетного типа [Электронный ресурс]. URL: <http://zala.aero/zala-421-02x-2>.

Использование указанной схемы испытания позволяет перейти к новой стратегии обслуживания РЭСхН-10 кВ по результатам диагностирования.

Данная схема позволяет выявлять ослабленные элементы, возникающие в распределительных сетях 10 кВ: штыревые и подвесные изоляторы ВЛ, проходные изоляторы КТП и ТП, опорные изоляторы разъединителей, средства грозозащиты, а также контролировать уменьшение изоляционного расстояния между токоведущими частями и изоляционными элементами (провод-опора, провод-провод).

Для проведения испытаний изоляции в распределительных сетях не нужен мощный источник питания, а достаточно создать пути перекрытия по поверхности дефектных изоляционных элементов, через которые разряжается емкостной ток всей испытываемой сети. Величина емкостного тока достаточна для разрушения дефектных элементов, т.е. в качестве источника питания испытательной установки используется реактивная мощность сети (емкостной ток сети).

При проведении испытаний под рабочим напряжением можно регистрировать диагностические признаки (параметры): электромагнитное излучение разрядных процессов (ЭМИР) на ВЛ; оптическое излучение разрядных процессов (ОИР); инфракрасное излучение, а также выполнить видеозапись и цифровое фотографирование внешнего вида конструктивных элементов расположения проводов и опор в пространстве и высоты поросли в зоне отчуждения линии.

Для испытания сетей под рабочим напряжением комплектуются две бригады: первая – проводит испытания, а вторая бригада – устраняет дефекты, выявленные при испытаниях.

При подаче высокого выпрямленного напряжения в рабочую сеть 10 кВ ослабленные дефекты начинают выявляться при напряжении выше 15 кВ. После устранения дефекта повышают испытательное напряжение и при выявлении нового дефекта дают указание на замену пробитого элемента. Именно таким образом проводят испытания суммарным напряжением $U_{исп} \leq 25 \text{ кВ}^1$ при наличии в сети вентильных разрядников, у которых нижний предел пробивного напряжения искровых промежутков составляет 25 кВ, а при наличии в сети ограничителей перенапряжения², у которых отсутствуют искровые промежутки, испытательное напряжение доводится до 30 кВ, что составляет предел выдерживаемого напряжения обмоток силовых трансформаторов 10 кВ³. Уровень испытательного напряжения приближается к предельному значению внутренних перенапряжений 3.1, которые получены при многолетних замерах в действующих электрических сетях. Следовательно, принятый уровень испытательного напряжения вполне достаточен.

Для оценки периодичности проведения испытаний необходимо руководствоваться полученными данными по отказам изоляционных элементов ВЛ и

¹ СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: ОАО «Фирма ОРГРЭС», 2017. 262 с.

² Там же.

³ ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Минск: Изд-во стандартов, 1998. 50 с

документами, регламентирующими нормы и объемы по числу отключений фидеров 10 кВ. При увеличении числа отказов более 4 раз в месяц необходимо увеличить частоту испытаний изоляции в распределительных сетях под рабочим напряжением, так как затраты на облет ВЛ с использованием БЛА на порядок меньше, чем при использовании автомобильного транспорта для обхода линий по отысканию дефектов. Поэтому указанный метод ранее не нашел широкого распространения в эксплуатации из-за сложности, связанной с отысканием дефектных элементов в распределительных сетях, имеющих большую протяженность фидеров. Протяженность сетей ВЛ 10 кВ, питающихся от одной подстанции с учетом отпаек, составляет в среднем 150-200 км, которые отражены в табл. 4¹.

Таблица 4

Характеристики ВЛ 10 кВ районных электрических сетей

Наименование ПС	Число фидеров	Протяженность	Количество ТП
Советск	10	168,5	97
Оршанка	7	156,1	113
Медведево	7	160,2	156
Морки	8	196,8	122

Приведенные на основе статистической модели отказов данные на рис. 10 показывают, что интенсивность отказов в распределительных сетях имеет 2 пика: апрель–июль и октябрь–январь. Первый пик апрель–июль связан с дефектообразованием в период грозосезона, а второй пик – отказы в период октябрь–январь – вызван увлажнением и накоплением дефектов в период грозосезона [9].

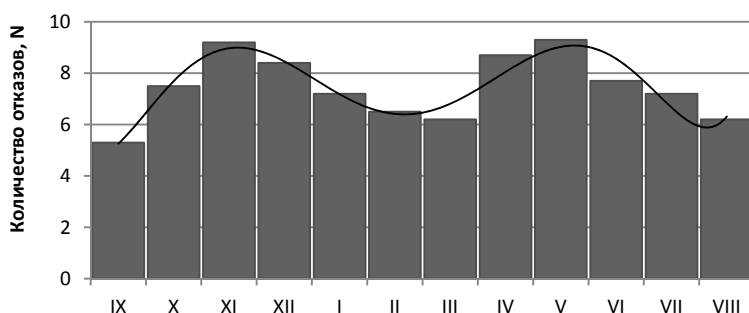


Рис. 10. Распределение интенсивности отказов элементов распределительных сетей по месяцам за период наблюдения 2007–2016 гг.

Таким образом, возникает необходимость повторного испытания изоляционных элементов после окончания грозового сезона в августе и в начале осенне-зимнего максимума нагрузок. Выполнение указанных двукратных испытаний позволяет обеспечить требуемую надежность работы распределительной сети. Для обоснования периодичных повторных испытаний необхо-

¹ Данные взяты из ежегодных Технических отчетов ПО «Йошкар-Олинские электрические сети» филиала «Мариэнерго» за период наблюдения 2007–2016 гг.

димо выполнить технико-экономический расчет, связанный с затратами ТО и ТР и ущербом от недоотпуска электроэнергии (Y) для каждого конкретного предприятия согласно формулам

$$Y \geq Z_d, \quad (5)$$

где Z_d – затраты на проведение диагностирование:

$$Z_d = K_{пр} + C_0, \quad (6)$$

где $K_{пр}$ – стоимость приборов и программных средств; C_0 – затраты на проведение диагностирования и испытания с учетом затрат на использование БЛА.

На рис. 11 приведен метод ТО и ТР РЭСсхН-10 кВ с учетом статистической модели отказов элементов, совмещенной с испытанием сетей под рабочим напряжением с использованием БЛА для оперативного выявления и замены дефектных элементов в процессе испытания, что способствует повышению показателей надежности РЭСсхН-10 кВ.

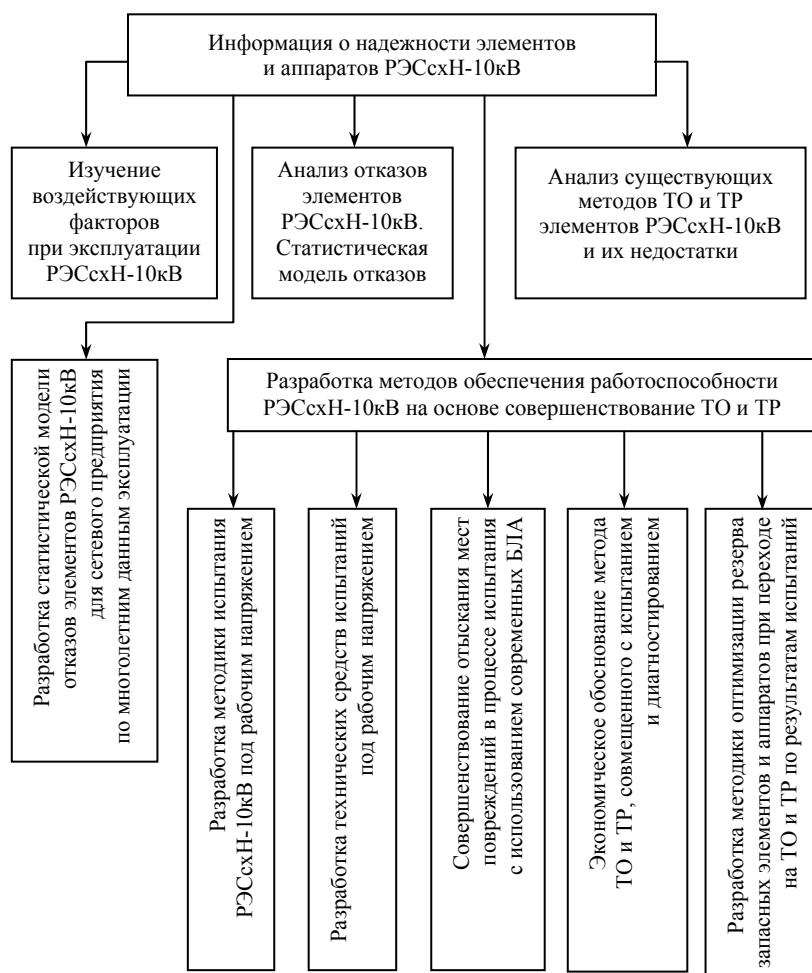


Рис. 11. Схема обслуживания элементов РЭСсхН-10 кВ по результатам оценки их технического состояния

Выводы. 1. Произведен анализ влияния внешних воздействующих факторов на безотказность РЭСсхН-10 кВ, имеющих практическое значение для технического обслуживания и текущего ремонта сетей по фактическому их состоянию с применением средств диагностирования (испытания).

2. Количество отказов в РЭСсхН-10 кВ имеет в течение года два характерных пика, которые сдвинуты относительно друг друга на 6 месяцев и значительно зависят от сезонно-климатических факторов, что позволяет обосновать периодичность испытаний состояния РЭСсхН-10 кВ.

3. Предложен метод ТО и ТР РЭСсхН-10 кВ, совмещенный с диагностированием (испытанием) состояния элементов сетей под рабочим напряжением с использованием современных технических измерительных средств для выявления дефектов расположенных на БЛА, который позволяет сократить время ликвидации выявленных дефектов.

4. Предложен метод ТО и ТР, позволяющий одновременно диагностировать все отходящие ВЛ от одной подстанции, средняя протяженность которых составляет 150-200 км, что повышает производительность труда в несколько раз по сравнению с аналогичным показателем при наземном обходе ВЛ с целью отыскания дефектов и значительно сокращает затраты на проведение профилактических работ.

5. Своевременная замена дефектных элементов способствует сокращению аварийных отключений и повышению надежности РЭСсхН-10 кВ.

6. Полученные закономерности отказов, их своевременное выявление и замена позволят регулировать резерв запасных элементов и аппаратов РЭСсхН-10 кВ с учетом сезонности их проявления.

7. Предложенная схема ТО и ТР способствует научному обоснованию организации обслуживания РЭСсхН-10 кВ с учетом снижения затрат на ремонтно-восстановительные работы, повышению работоспособности и снижению ущерба от недоотпуска электроэнергии.

Литература

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. 136 с.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах / под общ.ред. В.П. Ларионова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
3. Гельман Н.Л. Повышение эффективности выявления дефектов изоляции ТП и ВЛ 10 кВ // Электричество. 1973. № 9. С. 27.
4. Дударев А.Е. Профилактические испытания изоляции сетей под нагрузкой методом искусственного создания перенапряжений // Электричество. 1978. № 8 С. 70–72.
5. Климат России: науч.-прикл. справочник [Электронный ресурс] / ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii>.
6. О выборе беспилотных авиационных систем для аэродиагностики воздушных ЛЭП [Электронный ресурс] // Вести в электроэнергетике. 2017. № 5(91). С. 64–73. URL: http://ptero.ru/download/publications/o_vybore_bas_dlya_diaagnostiki_vlep.pdf.
7. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Новосибирск: Норматика, 2016. 672 с.
8. Рыбаков Л.М., Рыбакова Г.А. Совершенствование метода испытаний изоляции сетей 6–10 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1985. № 11. С. 46–48.

