

ISSN 1810-1909

Вестник

ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 2018

Технические науки

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 (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, доцент (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.

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 2018

Technical Sciences

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 (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 into the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications issued in the Russian Federation where the main scientific results of doctoral theses are to be published.

Address: 15, Moskovskiy pr., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russia
Tel. +7(8352)45-20-96, 58-33-63 (2030)
E-mail: vestnik@chuvsu.ru
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

УДК 621.313
ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ, В.В. ЕФИМОВ, Д.А. ТОКМАКОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ МАГНИТНОГО РЕДУКТОРА С ОБМОТКОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СТАТОРЕ

Ключевые слова: зубцовая обмотка, электромагнитный момент статора, магнитная проводимость модулятора, экспериментальный магнитный редуктор, опытные значения моментов роторов, аналитический и численный расчёты.

Электромагнитные моменты роторов магнитного редуктора будут всегда присутствовать, если имеется электромагнитный момент обмотки статора. Для нахождения электромагнитных моментов роторов редуктора достаточно определить электромагнитный момент статора. При использовании резольверов в схеме управления преобразователем частоты ток статора может иметь форму, близкую к синусоидальной, и находиться в фазе (генераторный режим) или в противофазе (двигательный режим) с ЭДС холостого хода обмотки статора. В этом режиме все электромагнитные моменты прямо пропорциональны току статора и не имеют предельных «опрокидывающих» значений, которые наблюдаются у нерегулируемых магнитных редукторов с постоянными магнитами на статоре и внутреннем роторе. Показано, что с ростом тока статора угол нагрузки синхронной машины увеличивается, но предельного значения, равного $\pi/2$, он достигает только при бесконечно большом токе статора. Опытные и расчётные значения моментов, полученные по данным аналитических и численных вычислений, имеют достаточно близкие уровни.

Магнитный редуктор (МР) с трёхфазной многополюсной обмоткой на статоре, питаемой от статического преобразователя частоты (ПЧ), имеет регулируемый коэффициент редукции выходных валов [4, 5].

При сравнительно малой мощности ПЧ, исчисляемой десятками киловатт, большое число пар полюсов на статоре может достигаться путем применения зубцовых обмоток, катушки которых расположены на каждом зубце.

В более мощных редукторах, имеющих достаточно большие диаметры расточки статора, могут использоваться классические распределённые обмотки статора с большим числом пар полюсов.

Электромагнитные моменты. Будем рассматривать электрическую машину-редуктор с зубцовой обмоткой, которая имеет три канала управления: два механических (входной и выходной валы) и электрический (обмотку статора, питаемую через регулируемый статический ПЧ от сети переменного или постоянного тока).

При работе магнитного редуктора в режиме мультипликатора наружный ротор является входным, а внутренний ротор – выходным.

В режиме, когда ПЧ обеспечивает питание катушек обмотки статора постоянным током (частота тока $\omega = 0$), мощности входного и выходного валов одинаковы:

$$M_1\Omega_1 = M_2\Omega_2, \quad \frac{M_2}{M_1} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}, \quad (1)$$

где $M_1, M_2, \Omega_1, \Omega_2$ – электромагнитные моменты и скорости вращения входного и выходного валов, соответственно.

Физические основы формирования электромагнитных моментов M_1 и M_2 базируются на взаимодействии независимых магнитных потоков статора и внутреннего ротора. А природа источников этих магнитных потоков (магниты, постоянный или переменный ток) в рассматриваемом процессе несущественна. Поэтому у магнитного редуктора на переменном токе, как и у редукторов с использованием постоянного тока или только постоянных магнитов, соотношение электромагнитных моментов M_1 и M_2 с учетом различия их в знаках определяется формулой

$$\frac{M_1}{M_2} = -\frac{z}{z - p_1}, \quad (2)$$

где z – число стержней модулятора (тихоходного ротора); p_1 – число пар полюсов обмотки статора [1].

Следовательно, если известен момент одного из валов, то можно считать известным и момент другого вала. Скорости вращения валов Ω_1 и Ω_2 должны удовлетворять выражению

$$\Omega_2 = \frac{z}{z - p_1} \Omega_1 + \frac{\omega}{z - p_1}, \quad (3)$$

где ω – угловая частота тока источника питания обмотки статора [1].

Умножим левую и правую части равенства (3) на момент M_2 и, учитывая соотношение моментов (2), получим

$$M_2 \Omega_2 = -M_1 \Omega_1 + M_2 \frac{\omega}{z - p_1}. \quad (4)$$

Разница между мощностями $M_2 \Omega_2$ и $M_1 \Omega_1$ в формуле (4), очевидно, представляет собой электромагнитную мощность синхронной машины P_3 , которой обменивается обмотка статора с питающей сетью

$$P_3 = M_3 \frac{\omega}{p_1}, \quad (5)$$

где M_3 – электромагнитный момент, создаваемый обмоткой статора и воздействующий на сердечник статора.

Следовательно, для второго слагаемого в правой части формулы (4) справедливо равенство

$$M_2 \frac{\omega}{z - p_1} = M_3 \frac{\omega}{p_1}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) с учётом соотношения моментов (2) позволяет установить связь моментов M_1 и M_2 с электромагнитным моментом M_3

$$M_1 = -M_3 \frac{z}{p_1}, \quad M_2 = M_3 \frac{z - p_1}{p_1}. \quad (7)$$

Из выражений (7) следует принципиально важное равенство

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0, \quad (8)$$

подтверждающее известный постулат механики, что для равновесия твёрдого тела необходимо, чтобы сумма всех сил, действующих на тело, и сумма моментов этих сил равнялись нулю.

Формулы (7) также указывают на два важных вывода:

1. Электромагнитные моменты M_1 и M_2 будут всегда присутствовать, если имеется электромагнитный момент M_3 .

2. Для нахождения электромагнитных моментов M_1 и M_2 по формулам (7) достаточно определить электромагнитный момент M_3 .

Электромагнитный момент, действующий на статор с трёхфазной обмоткой, находится по классической формуле [3]

$$M_3 = -\frac{3}{2} p_1 (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d). \quad (9)$$

Появление знака минус перед скобкой в формуле (9) показывает, что этот момент противоположен по знаку и равен по модулю моменту, приложенному к наружной поверхности модулятора, расположенной на другой стороне воздушного зазора.

При использовании резольверов в схеме управления ПЧ ток статора может иметь форму, близкую к синусоидальной, и находиться в фазе (генераторный режим) или в противофазе (двигательный режим) с ЭДС холостого хода обмотки статора. Для этих режимов имеем

$$i_d = 0; i_q = \pm I_m; \Psi_d = -\frac{4}{\pi} L_{af} h_m H_{CB}; \Psi_q = L_q i_q, \quad (10)$$

где верхний знак соответствует генераторному, нижний – двигательному режиму статора синхронной машины; I_m – амплитуда тока статора; h_m , H_{CB} – высота и коэрцитивная сила по индукции магнитов внутреннего ротора; L_q – индуктивность обмотки статора по поперечной оси; L_{af} – индуктивность взаимной индукции магнитов внутреннего ротора с обмоткой статора:

$$L_{af} = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} l \tau_1 \Lambda_{1m}'' w_1 k_{w1} \quad (11)$$

(здесь Λ_{1m}'' – амплитуда первой гармоники удельной магнитной проводимости (с размерностью 1/м) модулятора для поверхности расточки статора).

После подстановки формул (10) в выражение (9) для электромагнитного момента M_3 получим

$$M_3 = -\frac{3}{2} p_1 \Psi_d i_q = \pm \frac{6}{\pi} p_1 h_m L_{af} H_{CB} I_m. \quad (12)$$

Формула (12) и связанные с ней формулы (7) показывают, что моменты M_3 , M_1 и M_2 прямо пропорциональны току статора и не имеют предельных «опрокидывающих» значений, которые наблюдаются у нерегулируемых магнитных редукторов с постоянными магнитами на статоре и внутреннем роторе.

Для рабочих режимов совмещённой синхронной машины с магнитным редуктором справедливы векторные диаграммы, показанные на рис. 1. Из диаграммы двигательного режима на рис. 1, б видно, что с ростом тока статора угол нагрузки θ синхронной машины увеличивается, но предельного значения, равного $\pi/2$, он достигает только при бесконечно большом токе статора ($\lim_{I_m \rightarrow \infty} \theta = \pi/2$).

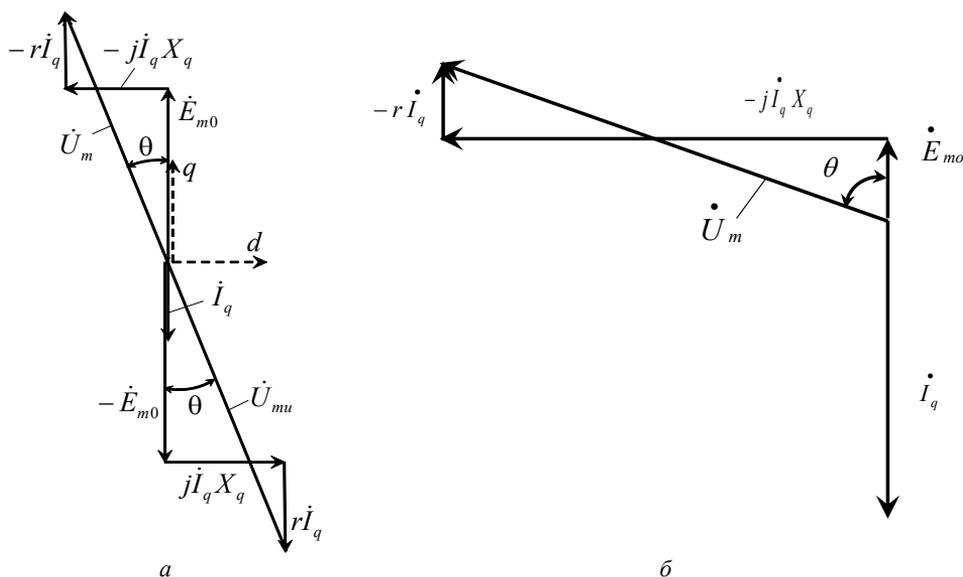


Рис. 1. Векторные диаграммы двигательного режима совмещённой синхронной машины с редуктором:

a – режим с отсутствием продольного тока статора;

б – векторная диаграмма с большим перегрузочным током статора $i = i_q$, превышающим номинальный уровень

Экспериментальный образец магнитного редуктора имеет следующие параметры¹:

$$w_1 = 720, k_{w1} = 0,825, p_1 = 17, z = 19, \tau_1 = 0,014 \text{ м}, l = 0,17 \text{ м},$$

$$h_m = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \Lambda_{m1}'' = 74,2 \text{ м}^{-1}, H_{CB} = 800 \cdot 10^3 \text{ А/м}, I_m = \sqrt{2} \cdot 5 \text{ А}.$$

После подстановки этих параметров в формулы (11), (12), (7) будем иметь

$$L_{af} = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} l \tau_1 \Lambda_{lm}'' w_1 k_{w1} = 0,0297 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, M_s = 39,82 \text{ Нм}, M_1 = 44,51 \text{ Нм},$$

$$M_2 = 4,69 \text{ Нм}.$$

При питании обмотки статора этого МР постоянным током величиной 5 А от ПЧ измеренное в опыте значение электромагнитного момента M_1 модулятора составило 50 Нм.

Численный расчёт электромагнитных моментов экспериментально-го образца МР. Схема соединения зубцовых катушек обмотки показана на рис. 2.

¹ Экспериментальный образец МР выполнен на базе асинхронного двигателя АИР 132 М6 У2 мощностью 7,6 кВт, изготовленного ООО «НасосЭлектроПром». Наружный и внутренний диаметры модулятора равны, соответственно, 147,5 и 127 мм. Амплитудное значение первой гармоники магнитной проводимости Λ_{m1}'' было найдено в результате численного расчёта магнитного поля МР [2].

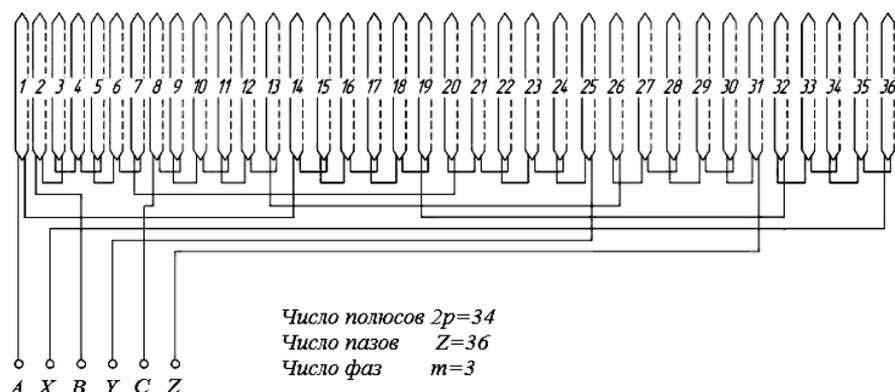


Рис. 2. Схема обмотки статора

Разложим магнитодвижущую силу (МДС) этой обмотки в ряд Фурье, выбрав в соответствии со схемой обмотки статора пространственный период магнитного поля $T_1 = z_1 t_z$ и основную частоту $\Omega = 2\pi/T_1$. Имеем косинусные $a_v(k)$ и синусные $b_v(k)$ коэффициенты эти рядов

$$a_v(k) = \frac{2}{T_1} \sum_n \int_{x_{nv}}^{t_z} i_v \hat{w} \cos(k\Omega x), \quad b_v(k) = \frac{2}{T_1} \sum_n \int_{x_{nv}}^{t_z} i_v \hat{w} \sin(k\Omega x), \quad (13)$$

где $v = A, B, C$; $i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t$, $i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 2\pi/3)$, $i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 4\pi/3)$ – первые гармоники тока статора, сформированные статическим преобразователем частоты; t_z – зубцовое деление статора; $n = 1, \dots, z_1$ – номер зубцовой катушки, принадлежащей соответствующей фазе v .

Для МДС обмотки статора будет справедливо

$$F_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \{ [a_A(k) + a_B(k) + a_C(k)] \cos(k\Omega x) + [b_A(k) + b_B(k) + b_C(k)] \sin(k\Omega x) \}. \quad (14)$$

Амплитуда каждой k -й гармоники МДС обмотки определится по формуле

$$F(k) = \sqrt{[a_A(k) + a_B(k) + a_C(k)]^2 + [b_A(k) + b_B(k) + b_C(k)]^2}. \quad (15)$$

На рис. 3. показан график зависимости (15) для фазного тока $I = 5$ А. Видим, что данная обмотка может использоваться при числе пар полюсов 17 и 19. Наибольшую амплитуду МДС она будет иметь при выбранном числе пар полюсов 17. Соседняя гармоника с порядком $v = 19$, имея соизмеримую амплитуду с рабочей гармоникой $v = 17$, может вызывать вибрацию и шум МР.

Видим, что кривая МДС не содержит чётных гармоник, 15-я гармоника составляет почти половину от основной.

Форма МДС обмотки, рассчитанная по формуле (14) для фазного тока $I = 5$ А, показана на рис. 3 для времени $t = 0$. В это время ток в фазе A максимален. Пространственный период обмотки T_1 равен всей длине окружности с диаметром расточки статора. Видим, что амплитудные значения МДС у зон фазы A больше, чем у остальных зон, принадлежащих фазам B и C .

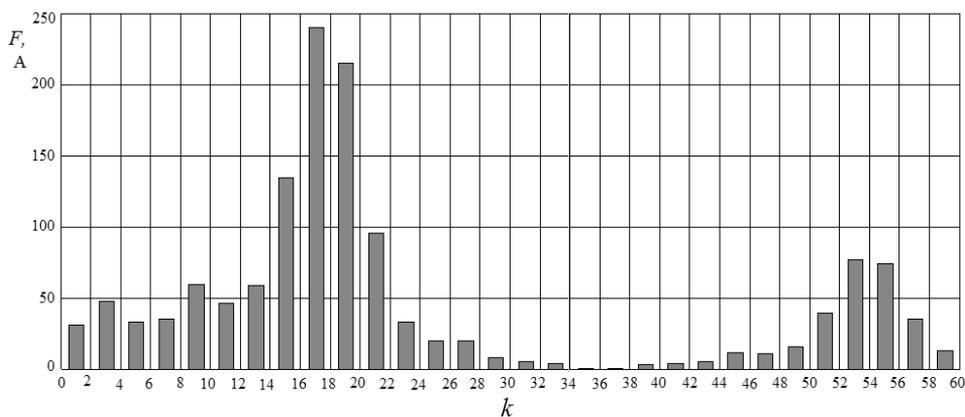


Рис. 3. Гармонический состав МДС обмотки статора
(17-я гармоника – рабочая)

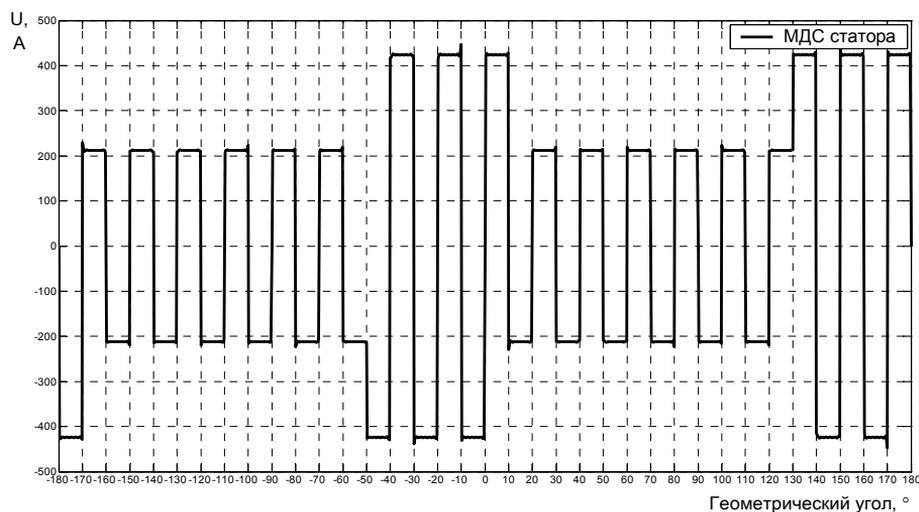


Рис. 4. Форма МДС обмотки статора для времени $t = 0$
(максимальную амплитуду имеют катушки фазы А)

Был произведен численный расчёт МР с указанной обмоткой методом сопряжения конформных отображений. В качестве источника магнитного поля статора использовалась МДС обмотки, представляемая аналитической зависимостью (14), причём дискретные значения этой МДС присваивались соответствующим точкам наблюдения, расположенным на поверхности расточки статора.

Воздушный зазор между статором и наружной поверхностью модулятора принимался равным 0,5 мм.

Расчётная область МР показана на рис. 5.

На рис. 6 показаны результаты численного расчёта электромагнитных моментов МР с рассматриваемой обмоткой статора, обтекаемой постоянным током 5 А. Видим, что они содержат высокочастотные пульсации, амплитуда которых соизмерима с величиной электромагнитного момента быстроходного ротора.