9. Рыбаков Л.М., З.Г. Иванова, Макарова Н.Л. Обслуживание элементов и оборудования электроустановок по результатам диагностирования технического состояния / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2015. 318 с.

10. Рыбаков Л.М., Волков С.В. Влияние климатических факторов на отказы элементов распределительных сетей 10 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2006. № 2. С. 4–5.

11. Рыбаков Л. М., Иванова З.Г. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределительных электрических сетей 10 кВ // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 104–110.

РЫБАКОВ ЛЕОНИД МАКСИМОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (diagnoz@marsu.ru).

ЛАСТОЧКИН СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (diagnoz@marsu.ru).

ЗАХВАТАЕВА АЛЕНА ОЛЕГОВНА – магистрант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (alena_zah94@mail.ru).

L. RYBAKOV, S. LASTOCHKIN, A. ZAKHVATAEVA
IMPROVEMENTS OF TECHNIQUES FOR MAINTANACE AND REPAIR
TO PREVENT GROWTH OF DEFECTS IN WEAKENED PARTS
OF RURAL DISTRIBUTION NETWORKS OF 10 kV

Key words: *distribution networks, climatic factors, thunderstorm activity, insulators, wires, preventive works, diagnosis, diagnostic parameters, maintenance, repair, unmanned aerial vehicles.*

The article deals with the issues of improving the techniques for maintenance and repair of rural distribution networks of 10 kV. It is shown that the air power lines are affected by seasonal external climatic factors, the most dangerous of which is thunderstorm activity. The zoning map of the territory of the Russian Federation for the average annual duration of thunderstorms in hours is given, as well as data on the intensity of thunderstorm activity in the Republic of Mari El in the period of observation from 2007 to 2016. The statistics on outages of overhead lines in storm periods from 2007 to 2016 is presented. The data on outages of overhead lines due to damage of pin insulators and wires on the territory of the Republic of Mari El for the period from 2007 to 2016 is given. The two-factor weather models are used to evaluate the operational capability of distribution networks. The main reasons of damaging elements of overhead power lines are specified. The table presents data on the number of damaged elements of distribution networks of 10 kV in the Republic of Mari El for the observation period of 2007–2016. The systems of air lines repair operations are considered. According to the results of calculations, the distribution network insulation failure rate is presented. The functional scheme for maintenance and repair of distribution networks is devised on the basis of diagnosing the parameters of defects recorded by devices installed on the unmanned aerial vehicles.

References

1. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennye metody diagnostiki vozdushnykh linii elektroperedachi* [Modern Overhead Transmission Lines Diagnostic Techniques] Novosibirsk, Nauka Publ., 2009, 136 p.

2. Larionov V.P., ed., Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal' Yu.S. *Tekhnika vysokikh napryazhenii: Izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh. 3-e izd., pererab. I dop.*

[High Voltage Engineering: Insulation and Overvoltage in Electrical Systems. 3rd ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 464 p.

3. Gel'man N.L. *Povyshenie effektivnosti vyvavleniya defektov izolyatsii TP i VL 10 kV* [Effectivization of Transformer Substations and OHPL 10 kV Insulation Fault Diagnostics]. *Elektrichestvo*, 1973, no. 9, pp. 27.

4. Dudarev A.E. *Profilakticheskie ispytaniya izolyatsii setei pod nagruzkoi metodom iskusstvennogo sozdaniya perenapryazhenii* [Preventive Testing of Live Circuits Insulation by Artificially Generated Electrical Surges]. *Elektrichestvo*, 1978, no. 8, pp. 70–72.

5. *Klimat-Rossii: nauch.-prikl. Spravochnik. FGBU «VNIIGMI-MTsD»* [Applied Science Reference Book «Climate of Russia», Federal State Budget Institution «RIHMI-WDC»]. Available at: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii>.

6. *O vybore bespilotnykh aviatsionnykh sistem dlya aerodiagnostiki vozdukhnykh LEP* [On the Choice of UAV for Overhead Power Transmission Lines]. *Vesti v elektroenergetike*, 2017, no. 5(91), pp. 64–73. Available at: http://ptero.ru/download/publications/o_vybore_BAS_dlya_diagnostiki_VLEP.pdf.

7. *Pravilaustroistvaelektroustanovok. 7-e izd.* [Rules of the Electric Installation. 7th ed.]. Novosibirsk, Normatika Publ., 2016, 672 p.

8. Rybakov L.M., Rybakova G.A. *Sovershenstvovanie metoda ispytanii izolyatsii setei 6-10 kV* [Improvements in Techniques for 6–10 kV Network Insulation Testing]. *Mekhanizatsiya I elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva*, 1985, no. 11, pp. 46–48.

9. Rybakov L.M., Z.G. Ivanova, Makarova N.L. *Obsluzhivanie elementov i oborudovaniya elektroustanovok po rezul'tatam diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya* [Power Station Component and Equipment Service After Technical Condition Diagnostics]. Yoshkar-Ola, 2015, 318 p.

10. Rybakov L.M., Volkov S.V. *Vliyanie klimaticheskikh faktorov na otkazy elementov raspredelitel'nykh setei 10 kV* [Influence of Climatic Factors on Failures of 10 kV Distribution Network Parts]. *Mekhanizatsiya I elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva*, 2006, no. 2, pp. 4–5.

11. Rybakov L. M., Ivanova Z.G. *Prognozirovanie otkazov i planirovanie rezerva zapasnykh elementov, apparatov i oborudovaniya raspredelitel'nykh elektricheskikh setei 10 kV* [Filure Forecasting and Reserve Planning of Spare Elements, Devices and Equipment of 10 kV Distribution Electric Networks]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 104–110.

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 (diagnoz@marsu.ru).

ZAKHVATAEVA ALENA – Master's Program Student of Electrical and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (alena_zah94@mail.ru).

Формат цитирования: Рыбаков Л.М., Ласточкин С.В., Захватаева А.О. Совершенствование метода технического обслуживания и текущего ремонта для предотвращения развития дефектов у ослабленных элементов сельских распределительных сетей 10 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 119–133.

УДК 621.311.16

ББК 31.280.7

А.С. СЕРЕБРЯКОВ, В.Л. ОСОКИН

О РАЗЛОЖЕНИИ ПОЛНОЙ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА НА МГНОВЕННУЮ АКТИВНУЮ И МГНОВЕННУЮ РЕАКТИВНУЮ МОЩНОСТИ

Ключевые слова: полная мгновенная мощность, активная мгновенная мощность, реактивная мгновенная мощность, активно-индуктивная нагрузка, интегральные значения мощностей, ваттметры активной и реактивной мощности, компенсации реактивной мощности.

Рассмотрены особенности систем электроснабжения переменного тока, в которых для оценки их энергоэффективности необходимо учитывать не только активную, но реактивную мощность, для передачи которой по проводам затрачивается определенная часть активной мощности. Отмечено, что дефицит реактивной мощности приводит к снижению уровня напряжения в электрической сети и может нарушить статическую устойчивость электрической системы. Следовательно, источники питания должны вырабатывать не только активную, но и реактивную мощность для питания приемников, имеющих реактивные элементы.

Поскольку передача реактивной мощности по сети экономически невыгодна из-за потерь в линии электропередачи, то более целесообразным является выработка ее непосредственно в местах потребления с помощью местных источников реактивной мощности – установок емкостной компенсации реактивной мощности. В этом случае обменная часть электромагнитной энергии становится равной нулю. Она не потребляется от источника энергии и не возвращается к нему. Емкостной и индуктивный элементы обмениваются реактивной энергией между собой. По сети в этом случае передается только энергия, которая преобразуется в полезную работу.

С введением в систему управления энергетическими процессами цифровых технологий необходимо обосновать основные теоретические положения для оптимального управления режимами энергопотребления и компенсации реактивной мощности. В статье приводятся теоретические положения, которые могут лечь в основу автоматизированных цифровых систем управления энергопотреблением.

Приведены выражения и волновые диаграммы для мгновенных значений активной, реактивной и полной мощностей в цепи синусоидального тока с активно-индуктивной нагрузкой, состоящей из последовательного или параллельного соединения резистора и индуктивной катушки. Показано, как изменятся волновые диаграммы мгновенных значений мощностей в случае компенсации реактивной мощности с помощью поперечной емкостной компенсации, т.е. включением параллельно нагрузке конденсатора. В обоих случаях реактивная мощность на входе цепи становится равной нулю, а полная мощность – равной активной мощности. Однако кривые мгновенных значений активных мощностей в указанных случаях имеют разные фазы, что необходимо учитывать при разработке и эксплуатации цифровых систем автоматического регулирования устройств компенсации реактивной мощности.

Основной задачей электрических сетей является электроснабжение потребителей, т.е. обеспечение их электроэнергией. Поэтому основными важными для практики величинами, характеризующими эффективность работы электрических систем, являются мощность и энергия. По значению мощности оценивают работу системы электроснабжения в каждом отдельном рабочем режиме, а по значению потребленной энергии – работу системы за длитель-

ный период времени. Особенностью систем электроснабжения переменного тока является то обстоятельство, что для оценки их энергоэффективности необходимо учитывать не только активную, но и так называемую реактивную мощность. Активной мощностью P в электрической цепи при периодических процессах называют среднее значение полной мгновенной мощности s за один период, или среднее значение мгновенной активной мощности p за один период. Разность полной мгновенной мощности s и активной мгновенной мощности p является мгновенной реактивной мощностью q .

Задачи исследования. Дефицит реактивной мощности приводит к снижению уровня напряжения в электрической сети и в ряде случаев может нарушить статическую устойчивость электрической системы. С введением в систему управления энергетическими процессами цифровых технологий необходимо обосновать основные теоретические положения для оптимального управления режимами энергопотребления. Ниже приводятся положения, которые могут лечь в основу разработки автоматизированных систем управления энергопотреблением.

Методы исследования. Полную мгновенную мощность в цепях синусоидального тока можно представить как сумму мгновенной активной мощности p и мгновенной реактивной мощности q [3, 10]. Например, для цепи, содержащей последовательно соединенные сосредоточенные элементы, обладающие активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C , по которой протекает синусоидальный ток i , результирующее напряжение, приложенное к цепи:

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + u_C. \quad (1)$$

Выражение для полной мгновенной мощности s , подводимой к цепи, будет выглядеть как

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = u_R i + u_L i + u_C i = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} + u_C C \frac{du_C}{dt} = \\ &= Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{Li^2}{2} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{Cu_C^2}{2} \right) = \\ &= Ri^2 + \frac{d}{dt} (W_L) + \frac{d}{dt} (W_C) = p_R + q_L + q_C, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i = C \frac{du_C}{dt}$ – ток в цепи; $u_L = L \frac{di}{dt}$ и u_C – напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе, соответственно; $p_R = u_R i$ – мгновенная активная мощность в активном сопротивлении; $q_L = u_L i$ и $q_C = u_C i$ – мгновенные реактивные мощности в индуктивной катушке и конденсаторе, соответственно.

В выражениях (1) и (2) ток, напряжения и мощности являются функциями времени t . Мгновенная активная мощность, которая потребляется в активном сопротивлении R , выраженная по закону Джоуля – Ленца как $p_R = R \cdot i^2$, всегда положительная. Она характеризует необратимый процесс поглощения энергии.

Мгновенные реактивные мощности q_L в индуктивной катушке и q_C в конденсаторе, в которых электроэнергия запасается и затем снова возвращается к источнику энергии, будут положительными в том случае, когда энергия в них запасается, т.е. возрастает, и отрицательными, когда энергия убывает. Таким образом, мгновенные реактивные мощности q_L в индуктивной катушке и q_C определяют скорость поступления энергии в магнитное поле катушки и электрическое поле конденсатора и скорость возвращения энергии из этих полей.

На рис. 1 в качестве примера приведены расчетные формулы в интегрированном пакете Mathcad для расчета рассмотренных выше мгновенных мощностей в цепи синусоидального тока с активно-индуктивной нагрузкой, состоящей из последовательного соединения резистора $R = 4$ Ом и индуктивной катушки с индуктивным сопротивлением $X = 3$ Ом [11]. Полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 5$ Ом. Действующее значение питающего напряжения $U = 100$ В, частота $f = 50$ Гц. Начальная фаза напряжения принята равной нулю. Фазовый угол нагрузки равен $\varphi = 36,87^\circ = 0,644$ рад. На этот угол синусоида тока i отстает от синусоиды напряжения u . Там же приведены формулы для расчета интегральных значений мощностей P , Q , S .

Мгновенные мощности при активно-индуктивной нагрузке

$$U := 100 \quad u(t) := U \cdot \sqrt{2} \sin(100\pi t) \quad R := 4 \quad X := 3 \quad Z := \sqrt{R^2 + X^2} = 5$$

$$\varphi := \arccos\left(\frac{R}{Z}\right) \quad \cos(\varphi) = 0.8 \quad \sin(\varphi) = 0.6 \quad I := \frac{U}{Z} = 20$$

$$t := 0, 0.0001 \dots 0.02 \quad u1(t) := 100 \sqrt{2} \cdot \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$i(t) := U \cdot \sqrt{2} \frac{1}{Z} \sin(100\pi t - \varphi) \quad I := \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} i(t)^2 dt} = 20$$

$$p(t) := R \cdot i(t)^2 \quad P := \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} p(t) dt = 1.6 \times 10^3$$

$$s(t) := u(t) \cdot i(t) \quad P := \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} s(t) dt = 1.6 \times 10^3$$

$$q(t) := \frac{d}{dt} \left(\frac{L \cdot i(t)^2}{2} \right) \quad Q := \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} q(t) dt = 6.182 \times 10^{-13}$$

$$q1(t) := u1(t) \cdot i(t) \quad Q := \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} q1(t) dt = 1.2 \times 10^3$$

$$S := U \cdot I = 2 \times 10^3 \quad P := S \cos(\varphi) = 1.6 \times 10^3 \quad Q := S \sin(\varphi) = 1.2 \times 10^3$$

Рис. 1. Формулы для расчета мгновенных и интегральных значений мощностей в цепи с последовательно включенной активно-индуктивной нагрузкой

Для расчета интегрального значения активной мощности $P = 1600$ Вт взят принцип действия ваттметра индукционной системы, усредняющего мощность за один период питающего напряжения. Из рис. 1 видно, что средняя за период мощность, т.е. активная мощность, на зажимах всей цепи равна средней за период мощности на участке с активным сопротивлением R .

Для расчета интегрального значения реактивной мощности $Q = 1200$ вар, так же, как и в реальных ваттметрах реактивной мощности, взято напряжение u_1 , сдвинутое в сторону отставания от питающего напряжения u на угол 90° $\left(\frac{\pi}{2}\right)$. В этом случае мгновенное значение измеряемой реактивной мощности обозначено на рис. 1 как q_1 . Интегральное значение реактивной мощности без сдвига напряжения (интегрирование мгновенной реактивной мощности q за один период), как видно из рис. 1, равно нулю ($Q = 6,182 \cdot 10^{-13} \approx 0$) [2, 8].

Научная новизна. На рис. 2 приведены зависимости мгновенных значений мощности, полученные по формулам, приведенным на рис. 1. Заметим, что такие же значения мгновенных мощностей можно получить при последовательном соединении элементов R и L , разложив питающее напряжение на две составляющие – активную $u_a = U\sqrt{2} \cdot \cos\varphi \cdot \sin(100\pi \cdot t - \varphi)$, совпадающую по фазе с током i в цепи, и реактивную составляющую $u_p = U\sqrt{2} \cdot \sin\varphi \cdot \sin(100\pi \cdot t + 90^\circ - \varphi)$, опережающую по фазе ток i на 90° (рис. 3). Первая составляющая – это мгновенное значение напряжения на резисторе, а вторая – на индуктивной катушке. Ток же i в обоих элементах при последовательном их включении одинаковый. Его амплитуда составляет $20\sqrt{2} = 28,2$ А. В этом случае две составляющие напряжения дают две составляющие p и q мгновенной мощности s . Активная мощность p и ток i одновременно проходят через нуль. Отметим, что интегральное значение активной мощности P получается одинаковым как при интегрировании мгновенной активной мощности $p(t)$, так и при интегрировании полной мгновенной мощности $s(t)$, что подтверждает рис. 1.

Как видно из рис. 2, кривые мгновенной активной мощности p и мгновенной полной мощности s являются несинусоидальными функциями времени. Они обе содержат синусоидальные составляющие двойной частоты и постоянные составляющие. Амплитуды синусоидальных составляющих этих кривых различны, а постоянные составляющие одинаковые и равны P . Поэтому их интегральные значения равны их постоянным составляющим – активной мощности P . Значение активной мощности P можно определить из кривых s и p следующим образом: $P = \frac{s_{\max} + s_{\min}}{2} = \frac{3600 - 400}{2} = 1600$ Вт,

или $P = \frac{p_{\max}}{2} = \frac{3200}{2} = 1600$ Вт.

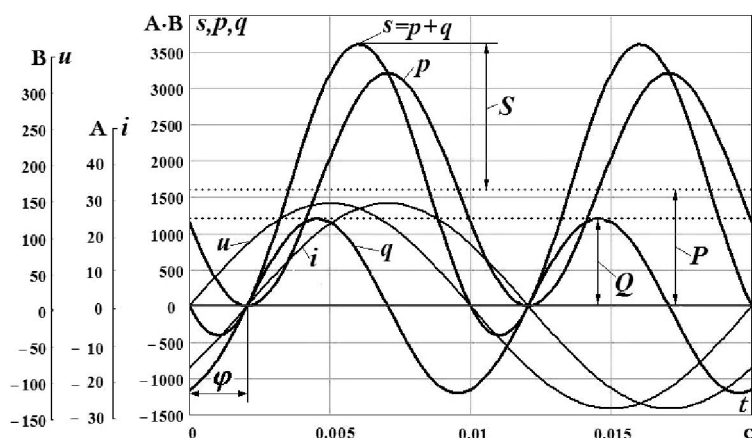


Рис. 2. Зависимости мгновенных значений мощности от времени, полученные по формулам, приведенным на рис. 1

Кривая мгновенной реактивной мощности q представляет собой синусоидальную величину. Поэтому ее интегральное значение за период равно нулю. Амплитуда колебаний мгновенной реактивной мощности q равна значению реактивной мощности Q . Пульсирующий характер мгновенных мощностей дает полную энергетическую характеристику процесса передачи электрической энергии.

На рис. 2 начало синусоиды реактивной мощности q совпадает с началом синусоиды тока, или концом ее полупериода. Из представленных на рис. 2 кривых мгновенных значений мощностей реактивную мощность Q можно определить через амплитудное значение мгновенной реактивной мощности $q_{\max}$ или через максимальное $s_{\max}$ и минимальное (отрицательное) $s_{\min}$ значения полной мощности s следующим образом:

$$Q = q_{\max} = |q_{\min}| = 1200 \text{ вар}$$

$$\text{или } Q = \sqrt{s_{\max} \cdot (-s_{\min})} = \sqrt{3600 \cdot 400} = 1200 \text{ вар.}$$

В этом нетрудно убедиться, произведя следующие преобразования:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = \left(\frac{s_{\max} + s_{\min}}{2} \right)^2 - s_{\max} \cdot s_{\min} =$$

$$= \frac{s_{\max}^2 + 2s_{\max} \cdot s_{\min} + s_{\min}^2}{4} - s_{\max} \cdot s_{\min} =$$

$$= \frac{s_{\max}^2 - 2s_{\max} \cdot s_{\min} + s_{\min}^2}{4} = \left(\frac{s_{\max} - s_{\min}}{2} \right)^2$$

Отсюда следует, что $S = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2}$.

С учетом предложенных новых соотношений можно выразить коэффициент мощности как $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{s_{\max} + s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}}$ и коэффициент реактивной мощности как $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{2\sqrt{s_{\max} \cdot (-s_{\min})}}{s_{\max} + s_{\min}}$.

Если же двухполюсник с активно-индуктивной нагрузкой представлен не как последовательное, а как параллельное соединение элементов, то в этом случае следует брать две составляющие тока и одно общее напряжение (рис. 3). Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением и определяется по формуле

$$i_a(t) = I\sqrt{2} \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(100\pi \cdot t). \quad (3)$$

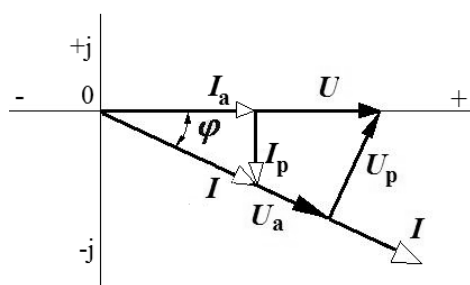


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов при активно-индуктивной нагрузке для последовательного и параллельного соединения элементов

Реактивная составляющая тока отстает от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$ и определяется по формуле

$$i_p(t) = I\sqrt{2} \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin\left(100\pi \cdot t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Мгновенные значения мощностей в этом случае определяются по формулам

$$p(t) = u(t) \cdot i_a(t), \quad (5)$$

$$q(t) = u(t) \cdot i_p(t), \quad (6)$$

$$s(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (7)$$

Две составляющие p и q полной мощности $s = p + q$ определяются двумя составляющими общего тока i . Мгновенные значения мощностей, рассчитанные по формулам (5)–(7), приведены на рис. 4 [3]. Здесь же показаны кривые напряжения u и тока i . Начало синусоиды реактивной мощности q совпадает с максимальным и минимальным значениями питающего напряжения u .

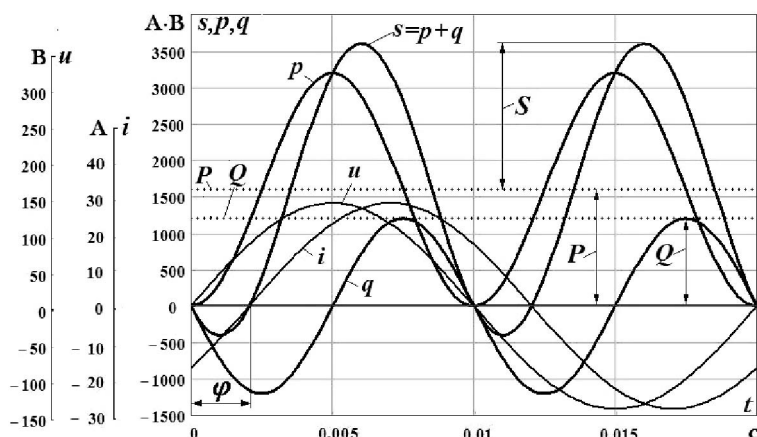


Рис. 4. Зависимости мгновенных значений мощности от времени, полученные по формулам (5)–(7) при параллельном соединении элементов

Сравнивая осциллограммы на рис. 2 и рис. 4, можно заключить, что мгновенные значения полной мощности s , поступающей на вход схемы, в обоих случаях одинаковые, так как одинаковы амплитудные значения и начальные фазы напряжения u и тока i на входе в обеих схемах. Однако кривые мгновенных значений активной мощности p и реактивной мощности q в обоих рассматриваемых случаях имеют разные фазы, хотя амплитудные значения их в обоих случаях одинаковы: $Q = 1200$ вар, $P = 1600$ Вт. Но при этом постоянная составляющая реактивной мощности q , так же, как и ранее, равна нулю, а постоянная составляющая активной мощности p равна половине максимального значения этой мощности, или амплитудному значению ее синусной составляющей.