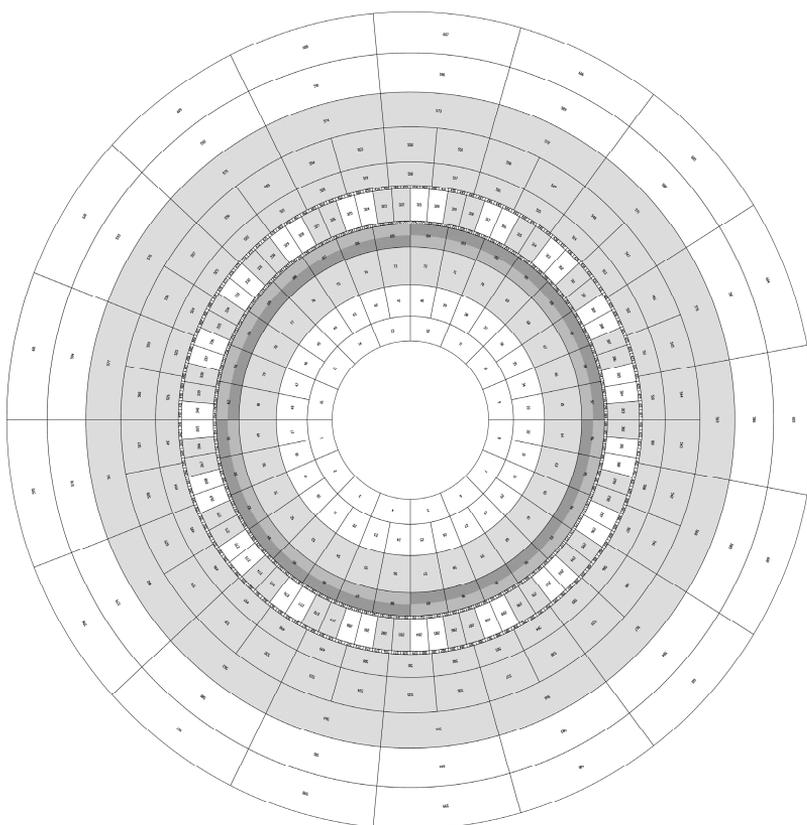


Рис. 5. Расчётная область МР

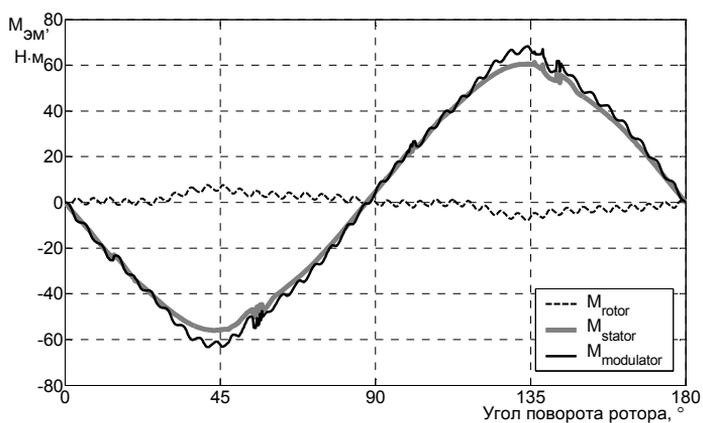


Рис. 6. Кривые электромагнитных моментов валов МР, по обмотке статора которого протекает постоянный ток 5 А

Следует также обратить внимание, что электромагнитный момент, воздействующий на внутреннюю поверхность статора (он совпадает с электромагнитным моментом, действующим на наружную поверхность модулятора), не содержит высокочастотных пульсаций.

Кривые магнитной индукции на поверхности магнитов внутреннего ротора и на средней окружности наружного воздушного зазора при токе 5А в обмотке статора показаны на рис. 7. Импульсные выбросы индукции связаны с резким изменением МДС обмотки статора на краях полюсных зон.

Средние уровни индукции на поверхностях внутреннего ротора и снаружи модулятора составляют примерно 0,8 и 1,5 Тл, соответственно.

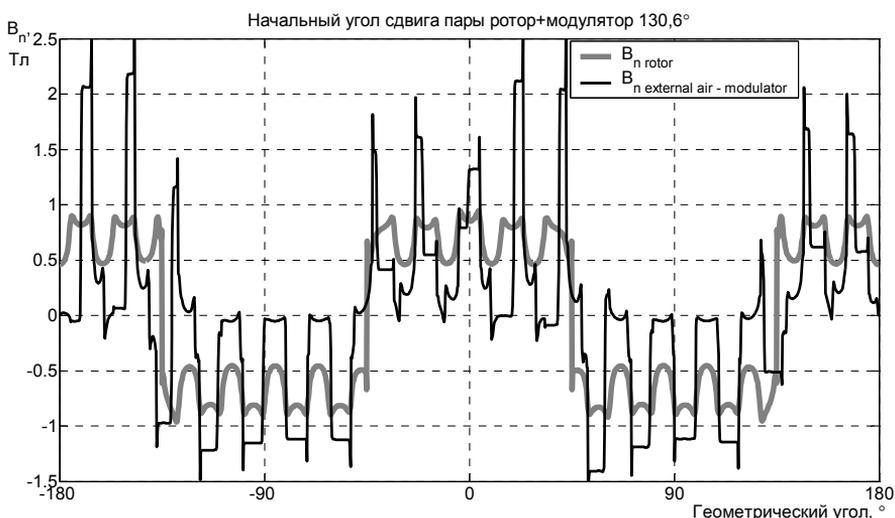


Рис. 7. Распределение магнитной индукции на наружной поверхности магнитов внутреннего ротора и на середине внешнего воздушного зазора при постоянном токе статора 5 А

Выводы. 1. Электромагнитные моменты роторов M_1 и M_2 МР являются следствием наличия электромагнитного момента M_3 статора.

2. Электромагнитные моменты M_1 и M_2 роторов жёстко связаны с электромагнитным моментом M_3 статора через постоянные коэффициенты. Все три момента прямо пропорциональны активному току обмотки статора. При отсутствии активного тока статора электромагнитные моменты M_3 , M_1 и M_2 равны нулю.

3. Режим отсутствия «опрокидывания» роторов МР с трёхфазной обмоткой статора будет возможен до тех пор, пока ПЧ способен наращивать свой ток.

Литература

1. *Афанасьев А.А.* Аналитические и численные методы решения задач электромеханики на основе комплексного магнитного потенциала. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. 430 с.
2. *Афанасьев А.А., Дмитренко А.М., Ефимов В.В.* Магнитная проводимость модулятора магнитного редуктора // *Электротехника*. 2017. № 7. С. 11–14.
3. *Важнов А.И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 256 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.
5. *Jian Linni, Chau K.T., Yu Gong A.O.* Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies. *IEEE Transactions on magnetic*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529.

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

ЕФИМОВ ВЯЧЕСЛАВ ВАЛЕРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, главный специалист отдела электрических машин, ЗАО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары.

ТОКМАКОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – технический директор, ЗАО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары.

A. AFANASYEV, V. EFIMOV, D. TOKMAKOV

**ELECTROMAGNETIC MOMENTS OF MAGNETIC GEARBOX
WITH ALTERNATING CURRENT WINDING ON STATOR**

Key words: tooth winding, electromagnetic torque of stator, magnetic conductivity of modulator, experimental magnetic gearbox, experimental values for moments of the rotors, analytical and numerical computations.

There are always electromagnetic moments of the rotors of the magnetic gear if there is an electromagnetic torque of the stator winding. To find electromagnetic moments of the rotors of the gearbox it is sufficient to determine the electromagnetic torque of the stator. When using resolvers in the control circuit by the frequency, converter current of the stator may have a shape close to sinusoidal and be in phase (generator mode) or in anti phase (motional mode) with EMF of the stator winding idling. In this mode, all electromagnetic moments are directly proportional to stator current and have no ultimate «tiping» values, which are observed in the unregulated magnetic gear with a permanent magnet stator and inner rotor. It is shown that when stator current increases load angle of the synchronous machine increases, but it reaches the limit values equal to $\pi/2$ only in case of an infinitely large current of the stator. Experienced and calculated values of moments obtained according to analytical and numerical computations have similar levels.

References

1. Afanasyev A.A. *Analiticheskie i chislennye metody resheniya zadach elektromekhaniki na osnove kompleksnogo magnitnogo potentsiala* [Analytical and numerical methods of solution of problems of electromechanics on the basis of complex magnetic potential]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2017. 430 p.
2. Afanasyev A.A., Dmitrenko A.M., Efimov V.V. *Magnitnaja provodimost' modulyatora magnitnogo reduktora* [The magnetic conductivity of the magnetic modulator reducer]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2017, no. 7, pp. 11–14.
3. Vazhnov A.I. *Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Leningrad, Energy Publ., 1980, 256 p.
6. 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.
4. Jian Linni, Chau K.T., Yu Gong A.O. Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies. *IEEE Transactions on magnetic*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529.

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

EFIMOV VYACHESLAV – Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Department of Electrical Machines, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary.

TOKMAKOV DMITRY – Technical Director, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary.

Ссылка на статью: Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Токмаков Д.А. Электромагнитные моменты магнитного редуктора с обмоткой переменного тока на статоре // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 5–13.

УДК 621.3.027.3

ББК 31.2

В.В. АШМАРИН, А.А. БЛОХИНЦЕВ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ШУНТИРУЮЩЕГО РАЗРЯДНИКА
ДЛЯ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ,
РАБОТАЮЩИХ НА МАЛОИНДУКТИВНЫЕ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

Ключевые слова: шунтирующий режим, цепь разряда, ускорители масс, коммутатор, интеграл действия, оптимизация параметров.

Предложены аналитические выражения для расчета шунтирующего режима емкостного накопителя энергии при его работе на малоиндуктивные ускорители масс. Проведен анализ экспериментальных исследований по влиянию параметров цепи шунтирования на эффективность режима. Установлено, что использование шунтирующего режима накопителя с целью повышения эффективности работы электродинамических ускорителей масс целесообразно при следующих соотношениях параметров цепи шунтирования и нагрузки: индуктивности $L_2 \leq 0,05 L_3$; сопротивлении канала $R \leq 0,05 \omega L_3$. Разработана и исследована конструкция твердотельного многоканального разрядника, позволяющая реализовать приведенные соотношения: сопротивление канала $R < 1$ мОм, индуктивность $L_2 < 5$ нГн.

Для исследования процессов, связанных с силовым воздействием сильных импульсных магнитных полей мегагауссового диапазона на проводящие материалы, широкое применение нашли экспериментальные стенды с электродинамическими ускорителями масс, в которых в качестве источника энергии используют мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ) многомодульного использования с запасаемой энергией сотни килоджоулей. Результаты моделирования на таких стендах процессов высокоскоростных соударений в широком диапазоне изменения масс и скоростей взаимодействующих тел позволяют разработать методику проектирования средств микрометеорной защиты элементов конструкций летательных аппаратов. Для этой цели применяют электродинамические ускорители масс с отдельным регулированием тока в метаемом теле и тока в соленоиде, в рабочей зоне которого создается ускоряющее магнитное поле. Плотность тока в метаемом проводнике выбирается из условия получения предельно допустимых по условиям нагрева скоростей метания таким образом, чтобы в момент соударения с преградой проводник был в твердом состоянии. На получение максимально достижимых индукций внешнего ускоряющего магнитного поля накладываются ограничения, связанные с прочностными характеристиками материала соленоида. Существенное замедление скорости нарастания поля с индукцией более 50 Тл связано с резко нелинейной диффузией магнитного поля в металл и разрушением токонесущего скин-слоя окна соленоида, в зоне которого происходит процесс метания. Разрушение происходит вследствие выброса металла из нагретого импульсным током разряда ЕНЭ (сотни килоампер) скин-слоя возникающими пондеромоторными силами и сопровождается радиальным и осевым течением металла за счет его пластической деформации. При

этом происходят увеличение начального размера окна соленоида, возрастание его индуктивности и снижение достижимых в эксперименте индукций ускоряющего магнитного поля и скорости метания. Существенное увеличение первоначальных размеров окна за счет взрыва скин-слоя наблюдается лишь после первого максимума тока разряда ЕНЭ ($t > T/4$, где T – период разрядного тока) и происходит со скоростью более 500 м/с при $B_m = 75$ Тл. Так как пластическая деформация металлов развивается сравнительно медленно, электрический взрыв токонесущей поверхности окна соленоида является основным препятствием при получении быстронарастающих полей и больших значений скорости метания.

Одним из способов снятия этого ограничения является использование униполярной формы импульса разряда. Это может быть достигнуто включением в момент максимума тока разряда ЕНЭ малоиндуктивного устройства, шунтирующего нагрузку. При этом форма напряжения на конденсаторах ЕНЭ близка к апериодической, что значительно повышает ресурс работы конденсаторов накопителя энергии и позволяет более эффективно использовать запасенную в конденсаторах энергию.

Однако к шунтирующим разрядникам предъявляются более жесткие требования по сравнению со стартовыми разрядниками по собственной индуктивности, рабочему току и управлению их синхронным срабатыванием в условиях, когда напряжение на главных электродах стартового разрядника близко к нулю. Обзор публикаций по шунтирующим разрядникам [5–7] показывает, что отсутствуют описания конструкций шунтирующих разрядников, позволяющих организовать стабильный многоканальный искровой разряд с малой индуктивностью и активным сопротивлением цепи разряда. Особенно это важно в случае, когда величина токов коммутации составляет сотни килоампер и встает вопрос о повышении эрозионной стойкости электродов разрядника, влияющей на стабильность срабатывания с минимальным разбросом временных характеристик.

Реализация шунтирующего режима ЕНЭ на практике затруднена ввиду отсутствия аналитического выражения для определения основных параметров шунтирующего разрядника, влияющих на форму кривой тока в нагрузке. Кроме того, нет инженерно обоснованных технических решений, позволяющих обеспечить шунтирование нагрузки в виде электродинамических устройств с малой индуктивностью ($L_3 = 50\text{--}700$ нГн) при рабочем напряжении ЕНЭ, близком к нулю.

В настоящей статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих обоснованно определять параметры шунтирующих разрядников, обеспечивающих эффективность режима шунтирования малоиндуктивной нагрузки.

Схема замещения ЕНЭ с шунтирующим разрядником приведена на рис. 1, где C_0 – емкость накопителя; L_1 – индуктивность кабельной ошиновки и стартового разрядника; L_2 и R – индуктивность и активное сопротивление

шунтирующего разрядника, соответственно; L_3 – индуктивность кабельной ошиновки токосборного коллекторного узла и нагрузки.

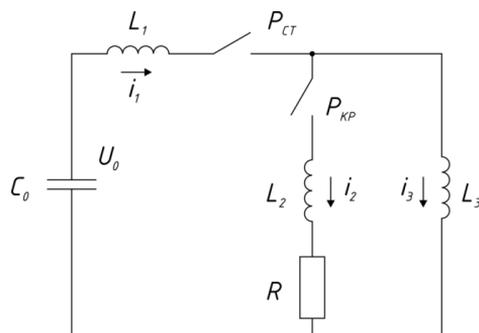


Рис. 1. Схема замещения ЕНЭ с шунтирующим разрядником

Процесс коммутации происходит следующим образом. После срабатывания стартового разрядника P_{CT} накопитель энергии начинает разряжаться на нагрузку. Напряжение на емкости C_0 изменяется по косинусоидальному закону. В момент максимума тока, когда напряжение на емкостях накопителя близко к нулю, происходит срабатывание шунтирующего разрядника P_{KP} , и ток в нагрузке будет экспоненциально затухать с постоянной времени, определяемой параметрами R – L – C цепи.

Используя метод контурных токов, запишем уравнения, позволяющие провести численный анализ переходных процессов в приведенной схеме замещения при шунтировании нагрузки в момент времени $t_{III} = T/4$.

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + R(i_3 + i_1) + L_2 \frac{d(i_3 - i_1)}{dt} = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt; \\ L_3 \frac{di_3}{dt} + R(i_3 - i_1) + L_2 \frac{d(i_3 - i_1)}{dt} = 0; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{i_1}{C}; \frac{d\theta}{dt} = i_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

где $i_1(t)$ и $i_3(t)$ – токи в контурах; $\varphi(t) = U_0(0) - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt$ – напряжение на емкости C_0 ; $\theta(t) = \int_0^t i_3^2 dt$ – интеграл действия тока.

Для решения исходной системы (1) приведем ее в безразмерный вид, вводя базисные величины:

$$\begin{aligned} U_6 &= U_0; C_6 = C_0; L_6 = L_3; R_6 = \sqrt{\frac{L_6}{C_6}} = \sqrt{\frac{L_3}{C_3}}; \\ I_6 &= U_6 \sqrt{\frac{C_6}{U_6}} = U_0 \sqrt{\frac{C_0}{L_3}}; t_6 = \sqrt{L_6 C_6} = \sqrt{L_3 C_0}. \end{aligned}$$

В безразмерных переменных приведенная система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{d\tau} = \frac{1}{\lambda_0 + \lambda_3 + \lambda_0\lambda_3} [(1 + \lambda_3)\varphi + (I_3 - I_1)\rho]; \\ \frac{dI_2}{d\tau} = \frac{1}{\lambda_0 + \lambda_3 + \lambda_0\lambda_3} [\lambda_3\varphi + (I_3 - I_1)\rho\lambda_0]; \\ \frac{d\varphi}{d\tau} = -I_1; \frac{d\theta}{d\tau} = i_3^2, \end{cases} \quad (2)$$

где $I = \frac{i}{i_6}$; $\lambda_0 = \frac{L_1}{L_6}$; $\rho = \frac{R}{R_6}$; $\lambda_3 = \frac{L_3}{L_6}$; $\tau = \frac{t}{t_6}$; $\varphi = \frac{U_0}{U_6}$.

Начальные условия для момента $\tau = \tau_0 = 0$ можно записать следующим образом:

$$I_1(0) = I_3(0) = I_0 = \frac{1}{1 + \lambda_0} = 0,9; \varphi(0) = \varphi_0.$$

Система приведенных уравнений (2) решалась методом Кутта – Мерсона для широкого диапазона изменяющихся параметров при следующих исходных данных: $C_0 = 108$ мкФ, $U_0 = 20$ кВ, $L_1 = 137$ нГн, $L_3 = (50-750)$ нГн, $T/4 = 13$ мкс. Зависимости тока в нагрузке от времени при различных параметрах шунтирующего разрядника, полученные в результате проведенного численного моделирования, приведены на рис. 2.