На прохождение реактивного тока по проводам затрачивается определенная часть активной мощности, так как потери мощности пропорциональны квадрату полного тока. Кроме того, реактивный ток вызывает дополнительное снижение напряжения в точке потребления энергии. Таким образом, с одной стороны, реактивный ток и реактивная мощность являются нежелательными величинами. С другой стороны, они помимо нашего желания необходимы для нормальной работы большинства потребителей электрической энергии, имеющих в своем составе реактивные (индуктивные) элементы. Следовательно, источники питания должны вырабатывать не только активную, но и реактивную мощность для питания приемников, имеющих реактивные элементы.

Передача реактивной мощности по сети экономически невыгодна из-за потерь в линии электропередачи. Более целесообразным является выработка ее непосредственно в местах потребления с помощью местных источников реактивной мощности, например, конденсаторных установок. Такие установки называют установками поперечной емкостной компенсации реактивной мощности. В этом случае полупериоды запасаения и возврата электромагнитной энергии индуктивностью и емкостью сдвинуты на 180° , т.е. они находятся в противофазе. Поэтому при наличии рядом двух различных потребителей – индук-

тивности и емкости с равными реактивными сопротивлениями – суммарная обменная часть электромагнитной энергии становится равной нулю. Она не потребляется от источника энергии и не возвращается к нему. Емкостный и индуктивный элементы обмениваются реактивной энергией между собой. По сети в этом случае передается только энергия, которая преобразуется в полезную работу. Такие мероприятия называют компенсацией реактивной мощности.

Рассмотрим, как изменятся волновые диаграммы мгновенных значений мощностей в случае компенсации реактивной мощности с помощью установки поперечной емкостной компенсации, т.е. включением параллельно нагрузке конденсатора [1, 7, 13]. В обоих случаях интегральное значение реактивной мощности Q становится равным нулю, а полная мощность S становится равной P . На рис. 5 приведены кривые мгновенных мощностей при компенсации реактивной мощности при последовательном включении активного сопротивления и катушки индуктивности. Напряжение и общий ток i совпадают по фазе. Амплитуда питающего тока уменьшилась до значения $20\sqrt{2} \cos \varphi = 22,6$ А. Пунктирными линиями на рис. 5 показаны мощности p и q до компенсации. Потребляемая из сети реактивная мощность Q становится равной нулю, а полная мощность s становится равной активной мощности p .

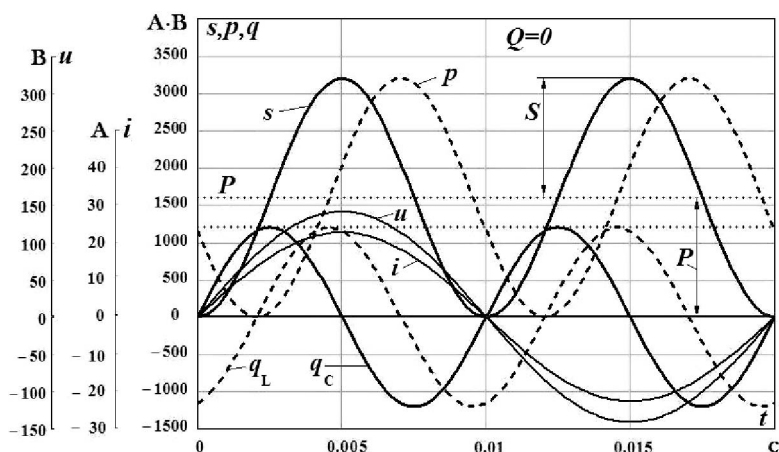


Рис. 5. Зависимости мгновенных значений мощностей от времени при компенсации реактивной мощности последовательно соединенных активного сопротивления и катушки индуктивности

На рис. 6 приведены кривые мгновенных мощностей при компенсации реактивной мощности и параллельном включении активного сопротивления и катушки индуктивности. Индуктивная мощность q в схеме до компенсации на рис. 6 показана пунктирной линией.

В обоих случаях кривые мгновенных значений полных мощностей s совпадают. Обе схемы потребляют только активную мощность, т.е. $P = S$ и $Q = 0$. При этом активные мощности, потребляемые активным сопротивлением R , на рис. 5 и 6 имеют разные фазы.

измерительной техники и при оптимизации управления качеством электрической энергии и оценки электромагнитной совместимости электротехнических средств [4–6, 9, 12, 14].

Литература

1. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 459 с.
3. Зевеке Г.В. Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. 3-е изд., испр. М.; Л.: Энергия, 1965. 753 с.
4. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. 5-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2012. 667 с.
5. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. М.: НОРТ, 2001. 401 с.
6. Карташев И.И., Зуев Н.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 120 с.
7. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 200 с.
8. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975. 128 с.
9. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии / Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Ф.К. Шидловский и др. Киев: Наукова думка, 1990. 252 с.
10. Серебряков А.С., Осокин В.Л. Моделирование в пакете Mathcad переходных процессов в активно-емкостных цепях при переменном питающем напряжении и дискретном изменении параметров элементов // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 4(25). С. 13–21.
11. Серебряков А.С., Шумейко В.В. Mathcad и решение задач электротехники. М.: Маршрут, 2005. 240 с.
12. Управление качества электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 320 с.
13. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети / под ред. В.А. Веникова. М.: Высш. шк., 1971. 440 с.
14. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Энергоатомиздат, 2003. 768 с.

СЕРЕБРЯКОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Россия, Княгинино (a.sereb@mail.ru).

ОСОКИН ВЛАДИМИР ЛЕОНИДОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрификации и автоматизации, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Россия, Княгинино (osokinvl@mail.ru).

A. SEREBRYAKOV, V. OSOKIN

EXPANSION OF FULL INSTANTANEOUS POWER IN CIRCUIT OF SINUSOIDAL CURRENT ON INSTANTANEOUS ACTIVE AND INSTANTANEOUS REACTIVE POWER

Key words: full instantaneous power, instantaneous active power, instantaneous reactive power, active-inductive load, integral value of the capacity, power meter of active and reactive power, compensation of reactive power.

The features of AC power supply systems are considered, it is necessary to take into account not only active, but reactive power to assess their energy efficiency for the transmission of which a certain part of the active power is spent on the wires. It is noted that the lack of reactive power leads to a decrease in the voltage level in the electrical network and can disrupt the static stability of the electrical system. Consequently, the power sources must produce not only active, but also reactive power for power receivers with reactive elements.

Since the transmission of reactive power over the network is economically unprofitable due to losses in the power line, it is more expedient to develop it directly in the places of consumption with the help of local sources of reactive power – installations for capacitive compensation of reactive power. In this case, the exchange part of the electromagnetic energy becomes zero. It is not consumed from or returned to the energy source. Capacitive and inductive elements exchange reactive energy with each other. In this case, only energy is transmitted through the network, which is converted into useful work.

With the introduction of digital technologies into the energy process control system, it is necessary to substantiate the basic theoretical provisions for optimal control of energy consumption modes and reactive power compensation. The article presents the theoretical provisions that can form the basis of automated digital energy management systems.

Expressions and wave diagrams for instantaneous values of active, reactive and full powers in a circuit of a sinusoidal current with an active-inductive load consisting of a series or parallel connection of a resistor and an inductive coil are given. It is shown how the wave diagrams of instantaneous power values will change in the case of reactive power compensation by means of transverse capacitive compensation, i.e. by switching the capacitor in parallel with the load. In both cases, the reactive power at the input of the circuit becomes zero, and the total power becomes equal to the active power. However, the curves of the instantaneous values of the active power in these cases have different phases, which must be taken into account in the development and operation of digital systems of automatic control of reactive power compensation devices.

References

1. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti i povysheniye kachestva elektroenergii* [Reactive power compensation and power quality improvement]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 216 p.
2. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii* [Power loss. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009, 459 p.
3. Zeveke G.V. Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepey. 3-e izd., ispr.* [Basics of circuit theory. 3rd ed.]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1965, 753 p.
4. Zinovyev G.S. *Silovaya elektronika. 5-e izd., ispr. i dop.* [Power electronics. 5th ed.]. Moscow, Yurayt Publ., 2012, 667 p.
5. Karmashev V.S. *Elektromagnitnaya sovместimost tekhnicheskikh sredstv. Spravochnik* [Electromagnetic compatibility of technical means]. Moscow, NORT Publ., 2001, 401 p.
6. Kartashev I.I., Zuyev N.N. *Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Spособы ego kontrolya i obespecheniya* [Power quality in power supply systems. Methods of its control and maintenance]. Moscow, MEI Publ., 2000, 120 p.
7. Kovalev I.N. *Vybor kompensiruyushchikh ustroystv pri proyektirovanii elektricheskikh se-tey* [Selection of compensating devices in the design of electrical networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 200 p.
8. Melnikov N.A. *Reaktivnaya moshchnost v elektricheskikh setyakh* [Reactive power in electrical networks]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 128 p.
9. Borisov B.P., Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Shidlovskii F.K. et al. *Povyscheniye effektivnosti ispolzovaniya elektroenergii v sistemakh elektrotekhnologii* [Increase of efficiency of use of the electric power in systems of electrotechnology]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990, 252 p.
10. Serebryakov A.S., Osokin V.L. *Modelirovaniye v pakete Mathcad perekhodnykh protsessov v aktivno-emkostnykh tsepyakh pri peremennom pitayushchem napryazhenii i diskretnom izmenenii*

parametrov elementov [Modeling in the Mathcad transient processes in active-inductive circuits with AC supply voltage and the discrete change in parameters of elements]. *Vestnik VIESKh*, 2016, no. 4(25), pp. 13–21.

11. Serebryakov A.S., Shumeyko V.V. *Mathcad i resheniye zadach elektrotehniki* [Mathcad and the solution of problems in electrical engineering]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 240 p.

12. Sharov Yu.V., ed., Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Shamonov R.G. et al. *Upravleniye kachestva elektroenergii* [Power quality management]. Moscow, MEI Publ., 2006, 320 p.

13. Venikov V.A., ed. *Elektricheskiye sistemy. T. 2. Elektricheskiye seti* [Electrical system. Vol. 2. Electric network]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971, 440 p.

14. Diakov A.F., ed., Diakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K. et al. *Elektromagnitnaya sovmestimost v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Electromagnetic compatibility in power and electrical engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003, 768 p.

SEREBRYAKOV ALEKSANDR – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrification and Automatization Department, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Russia, Knyaginino (a.sereb@mail.ru).

OSOKIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electrification and Automatization Department, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Russia, Knyaginino (osokinvl@mail.ru).

Формат цитирования: Серебряков А.С., Осокин В.Л. О разложении полной мгновенной мощности в цепи синусоидального тока на мгновенную активную и мгновенную реактивную мощности // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 134–145.

УДК 621.314
ББК 31.27-082

П.И. СКОМОРОХОВ, В.И. ЗАЦЕПИНА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ АУТОНОМНОЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИОНИСТОРНО-АККУМУЛЯТОРНОЙ СХЕМЫ

Ключевые слова: динамическая компенсация, искажения напряжения, надежность, ионистор, оптимизация, автономное электроснабжение, безотказность, нормализация.

В статье рассматривается схемный способ оптимизации работы устройства комбинированной нормализации напряжения в распределительной сети. Так как устройство работает в динамическом режиме, то в условиях резкого или длительного снижения напряжения, а также при вероятности полного погашения электроприемников требуется надежный способ обеспечения автономности работы как самого устройства, так и электроснабжения защищаемых потребителей. Целью работы является разработка способа повышения надежности работы устройств динамической компенсации искажений напряжения, в том числе обеспечения автономности работы как устройств компенсации, так и самих электроприемников. Предлагаемый в работе способ является актуальным для потребителей, подключенных к распределительной электросети, особенно для электроприемников первой и второй категорий надежности. Научная новизна заключается в том, что для решения поставленной цели предлагается использовать инновационные накопители электроэнергии – ионисторы, отличающиеся, по сравнению с традиционными накопителями, более высокой удельной ёмкостью, увеличенными длительностью и надежностью сохранения заряда. Практическая значимость заключается в минимизации продолжительности простоя электроприемников при полной потере питания секции шин, а также в повышении надежности работы устройств динамической компенсации искажений напряжения за счет автономного их питания от гибридной аккумуляторной установки. Разработано схемное решение, позволяющее надежно запитывать электроприемники в случаях полной потери питания, обеспечивающее работу устройств динамической компенсации амплитудно-фазных искажений напряжения. Определено необходимое количество ионисторов и аккумуляторных батарей, в том числе их производственные параметры для представленной в работе схемы электроснабжения. Предлагаемый способ, базирующийся на оптимальном сочетании ионисторов и свинцовых аккумуляторных батарей, гибрид которых вводится в цепь постоянного тока устройства, является инновационным в плане обеспечения автономности и повышения надежности устройств динамической компенсации. Данное решение максимально оптимизирует работу как устройств динамической компенсации, так и системы электроснабжения в целом.

На сегодняшний день в большинстве случаев ненормальные режимы в распределительных электрических сетях ликвидируются, как правило, действиями устройств релейной защиты и автоматики, а также различного рода фильтрокомпенсирующих устройств. Основной их недостаток в том, что выдаваемое ими управляющее воздействие имеет статический характер и сложно поддается перестройке рабочих режимов. При этом при повышенной вероятности возникновения искажений ключевых параметров электрических режимов гораздо эффективней будет их динамическая компенсация нежели обесточивание пострадавшего элемента [1, 6, 7].

В целях решения задачи обеспечения ответственных электроприемников электроэнергией, качество которой максимально соответствует положениям действующего национального стандарта¹, было разработано устройство динамического подавления амплитудно-фазных искажений напряжения, направленное на выполнение задач идентификации и динамической компенсации провалов, перенапряжений и высших гармонических составляющих [3]. Устройство восстанавливает уровень напряжения и форму кривой напряжения при бросках активно-реактивной мощности за счет непрерывного введения в распределительную электрическую сеть кривой компенсационного напряжения через вольтдобавочный трансформатор. Кодимпульсная модуляция управляющего воздействия позволяет гораздо быстрее и эффективнее реагировать на негативные сетевые возмущения в распределительных сетях [4].

В качестве исследуемого объекта для разработанного устройства была выбрана первая секция шин номинального напряжения 6 кВ главной понизительной подстанции некоего промышленного предприятия номинального напряжения 110/35/6 кВ (рис. 1). Процесс оптимизации электроснабжения в данном аспекте исследования является неотъемлемой частью этапа параметрической и структурной оптимизаций на заключительных этапах электроценоза [1]. В процессе исследования осуществляется решение одновременно нескольких задач: повышение безотказности электрооборудования предприятия; улучшение качества поставляемой к электроприемникам электроэнергии; увеличение технико-экономических показателей производства. Основной проблемой помимо поддержания параметров кривой напряжения в норме, которую должна решать оптимизация, в рассматриваемом случае является минимизация вероятности полного погашения электроприемников секции шин.

Оптимальным решением проблемы является введение в цепь постоянного тока в разработанном устройстве [3] нормализации напряжения сети промышленных аккумуляторных батарей (далее – АКБ) повышенной ёмкости, что позволит избежать простоя агрегатов и дать время на устранение неисправности в сети. Запитывать же их предлагается от соседней секции шин 6 кВ. Стационарные свинцовые аккумуляторы хорошо зарекомендовали себя в роли аварийных источников питания. Также стоит отметить тяговые аккумуляторы, имеющие возможность глубокого разряда и относительно небольшую стоимость.

Особое внимание в рамках решения данной проблемы необходимо уделить ионисторам. К их уникальным свойствам относят высокую удельную емкость (порядка нескольких фарад), а также увеличенную по сравнению с аналогами длительность и надежность сохранности заряда. Они могут практически безотказно работать в цепях постоянного тока при значительных физических возмущениях. Главными преимуществами применения ионисторов

¹ ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 9400-ст.

являются: большой срок службы; быстрый заряд; практически неограниченное количество циклов «заряд/разряд»; относительная дешевизна; отсутствие необходимости контроля за режимом зарядки. Однако независимое использование ионисторов как высоковольтных источников питания перекрывается их следующими недостатками:

- малым накоплением электроэнергии;
- низкой энергетической плотностью;
- необходимостью последовательного соединения нескольких десятков элементов.

Согласно справочным данным, ионистор запасает энергию, равную примерно 10% энергии никель-металлогидридного или свинцового аккумулятора. При этом аккумулятор выдает относительно постоянное рабочее напряжение. Стоит учитывать, что электронные элементы, к которым относится ионистор, функционируют при ограниченных значениях питающего напряжения. Заряд, остающийся в ионисторе при достижении минимального напряжения, остается неиспользованным [2].

Для обеспечения постоянным питанием мощных потребителей в условиях совместной работы с разработанным устройством (в том числе при сильных просадках напряжения по секции шин) предлагается использовать ионисторы совместно с аккумуляторными батареями. В предлагаемом схемном решении ионисторы должны будут снижать нагрузку на аккумуляторную батарею, что значительно повышает срок ее службы, одновременно с этим возрастает и пусковой ток, который способна отдавать эта установка. Кроме того, при совместном использовании АКБ с ионисторами уменьшаются масса и габариты первых, что имеет важное значение для промышленности.

Возвращаясь к схеме электроснабжения, представленной на рис. 1, для данной секции шин следует определить количество ионисторов, необходимое для обеспечения напряжением приемников (с учетом вероятности полного их погашения). Для начала надо рассчитать количество энергии, необходимой для обеспечения приемников достаточной мощностью P в период максимального потребления, который представляет собой отказ системы питания шины:

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{2} C_{\text{и}} (U_{\text{нач}}^2 - U_{\text{кон}}^2), \quad (1)$$

где $C_{\text{и}}$ – суммарная емкость группы ионисторов, Ф; $U_{\text{нач}}^2$ – напряжение на входе группы параллельно соединенных ионисторов перед началом пикового потребления, В; $U_{\text{кон}}^2$ – напряжение на входе группы ионисторов в момент окончания пикового потребления, В.

С учетом того, что полностью заряженная гибридная аккумуляторная установка (далее – ГАУ) до момента отклонения амплитудно-фазных параметров напряжения от нормы находится в состоянии покоя или, так сказать, постоянной зарядки, выражение (1) примет вид

$$W_{\text{и}} = 0,5 \cdot C_{\text{и}} U_{\text{ном}}^2.$$

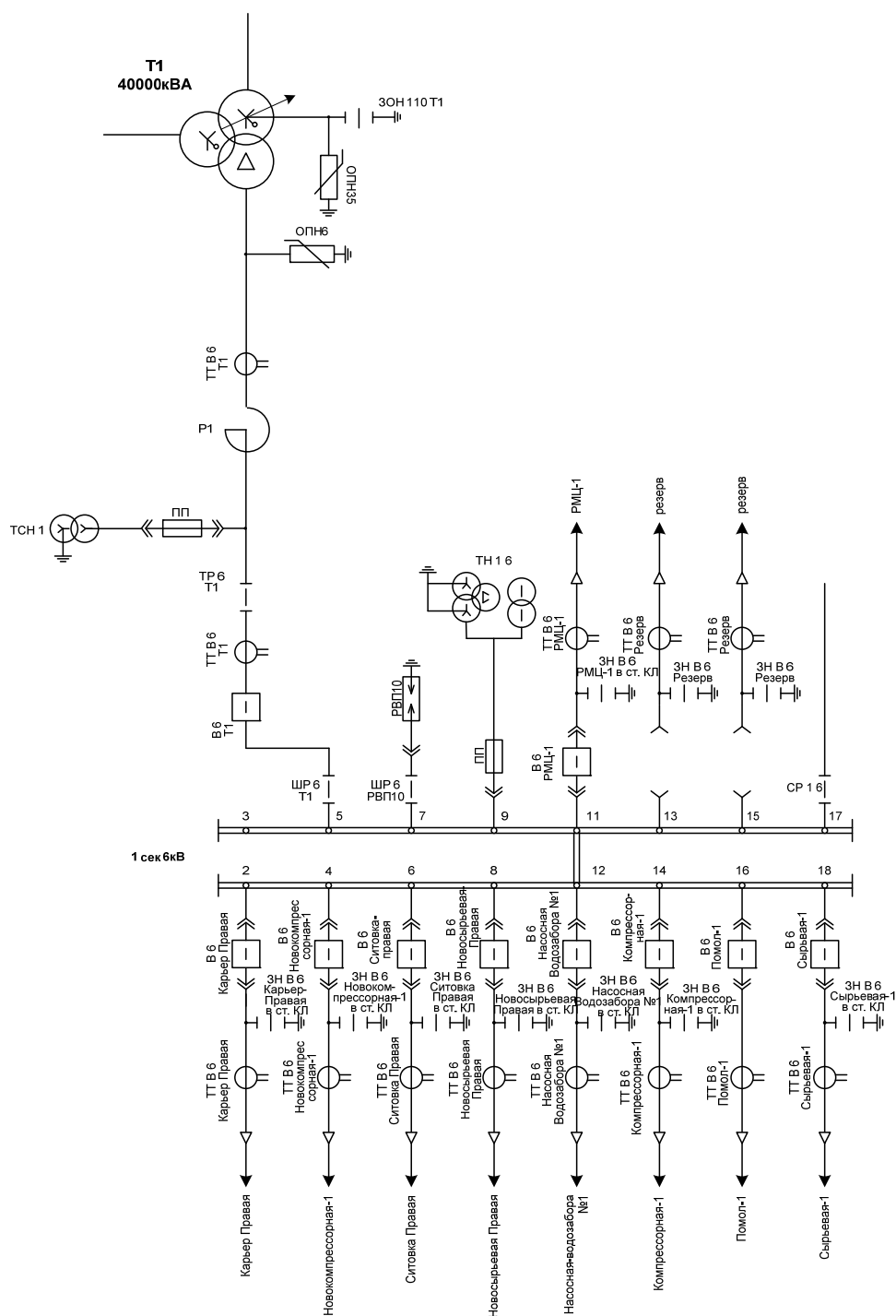


Рис. 1. Нормальная схема первой секции шин 6 кВ
главной понизительной подстанции 110/35/6 кВ

Принимая во внимание тот факт, что на предприятии, возможно, имеются ответственные электроприемники, требуется обеспечивать большой ток зарядки и разрядки ионисторов, а также максимальное снижение габаритов гибридной аккумуляторной установки. Оптимальным вариантом для этой подзадачи являются ионисторы повышенной емкости типа K58-15, номинального напряжения отдельного ионистора $U_{\text{и}} = 5,5$ В и емкости $C = 10$ Ф. Допустимый ток зарядки и разрядки одного ионистора составляет не более 1,2 А. На основании статистических и экспериментальных данных ионисторы данного типа имеют наработку на отказ, равную 15000 циклов, при сроке службы не менее 12 лет [5].