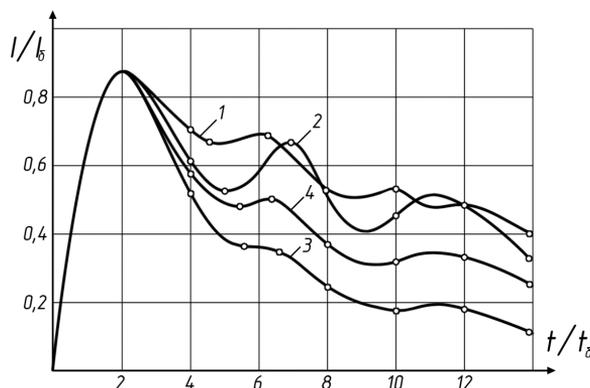


Рис. 2. Зависимость тока нагрузки от времени в шунтирующем режиме
 при 1 – $L_3 = 511$ нГн, $L_2 = 20$ нГн, $R = 5$ МОм; 2 – $L_2 = 20$ нГн, $R = 10$ МОм;
 3 – $L_2 = 20$ нГн, $R = 15$ МОм; 4 – $L_2 = 40$ нГн, $R = 5$ МОм

Для оценки эффективности применения шунтирующего режима ЕНЭ принималось условие, что интеграл действия тока $Q_{кр}$ за первый период T его изменения должен быть больше или равен половине суммы интегралов действия тока для синусоидальной формы кривой

$$Q_{син} = \frac{1}{\omega} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = 0,5 I_m^2 t \quad (3)$$

и для идеального шунтирования

$$Q_{\text{ид}} = \frac{1}{\omega} \int_0^{T/4} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = 0,5 I_m^2 t + \int_{T/4}^T I_m^2 dt = 0,875 I_m. \quad (4)$$

Или можно записать это условие в виде

$$Q_{\text{кр}} \geq Q_{\text{крит}} = \frac{Q_{\text{син}} + Q_{\text{ид}}}{2} = 0,6875 I_m^2. \quad (5)$$

Экспертная оценка степени влияния активного сопротивления R и индуктивности L_2 шунтирующего разрядника на интеграл действия $Q_{\text{кр}}$ показала, что его значение уменьшается с увеличением активного сопротивления и индуктивности цепи шунтирования, причем основной вклад вносит изменение активного сопротивления. С целью определения значений $Q_{\text{кр}}$ в зависимости от величин R и L_2 при варьировании индуктивности нагрузки L_3 в диапазоне, характерном для электродинамических ускорителей, были приведены экспериментальные исследования на разработанной конструкции четырехканального канального разрядника с искажением поля и двумя управляющими электродами на канал, описанной в [1, 2]. Принципиальная электрическая схема электрофизической установки с накопителем энергии многомодульного исполнения с шунтирующими разрядниками приведена на рис. 3.

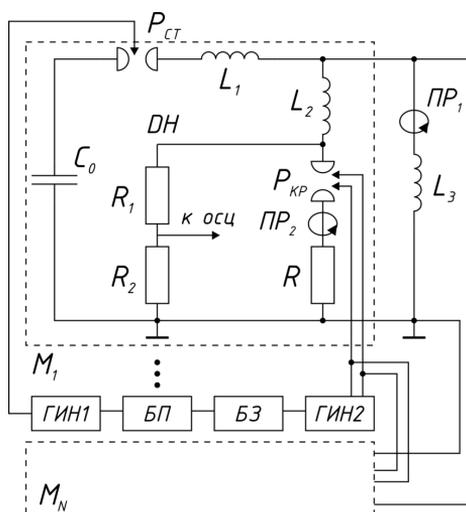


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема емкостного накопителя энергии с шунтирующими разрядниками $C_0 = 108$ мкФ – емкость модуля емкостного накопителя; $P_{ст}$ – стартовый разрядник; $L_1 = 137$ нГн – индуктивность кабельной ошиновки и стартового разрядника; $P_{кр}$ – шунтирующий разрядник; L_2 и R – индуктивность и активное сопротивление шунтирующего разрядника; L_3 – индуктивность нагрузки; ГИН1, ГИН2 – генераторы импульсных напряжений; $M_1 \dots M_N$ – модули емкостного накопителя энергии; БП – блок поджига; БЗ – блок задержки

В эксперименте использовался один модуль установки с запасаемой энергией $W_1 = 45$ кДж (15 конденсаторов марки ИК-25/12, $U_{\text{раб}} = 20$ кВ). По-

сле срабатывания стартового разрядника $P_{ст}$ модуль ЕНЭ разряжается в колебательном режиме на нагрузку с индуктивностью L_3 . Управление срабатыванием $P_{ст}$ осуществлялось от трехступенчатого генератора импульсов напряжения ГИН-1 с параметрами импульса – $U_{m1} = 100$ кВ, $\tau_{фр1} = 80$ нс. В момент максимума тока ($t = T/4$) на управляющие электроды шунтирующего разрядника $P_{кр}$ подавался импульс напряжения от генератора импульсов ГИН-2 с параметрами – $U_{m2} = 100$ кВ, $\tau_{фр2} = 10$ нс. Требуемая задержка времени срабатывания ГИН-2 обеспечивалась блоком задержки БЗ. Управляющие высоковольтные импульсы на срабатывание блоков ГИН-1, ГИН-2, БЗ формировались блоком поджига БП и подавались на них по системе коаксиальных кабелей. Значение индуктивности нагрузки L_3 варьировалось в диапазоне от 100 до 750 нГн, характерном для электродинамических ускорителей масс. С целью выяснения влияния индуктивности L_2 шунтирующего разрядника на интеграл действия тока $Q_{кр}$ последовательно с ним включалась металлическая петля с изменяющейся площадью витка. Величина индуктивности L_2 определялась по периоду разрядного тока $i_2(t)$ в цепи шунтирования. Влияние активного сопротивления R шунтирующего разрядника на значение $Q_{кр}$ учитывалось путем изменения числа параллельных каналов разряда в коммутаторе. При этом сопротивление R определялось путем деления активной составляющей падения напряжения на дуговом канале на величину тока, протекающего в цепи шунтирования. Напряжение на дуге измерялось омическим делителем напряжения с коэффициентом деления $K_{дел} = 28$, а амплитудные значения токов $i_2(t)$ и $i_3(t)$ и их форма контролировались измерительными поясами Роговского РП₁ и РП₂. Характерная осциллограмма токов в нагрузке и в шунтирующей цепи приведена на рис. 4.

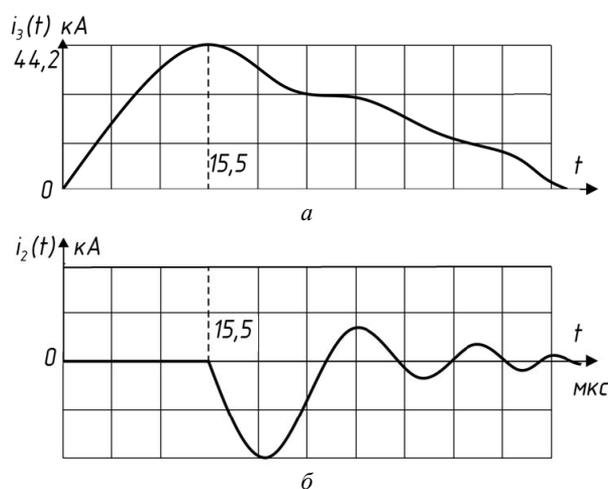


Рис. 4. Осциллограмма тока через нагрузку (а) и шунтирующий разрядник (б):
 $L_3 = 680$ нГн, $I_m = 44$ кА; $T = 62$ мкс; $L_2 = 35$ нГн; $R = 3,7$ МОм

Для оценки эффективности процесса метания в электродинамических устройствах при обеспечении шунтирующего режима принималось условие (2). Интеграл действия тока в

$$Q_{\text{кр}} = \int_0^T I_m^2 dt \quad (6)$$

определялся по осциллограмме, исходя из максимального значения тока в нагрузке. Если это значение оказывалось больше или равным критическому значению интеграла тока $Q_{\text{кр}}$, определенному по выражению (2), то считалось что требуемое качество шунтирования обеспечено.

Результаты проведенных экспериментальных исследований по оценке эффективности шунтирующего режима применительно к электродинамическим ускорителям масс в виде зависимостей $Q_{\text{кр}} = f(L_2)$ и $Q_{\text{кр}} = f(R)$ приведены на рис. 5 и 6. Анализ приведенных зависимостей позволяет отметить следующее. Зависимость $Q_{\text{кр}} = f(L_2)$ является монотонно убывающей, требуемый эффект от применения замыкающего разрядника при индуктивности нагрузки $L_3 = 444$ нГц (кривая 1, рис. 6) достигается при значении $L_2 = 20$ нГц, при этом интеграл действия

$$Q_{\text{кр}} = 98946 A^2 \cdot c > Q_{\text{крит}} = 96833 A^2 \cdot c. \quad (7)$$

При увеличении индуктивности L_2 до значения 40 нГн $Q_{\text{кр}} < Q_{\text{крит}}$, условие (2) не выполняется, и требуемая эффективность метания не обеспечивается. Аналогичные выводы можно сделать и при других значениях индуктивности нагрузки: кривая 2 – $L_3 = 508$ нГц, кривая 3 – $L_3 = 680$ нГц.

Зависимость $Q_{\text{кр}} = f(R)$ также является монотонно убывающей, и требуемая эффективность от применения шунтирующего режима ЕНЭ для индуктивности $L_3 = 444$ нГн (кривая 1, рис. 6) обеспечивается при значении сопротивления $R = 2,7$ мОм и $Q_{\text{кр}} > Q_{\text{крит}}$. При дальнейшем увеличении сопротивления величина интеграла действия становится меньше критического значения (кривые 2 и 3, рис. 6). Во всех случаях уменьшение интеграла действий с ростом R связано с уменьшением постоянной времени затухания тока в нагрузке – $\tau = L_3/R$, что приводит к уменьшению площади под кривой тока.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований можно сделать следующий основной вывод. Использование шунтирующего режима ЕНЭ с целью повышения эффективности процесса метания твердых тел целесообразно при следующих соотношениях величин основных параметров шунтирующего разрядника и нагрузки L_3 :

$$L_2 \leq 0,05L_3; R \leq 0,05\omega L_3, \quad (8)$$

где $\omega = \frac{1}{\sqrt{C_0(L_1 + L_3)}}$ – круговая частота основной цепи разряда ЕНЭ.

Из (8) следует, что уменьшение индуктивности нагрузки L_3 влечет за собой ужесточение требований к основным параметрам замыкающего кроу-бар-разрядника.

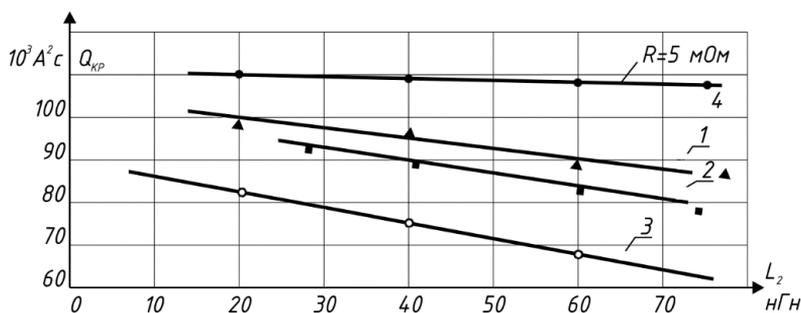


Рис. 5. Зависимости интеграла действия тока $Q_{кр}$ от индуктивности L_2 :
 1 – $L_3 = 444$ нГн; $R = 2,7$ МОм; $I_m = 51,5$ кА; $T = 23$ мкс; $Q_{крит} = 96883$ А²с;
 2 – $L_3 = 508$ нГн; $R = 2,9$ МОм; $I_m = 49,2$ кА; $T = 55,5$ мкс; $Q_{крит} = 92537$ А²с;
 3 – $L_3 = 680$ нГн; $R = 3,7$ МОм; $I_m = 44,2$ кА; $T = 62$ мкс; $Q_{крит} = 79600$ А²с;
 4 – результат численного моделирования при $L_3 = 280$ нГн, $L_2 = 20$ нГн

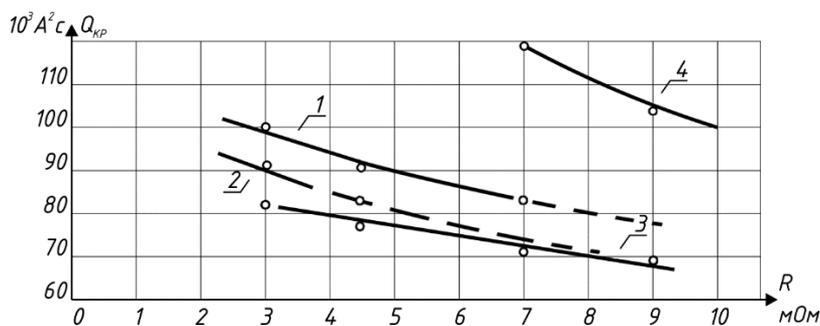


Рис. 6. Зависимости интеграла действия тока $Q_{кр}$ от активного сопротивления R :
 1 – $L_3 = 444$ нГн; $L_2 = 20$ нГн; $I_m = 51,5$ кА; $T = 53$ мкс; $Q_{крит} = 96883$ А²с;
 2 – $L_3 = 508$ нГн; $L_2 = 30$ нГн; $I_m = 49,2$ кА; $T = 49,2$ мкс; $Q_{крит} = 92537$ А²с;
 3 – $L_3 = 680$ нГн; $L_2 = 35$ нГн; $I_m = 44,2$ кА; $T = 62$ мкс; $Q_{крит} = 79600$ А²с;
 4 – результат численного моделирования при $L_3 = 280$ нГн, $L_2 = 20$ нГн

Из (8) следует, что уменьшение индуктивности нагрузки L_3 влечет за собой ужесточение требований к основным параметрам замыкающего кроубар-разрядника. При значениях $L_3 \leq 100$ нГн, что характерно для электродинамических ускоряющих систем малых масс кондукционного типа, необходимы шунтирующие разрядники со следующими параметрами: $L_2 \leq 5$ нГн, $R \leq 1$ МОм. Это может быть достигнуто уменьшением длины канала разряда, увеличением его проводимости и поперечного сечения. Для этой цели разработана конструкция многоканального шунтирующего разрядника с твердым диэлектриком, описанная в [6]. Разрядник позволяет организовать многоканальный искровой разряд с высокой проводимостью при напряжении на основных электродах разрядника, близком к нулю. В качестве диэлектрика используется многослойная полиэтиленовая изоляция общей толщиной $\delta \approx 1$ мм. Между слоями изоляции размещаются два управляющих электрода, способствующие резкому искажению поля в промежутке. При подаче на управляющие электроды твердотельного разрядника в момент максимума

тока высоковольтного импульса от ГИН с параметрами $U_{\text{имп}} = 80$ кВ, длительностью фронта $\tau_{\text{фр}} = 10$ мс происходит синхронный пробой всех четырех каналов в полиэтиленовой изоляции. Плазменная струя из камеры поджига заполняет места предварительного пробоя в полиэтиленовой изоляции, обеспечивая сопротивление канала пробоя $R \leq 1$ мОм и малую индуктивность разрядника.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований шунтирующего режима ЕНЭ [3, 4] с электродинамическими ускорителями масс могут быть сформулированы следующим образом:

– предложены аналитические выражения для расчета шунтирующего режима и определения формы импульса тока в нагрузке, исходя из параметров кроубар-разрядника и нагрузки;

– результаты экспериментальных исследований показали, что индуктивность шунтирующей цепи влияет на провал тока после достижения его максимального значения за счет осцилляций, а активное сопротивление – на время затухания тока в нагрузке;

– экспериментально установлено оптимальное соотношение основных параметров кроубар-разрядника и нагрузки, обеспечивающее необходимую эффективность шунтирующего режима;

– разработана конструкция твердотельного шунтирующего разрядника с малым активным сопротивлением и индуктивностью, позволяющая организовать многоканальный искровой пробой при рабочем напряжении накопителя энергии, близком к нулю;

– показано, что применительно к электромагнитным ускорителям целесообразно использовать многоканальные малоиндуктивные плоские разрядники с искажением поля. Такие разрядники обеспечивают как синхронное включение параллельных контуров электродинамического устройства, так и шунтирование малоиндуктивной нагрузки в момент максимума тока.

Литература

1. А.с. СССР № 983858 МКНЗ НОИТ3/00 НОИТ5/00. Многоканальный искровой разрядник / Ашмарин В.В., Блохинцев А.А., Калихман С.А. Оpubл. 23.12.82. Бюл. № 4с–2с.
2. А.с. СССР № 1264798 МКНЗ НОИТ2/02. Многоканальный управляемый разрядник / Ашмарин В.В., Блохинцев А.А., Калихман С.А. Оpubл. 15.06.86.
3. А.с. СССР № 1557613 МКНЗ НОИТ2/02. Шунтирующий разрядник / Ашмарин В.В., Абрамов А.М. и др. Оpubл. 20.07.88.
4. Ашмарин В.В. Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.
5. Finist G., Wetter M., Meyer T. New spark-gap technology with efficient line-follow current suppression for the protection of powerful LV distribution systems. *Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP)*. Estoril, 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICLP.2016.7791513.
6. Grabowski C., Derman J.H., Domonkos M. Operation of rail-gap switches in a high-current, low-inductance crowbar switch. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Austin, TX, 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/PPC.2015.7296980.
7. Reddy C.S., Sharma A., Mittal K.C. Experimental Investigations Into Pulse-Charged Spark Gap Recovery Times and Influencing Factors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 331–337. doi: 10.1109/TPS.2015.2509162.

АШМАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ashmarin1953@yandex.ru).

БЛОХИНЦЕВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

V. ASHMARIN, A. BLOKHINTSEV

**DEVELOPMENT AND STUDY OF SHUNT DISCHARGER
FOR HIGH-POWER CAPACITIVE ENERGY STORAGE TO RUN
LOW-INDUCTANCE ELECTROMAGNETIC APPARATUSES**

Key words: bypass mode, discharge circuit, mass accelerators, switch, action integral, parameters optimization.

The analytical expression is proposed to calculate the bypass mode of the capacitive energy storage device during its work for the little inductance mass accelerators. The analysis of experimental studies showing the influence of bypass circuit parameters on the mode efficiency was carried out. It was found that it is useful to apply by-passing mode to increase the efficiency of the electrodynamic mass accelerators in case of the following proportions of bypass circuit parameters and load $h_2 \leq 0,05 L_3$; $R \leq 0,05 \omega L_3$. The design of multi-channel solid state arrester was developed and studied, it allowing to realize given relations: channel resistance is $R < I mOm$, inductance is $L_2 < 5 nHn$.

References

1. Ashmarin V.V., Blohintsev A.A., Kalihman S.A. *Mnogokanal'nyi iskrovoi razryadnik* [Multichannel spark arrester]. Author's certificate USSR, no. 983858, 1982.
2. Ashmarin V.V., Blohintsev A.A., Kalihman S.A. *Mnogokanal'nyi upravlyaemyi razryadnik* [Multichannel controlled arrester]. Author's certificate USSR, no. 1264798, 1986.
3. Ashmarin V.V., Abramov A.M. et al. *Shuntiruyushchii razryadnik* [Shunt arrester]. Author's certificate USSR, no. 1557613, 1988.
4. Ashmarin V.V. *Kommutatory emkostnogo nakopitelya energii dlya elektrodinamicheskogo uskoritelya massy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Switches of the capacity drive of energy for the electrodynamic accelerator of weight. Abstract of Doct. Diss.]. Moscow, 1994, 19 p.
5. Finist G., Wetter M., Meyer T. New spark-gap technology with efficient line-follow current suppression for the protection of powerful LV distribution systems. *Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP)*. Estoril, 2016, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICLP.2016.7791513.
6. Grabowski C., Derman J.H., Domonos M. Operation of rail-gap switches in a high-current, low-inductance crowbar switch. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Austin, TX, 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/PPC.2015.7296980.
7. Reddy C.S., Sharma A., Mittal K.C. Experimental Investigations Into Pulse-Charged Spark Gap Recovery Times and Influencing Factors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 331–337. doi: 10.1109/TPS.2015.2509162.