Чтобы эффективно запастись необходимой для батарей энергию, необходимо ограничить напряжение заряда ионистора до уровня несколько меньшего, чем его допустимое напряжение. С учетом этого примем необходимое количество ионисторов

$$N_{\text{и}} = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{и}}} = \frac{6000}{5,5} = 1090,9 \approx 1091. \quad (2)$$

Суммарный запас энергии и мощности группы ионисторов для рассматриваемого случая (секции шин номинального напряжения 6 кВ) будет определяться на основании справочных данных следующим образом:

$$\begin{cases} W_{\text{и.сумм.}} = C \cdot \frac{U^2}{2} \cdot N_{\text{и}} = 10 \cdot \frac{5,5^2}{2} \cdot 1100 = 165,02 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \\ P_{\text{и.сумм.}} = \frac{U^2}{4R} \cdot N_{\text{и}} = \frac{5,5^2}{4 \cdot 0,2} \cdot 1100 = 41,25 \text{ кВт}, \end{cases} \quad (3)$$

где C – емкость отдельного ионистора, Ф; U – напряжение на электродах, В; R – эффективное последовательное сопротивление.

Касательно автономности работы при полученных значениях энергии группы ионисторов можно сделать вывод, что, будучи полностью заряженными, они способны несколько дней питать ряд бытовых электроприемников. Что касается промышленных электроприемников, например электродвигателей, то работы такой группы ионисторов хватит максимум на несколько часов, однако для устранения неисправности, приведшей к полному погашению секции, этого может быть вполне достаточно. А учитывая, что в разрабатываемой ГАО они будут работать совместно с аккумуляторными батареями, при этом запитываясь от другой секции шин, подобное структурное резервирования будет значительно снижать вероятность отказа оборудования и погашения питания электроприемников.

Согласно принятому типу ионисторов в условиях их работы в ГАО консолидированно с обычными аккумуляторными батареями необходимо соответствие емкостей этих двух составляющих. Принимаем в качестве свинцовых аккумуляторных источников три батареи марки СК-104 с номинальной емкостью 3744 А·ч каждая. На рис. 2 изображено разработанное схемное решение подключения ГАО к нагрузочной шине разработанного устройства, подсоединенного, в свою очередь, к рассматриваемой секции шин.

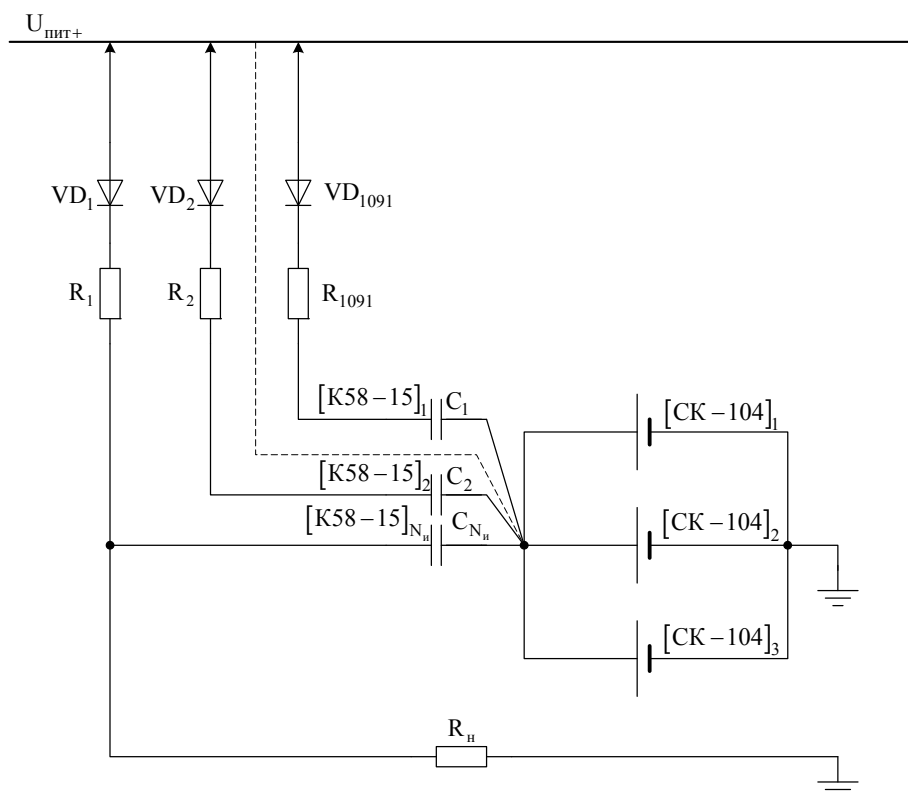


Рис. 2. Схема подключения ГАО

Установка состоит из N_n параллельно соединенных ионисторов марки K58-15, которые подключены к трем параллельно соединенным аккумуляторным батареям типа СК-104. В качестве нагрузки R_n выступает вход тиристорного управляемого преобразователя напряжения. Отметим, что указанные на рис. 2 марки и количество ионисторов и аккумуляторных батарей применительны только к конкретной схеме на рис. 1, в других случаях требуется аналогичный подбор на основании выражений, указанных выше. При этом схема подключения универсальна. Предлагаемое схемное решение позволяет:

- запитывать все приемники секции шин потребителей бесперебойно, имеется достаточное для устранения даже серьезных неполадок время (аварийный режим работы системы электроснабжения);
- объединяет в себе достоинства ионисторов и свинцовых аккумуляторных батарей как источников резервного питания, нивелируя основные недостатки обоих;
- повышает надежность системы электроснабжения в целом посредством структурной избыточности за счет внедрения в систему резервного инновационного элемента питания;
- максимально оптимизирует работу устройства комбинированной нормализации напряжения, так как разработанное решение снижает вероятность отказа в работе устройства динамической компенсации искажений напряжения.

Отметим, что в условиях крайней необходимости для повышения времени автономной работы ГАО рекомендуется отключать некоторые неотвеченные электроприемники намеренно, в особенности те, кратковременный перерыв в электроснабжении которых не ведет к значительным негативным последствиям для предприятия. Однако подобное решение необходимо использовать только тогда, когда, например, к одной секции шин присоединены электроприемники разных категорий надежности, что достаточно редко.

Литература

1. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. М.: Центр системных исследований, 2005. 383 с.
2. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии. 2005. № 50. С. 12–16.
3. Пат. 168544 РФ, (51)МПК H02J3/00 (2006/01). Устройство комбинированного регулирования напряжения сети / А.Н. Шпиганович, Е.П. Зацепин, П.И. Скоморохов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». №2016107854; заяв. 03.03.2016; опубл. 08.02.2017, Бюл. № 4.
4. Скоморохов П.И. О перспективах использования кодоимпульсной модуляции в устройствах нормализации качества электроэнергии при резкопеременных искажениях // Современные тенденции в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. Смоленск, 2016. Ч. 1. С. 110–111.
5. Супер конденсаторы: 2002–2012 гг. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm> (дата обращения: 30.09.2018).
6. Filimonova A.A., Zatsepin E.P., Zatsepina V.I. Multilevel control or power consumption at metallurgical plants. International Russian Automation Conference. Sochi, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501746.
7. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Shachnev O.Y. Ensuring effective functioning of compensating device STATCOM in metallurgical enterprises. International Russian Automation Conference. Sochi, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501660.

СКОМОРОХОВ ПАВЕЛ ИГОРЕВИЧ – ведущий специалист службы релейной защиты и автоматики, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемами Липецкой и Тамбовской областей», Россия, Липецк (pavelskomorokhov@mail.ru).

ЗАЦЕПИНА ВIOЛЕТТА ИОСИФОВНА – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк.

P. SKOMOROKHOV, V. ZATSEPINA
ENSURING AUTONOMOUS WORK OF DEVICES
OF DYNAMIC COMPENSATION OF VOLTAGE DISTORTION
BY MEANS OF IONISTOR-BATTERY CIRCUIT

Key words: *dynamic compensation, voltage distortion, reliability, ionistor, optimization, autonomous power supply, reliability, normalization.*

The article discusses a circuit method for optimizing the operation of a combined voltage normalization device in a distribution network. Since the device operates in a dynamic mode, under conditions of abrupt or long-term voltage reduction, as well as with the probability of full redemption of the power receivers, a reliable method is needed to ensure the autonomy of the device itself and the power supply of the protected consumers.

The goal of the work is to develop a method to increase the reliability of the operation of dynamic voltage distortion compensation devices, including ensuring the autonomy of operation of both the compensation devices and the electrical receivers themselves. The proposed method is relevant for consumers connected to the distribution network, especially for electrical receivers of the first and second categories of reliability. The scientific novelty is due to the fact that to meet this goal, it is proposed to use innovative electric energy storage devices – ionistors, which differ, as compared to traditional storage devices, higher specific capacity, increased duration and reliability of charge conservation. The practical significance lies in minimizing the duration of downtime of electric receivers with a complete loss of power to the busbar section, as well as in improving the reliability of devices for dynamic voltage distortion compensation due to their autonomous power supply from a hybrid battery installation. A circuit solution was developed that allows to power consumers reliably in cases of complete power loss, as well as ensuring the operation of devices for dynamic compensation of amplitude-phase voltage distortions. The required number of ion-detectors and rechargeable batteries, including their production marks for the power supply circuit presented in operation, has been determined. The proposed method, based on the optimal combination of ionistors and lead batteries, the hybrid of which is introduced into the DC circuit of the device, is innovative in terms of autonomy and increasing the reliability of dynamic devices compensation. This solution maximally optimizes the operation of both dynamic compensation devices and the power supply system as a whole.

References

1. Gnatyuk V.I. *Zakon optimal'nogo postroeniya tekhnotsenozov* [The law of optimal construction of technocenosis]. Moscow, 2005, 383 p.
2. Kuznetsov V., Pan'kina O., Machkovskaya N. *Kondensatory s dvoynym elektricheskim sloem (ionistory): razrabotka i proizvodstvo* [Electric Double Layer Capacitors (Ionistors): Design and Production]. *Komponenty i tekhnologii*, 2005, no. 50, pp. 12–16.
3. Shpiganovich A.N., Zatsepin E.P., Skomorokhov P.I. *Ustroistvo kombinirovannogo regulirovaniya napryazheniya seti* [Device for combined voltage regulation]. Patent RF, no. 168544, 2017.
4. Skomorokhov P.I. *O perspektivakh ispol'zovaniya kodoimpul'snoi modulyatsii v ustroystvakh normalizatsii kachestva elektroenergii pri rezkoperemennykh iskazheniyakh* [On the prospects for the use of code-pulse modulation in devices for the normalization of the quality of electric power with sharply alternating distortions]. *Sovremennye tendentsii v nauke, tekhnike, obrazovanii: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 3 ch.* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Modern trends in science, technology, education». 3 parts]. Smolensk, 2016, part 1, pp. 110–111.
5. *Super kondensatory: 2002–2012 gg.* [Super capacitors]. Available at: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm> (Accessed 30 September 2018).
6. Filimonova A.A., Zatsepin E.P., Zatsepina V.I. Multilevel control of power consumption at metallurgical plants. International Russian Automation Conference. Sochi, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501746.
7. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Shachnev O.Y. Ensuring effective functioning of compensating device STATCOM in metallurgical enterprises. International Russian Automation Conference. Sochi, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501660.