ASHMARIN VASILY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ashmarin1953@yandex.ru).

BLOKHINTSEV ANATOLY – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

Ссылка на статью: Ашмарин В.В., Блохинцев А.А. Разработка и исследование шунтирующего разрядника для мощных емкостных накопителей энергии, работающих на малоиндуктивные электродинамические устройства // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 14–23.

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

А.В. БУЛЫЧЕВ, Ю.А. ДЕМЕНТИЙ, В.Н. КОЗЛОВ

**КОМПЕНСАЦИЯ ПОЛНОГО ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В СЕТЯХ 6-10 кВ**

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, гашение дуги, компенсация полного тока, модель сети, экспериментальные исследования.

Предложен принцип компенсации остаточного тока, позволяющий принудительно погасить дугу в месте повреждения и предотвратить повторные электрические пробои. Рассмотрены структура и функционал устройства, реализующего данный принцип. Представлены математическая и физическая модели сети с системой компенсации, проанализированы результаты моделирования, доказано соответствие моделей реальному объекту. Оценены динамические свойства и предельные возможности системы компенсации. Установлено, что гашение электрической дуги осуществляется системой за время, не превышающее 60 мс.

Задача снижения тока и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6-35 кВ традиционно решается с помощью дугогасящих реакторов (катушек индуктивности), включаемых между нейтралью сети и землей [3]. Однако это элегантное решение, основанное на компенсации только емкостной составляющей тока ОЗЗ противоположно направленной индуктивной составляющей тока, создаваемой дугогасящим реактором (ДГР), дает хорошие практические результаты только на одной частоте и при отсутствии существенных потерь. В реальных сетях, где токи ОЗЗ превышают, например, 100 А, остаточный, не скомпенсированный ДГР ток в месте ОЗЗ, обусловленный потерями, гармониками и общей неидеальностью параметров, может превышать 5 А и поддерживать горение электрической дуги в месте ОЗЗ.

Значение тока, при котором возможно устойчивое горение дуги в месте замыкания (5 А), определено в результате всесторонних исследований и зафиксировано в нормативных документах¹ [4, 5]. Таким образом, в сетях с током ОЗЗ 100 А и более ДГР не является гарантированным средством гашения дуги, так как остаточный ток может превышать значение 5 А.

В условиях поступательного развития сетей и увеличения токов ОЗЗ для эффективного снижения тока до уровня ниже 5 А и гашения электрической дуги в месте ОЗЗ необходимо компенсировать не только емкостную составляющую тока ОЗЗ на частоте сети, а полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую и составляющие других частот. Кроме того, необходимо поддерживать в месте повреждения условия, в которых невозможно повторное зажигание электрической дуги.

¹ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: утв. приказом Минэнерго России от 13.01.2003 г. № 6 [Электронный ресурс] // Гарант: инф.-прав. портал. URL: <http://base.garant.ru/12129664>.

Особый практический интерес представляет решение, при котором остаточный ток (не скомпенсированный за счет ДГР) компенсируется током специального управляемого источника и создаются условия для предотвращения повторного зажигания электрической дуги в месте ОЗЗ [1, 2].

Ток в месте повреждения в общем обусловлен суммарной проводимостью фазных сопротивлений и емкостей относительно земли и проводимостью реактора (рис. 1):

$$i_{O33} = i_L + i_{CB} + i_{CA} + i_{RB} + i_{RA} + i_{Rn},$$

где i_L – ток дугогасящего реактора; i_{CA} и i_{CB} – емкостные токи неповрежденных фаз на землю; i_{RB} и i_{RA} – токи активных утечек неповрежденных фаз на землю; i_{Rn} – эквивалентное активное сопротивление цепей заземления.

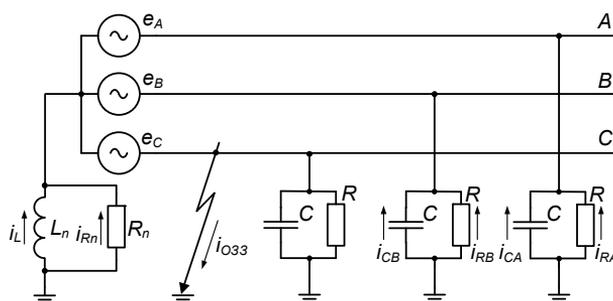


Рис. 1. Схема замещения компенсированной сети при ОЗЗ

Решение заключается в том, что на нейтрали сети создается искусственный потенциал путем введения тока дополнительного источника в контур нулевой последовательности сети, измеряются параметры контура нулевой последовательности и осуществляется настройка дугогасящего реактора.

С момента возникновения ОЗЗ определяют (косвенным методом) остаточный ток в месте замыкания на землю. Измеренный ток ОЗЗ сравнивают с пороговым уровнем, управляют дополнительным источником и регулируют его ток до полной компенсации тока ОЗЗ.

Остаточный ток определяют путем суммирования отдельных составляющих тока, циркулирующих в месте замыкания на землю. Первую составляющую остаточного тока определяют путем вычисления произведения проводимости контура нулевой последовательности сети, измеряемой в период, предшествующий моменту возникновения замыкания на землю, на напряжение поврежденной фазы, измеряемое относительно нейтрали сети. Вторую составляющую определяют путем вычисления произведения проводимости контура нулевой последовательности сети, измеряемой в период, предшествующий моменту возникновения замыкания на землю, на измеряемое в тот же период напряжение нейтрали относительно земли. При превышении результирующим остаточным током заданного порогового уровня ток источника устанавливают пропорциональным результирующему остаточному току, а если результирующий остаточный ток не превышает заданный пороговый уровень, то ток источника устанавливают равным нулю.

На рис. 2 приведена функциональная схема устройства компенсации, реализующего предложенный способ.

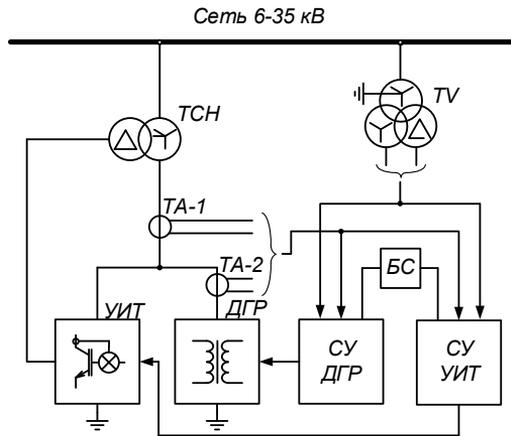


Рис. 2. Структурная схема управляемого заземления нейтрали

К электрической сети, содержащей несколько присоединений, через нейтралеобразующую обмотку трансформатора собственных нужд (ТСН) подключены управляемый ДГР и управляемый источник тока (УИТ), который получает питание от вторичной обмотки ТСН. В принципе питание управляемого источника можно осуществлять от другого отдельного трансформатора.

Выходные сигналы измерительного трансформатора напряжения (TV) и трансформаторов тока ТА-1 и ТА-2 поступают на вход системы управления ДГР (СУ ДГР) и на вход системы управления УИТ (СУ УИТ). Логика взаимодействия указанных контуров управления задается программным путем в блоке согласования (БС) систем управления.

В системе управления ДГР обрабатываются входные данные и вычисляются активная, индуктивная, емкостная и полная проводимости контура нулевой последовательности сети. Определяется характеристическая величина, соответствующая рассогласованию между индуктивной и емкостной проводимостями. Сформированный таким образом сигнал рассогласования сравнивается по абсолютной величине с предельным значением, определяющим зону нечувствительности измерительного органа СУ ДГР. Если сигнал рассогласования по уровню выходит за пределы зоны нечувствительности, то сигнал рассогласования поступает на вход управления индуктивностью ДГР.

В системе управления УИТ по факту возникновения ОЗЗ регистрируются осциллограммы входных сигналов. Путем обработки данных во временной и частотной областях вычисляется характеристическая функция, ориентированная относительно опорного сигнала, поступающего с одной из фазных обмоток трансформатора напряжения TV. Сформированный таким образом сигнал сравнивается по абсолютной величине с граничным значением, определяющим зону нечувствительности системы управления УИТ. Если уровень

сигнала превышает граничное значение, то сформированный им сигнал поступает на управление выходным током УИТ. Управляемый источник тока может быть реализован на основе ШИМ-конвертора с повышенной частотой преобразования электроэнергии и подключаться к нейтрали непосредственно или через дополнительную обмотку ДГР.

В нормальном установившемся режиме работы сети СУ ДГР производится измерение текущих параметров контура сети с использованием опорного тока, задаваемого блоком согласования БС. Он устанавливает циклический режим работы УИТ, подающего в нейтраль сети опорный ток, частота которого может задаваться кратной частоте сети в соотношении $1/2$ или $1/3$. Это дает возможность отстроиться от негативного влияния шумов промышленной частоты на точность измерений. Отсутствие сигнала на выходе СУ ДГР свидетельствует о том, что значение индуктивности ДГР находится вблизи точки резонансного равновесия и реальная расстройка контура сети незначительна и не выходит за пределы заданной зоны нечувствительности.

Если емкость сети изменяется в процессе работы, например, из-за отключения или подключения присоединений (изменения конфигурации), то СУ ДГР формирует сигнал управления реактором, по которому путем ступенчатого или плавного регулирования индуктивности ДГР возвращается в точку резонансного равновесия. Таким образом, СУ ДГР постоянно обеспечивает резонансную настройку ДГР.

Факт возникновения ОЗЗ фиксируется СУ УИТ по сигналам, поступающим на ее вход от измерительного трансформатора напряжения TV. С этого момента прерываются действия СУ ДГР, блокируется управление ДГР и УИТ и запускается процесс обработки данных, зафиксированных СУ ДГР на момент возникновения ОЗЗ. Производится вычисление мгновенных значений остаточного тока ОЗЗ, определяемого суммированием двух характерных составляющих.

Первая составляющая включает в себя активный ток контура нулевой последовательности (КНП) сети и его реактивный ток, обусловленный реальной расстройкой КНП на момент возникновения ОЗЗ. Вторая составляющая представляет собой ток, обусловленный неравенством проводимостей фаз относительно земли. Для вычисления первой составляющей тока используются выборки напряжения поврежденной фазы, измеренного относительно нейтрали сети на соответствующей фазной обмотке измерительного трансформатора TV, и полная проводимость КНП сети, измеренная до момента замыкания на землю.

Для вычисления второй составляющей тока используются та же полная проводимость КНП сети и зарегистрированные выборки напряжения на нейтрали, измеренные с помощью обмотки трансформатора напряжения TV, соединенной по схеме «разомкнутый треугольник» до момента замыкания на землю. Затем сформированный пропорционально вычисленному результирующему току сигнал сравнивается по абсолютной величине с порогом чувствительности. Следует отметить, что он задается исходя из условия минимального ущерба от термического действия тока в месте повреждения и невозможности поддерживать опасные перемежающиеся дуговые процессы.

Если при наличии ОЗЗ сигнал на выходе СУ ДГР отсутствует, то это означает, что измеренный косвенным образом результирующий остаточный ток мал и не превышает порога чувствительности. В этом случае ток в цепи ДГР, настроенного предварительно на резонанс, оказывается достаточным для нейтрализации тока в месте повреждения до безопасного уровня. При отсутствии сигнала в цепи управления УИТ его выходная цепь остается обесточенной и сохраняет высокий импеданс, что исключает влияние его на электромагнитные процессы в КНП сети.

Если при наличии ОЗЗ СУ ДГР фиксирует выход сигнала из зоны нечувствительности, то формируется сигнал управления УИТ и он переводится в режим генерации тока в нейтраль сети. Причем этот ток пропорционален измеренному результирующему остаточному току и направлен встречно ему.

В результате в цепи нейтрали устанавливается ток, образуемый наложением тока ДГР, направленного на компенсацию емкостной составляющей тока КНП сети, и тока УИТ, направленного на компенсацию остаточного тока. Остаточный ток включает в себя активную составляющую тока КНП сети и его реактивную составляющую, обусловленную реальной расстройкой КНП сети на момент возникновения ОЗЗ, а также составляющую, обусловленную неравенством проводимостей фаз относительно земли. При этом ток в месте замыкания на землю полностью нейтрализуется, и потенциал поврежденной фазы выравнивается с потенциалом земли. Эти факторы обуславливают возможность снижения до минимума рисков возникновения повторных дуговых замыканий и ущерба от термического воздействия в месте повреждения.

Через интервал времени, программно заданный в БС, режим компенсации прерывается и проверяется возможность самоустранения ОЗЗ. Если устранения ОЗЗ не произошло, то восстанавливается режим компенсации тока ОЗЗ без ограничения длительности времени. Если ОЗЗ самоустранилось, то БС восстанавливает циклический режим генерации УИТ опорного тока и активизирует работу СУ ДГР.

Таким образом, СУ ДГР и СУ УИТ постоянно обеспечивают настройку ДГР и УИТ на компенсацию полного тока ОЗЗ.

Для исследования процессов компенсации полного тока ОЗЗ использована схема замещения сети (рис. 3), все параметры которой приведены к уровню напряжения сети. В схеме учтены все основные параметры, которые оказывают существенное влияние на процессы ОЗЗ и компенсацию полного тока в месте ОЗЗ. При этом принято, что исходно до момента возникновения ОЗЗ сеть симметрична по продольным и поперечным параметрам, а фазные ЭДС представляют собой гармонические функции одной частоты:

$$\begin{aligned}C_a &= C_b = C_c = C; \\R_a &= R_b = R_c = R; \\r_{fA} &= r_{fB} = r_{fC} = r_f; \\L_{fA} &= L_{fB} = L_{fC} = L_f; \\e_A(t) &= e_{fm} \cdot \sin\omega t;\end{aligned}$$

$$e_B(t) = e_{fm} \cdot \sin(\omega t + 120^\circ);$$

$$e_C(t) = e_{fm} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ),$$

где $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ – фазные ЭДС; e_{fm} – амплитудное значение напряжения; L_{fA} , L_{fB} , L_{fC} , L_f – продольные индуктивности фаз; r_{fA} , r_{fB} , r_{fC} , r_f – продольные активные сопротивления фаз; C_a , C_b , C_c , C – распределенные емкости фаз относительно земли; R_a , R_b , R_c , R – распределенные сопротивления утечек фаз на землю; ω – угловая частота ЭДС сети.

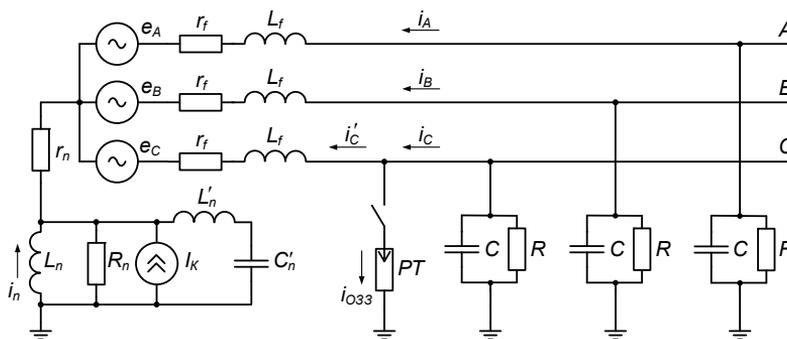


Рис. 3. Схема замещения распределительной сети с управляемым заземлением при ОЗЗ

На основании схемы замещения сети (рис. 3), содержащей наиболее значимые для процессов ОЗЗ параметры, сформирована система дифференциальных уравнений сети при ОЗЗ:

$$\begin{cases} i_{033} = i_A + i_B + i_C + i_n; \\ e_C - e_B = -i'_C r_f - L_f \frac{di'_C}{dt} - U_{C0} + U_{B0} + L_f \frac{di_B}{dt} + i_B r_f; \\ e_B - e_A = -i_B r_f - L_f \frac{di_B}{dt} - U_{B0} + U_{A0} + L_f \frac{di_A}{dt} + i_A r_f; \\ e_A = -i_A r_f - L_f \frac{di_A}{dt} - U_{A0} + U_n; \\ i_C = i'_C + i_{033}; \\ 0 = U_{C0} + i_{033} R_{033}. \end{cases}$$

где e_A , e_B , e_C – фазные ЭДС; i_A , i_B , i_C – фазные токи; i_n – ток нейтрали; i_{033} – ток в месте повреждения; i'_C – ток активно-емкостной проводимости поврежденной фазы на землю; U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} – падения напряжений на распределенных емкостях и активных проводимостях фаз относительно земли; U_n – падение напряжения на нейтрали сети; r_f , L_f – продольное эквивалентное, соответственно, активное сопротивление и индуктивность фазы.

Первое уравнение системы составлено по первому закону Кирхгофа для узла, связанного с землей. Второе и третье уравнения записаны для контуров, содержащих линейные ЭДС $A-B$ и $B-C$. Четвертое уравнение относится к фазе A и цепям заземления. Место повреждения, как правило, имеет ненулевое

сопротивление, и ток в поврежденной фазе делится между местом повреждения и активно-емкостной проводимостью фазы относительно земли. Это учтено в пятом и шестом уравнениях системы.

Сложность процессов при ОЗЗ, неоднозначность параметров элементов и стремление наиболее точно воспроизвести в модели реальные процессы вызвали необходимость создания физической модели.

С целью получения наиболее близких по сути процессов горения дуги физическая модель построена на номинальное напряжение 10 кВ с током ОЗЗ, примерно, 30 А (рис. 4). Для моделирования электрической дуги при ОЗЗ в модели использованы специальные разрядники рогового и шарового типов, а также – кабель с искусственно поврежденной изоляцией. Для создания активной составляющей тока ОЗЗ в модели применен блок резисторов БР, который в опытах ОЗЗ обуславливает активный ток, примерно, 5,4 А. Расстройка ДГР составляла менее 0,5%.

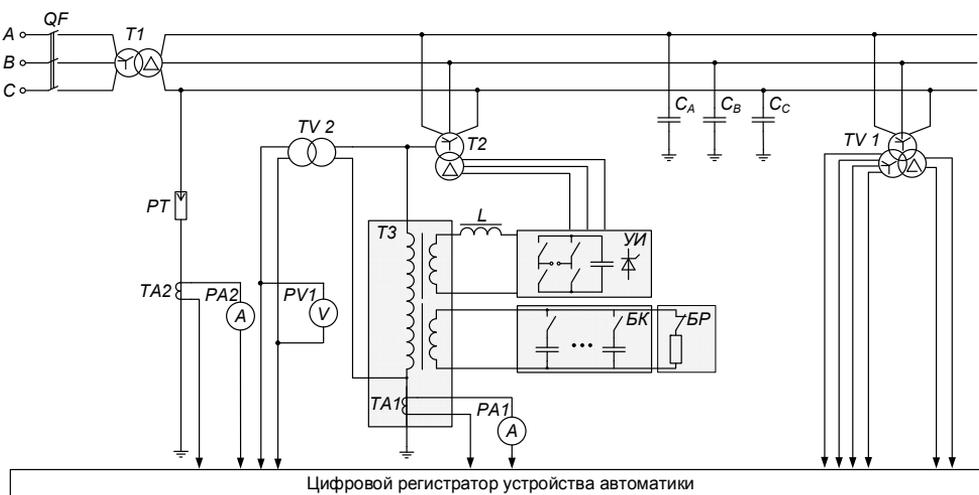


Рис. 4. Схема физической модели

Построенная таким образом модель использована для анализа процессов при ОЗЗ и при компенсации полного тока при разных видах ОЗЗ.

На рис. 5 приведена осциллограмма процесса при устойчивом ОЗЗ, полученная с помощью физической модели. На ней показаны: напряжения фаз А, В, С относительно земли (соответственно, шлейфы 1, 2, 3); напряжение на нейтрали $3U_0$ (шлейф 4); ток в месте ОЗЗ (шлейф 5); выходной ток инвертора (шлейф 6); ток ДГР (шлейф 7). Кроме того, для каждого шлейфа приведены значения контролируемых сигналов в моменты, отмеченные двумя указками, соответственно.

Из осциллограммы видно, что через 60 мс после включения управляемого источника ток в месте ОЗЗ, практически, равен нулю, т.е. остаточный (полный) ток полностью скомпенсирован. Путем математического и физиче-

ского моделирования установлено, что ток в месте повреждения после гашения дуги (обусловленный остаточными утечками), как правило, не превышает 300 мА.

Таким образом, от момента начала замыкания до полного гашения дуги проходит не более трех периодов колебаний промышленной частоты. Для предотвращения повторных электрических пробоев места повреждения система управления компенсацией поддерживает близкое к нулю значение напряжения поврежденной фазы, создавая таким образом «виртуальное замыкание на землю» в распределительной сети. Оно отличается от обычного ОЗЗ тем, что является полностью управляемым состоянием сети и при нем отсутствует ток в месте повреждения.



Рис. 5. Осциллограмма процесса компенсации тока при устойчивом ОЗЗ, полученная с помощью физической модели

На рис. 6 приведена осциллограмма процесса ОЗЗ, полученная на математической модели, при параметрах, соответствующих параметрам физической модели. Как видно, формы и уровни сигналов физической и математической моделей, практически, совпадают.

Для количественного сопоставления сигналов проведен их анализ в частотной области (рис. 7). Сигналы, как видно из рис. 7, имеют аналогичный спектральный состав в диапазоне частот от 0 до 300 Гц. В связи с этим можно отметить, что математическая модель достаточно точно воспроизводит процессы ОЗЗ при компенсации полного тока ОЗЗ и может служить эффективным инструментом для исследования этих процессов.

Опытный образец управляемого заземления с функцией компенсации полного тока ОЗЗ разработан, изготовлен и введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Получен опыт эксплуатации в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного образца при реальных ОЗЗ, который подтвердил все основные параметры управляемого заземления, заданные при разработке.

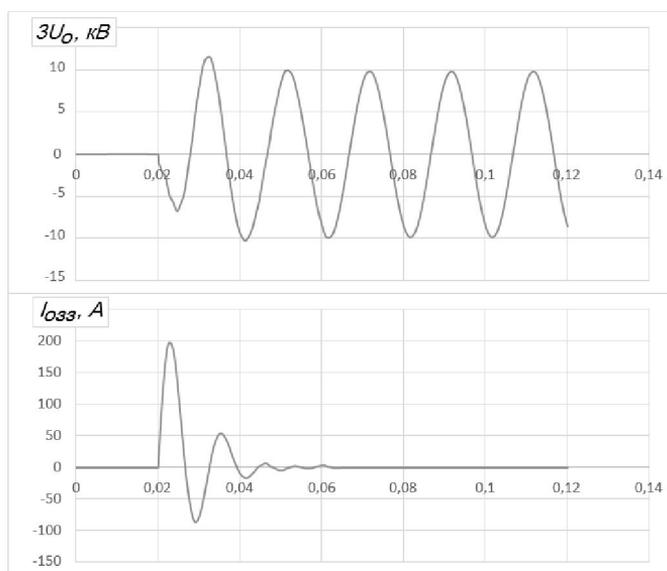


Рис. 6. Осциллограмма процесса компенсации тока при устойчивом ОЗЗ, полученная с помощью математической модели

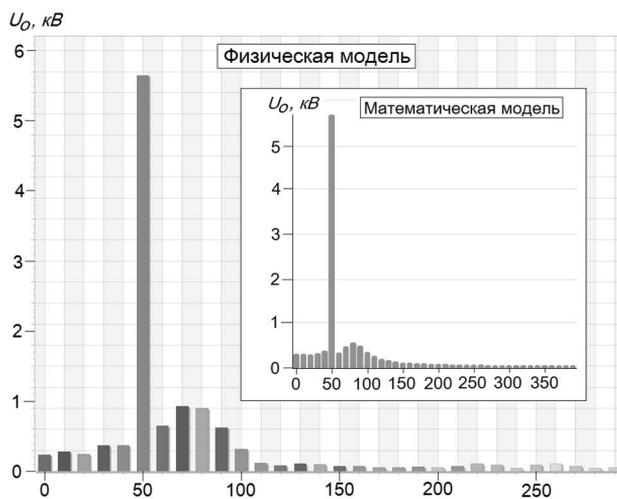


Рис. 7. Спектры сигналов

На рис. 8 приведена осциллограмма ОЗЗ, записанная автоматикой управления ДГР на действующей подстанции. Показана кривая изменения напря-

жения нулевой последовательности при одиночных пробоях на землю с большим интервалом времени, обусловленным длительным восстановлением напряжения на поврежденной фазе.

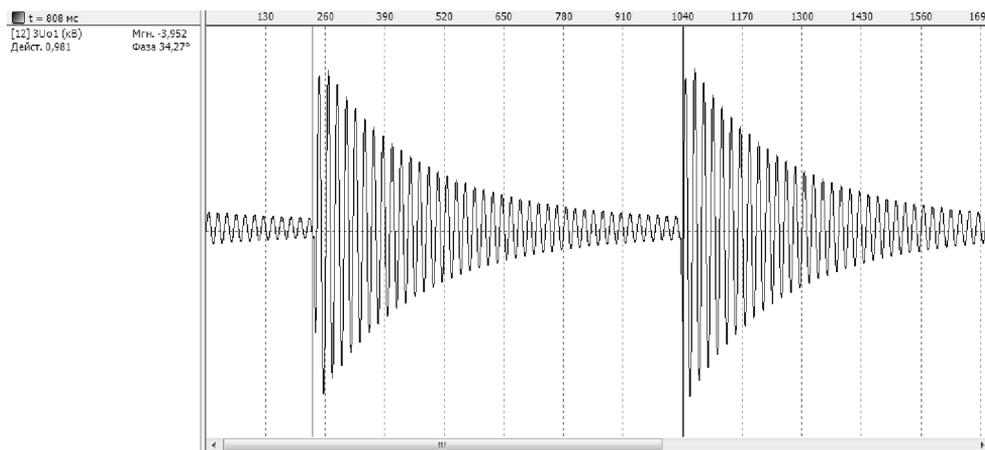


Рис. 8. Осциллограмма ОЗЗ в реальной сети

Параметры реальной сети, подключенной к шинам этой подстанции, введены в математическую модель и расчетным путем получены кривые (рис. 9) не только напряжения нулевой последовательности, но и тока ОЗЗ, который не доступен для измерения в условиях реальной подстанции. Возможность получать временные диаграммы изменения важных для анализа параметров, безусловно, подчеркивает эффективность математической модели.

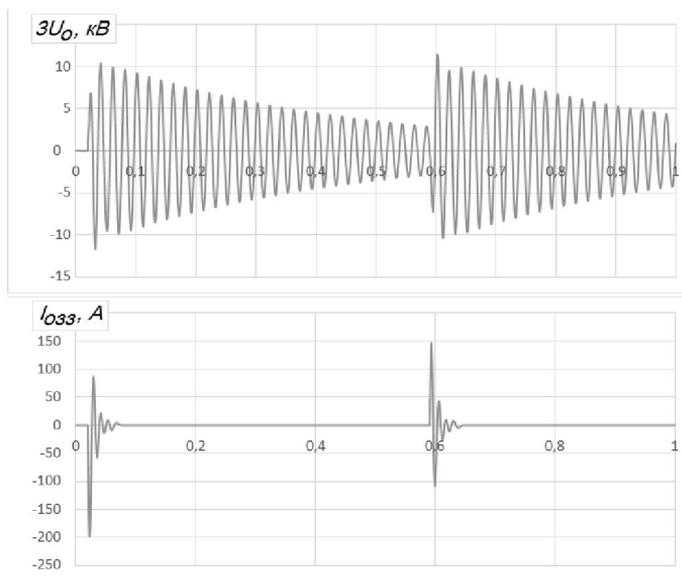


Рис. 9. Осциллограмма ОЗЗ, построенная с помощью модели реальной сети

Выводы. 1. Создано управляемое заземление нейтрали с функцией компенсации полного тока для сетей 6-10 кВ, обладающее новыми свойствами снижения тока и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю и обеспечивающее повышение надежности и безопасности этих сетей. Достигнута возможность снижать ток в месте ОЗЗ до уровня, обеспечивающего гашение дуги, и создавать условия для предотвращения повторного зажигания дуги.

2. Созданы математическая и физическая модели управляемого заземления, доказано их соответствие реальному объекту. Проведены всесторонние теоретические и экспериментальные исследования, которые подтвердили правомерность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали работоспособность системы и позволили определить ее основные эксплуатационные параметры. Остаточный ток после гашения дуги в месте ОЗЗ, обусловленный остаточными утечками, как правило, не превышает 300 мА. Время, необходимое для компенсации полного тока ОЗЗ и гашения дуги в месте повреждения, составляет, примерно, 60 мс.

3. Разработан, изготовлен и всесторонне исследован опытный образец управляемого заземления, который после испытаний и исследований в заводских лабораторных условиях введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Накоплен опыт эксплуатации в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного образца при реальных ОЗЗ, который подтвердил все основные параметры управляемого заземления, заданные при разработке.

Литература

1. А.с. 813587 СССР. Устройство для компенсации полного тока однофазного замыкания на землю / Обабков В.К., Целуевский Ю.Н.; заявитель Донецкий политехн. ин-т. № 2777496/23-07; заявл. 07.06.79 г.; опубл. 15.03.81 г., Бюл. № 10.
2. Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 04(29). С. 37–41.
3. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.: Госэнергоиздат, 1959. 416 с.
4. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. М.: Энергия, 1871. 106 с.
5. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова Думка, 1985. 254 с.

БУЛЫЧЕВ АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет; технический директор, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (bav@bresler.ru).

ДЕМЕНТИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – аспирант кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет; инженер, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (dementii_jua@bresler.ru).

КОЗЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет; главный конструктор, ООО «НПП Бреслер», Россия, Чебоксары (kvn@bresler.ru).

A. BULYCHEV, Yu. DEMENTIY, V. KOZLOV

FULL EARTH CURRENT COMPENSATION IN 6-10 kV NETWORK

Key words: one-phase earth fault, arc extinguishing, full current compensation, network model, experimental research.

The article proposes the principle of residual current compensation that allows forcing the arc to be extinguished in the place of damage and preventing repeated electrical breakdowns. The structure and the functional of the device implementing this principle are described. The mathematical and physical models of the full current compensated network are described, the simulation results are analyzed and the matching of the real models and objects is proven. Dynamic properties and limiting possibilities of the compensation system are estimated. It was found that the electric arc is extinguished by the system in a time not exceeding 60 ms.

References

1. Obabkov V.K., Tseluevskii Yu.N. *Ustroistvo dlya kompensatsii polnogo toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu* [Device for compensation of the full current of a single-phase earth fault]. Certificate of authorship (SSSR) № 813587, 1981.
2. Bulychev A.V., Dementii Yu.A., Kozlov V.N. *Eksperimental'nye issledovaniya upravlyаемого zazemleniya neutrally s funktsiei kompensatsii polnogo toka zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV* [Experimental research of controlled neutral grounding with the full earth fault current compensation function in 6-10 kV networks]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Power protection and automatization], 2017, no. 4, pp. 37–41.
3. Vil'geim R., Uoters M. *Zazemlenie neutrally v vysokovol'tnykh sistemakh* [Neutral grounding in high-voltage systems]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959, 416 p.
4. Likhachev F.A. *Instruktsiya po vyboru, ustanovke i ekspluatatsii dugogasyashchikh katushek* [Instructions for the selection, installation and operation of arc suppression coils]. Moscow, Energiya Publ., 1871, 106 p.
5. Sirota I.M., Kislenco S.N., Mikhailov A.M. *Rezhimy neutrally elektricheskikh setei* [Neutral modes of electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, 254 p.

BULYCHEV ALEKSANDR – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University; Technical Director, LLC «NPP Bresler», Russia, Cheboksary (bav@bresler.ru).

DEMENTIY YURIY – Post-Graduate Student, Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University; Engineer, LLC «NPP Bresler», Russia, Cheboksary (dya@bresler.ru).

KOZLOV VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University; Chief Designer, LLC «NPP Bresler», Russia, Cheboksary (kvn@bresler.ru).

Ссылка на статью: Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 24–35.

УДК 621.3
ББК 31.261.2

Н.И. ГОРБАЧЕВСКИЙ, С.Н. СИДОРОВ, Р.Н. ГАНИЕВ

АКТИВНЫЙ КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ДЕМПФИРУЮЩЕГО КОНДЕНСАТОРА

Ключевые слова: коэффициент мощности, корректор, демпфирующий конденсатор, корректор коэффициента мощности (ККМ).

Целью разработки корректора коэффициента мощности является поиск способов коррекции коэффициента мощности сетевого входа силовых преобразователей частоты с необходимостью устранения высших гармонических составляющих в составе кривой напряжения сети, что является одной из основных задач электромагнитной совместимости частотных преобразователей с сетью. Новизна разработки состоит в предложенном новом способе коррекции коэффициента мощности преобразователей частоты, отличающемся от известных вариантов исполнения демпфирующего устройства выходной цепи инвертора напряжения на основе полярного конденсатора, осуществляющего коммутацию в два этапа. Исследования предлагаемого корректора коэффициента мощности проведены путем моделирования в программе MatLab 14, пакет Simulink. Представленный вариант корректора коэффициента мощности позволяет добиться плавности изменения токов статорных обмоток во время коммутаций, завершающихся выключениями силовых транзисторов в обесточенном состоянии.

К числу демпфирующих устройств с наименьшими удельными массогабаритными показателями относятся полярные конденсаторы фильтра низких частот, работа которых может происходить при одностороннем поступлении избыточной энергии коммутации (пассивные демпфирующие устройства (ПДУ)) или при двухстороннем обмене энергией конденсатора с индуктивными элементами (активные демпфирующие устройства (АДУ)). Схема активного демпфирующего устройства, показанная в [2], после надлежащего изменения закона управления может выполнять более сложные функции активного корректора коэффициента мощности (ККМ). Основное предназначение ККМ состоит в обеспечении электромагнитной совместимости нелинейных, в том числе преобразовательных, нагрузок с питающей сетью. В отличие от традиционных элементов компенсации реактивной мощности и мощности высших гармоник активные ККМ способны решать указанные задачи в комплексе, в том числе при изменяющейся величине и форме тока компенсируемой нагрузки. При выполнении преобразовательной нагрузки на запираемых вентилях в задачу ККМ должны входить рассмотренные ранее функции демпфирования сетевого тока и ограничения коммутационных перенапряжений. Эта особенность расширяет области возможного применения ККМ на основе АДУ.

Рассмотрение общих принципов активной компенсации проведём на примере базовой схемы ККМ в виде однофазного инвертора напряжения с накопительным конденсатором C_k на стороне постоянного тока и согласующим дросселем L_k на сетевом входе [1, 4]. Данная схема реализует известный универсальный

принцип параллельной компенсации, не имеющий каких-либо принципиальных ограничений на области возможного применения [1]. При анализе будем считать, что потери мощности в схемах рассматриваемых компенсаторов равны нулю, а напряжение сети сохраняет синусоидальную форму. Работа ККМ на простейшую активно-индуктивную нагрузку иллюстрируется диаграммами, представленными на рис. 1. Полагается, что отстающий от ЭДС сети ток нагрузки $i_n(t)$ представлен суммой активной и реактивной составляющих

$$i_n(t) = i_{на}(t) + i_{нр}(t), \tag{1}$$

$$\begin{aligned} i_{на}(t) &= I_M \sin(\omega_0 t - \varphi_n); & i_{нр}(t) &= I_M \cos(\varphi_n) \sin(\omega_0 t); \\ i_{нр}(t) &= I_M \sin(\varphi_n) \sin(\omega_0 t - \pi/2), \end{aligned}$$

где I_M, φ_n – амплитудное значение тока и фазовый угол нагрузки.

При условии, что ток параллельно работающего компенсатора изменяется в противофазе по отношению к равной по модулю реактивной составляющей тока нагрузки

$$i_k = -i_{нр} = I_M \sin(\varphi_n) \cos(\omega_0 t), \tag{2}$$

система «нагрузка – компенсатор» будет потреблять из сети минимальное значение тока $i(t) = i_{на}(t)$, т.е. только активную мощность.

Как видно из рис. 1, а, б, задача формирования тока компенсатора решается без применения дополнительного источника энергии в результате взаимодействия реактивных элементов C_k, L_k и нагрузки с помощью четырёх транзисторов $V_{к1} \div V_{к4}$.

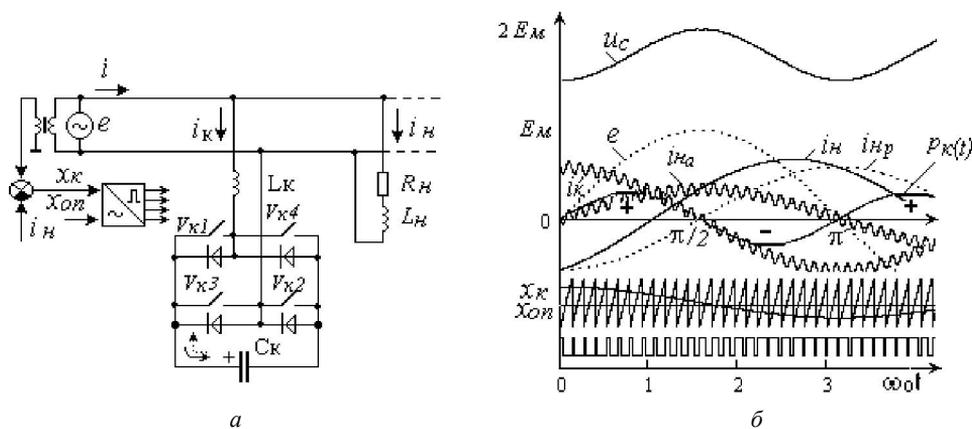


Рис. 1. Функциональная схема ККМ на основе демпфирующего конденсатора (а) и его рабочие диаграммы (б)

Полагается, что согласно способу ШИМ-2 переключения транзисторов происходят с высокой несущей частотой в моменты равенства опорного сигнала $x_{оп}(t)$ и управляющего сигнала (ошибки регулирования)

$$x_k(t) = k \cdot e(t) - i_n(t)/I_M,$$

где $e(t)$ – приведённая к амплитуде относительная ЭДС сети; $k = i_{на}/i_n = \cos(\varphi_n)$ – коэффициент сдвига тока нагрузки.