SKOMOROKHOV PAVEL – Leading Specialist, Service of Relay Protection and Automation, Branch of JSC «SO UES» «Regional dispatching Department of the power system of Lipetsk and Tambov regions», Russia, Lipetsk (pavelskomorokhov@mail.ru).

ZATSEPINA VIOLETTA – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical Department, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk.

Формат цитирования: Скоморохов П.И., Зацепина В.И. Обеспечение автономной работы устройств динамической компенсации искажений напряжения посредством ионисторно-аккумуляторной схемы // Вестник Чувашиского университета. – 2019. – № 1. – С. 146–153.

УДК 621.315

ББК 31.2

Е.В. ТУМАЕВА, С.С. КУЗИН

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 0,4 кВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕХИМИИ И НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Ключевые слова: радиальные схемы электроснабжения, индивидуальная компенсация реактивной мощности, оптимальное значение реактивной мощности, оптимизационная задача, минимум потерь активной мощности, метод множителей Лагранжа.

Предложено решение оптимизационной задачи минимизации потерь активной мощности в радиальной схеме электроснабжения путем оптимального распределения между компенсирующими устройствами заданной величины реактивной мощности. Рассмотрена однолинейная схема электроснабжения приточной вентиляции шинного завода, составлена математическая модель задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь в линиях электропередачи от протекания реактивной мощности. Получены результаты распределения оптимальных значений реактивной мощности между компенсирующими устройствами асинхронных двигателей при обеспечении заданного $\text{tg } \varphi$. Дана количественная и стоимостная оценка снижению потерь активной мощности в линиях электропередачи при использовании конденсаторных установок, реактивная мощность которых распределена оптимальным образом.

Радиальные схемы электроснабжения наиболее часто встречаются на крупных нефтехимических, нефтеперерабатывающих предприятиях с 1-й категорией надежности электроснабжения. В связи с географическими масштабами таких предприятий расстояние от источников питания до электроустановок значительно. Предприятия нефтехимической отрасли характеризуются большим количеством потребителей 0,4 кВ, для питания которых используются кабели малого сечения (с большим активным сопротивлением). Расчеты потерь электроэнергии в таких линиях показывают значительные величины. Указанные обстоятельства обуславливают поиск решения задачи снижения потерь активной мощности в линиях электропередач 0,4 кВ [2].

До недавнего времени на промышленных предприятиях нефтехимической отрасли не занимались вопросами компенсации реактивной мощности отдельных электроустановок, предпочитая компенсировать реактивную мощность, начиная с цеховых трансформаторных подстанций, и ставя перед собой задачу разгрузить силовые трансформаторы и вышестоящие линии электропередачи 6/10 кВ. При этом линии 0,4 кВ, питающие электроустановки, оставались загруженными избыточной реактивной мощностью. Это было связано, в том числе, с низкой стоимостью электроэнергии. С ростом тарифов на электроэнергию в целях уменьшения себестоимости выпускаемой продукции вопросы уменьшения потерь активной мощности для промышленных предприятий стали очень актуальными. Для получения наибольшего экономического эффекта от снижения потерь электроэнергии не

только в трансформаторах и вышестоящих линиях электропередачи, но и в нижестоящих линиях электропередачи 0,4 кВ предлагается использовать компенсацию реактивной мощности каждой отдельной электроустановки.

Научная новизна работы заключается в решении задачи минимизации потерь активной мощности в радиальной схеме электроснабжения путем решения оптимизационной задачи рационального распределения компенсирующих устройств. Поскольку целевая функция потерь активной мощности представляет собой нелинейную функцию, поставленная задача является нелинейной и решается с использованием метода множителей Лагранжа.

Математическая модель. Потери активной мощности в линии при отсутствии у потребителя компенсирующего устройства (Q_k) составляют

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R, \quad (1)$$

где P – протекающая по линии активная мощность, Вт; Q – протекающая по линии реактивная мощность, Вар; U – напряжение питания линии, В; R – сопротивление линии электропередачи, Ом.

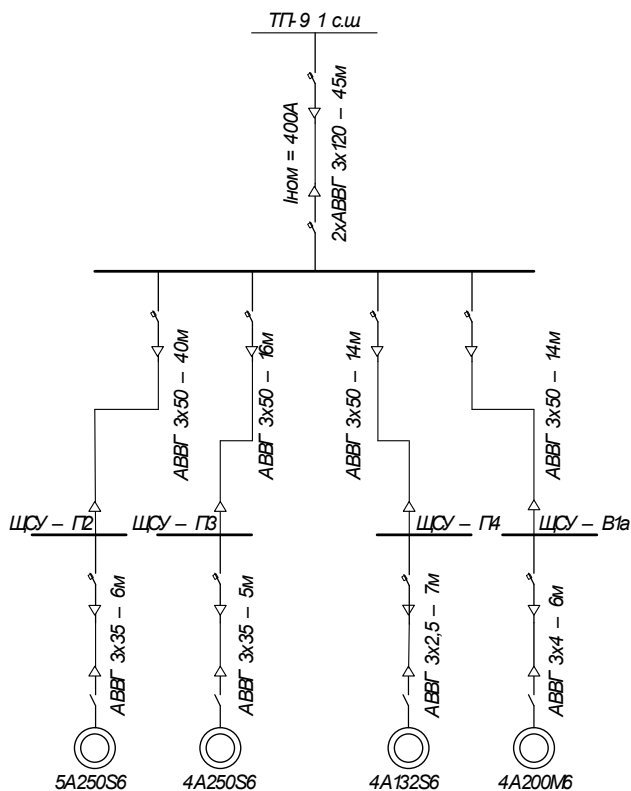
При установке у потребителя компенсирующего устройства ($Q_k \neq 0$) эти потери уменьшаются до величины

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} R. \quad (2)$$

Таким образом, компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить потери активной мощности в схеме электроснабжения и, следовательно, улучшить технико-экономические показатели этой схемы. Из выражений (1), (2) видно, что потери мощности ΔP имеют две составляющие: потери от протекания по линии активной мощности P и потери от протекания по линии реактивной мощности Q , т.е. $(Q - Q_k)$. Поскольку компенсация реактивной мощности влияет только на вторую составляющую потерь, в дальнейшем будем рассматривать потери активной мощности от протекания по линиям только реактивных мощностей. Для системы электроснабжения величина суммарной мощности компенсирующих устройств Q_k может быть заданной какими-то техническими условиями. В этом случае заданную мощность Q_k требуется оптимальным образом распределить внутри системы электроснабжения. Это уже задача условной оптимизации, решение которой может выполняться методом Лагранжа [3, 4].

Рассмотрим такую задачу для радиальной схемы электроснабжения приточной вентиляции шинного завода. Асинхронные двигатели M_1, M_2, M_3, M_4 , потребляющие реактивную мощность Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , получают питание по кабельным линиям от распределительного пункта с напряжением питания $U = 380$ В. Активные сопротивления линий между источником и потребителями составляют R_1, R_2, R_3, R_4 . Технические характеристики двигателей, кабелей, магнитных пускателей и автоматических выключателей показаны на рисунке. У каждого асинхронного двигателя может быть установлено компенсирующее устройство мощностью Q_{ki} .

Требуется найти оптимальное распределение между четырьмя асинхронными двигателями заданной суммарной мощности компенсирующих устройств Q_k , соответствующей $\tan \varphi = 0,35$ на шинах РП-1. Критерий оптимальности – минимум потерь активной мощности от протекания реактивной мощности в схеме электроснабжения приточной вентиляции.



Однолинейная схема электроснабжения двигателей приточной вентиляции

Подлежащая минимизации целевая функция, представляющая собой потери активной мощности в схеме, имеет вид

$$\Delta P = (Q_1 - Q_{k1})^2 \frac{R_1}{U^2} + (Q_2 - Q_{k2})^2 \frac{R_2}{U^2} + (Q_3 - Q_{k3})^2 \frac{R_3}{U^2} + (Q_4 - Q_{k4})^2 \frac{R_4}{U^2} \rightarrow \min.$$

Относительный минимум целевой функции ищется при ограничении

$$Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k3} + Q_{k4} - Q_k = 0.$$

Функция Лагранжа

$$L = \frac{1}{U^2} [(Q_1 - Q_{k1})^2 R_1 + (Q_2 - Q_{k2})^2 R_2 + (Q_3 - Q_{k3})^2 R_3 + (Q_4 - Q_{k4})^2 R_4] + \lambda (Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k3} + Q_{k4} - Q_k) \rightarrow \min.$$

С целью нахождения минимума функции L вычислим ее частные производные и приравняем их к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial Q_{к1}} = -\frac{2}{U^2} R_1(Q_1 - Q_{к1}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к2}} = -\frac{2}{U^2} R_2(Q_2 - Q_{к2}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к3}} = -\frac{2}{U^2} R_3(Q_3 - Q_{к3}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к4}} = -\frac{2}{U^2} R_4(Q_4 - Q_{к4}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{к} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решаем полученную систему линейных уравнений (3), определяем оптимальные значения реактивных мощностей компенсирующих устройств $Q_{к1}$, $Q_{к2}$, $Q_{к3}$, $Q_{к4}$ и находим минимум активных потерь ΔP от протекания по линиям реактивной мощности.

Анализ результатов решения задачи оптимизации показывает, что оптимальное распределение заданной суммарной величины реактивной мощности на шинах распределительного пункта $Q_{к}$ в рассматриваемой радиальной схеме электроснабжения подчиняется равенству:

$$(Q_1 - Q_{к1})R_1 = (Q_2 - Q_{к2})R_2 = (Q_3 - Q_{к3})R_3 = (Q_4 - Q_{к4})R_4.$$

При решении задачи оптимального распределения заданной суммарной реактивной мощности между компенсирующими устройствами в математической модели следует учитывать несколько факторов. Как правило, на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях асинхронные двигатели работают в продолжительном режиме с неполной загрузкой, поэтому встает вопрос определения активной и реактивной мощности асинхронного двигателя с учетом коэффициента загрузки. В случае, если электроустановка оснащена счетчиками активной и реактивной энергии, можно получить требуемые значения мощностей по результатам измерений. На исследуемом объекте отсутствовали приборы учета электроэнергии, поэтому по замеренным значениям токов двигателей, а также по методике, приведенной в [1], определили фактические значения активной и реактивной мощностей асинхронных двигателей с учетом коэффициента загрузки (таблица).

При определении активных сопротивлений R_i следует учитывать все составляющие трехфазной линии электропередачи на участке от двигателя до шин распределительного пункта, т.е. активное сопротивление кабеля должно быть определено с учетом числа фаз и температуры окружающей среды, а также следует учесть переходные сопротивления контактных соединений и сопротивления разъемных контактов магнитных пускателей и автоматических выключателей.

Технические характеристики асинхронных двигателей

№	Тип	I, А	K_z	P_Φ , кВт	$\lg \varphi_\Phi$	Q_Φ , кВар	$Q_{\text{опт}}$, кВар
1	5A250S6	46	0,54	26	0,67	17,4	8,6
2	4A250S6	50	0,58	28,3	0,65	18,4	9,3
3	4A132S6	10	0,76	5	0,99	5	3,5
4	4A200M6	30	0,66	16,1	0,65	10,5	5,4

Результаты распределения оптимальных значений реактивной мощности между компенсирующими устройствами асинхронных двигателей при обеспечении $\lg \varphi = 0,35$ на шинах РП-1 приведены в таблице.