Формирование тока компенсатора на каждом периоде несущей частоты происходит в два этапа. Если на первом этапе включение соответствующей пары транзисторов будет приводить к возрастанию тока компенсатора благодаря разряжающемуся конденсатору, то на втором этапе наблюдается обратная картина – выключение транзисторов будет приводить к уменьшению втекающего в положительную обкладку заряжающегося конденсатора тока компенсатора. Результатом высокочастотных переключений и соответствующего изменения длительности включённого состояния транзисторов будет служить необходимой величины и формы ток на сетевом входе компенсатора $i_k(t)$. Его суммирование с током нагрузки приведёт к разгрузке сети от реактивной составляющей тока $i(t) = i_k(t) + i_n(t) = i_{на}(t)$. При этом пульсации тока и напряжения компенсатора ввиду высокой частоты переключений легко поддаются сглаживанию [5].

Анализ электромагнитных процессов показывает, что совместная работа ККМ и компенсируемой нагрузки протекает в условиях взаимного энергетического обмена реактивной мощностью. Длительная работа в установившемся режиме требует соблюдения баланса энергий как на периоде сети, так и внутри каждого такта несущей частоты. Выяснению условий баланса на частоте сети помогают выражения мгновенной мощности сетевого входа, записанные без учёта пульсаций:

для компенсатора

$$p_k(t) = e(t)i_k(t) = \frac{I_m E_m}{2} \sin(\varphi_n) \cdot \sin(2\omega_0 t); \quad (3)$$

для нагрузки

$$p_n(t) = e(t)i_n(t) = I_m \cos(\varphi_n) \sin^2(\omega_0 t) - \frac{I_m E_m}{2} \sin(\varphi_n) \sin(2\omega_0 t). \quad (4)$$

Видно, что выражение (3) и второе слагаемое в составе (4) представляют собой обменную (реактивную) составляющую мгновенной мощности, которой обмениваются нагрузка и компенсатор, в то время как первое слагаемое в составе (4) представляет собой активную составляющую мощности, получаемую из сети. Диаграммы рис. 1, б показывают, что кривая обменной мощности $p_k(t)$ дважды меняет знак на сетевом периоде. Влияние изменений знака $p_k(t)$ на баланс напряжений внутри периода тактовой частоты проведём с помощью схем замещения и векторных диаграмм, изображённых на рис. 2 в предположении постоянства тока нагрузки.

Из рис. 2, а видно, что на интервалах потребления мощности $p_k(t) > 0$ условием начала первого этапа (этапа частичного разряда накопительного конденсатора) служит превышение напряжения конденсатора над разностью ЭДС индукции дросселя и ЭДС сети $u_c(t) \geq e_L - e$, в то время как второй этап (этап заряда накопительного конденсатора) осуществляется под воздействием суммы этих ЭДС $u_c(t) = e + e_L$ (см. рис. 2, б). Данные условия обуславливают тенденцию к возрастанию уровня напряжения на конденсаторе от одного такта ШИМ к другому.

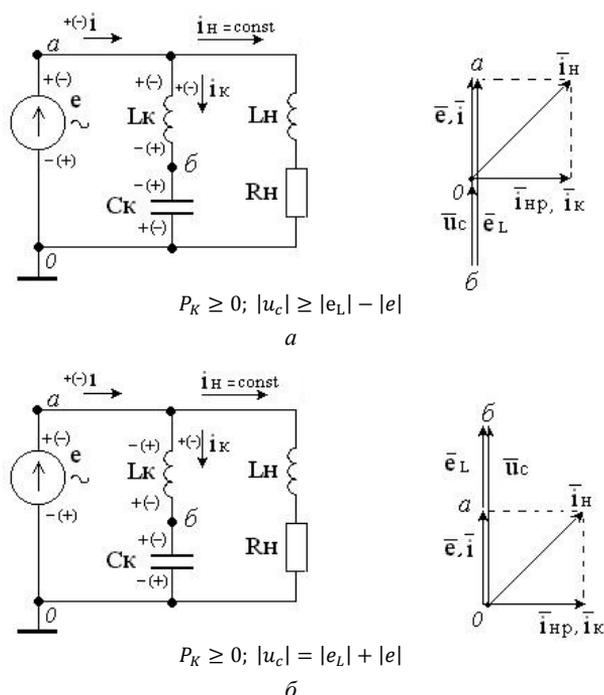


Рис. 2. Энергетические обменные процессы в схеме ККМ при $p_k(t) > 0$ на интервалах разряда (а) и заряда (б) конденсатора C_K

На интервалах возврата мощности $p_k(t) < 0$ условия энергетического баланса меняются, так как теперь для разряда требуется превышение напряжения конденсатора над суммарным значением ЭДС сети и дросселя $u_c(t) \geq e + e_L$ (см. рис. 3, а). На практике напряжение конденсатора в это время должно быть не меньше удвоенной амплитуды сетевого напряжения. Однако получению такого превышения не способствуют условия последующего заряда, который на каждом такте происходит под воздействием разности указанных ЭДС $u_c(t) = e_L - e$ (см. рис. 3, б).

В результате напряжение конденсатора на интервалах $p_k(t) < 0$ снижается. Таким образом, работа ККМ сопровождается низкочастотными колебаниями напряжения накопительной ёмкости. Как видно из рис. 1, б, колебания происходят относительно некоторого среднего уровня u_{c0} с удвоенной частотой сети и амплитудой Δu_c , зависящих от амплитуды тока I_M и фазового угла φ_H компенсируемой нагрузки. Получим граничную зависимость между параметрами накопителя и нагрузки. Для этого подсчитаем энергию, которую должен возвращать конденсатор на каждом интервале $p_k(t) < 0$ длительностью $\pi/2$ (5 мс):

$$\Delta W_K = \frac{1}{\omega_0} \int_{\pi/2}^{\pi} p_k(t) d\omega_0 t = -\frac{I_M E_M}{2\omega_0} \sin(\varphi_H). \quad (5)$$

Значение располагаемой энергии следует выразить через параметры конденсаторного накопителя [1, 2, 4]

$$\Delta W_c = \frac{C_k}{2} [(u_{co} + \Delta u_c / 2)^2 - (u_{co} - \Delta u_c / 2)^2] = C_k u_{co} \Delta u_c, \quad (6)$$

где u_{co} – средний за указанный интервал времени уровень напряжения конденсатора; Δu_c – полное изменение напряжения конденсатора на интервале $\pi/2 \div \pi$.

Условие баланса энергий в установившемся режиме работы с учётом возможных потерь следующее:

$$C_k u_{co} \Delta u_c \geq \frac{I_M E_M}{2\omega_0} \sin(\varphi_H). \quad (7)$$

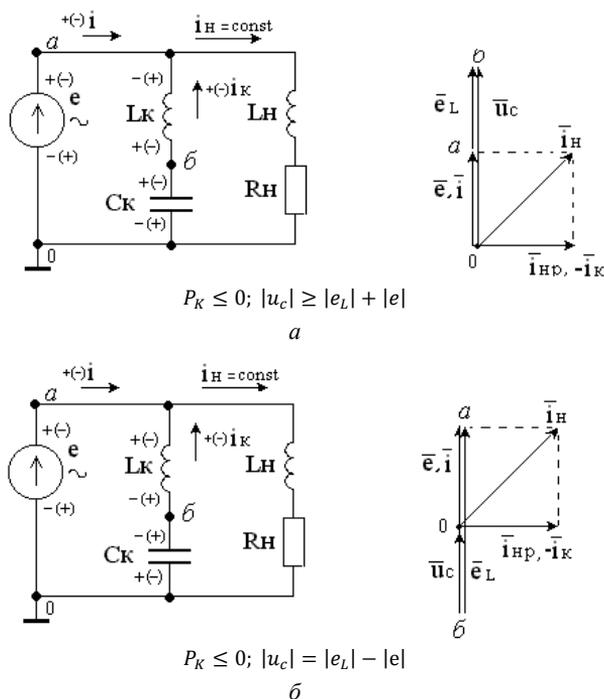


Рис. 3. Энергетические обменные процессы в схеме ККМ при $p_k(t) \leq 0$ на интервалах разряда (а) и заряда (б) конденсатора C_k

Попутно определим необходимую ёмкость неполярного «косинусного» конденсатора в традиционной схеме параллельной компенсации реактивной мощности [1]

$$C_c = \frac{I_M}{E_M \omega_0} \sin(\varphi_H). \quad (8)$$

Расчеты показывают, что в условиях реальных ограничений переменных $u_{co} \leq 2E_M$, $\Delta u_c \leq E_M/4$ применение ККМ требует большей ёмкости полярного конденсатора

$$\frac{C_k}{C_c} = \frac{E_M^2}{2u_{co} \Delta u_c} \geq 1. \quad (9)$$

Данный вывод не умаляет достоинств ККМ, область применения которых значительно шире приведённого примера. Кроме того, известно, что удельные характеристики полярных конденсаторов в составе ККМ превышают аналогичные характеристики неполярных аналогов, обуславливая их малые массогабаритные и стоимостные показатели.

Согласно полученной зависимости (7) на рис. 4, а построено семейство гиперболических кривых $I_m = f(\varphi_n)$, ограничивающих рабочую область ККМ при той или иной величине энергоёмкости $\Delta W_c = \text{const}$.

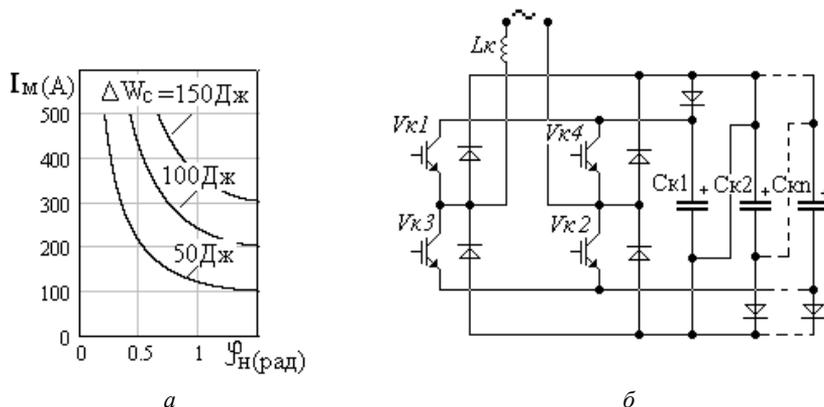


Рис. 4. Рабочая область (а) и схема модификации ККМ (б)

Расширение этой области в условиях упомянутых ограничений на величину пульсаций Δu_c требует увеличения ёмкости конденсатора C_k или среднего уровня напряжения на его обкладках u_{co} . Однако увеличение C_k может не дать ощутимых результатов, так как ведёт к уменьшению уровня u_{co} . Указанное противоречие требует конструктивных изменений. В схеме рис. 4, б нежелательное понижение напряжения конденсатора на интервалах $p_k(t) < 0$ компенсируется последовательным соединением нескольких одинаковых секций конденсатора $C_{к1} = C_{к2} = \dots = C_{кn}$. Благодаря разделительным диодам подключение секций к питающей сети на интервалах заряда происходит параллельно, а на интервалах разряда – последовательно. Саморазряду конденсаторов на интервалах включения транзисторов препятствует переход обратных диодов в запертое состояние. Число последовательно включённых секций в данной схеме определяется необходимым уровнем превышения напряжения конденсатора на первом этапе коммутации. Нежелательное повышение этого напряжения на интервалах $p_k(t) > 0$ можно исключить периодическим возвратом схемы в исходное состояние, однако это решение потребует дополнительных транзисторных ключей [3, 6].

Литература

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: Корона, 2001. 320 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. 3-е изд. Новосибирск: НГТУ, 2004.

3. Пат. 2167484 РФ, (51) МПК H02M 7/12 (2000.01), H02M 7/155 (2000.01). Способ управления мощностью на сетевом входе трёхфазного вентильного преобразователя / Сидоров С.Н.; патентообладатель Ульяновский гос. техн. ун-т. № 99125760/09; заявл. 03.12.1999; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14.

4. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 632 с.

5. Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией. М.: Энергия, 1968. 96 с.

6. Частотно-регулируемые электроприводы в технологиях шинопроизводства / Р.Н. Ганиев, Н.И. Горбачевский, В.Н. Дмитриев, С.Н. Сидоров; под. ред. Н.И. Горбачевского. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 245 с.

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

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

ГАНИЕВ РИШАТ НАИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятия, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (n7007@mail.ru).

**N. GORBACHEVSKY, S. SIDOROV, R. GANIEV
ACTIVE POWER COEFFICIENT CORRECTOR
ON BASIS OF DAMPING CAPACITOR**

Key words: power factor, corrector, damping capacitor, power factor corrector.

The purpose of the development of the power factor corrector is to find ways to correct the power factor of the network input of power frequency converters with the need to eliminate the higher harmonic components in the network voltage curve, this is one of the main tasks of electromagnetic compatibility of frequency converters with the network. The novelty of the development consists in the proposed new method to correct the power factor of frequency converters, based on the properties of the polar capacitor RA, switched by means of controlled valves, different from the known version of the damping device output voltage inverter circuit based on a polar capacitor, switching in two stages. Studies of the proposed power factor corrector were carried out by modeling in the program MatLab 14, Simulink package. The corrector of the power factor allows achieving fluent changing of the currents of the stator windings during commutation, being over through turning off the power transistors in the de-energized condition.

References

1. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0.* [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0.]. St. Petersburg, Korona Publ., 2001, 320 p.

2. Zinovev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki. 3-e izd.* [Fundamentals of Power electronics. 3rd ed.]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2004.

3. Sidorov S.N. *Sposob upravleniya moshchnost'yu na setevom vkhode trekhfaznogo ventil'nogo preobrazovatelya* [The method for controlling the power at the mains input of a three-phase inverter]. Patent RF, no. 2167484, 2001.

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

5. Sandler A.S., Gusyatskii Yu.M. *Tiristornye inventory s shirotno-impul'snoi modulyatsiei* [Thyristor inverters with pulse-width modulation]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 96 p.

6. *Chastotno-reguliruemye elektroprivody v tekhnologiyakh shinoproizvodstva* [Frequency-regulated electric drives in tire production technologies]. R.N. Gani-ev, N.I. Gorbachevskii, V.N. Dmitriev, S.N. Sidorov, pod. red. N.I. Gorbachevskogo. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2015, 245 p.

GORBACHEVSKY NIKOLAY – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (aep-nk@mail.ru).

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

GANIEV RISHAT – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (n7007@mail.ru).

Ссылка на статью: Горбачевский Н.И., Сидоров С.Н., Ганиев Р.Н. Активный корректор коэффициента мощности на основе демпфирующего конденсатора // Вестник Чувашиского университета. – 2018. – № 1. – С. 36–43.

УДК 621.313.8

ББК 31.261

НГУЕН КОНГ ТАМ

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ МАГНИТОВ НА РАБОЧИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БЕСПАЗОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: периодические комплексные потенциальные функции, высота постоянных магнитов, ЭДС обмотки статора, электромагнитный момент.

Рассмотрены основные и добавочные явления магнитоэлектрического беспазового вентильного двигателя в немагнитном зазоре, к которому следует отнести и слой высокоэнергетического магнита. При высоте постоянных магнитов 11,7 мм индукция магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором беспазового вентильного двигателя достигает максимального значения. Электромагнитный момент беспазового вентильного двигателя с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях может быть в 1,5 раз больше аналогичного момента беспазового вентильного двигателя с медной обмоткой.

В настоящее время именно высокоэнергетические спеченные магниты Nd – Fe – В можно рассматривать как наиболее перспективные для использования в роторах магнитоэлектрических электродвигателей. Важное значение имеет высокая остаточная намагниченность редкоземельных магнитов, что, в свою очередь, обеспечивает высокий результирующий электромагнитный момент на валу электродвигателя. Кроме того, высокая коэрцитивная сила таких магнитов позволяет предотвратить размагничивание ротора при его работе. В электрических машинах массив современного высокоэнергетического магнита Nd – Fe – В, имеющего относительную магнитную проницаемость, близкую к единице, также может считаться немагнитным зазором.

С помощью периодических комплексных потенциальных функций можно описать магнитное поле в воздушном зазоре с гладкими границами беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя с медными и медно-железными проводами и, следовательно, рассчитать индукцию в воздушном зазоре и ЭДС обмотки при варьировании высоты постоянных магнитов.

Обмоточный провод медный. Известно общее решение граничной задачи Дирихле для бесконечной полосы при периодическом изменении магнитного потенциала $u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\alpha x$ на нижней граничной стороне (для которой $y = 0$), полученное методом разделения переменных [3]:

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \sin n\alpha x \operatorname{sh}[n\alpha(\delta - y)]}{\operatorname{sh} n\alpha\delta}, \quad (1)$$

где $\alpha = \pi/\tau$; τ – полюсное деление; δ – ширина полосы.

Представляя скалярный магнитный потенциал магнитов, расположенных в воздушной полосе на поверхности ярма ротора (на нижней границе бесконечной полосы воздушного зазора шириной δ), синусным рядом [2]

$$u(x, \vartheta) = \frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\alpha x = \frac{4}{\pi} \frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{2n-1} \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)], \quad (2)$$

можем получить составляющие магнитной индукции по осям x и y в полосе воздушного зазора, вызванной магнитами ротора

$$B_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0\alpha I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{\text{sh} \alpha(2n-1)\delta} \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \text{sh}[\alpha(2n-1)(y-\delta)], \quad (3)$$

$$B_{py}(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_0\alpha I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{\text{sh} \alpha(2n-1)\delta} \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \text{ch}[\alpha(2n-1)(y-\delta)], \quad (4)$$

где $I_M = 2H_{cB}h_M$; δ – ширина полосы; ϑ – сдвиг продольной оси ротора относительно аналогичной оси магнитного поля статора.

При сохранении наружного диаметра ротора будем изменять высоту h_M магнитов в промежутке от 5 мм до 20 мм и рассматривать последовательное изменение магнитной индукции в воздушном зазоре, которая влияет на рабочие свойства беспазового вентильного электродвигателя¹.

На рис. 1–3 показаны кривые магнитной индукции макетного образца беспазового вентильного двигателя, имеющего неодим-железо-боровые магниты высотой 5; 11,7 и 20 мм.