Активные потери в линиях электропередачи 0,4 кВ от протекания реактивной мощности без компенсирующих устройств составляют 778 Вт. При установке к каждому асинхронному двигателю компенсирующего устройства с оптимальными значениями реактивной мощности активные потери от протекания реактивной мощности составили 47 Вт.

В целом снижение затрат на передачу активной мощности двигателям при установке к ним компенсирующих устройств составило 947 Вт, что позволило оценить экономию электроэнергии при тарифе 3,38 руб./кВт·ч в размере 28 036 руб./год. Стоимость конденсаторных установок, кабельных перемычек, магнитных пускателей и автоматических выключателей по предложенному техническому решению составляет 81 230 руб. Таким образом, за счет экономии электроэнергии проект можно окупить за 3 года, что является приемлемым для нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.

Практическая значимость результатов исследования заключается в минимизации потерь активной мощности от протекания реактивной мощности и, как следствие, минимизации активных потерь в линиях 0,4 кВ, силовых трансформаторов и вышестоящих линиях электропередачи в целом.

К перспективам дальнейшей работы относится исследование пусковых режимов асинхронных двигателей с оптимизационными конденсаторными установками, а также разработка алгоритмов оптимального управления конденсаторными установками в режиме реального времени при изменяющейся нагрузке электроустановок.

Выводы. 1. Предложена математическая модель задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь в линиях электропередачи от протекания реактивной мощности для радиальной схемы электроснабжения на примере схемы электроснабжения приточной вентиляции шинного завода.

2. Установлено оптимальное распределение реактивной мощности между компенсирующими устройствами асинхронных двигателей.

3. Дана количественная оценка снижению потерь активной мощности в линиях электропередачи при использовании конденсаторных установок, реактивная мощность которых распределена оптимальным образом.

4. Проведено технико-экономическое обоснование проектного решения, срок окупаемости проекта является допустимым для принятия решения о внедрении предложенного проекта на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях.

Литература

1. Белявский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 6. С. 66–69.
2. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях // Вопросы электромеханики. 2014. № 1. С. 43–50.
3. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. 128 с.
4. Тумаева Е.В., Попов А.В. Алгоритм расчета оптимальных токов моментного вентильного двигателя в установившемся режиме работы // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 46, № 19. С. 86–91.

ТУМАЕВА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА – кандидат технических наук, заведующая кафедрой электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт, Россия, Нижнекамск (e.tumaeva@mail.ru).

КУЗИН СТАНИСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ – магистрант кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт, Россия, Нижнекамск (stanislav_kuzin@mail.ru).

E. TUMAeva, S. KUZIN

MINIMIZATION OF ACTIVE POWER LOSS IN CABLE LINES OF ELECTRIC TRANSMISSION OF 0,4 KV AT OIL CHEMISTRY AND OIL REFINING ENTERPRISES

Key words: radial power supply schemes, individual reactive power compensation, optimum reactive power value, optimization problem, minimum active power loss, Lagrange multiplier method.

The solution of the optimization task is proposed, that is to minimize the active power losses in the radial power supply scheme by the optimal distribution between the compensating devices of the set value of the reactive power. A single-line scheme for air supply to a tire plant is considered, a mathematical model of the optimization problem is compiled based on the criterion of the minimum of active losses in transmission lines from the flow of reactive power. We obtained the results of distribution of best values of reactive power between compensating devices of asynchronous engines when providing the set $\tan \varphi$. A quantitative and cost assessment is given to decrease losses of active power in transmission lines when using condenser installations, reactive power of which is optimally distributed.

References

1. Belyavskiy R.V. Analiz vliyaniya koeffitsiyenta zagruzki asinkhronnykh dvigateley na potrebleniye reaktivnoy moshchnosti [Analysis of the effect of the load factor of asynchronous motors on the consumption of reactive power]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010, no. 6, pp. 66–69.
2. Karagodin V.V., Rybakov D.V. Optimizatsiya razmeshcheniya ustroystv kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh [Optimization of placement of devices

es for compensation of reactive power in distribution electric networks]. Voprosy elektromekhaniki [Issues of Electromechanics], 2014, no. 1, pp. 43–50.

3. Kostin V.N. *Optimizatsionnyye zadachi elektroenergetiki* [Optimization tasks of the electric power industry]. St. Petersburg, 2006, 128 p.

4. Tumaeva E.V., Popov A.V. *Algoritm rascheta optimal'nykh tokov momentnogo ventil'nogo dvigatelya v ustanovivshemysya rezhime raboty* [The algorithm for calculating the optimum currents of a torque valve motor in the steady state of operation]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, vol. 46, no. 19, pp. 86–91.

TUMAEVA ELENA – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises, Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, Russia, Nizhnekamsk (e.tumaeva@mail.ru).

KUZIN STANISLAV – Post-Graduate Student of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises, Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, Russia, Nizhnekamsk (stanislav_kuzin@mail.ru).

Формат цитирования: Тумаева Е.В., Кузин С.С. Минимизация потерь активной мощности в кабельных линиях электропередачи 0,4 кВ на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 154–160.

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) *присланный 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, заголовок выделяется 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

Афанасьев А.А. Расчёт магнитного редуктора методом разделения переменных Фурье.....	5
Афанасьев А.А., Ваткин В.А., Генин В.С., Ефимов В.В., Нестерин В.А., Романов Р.А. Аналитический расчёт беспазового микродвигателя, не имеющего статорного сердечника	13
Ермолаева Н.М., Кокорев Н.А., Щедрин В.А. Математическое моделирование и оптимизация неоднородных систем электроснабжения с трансформаторными связями	23
Ёрохов С.А. Комбинированное торможение как способ повышения энергоэффективности электропривода буровой лебедки	31
Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниатуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью	39
Кощеев М.И., Ларюхин А.А., Славутский А.Л. Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики	47
Львова Э.Л., Миронова А.Н. Расчет высших гармоник тока и реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей	59
Малинин Г.В., Софронов Д.А. Преобразователь солнечной энергии без звена постоянного тока	67
Муравьев А.В., Калинин А.Г., Мясникова Т.В. Управление энергосберегающими режимами насосных установок по критерию «баланс мощности»	75
Мясникова Т.В., Матюнин А.Н., Кириллова А.А. Моделирование фотоэлектрических панелей	83
Петров В.Н., Руссова Н.В., Самуилов Д.В., Свинцов Г.П. Результаты проектирования форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором	91
Попов Д.И. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей	102
Расулзода Х.Н., Щедрин В.А. Исследование переходных процессов в обмотке ротора гидрогенератора при коротких замыканиях в системе с учетом действия автоматического регулирования возбуждения	112
Рыбаков Л.М., Ласточкин С.В., Захватаева А.О. Совершенствование метода технического обслуживания и текущего ремонта для предотвращения развития дефектов у ослабленных элементов сельских распределительных сетей 10 кВ	119

Серебряков А.С., Осокин В.Л.

О разложении полной мгновенной мощности в цепи синусоидального тока
на мгновенную активную и мгновенную реактивную мощности 134

Скоморохов П.И., Зацепина В.И.

Обеспечение автономной работы устройств динамической компенсации
искажений напряжения посредством ионисторно-аккумуляторной схемы 146

Тумаева Е.В., Кузин С.С.

Минимизация потерь активной мощности в кабельных линиях электропередачи 0,4 кВ
на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки 154

Правила для авторов..... 161

CONTENTS

<i>Afanasyev A.</i> CALCULATION OF MAGNETIC GEAR BY SEPARATION FOURIER VARIABLES	5
<i>Afanasyev A., Vatin V., Genin V., Efimov V., Nesterin V., Romanov R.</i> ANALYTICAL CALCULATION OF SLOTLESS MICROMOTOR WITHOUT STATOR CORE	13
<i>Ermolaeva N., Kokorev N., Shchedrin V.</i> MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF HETEROGENEOUS POWER SYSTEMS WITH TRANSFORMER CONNECTIONS	23
<i>Erokhov S.</i> COMPOSITE BRAKING TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVE OF DRAWWORKS WINCH	31
<i>Kozlov V., Kirzhatskikh E., Giniatullin R.</i> TRANSIENT RESISTANCE INFLUENCE ON ONE-PHASE GROUND FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION GRIDS WITH ISOLATED NEUTRAL WIRE	39
<i>Koshcheev M., Lariukhin A., Slavutskiy A.</i> APPLICATION OF ADAPTIVE NEURO ALGORITHMS FOR RECOGNITION OF ANOMALOUS BEHAVIOUR OF SECONDARY EQUIPMENT SYSTEMS IN ELECTRIC POWER INDUSTRY	47
<i>Lvova E., Mironova A.</i> CALCULATION OF HIGHER HARMONIC CURRENT AND REACTIVE POWER OF ARC STEEL-MELTING FURNACES	59
<i>Malinin G., Sofronov D.</i> SOLAR POWER CONVERTER WITHOUT DC LINK	67
<i>Muravyev A., Kalinin A., Myasnikova T.</i> ENERGY SAVING OF CONTROLLED PUMPS ACCORDING TO POWER BALANCE.....	75
<i>Myasnikova T., Matyunin A., Kirillova A.</i> PHOTOVOLTAIC PANEL MODELING.....	83
<i>Petrov V., Russova N., Samuilov D., Svintsov G.</i> DESIGN RESULTS OF FORCED VALVE ELECTROMAGNETIC CONSTANT VOLTAGE IN THE SCHEME WITH BALLAST RESISTOR	91
<i>Popov D.</i> COMPUTER MODELLING OF ELECTRO-TECHNICAL COMPLEX TO TEST FOUR-PHASE INDUCTION TRACTION MOTORS.....	102
<i>Rasulzoda Kh., Shchedrin V.</i> STUDIES OF TRANSIENTS IN ROTOR WINDING OF HYDROGENERATOR WITH VARIOUS SHORT CIRCUITS IN SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT ACTIONS OF AEC	112
<i>Rybakov L., Lastochkin S., Zakhvataeva A.</i> IMPROVEMENTS OF TECHNIQUES FOR MAINTANACE AND REPAIR TO PREVENT GROWTH OF DEFECTS IN WEAKENED PARTS OF RURAL DISTRIBUTION NETWORKS OF 10 kV	119

Serebryakov A., Osokin V.

EXPANSION OF FULL INSTANTANEOUS POWER IN CIRCUIT
OF SINUSOIDAL CURRENT ON INSTANTANEOUS ACTIVE
AND INSTANTANEOUS REACTIVE POWER 134

Skomorokhov P., Zatsepina V.

ENSURING AUTONOMOUS WORK OF DEVICES OF DYNAMIC COMPENSATION
OF VOLTAGE DISTORTION BY MEANS OF IONISTOR-BATTERY CIRCUIT 146

Tumaeva E., Kuzin S.

MINIMIZATION OF ACTIVE POWER LOSS IN CABLE LINES
OF ELECTRIC TRANSMISSION OF 0,4 kV AT OIL CHEMISTRY
AND OIL REFINING ENTERPRISES 154

RULES FOR THE AUTHORS 161

ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Технические науки

№ 1 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 09.01.19. Подписано в печать 21.03.19. Выход в свет 25.03.19.
Формат 70×100/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 13,38. Уч.-изд. л. 13,45.

Тираж 200 экз. Заказ № 347. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя
428015, Чебоксары, Московский просп., 15

Типография Чувашского университета
428015, Чебоксары, Московский просп., 15