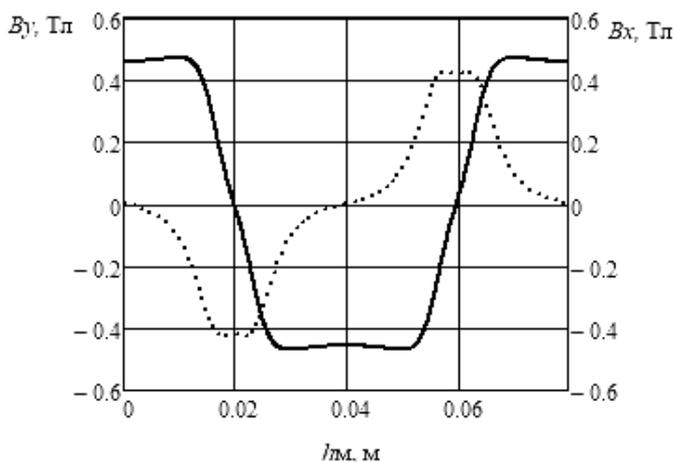


Рис. 1. Составляющие магнитной индукции по осям x (пунктир) и y (сплошная линия) на поверхности магнитов ($y = h_M = 5$ мм), вызванные МДС магнитов

¹ Некоторые параметры рассматриваемого беспазового вентильного двигателя следующие: диаметр расточки статора $D_i = 75,5$ мм; длина ротора $l = 140$ мм; число полюсов $2p = 6$; число виртуальных пазов $z = 36$; число виртуальных пазов на полюс и фазу $q = 2$; частота тока $f = 50$ Гц; немагнитный зазор $\delta = 1,05$ мм; число витков в катушке $w_k = 8$; число витков в фазе $w = 96$; шаг обмотки $y = 5/6\tau$; коэрцитивная сила магнитов $H_{cB} = 915$ кА/м; $I_n = 5$ А.

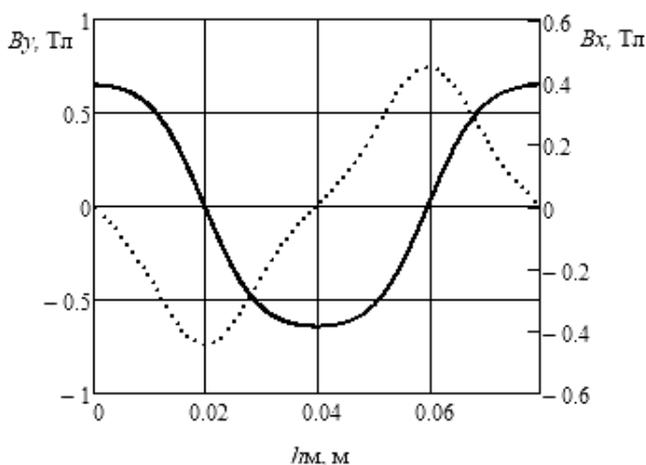


Рис. 2. Составляющие магнитной индукции по осям x (пунктир) и y (сплошная линия) на поверхности магнитов ($y = h_m = 11,7$ мм), вызванные МДС магнитов

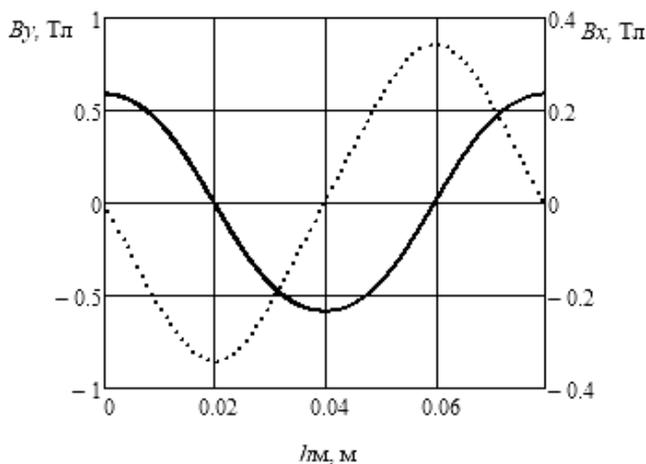


Рис. 3. Составляющие магнитной индукции по осям x (пунктир) и y (сплошная линия) на поверхности магнитов ($y = h_m = 20$ мм), вызванные МДС магнитов

В табл. 1 указаны значения радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (3), (4).

Таблица 1

Значения радиальной магнитной индукции при изменении высоты постоянных магнитов

h_m , мм	5	6	7	8	9	10	11,7	13	14	15	16	17	18	19	20
B_y , Тл	0,47	0,51	0,55	0,59	0,61	0,63	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,62	0,6	0,59

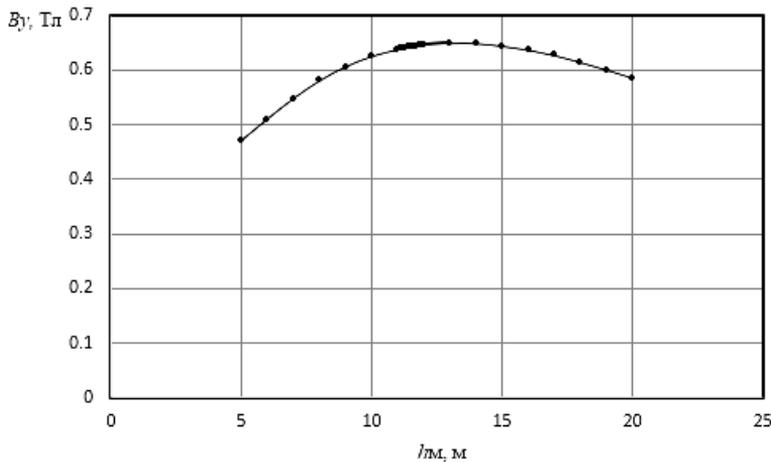


Рис. 4. Значения радиальной магнитной индукции по оси y на поверхности магнитов при изменении высоты магнитов

На рис. 4 видно, что значение индукции в воздушном зазоре в значительной степени зависит от высоты постоянного магнита, индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения при высоте магнитов $h_m = 11,7$ мм. Увеличение магнитной индукции при увеличении высоты постоянных магнитов от 5 до 11,7 мм составляет 38%. При дальнейшем увеличении значения h_m индукция практически уменьшается.

Электромагнитный момент находим по формуле метода натяжений [4]

$$M(t) = \frac{p l D}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} B_y(x, h_m, t, \tau/2) B_x(x, h_m, t, \tau/2) dx, \quad (5)$$

где p – число пар полюсов; l, D – активная длина статора и диаметр наружной поверхности магнитов ротора, соответственно.

Это будет значение момента, соответствующее сдвигу основных гармоник МДС статора и ротора на половину полюсного деления.

Мгновенные значения ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим потоком магнитной индукции в воздушном зазоре по оси y , будут равны [4]

$$\begin{aligned}
 e(t) &= -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -2plw_k \frac{d}{dt} \left\{ \int_{x(t)}^{x(t)+y_k} B_y[x(t), h_m, \tau/2] dx + \int_{x(t)+t_z}^{x(t)+y_k+t_z} B_y[x(t), h_m, \tau/2] dx \right\} = \\
 &= -2plw_k \left\{ \int_{x(t)}^{x(t)+y_k} \frac{\partial B_y[x(t), h_m, \tau/2]}{\partial t} dx + \int_{x(t)+t_z}^{x(t)+y_k+t_z} \frac{\partial B_y[x(t), h_m, \tau/2]}{\partial t} dx \right\} - \\
 &\quad - 2pw_k l \frac{\omega}{\alpha} \left\{ B_y[(x(t)+y_k), h_m, \tau/2] - B_y[x(t), h_m, \tau/2] + \right. \\
 &\quad \left. + B_y[(x(t)+y_k+t_z), h_m, \tau/2] - B_y[x(t)+t_z, h_m, \tau/2] \right\}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

В табл. 2 и на рис. 5 приведены значения электромагнитных моментов и ЭДС обмотки статора при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (5) и (6).

Таблица 2
Значения электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора при изменении высоты постоянных магнитов

$h_m, \text{мм}$	$M, \text{Нм}$	ЭДС, В
5	4,7	50,33
7	5,4	58,38
9	5,8	64,01
11,7	5,9	67,6
13	5,86	67,5
15	5,7	67,0
17	5,5	65
19	5,2	62,14

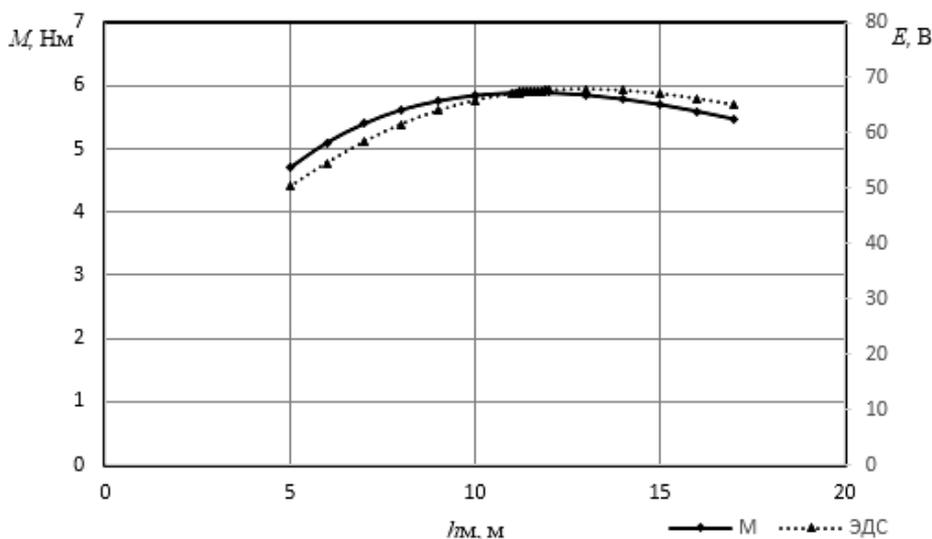


Рис. 5. ЭДС обмотки статора (пунктирная) и электромагнитный БМДП момент (сплошная линия) при изменении высоты магнитов

Предполагая с учётом табл. 2, что при высоте магнита $h_m = 11,7$ мм индукция в воздушном зазоре достигнет максимального значения 0,65 Тл, получаем, что при этом значении индукции электромагнитный момент и ЭДС обмотки статора БВД по формуле (5) и (6) будут равными 5,9 Нм и 67,6 В, соответственно.

Обмоточный провод комбинированный (медно-железный). Комбинированный провод имеет медную сердцевину и ферромагнитную оболочку [3, 9, 10]. Наиболее оптимальным будет комбинированный провод, у которого ферромагнитная часть поперечного сечения составит примерно 40% [10].

В этом случае эквивалентная относительная магнитная проницаемость, находящаяся по формуле

$$\mu_r = \frac{\text{Магнитный поток с комбинированной обмоткой}}{\text{Магнитный поток с медной обмоткой}},$$

может достичь значения примерно 3,5. При наращивании ферромагнитной части сечения свыше 40% значение относительной магнитной проницаемости μ_r остаётся неизменным (рис. 6).

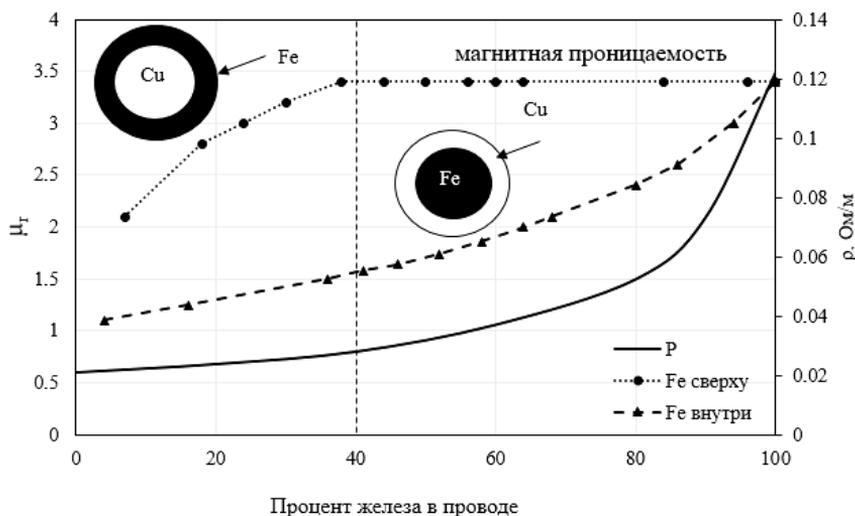


Рис. 6. Эквивалентная относительная магнитная проницаемость μ_r и удельное сопротивление комбинированного провода ρ

Этот результат указывает, что магнитное сопротивление слоя обмотки из комбинированного провода будет в μ_r раз меньше сопротивления слоя из медной обмотки той же толщины.

Следовательно, при расчёте магнитного поля в немагнитном зазоре можем обмоточный слой из комбинированного провода как элемент магнитной цепи заменить эквивалентным медным слоем, имеющим в μ_r раз меньшую толщину по сравнению с таковой комбинированного слоя. В этом случае магнитную проницаемость всей расчётной полосы можно принять равной магнитной проницаемости воздуха, т.е. магнитная среда полосы будет однородной.

Электромагнитные расчёты, сделанные рассматриваемым методом, будут справедливы именно для однородного по магнитной проницаемости немагнитного зазора.

Если принять за эквивалентную толщину $\tilde{\delta}_{об}$ обмотки с комбинированным проводом

$$\tilde{\delta}_{об} = \delta_{об} / \mu_r, \tag{7}$$

где $\delta_{об}$ – реальная толщина этой обмотки, то высота немагнитной полосы у двигателя с комбинированной обмоткой составит

$$\delta = \tilde{\delta}_{об} + h_M + \delta_B, \quad (8)$$

где h_M , δ_B – высота магнитов и размер воздушного зазора, соответственно.

При $\mu_r = 3,5$ по формулам (7) и (8) получим расчётное значение немагнитного промежутка (ширины бесконечной полосы) $\delta = 10,59$ мм вместо 15,05 мм при медной обмотке. Тогда для этой меньшей ширины немагнитной полосы значения электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора БВД с комбинированной обмоткой оказались равными 8,83 Нм и 88,18 В, соответственно.

Выводы. 1. При высоте постоянных магнитов 11,7 мм индукция магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором беспазового вентильного двигателя достигает максимального значения, поэтому ЭДС обмотки статора и электромагнитный момент имеют максимальные значения.

2. Электромагнитный момент вентильного двигателя с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях может быть в 1,5 раза больше аналогичного момента вентильного двигателя с медной обмоткой.

Литература

1. Афанасьев А.А., Нгуен Конг Там. Беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с комбинированным проводом // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 5–12.
2. Афанасьев А.А., Там Нгуен Конг, Нестерин В.А. Полевая аналитическая модель беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 26–36.
3. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. 256 с.
4. Sanada M., Morimoto S. Efficiency Improvement in High speed Operation using Slot-less Configuration for Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE PES 2007 General Meeting*, 2007, pp. 3–27.
5. Sanada M., Ogawa T., Morimoto S., Takeda Y. Thrust Improvement of Linear Electromagnetic Actuator using Compound Wire with Copper and Iron. *Proc. of 2005 Int. Power Electronics Conf. Niigata*, 2005, pp. 431–434.

НГУЕН КОНГ ТАМ – аспирант кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (nguyencong-tam06@gmail.com).

NGUYEN CONG TAM INFLUENCE OF HEIGHT OF MAGNETS ON WORKING PROPERTIES OF MAGNETIC-ELECTRIC SLOT-LESS VALVE MOTOR

Key words: *periodic complex potential functions, height of permanent magnets, EMF winding stator, electromagnetic moment.*

The article considers the main and additional phenomena of the slot-less magneto-electric valve motor of a nonmagnetic gap, including also the layer of a high-energy magnet. With a permanent magnet height of 11,7 mm, the induction of the magnetic field in the air gap between the stator and the rotor of the slot-less valve motor reaches a maximum value. The electromagnetic moment of the slot-less valve motor with a combined winding under some other equal conditions can be 1,5 times greater than the analogous moment of a slot-less valve motor with a copper winding.

References

1. Afanavsyev A.A., Nguen Cong Tam. *Bespazovyi magnitoelektricheskii ventil'nyi dvigatel' s kombinirovannym provodom* [The slotless magnetolectric valve motor with combined wire]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 5–12.
2. Afanasyev A.A., Tam Nguen Kong, Nesterin V.A. *Polevaya analiticheskaya model' bespazovogo magnitoelektricheskogo ventilnogo dvigatela* [Field analytical model of slotless magnetolectric valve engine]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 26–36.
3. Dombrovskii V.V. *Spravochnoe posobie po raschetu elektromagnitnogo polya v elektricheskikh mashinakh* [Handbook on the calculation of the electromagnetic field in electrical machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1983, 256 p.
4. Sanada M., Morimoto S. Efficiency Improvement in High speed Operation using Slot-less Configuration for Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE PES 2007 General Meeting*, 2007, pp. 3–27.
5. Sanada M., Ogawa T., Morimoto S., Takeda Y. Thrust Improvement of Linear Electromagnetic Actuator using Compound Wire with Copper and Iron. *Proc. of 2005 Int. Power Electronics Conf. Niigata*, 2005, pp. 431–434.

NGUYEN CONG TAM – Post-Graduate Student, Department of Management and Computer Science in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (nguyen-congtam06@gmail.com).

Ссылка на статью: *Нгуен Конг Там.* Влияние высоты магнитов на рабочие свойства магнитоэлектрического беспазового вентильного двигателя // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 44–51.

УДК 621.3.06
ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, С.В. ВОЛКОВ, А.А. САВЕЛЬЕВ

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ ВЫРАВНИВАНИИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ

Ключевые слова: потери электрической энергии, трехфазный трансформатор, несимметричная нагрузка, выравнивание нагрузки, коэффициент несимметрии, коэффициент неравномерности, качество электрической энергии.

Предложена математическая модель трансформатора, учитывающая тип магнитопровода, а также потери в его конструктивных элементах от составляющей токов нулевой последовательности. Показан характер зависимости потерь трансформатора от различия проводимостей нагрузок отдельных фаз при неизменной суммарной проводимости. На основе результатов компьютерного моделирования определена связь суммарных потерь мощности с коэффициентами несимметрии токов по нулевой и обратной последовательностям и коэффициентом неравномерности нагрузки. Дана оценка снижению дополнительных потерь мощности в трансформаторах при использовании устройства выравнивания трехфазной нагрузки.

В распределительных электрических сетях 0,4 кВ распространен несимметричный режим нагрузки. Систематическое неравенство нагрузки по фазам может иметь место даже в правильно спроектированных электрических сетях при их расширении. Несимметрия токов является причиной отклонений напряжений в точках общего присоединения нагрузки. В ряде случаев такие отклонения превышают допустимые стандартом¹ значения, что может приводить к негативным последствиям для электрооборудования конечных потребителей [7].

Несимметрия нагрузки является причиной потерь в элементах электрических сетей. Актуальность данной проблемы подтверждает большое количество исследований по данной тематике. Так, в работах [5, 8] авторы представляют алгоритмы и компьютерные программы для определения потерь электроэнергии в элементах электрических сетей от снижения качества электроэнергии, для чего используются известные из литературных источников зависимости дополнительных потерь мощности от коэффициента несимметрии напряжений. В работе [8] А.А. Мирошник оценивает степень увеличения потерь мощности и энергии вследствие неравномерности нагрузки фаз через коэффициент неравномерности и утверждает факт того, что потери в несимметричном режиме превышают потери в симметричном режиме работы. А.В. Дед и соавт. описывают влияние несимметрии на потери мощности в различных элементах электрических сетей [2, 3, 4].

¹ ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

Существуют исследования, посвященные различным способам снижения несимметрии токов и напряжений. Так, в работах [9, 10, 11] рассматривается устройство выравнивания нагрузки, перераспределяющее нагрузку между фазами электрической сети, и алгоритмы его работы.

Известны работы, посвященные моделированию трансформаторов и определению дополнительных потерь в них при несимметрии. В работе [12] приводится математическая модель во временной области трехфазного трансформатора с единым магнитопроводом, позволяющая учитывать потери в стали. Моделированию трансформатора с трехстержневым магнитопроводом в частотной области посвящена работа [1]. Предложенная авторами модель позволяет рассчитать модули и углы токов и напряжений в обмотках. Проблеме минимизации потерь в силовых трансформаторах посвящен ряд других работ, например, [6, 13]. Значимой составляющей потерь при наличии токов нулевой последовательности являются потери в конструктивных элементах трансформатора, наводимые магнитными потоками нулевой последовательности. Учет этого фактора при моделировании трансформаторов, наряду с разработкой и исследованием методов снижения потерь при несимметрии, представляется актуальной задачей.

Цель работы состоит в исследовании потерь трансформатора при несимметрии нагрузки на основе математической модели трансформатора, а также в оценке влияния устройства выравнивания нагрузки на потери в трансформаторах.

Научная новизна работы заключается в разработке математической модели трехфазного трансформатора во временной области, учитывающей тип магнитопровода и потери в конструктивных элементах от магнитных потоков нулевой последовательности, а также в оценке влияния устройства выравнивания нагрузки на снижение дополнительных потерь в трансформаторах.

Методы исследования основывались на экспериментальном определении параметров трехфазного трансформатора, численном компьютерном моделировании его работы при несимметричной нагрузке. Методологическую основу исследования составила теоретическая электротехника, теория линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

Математическая модель. Рассмотрен трехфазный двухобмоточный трансформатор, состоящий из 6 индуктивно связанных катушек – по 2 на каждую фазу (рис. 1, *a*). Каждая катушка в математической модели представлена в виде активно-индуктивного контура. Контур имеет определенную индуктивную связь между собой, зависящую, помимо прочего, от типа магнитопровода. Учет потерь в конструктивных металлических элементах трансформатора, возникающих в результате замыкания через них магнитных потоков нулевой последовательности, выполнен в модели путем добавления дополнительного короткозамкнутого контура (параметры которого обозначены индексом *sc*), имеющего слабую индуктивную связь с контурами катушек. Насыщение магнитопровода в модели не учитывалось.

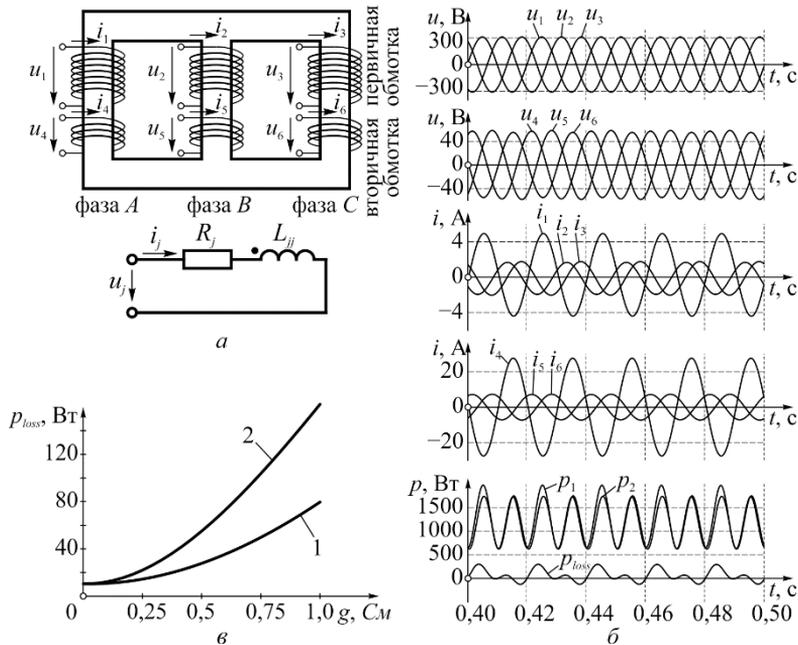


Рис. 1. Обозначения обмоток трехфазного трансформатора и один из индуктивно-связанных контуров (а); осциллограмма основных электрических величин трансформатора (б); зависимость суммарных потерь мощности p_{loss} от суммарной проводимости нагрузки g : 1 – при симметричной нагрузке; 2 – при несимметричной нагрузке (в)

При разработке математической модели использовался подход, описанный в работе [15]. Математическое описание модели трансформатора рассматривалось в виде системы ОДУ первого порядка в матричной форме

$$U = R \cdot I + L \cdot dI / dt, \quad (1)$$

где $U = [u_1, u_2, \dots, u_6, u_{sc}]^T$ и $I = [i_1, i_2, \dots, i_6, i_{sc}]^T$ – вектор-столбцы мгновенных значений напряжений и токов катушек; $R = \text{diag}[R_1, R_2, \dots, R_7, R_{sc}]$ – матрица сопротивлений катушек; L – матрица индуктивностей, элементы главной диагонали которой представляют собой собственные индуктивности катушек, остальные элементы – взаимные индуктивности.

Матрица индуктивностей зависит от типа магнитопровода. Так, в трехстержневом трансформаторе все контуры имеют индуктивную связь, и матрица индуктивностей имеет вид

$$L_{3ст} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1sc} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2sc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{sc1} & L_{sc2} & \dots & L_{sc.sc} \end{bmatrix}.$$

В групповом трансформаторе каждая фаза может рассматриваться независимо, матрица индуктивностей в этом случае будет иметь вид

$$L_a = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{14} \\ L_{41} & L_{44} \end{bmatrix}, L_b = \begin{bmatrix} L_{22} & L_{25} \\ L_{52} & L_{55} \end{bmatrix}, L_c = \begin{bmatrix} L_{33} & L_{36} \\ L_{63} & L_{66} \end{bmatrix}.$$

Модель позволяет исследовать электромагнитные процессы в трансформаторе при произвольных входных воздействиях. В работе исследовался случай воздействия только синусоидальных питающих напряжений, для точного описания электромагнитных процессов модель трансформатора рассматривалась во временной области для мгновенных значений. Входные напряжения задавались соотношениями:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_{m1} \sin(\omega t); \\ u_2 &= U_{m2} \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ u_3 &= U_{m3} \sin(\omega t + 2\pi/3); \\ u_4 &= u_5 = u_6 = u_{sc} = 0. \end{aligned}$$

Рассматривался активный характер нагрузок. Сопротивления катушек

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = R_{s1}, \\ R_4 &= R_{s2} + R_a, \\ R_5 &= R_{s2} + R_b, \\ R_6 &= R_{s2} + R_c, \end{aligned}$$

где R_{s1} и R_{s2} – собственные активные сопротивления первичной и вторичной обмоток; R_a, R_b, R_c – сопротивления фазных нагрузок.

Суммарные потери мощности в трансформаторе p_{loss} рассчитывались как усредненное значение разности мгновенных активных мощностей [14] со стороны первичной p_1 и вторичной p_2 обмоток в установившемся режиме:

$$\begin{aligned} p_{loss} &= p_1 - p_2; \\ p_1 &= u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 + R_{sc} i_{sc}^2; \\ p_2 &= R_a i_4^2 + R_b i_5^2 + R_c i_6^2. \end{aligned}$$

Результаты моделирования. Расчет электромагнитных процессов в трансформаторе выполнялся для случая непосредственного его включения на симметричную трехфазную систему напряжений при различной нагрузке R_a, R_b, R_c . Характер нагрузки выбран чисто активный по причине широкого распространения такой нагрузки в распределительных сетях 0,4 кВ. Схема соединения обмоток Y/Y_0 . Система ОДУ (1) решалась численно относительно вектор-столбца тока I с нулевыми начальными условиями. Для решения системы уравнений и автоматизации серии численных экспериментов использовалась созданная авторами программа, написанная на языке Python, реализующая метод Гаусса – Лежандра 6-го порядка точности. Условия моделирования подразумевают возможность изменения нагрузки трансформатора в широких пределах – от холостого хода до короткого замыкания, что реализуется в модели за счет изменения во времени матриц R и L . Применяемый метод относится к группе неявных методов Рунге – Кутты и выбран по причине более высокой устойчивости решений по сравнению с явными методами.

В качестве объекта моделирования рассматривался понижающий трансформатор ТСЗИ-1,6 с номинальными фазными напряжениями 220/42 В, параметры которого были определены экспериментально. На рис. 1, б показаны

осциллограммы основных электрических величин данного трансформатора, полученные в результате моделирования. Осциллограммы соответствуют интервалу времени 0,4–0,5 с после непосредственного включения трансформатора в сеть при несимметричной нагрузке $R_a = 2$ Ом, $R_b = 8$ Ом, $R_c = 8$ Ом. Для исключения влияния переходных процессов на результаты моделирования параметры при новых входных данных определялись в установившемся режиме на интервале времени 2–3 с после включения моделируемого трансформатора.

В качестве величины, характеризующей суммарную загрузку трансформатора, выбрана суммарная проводимость трех фаз нагрузки $g = g_a + g_b + g_c$. Следует отметить, что проводимость отдельных фаз нагрузки практически пропорциональна токам в них в рабочем диапазоне нагрузок трансформатора. Для характеристики несимметрии использовался коэффициент несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям K_0 и K_2 , а также коэффициент неравномерности $k_{\text{нпр}} = 3 \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) / (I_a + I_b + I_c)^2$, применяемый автором работы [3] для оценки дополнительных потерь в элементах системы электропитания. В рассматриваемом случае при чисто активной нагрузке коэффициенты несимметрии K_0 и K_2 равны. Связь между коэффициентами несимметрии $k_{\text{нпр}}$ и K_0, K_2 в этом случае характеризуется выражением $k_{\text{нпр}} = 2 \cdot K_0^2 + 1$.

Известно, что суммарные потери трехфазного трансформатора включают условно постоянную составляющую, связанную с магнитными потерями, и составляющую, пропорциональную квадрату величины загрузки g^2 . При неизменной нагрузке g суммарные потери мощности p_{loss} различаются также в зависимости от степени несимметрии. Это различие демонстрирует рис. 1, в, кривые 1 и 2 соответствуют симметричному ($g_a = g_b = g_c = g/3$) и резко несимметричному ($g_a = g_b = 0, g_c = g$) режиму работы при одинаковой суммарной проводимости g .

Целью исследования было также определение характера зависимости потерь трансформатора от степени несимметрии при заданной суммарной проводимости $g = \text{const}$. Для этого вычислялись суммарные потери трансформатора при всех практически допустимых распределениях фазных проводимостей g_a, g_b и g_c . Множество значений проводимостей при $g = \text{const}$ в координатах g_a, g_b и g_c образует плоскость в первом октанте.

На рис. 2, а показана зависимость суммарных потерь мощности p_{loss} при различных фазных проводимостях нагрузок, но неизменной суммарной проводимости $g = 0,75$ См в виде контурного графика. График построен по результатам компьютерного моделирования исследуемого трансформатора с различными сочетаниями фазных проводимостей нагрузок. В рассматриваемых условиях график симметричен относительно точки с фазными проводимостями нагрузки $g_a = g_b = g_c = g/3 = 0,25$ См. Суммарные потери в данной точке $p_{\text{loss}} = 50$ Вт. С ростом несимметрии суммарные потери увеличиваются и достигают максимума в углах контурного графика, где проводимости двух фаз равны нулю, а проводимость третьей фазы равна g . На рис. 2, б показаны суммарные потери при изменении нагрузок двух фаз в диапазоне от 0 до $g/3$, а третьей фазы – от g до $g/3$, что соответствует линии ABC на контурном графике рис. 2, а. Это один из возможных способов изменения коэффициентов несим-

метрии токов по обратной и нулевой последовательностям K_0 и K_2 в диапазоне от 1 до 0, а коэффициента несимметрии нагрузки $k_{\text{нec}}$ – от 3 до 1. На рис. 3, а и б показаны зависимости суммарных потерь мощности p_{loss} от коэффициента несимметрии нагрузки $k_{\text{нec}}$, а также от коэффициентов несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям K_0 и K_2 . По графикам видно, что суммарные потери мощности p_{loss} пропорциональны K_0^2 , K_2^2 и $k_{\text{нec}}$.

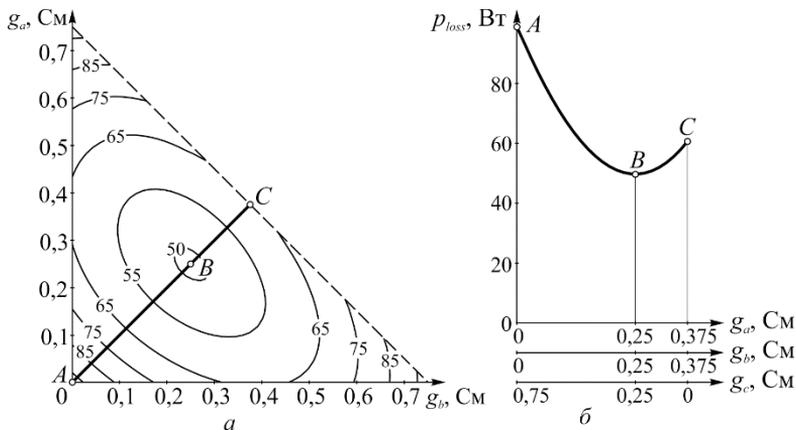


Рис. 2. Зависимость суммарных потерь мощности p_{loss} при различных фазных проводимостях нагрузок, но неизменной суммарной проводимости $g = 0,75$ См (а); зависимость суммарных потерь p_{loss} при изменении нагрузок двух фаз в диапазоне от 0 до $g / 3$, а третьей фазы – от g до $g / 3$ (б)

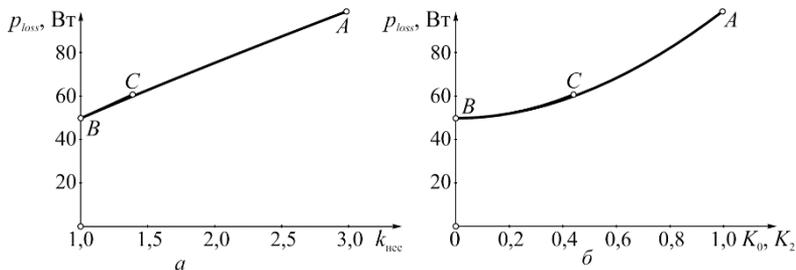


Рис. 3. Зависимость суммарных потерь p_{loss} мощности от коэффициента неравномерности нагрузки $k_{\text{нec}}$ (а); зависимость суммарных потерь p_{loss} мощности от коэффициентов несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям K_0 и K_2 (б)

Приведенные кривые могут быть аппроксимированы зависимостями $p_{\text{loss}} = 24,9 \cdot k_{\text{нec}} + 25,1$ и $p_{\text{loss}} = 47,1 \cdot K_0^2 + 2,9 \cdot K_0 + 49,5$. С достаточной для практических расчетов точностью можно считать, что

$$p_{\text{loss}} = P_{\text{symm}} + P_{\text{add}} \cdot K_0^2, \tag{2}$$

где P_{symm} – потери трансформатора при симметричной нагрузке, P_{add} – дополнительные потери при $K_0 = 1$. Составляющую $p_{\text{add}} = P_{\text{add}} \cdot K_0^2$ можно рассматривать как дополнительные потери при произвольном коэффициенте несимметрии токов по нулевой последовательности.

В работах [9, 10, 11] рассматривается устройство выравнивания нагрузки (УВН), перераспределяющее нагрузку между фазами электрической сети и алгоритмы его работы. В работе [9] показано, что применение УВН позволяет в оптимальном случае снизить коэффициент несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям в среднем до 0,72 от его значения без устройства. С учетом зависимости (2) дополнительные потери в результате применения УВН сократятся до $0,52 \cdot p_{add}$, т.е. на 48%.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении степени снижения дополнительных потерь мощности в трансформаторах при использовании устройства выравнивания нагрузки, установлении характера зависимости потерь трансформатора от проводимостей нагрузок отдельных фаз при неизменной суммарной проводимости.

К перспективам дальнейшей работы относится исследование зависимости дополнительных потерь в трансформаторах и других элементах электрических сетей при различных коэффициентах мощностей фазных нагрузок.

Выводы. 1. Предложена математическая модель трансформатора, учитывающая тип магнитопровода, а также потери в конструктивных элементах от составляющей токов нулевой последовательности.

2. Установлен характер зависимости потерь трансформатора от степени несимметрии нагрузки при заданной суммарной проводимости.

3. По результатам компьютерного моделирования показана связь суммарных потерь мощности при активном характере нагрузки с коэффициентами несимметрии токов по нулевой и обратной последовательностям и коэффициентом неравномерности нагрузки.

4. Показано, что устройство выравнивания нагрузки позволяет в оптимальном случае сократить дополнительные потери мощности в трансформаторе в среднем на 48% по сравнению с этим значением без применения устройства.

Литература

1. Бошняга В.А., Сулов В.М. Моделирование трехфазных трансформаторных устройств с трехстержневым магнитопроводом для инженерных расчетов несимметричных режимов при различных схемах соединения обмоток // Проблемы региональной энергетики. 2013. № 2(22). С. 38–50.
2. Дед А.В., Волюшкин А.И., Денисенко М.Ю., Кириченко Н.В., Сухов Е.С. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке // Омский научный вестник. 2013. № 1(117). С. 157–158.
3. Дед А.В. Определение потерь мощности в распределительных сетях с учетом влияния несимметричной нагрузки // Омский научный вестник. 2009. № 2(80). С. 167–170.
4. Дед А.В., Паршукова А.В. Метод расчета дополнительных потерь мощности при несимметрии режима работы системы электроснабжения // Инновационная наука. 2015. № 10/2015. С. 61–65.
5. Долгингер С.Ю., Лютаревич А.Г., Горюнов В.Н., Сафонов Д.Г., Черемисин В.Т. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2013. № 2(120). С. 178–183.
6. Кирисов И.Г., Овчаренко Т.И. Минимизация потерь в силовых трансформаторах при изменении режима нагрузки // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 6(124). С. 49–56.
7. Мирошник А.А. Методы вычисления потерь мощности в элементах несимметрично нагруженной сети // Электротехника і електромеханіка. 2011. № 5. С. 66–69.
8. Курилин С.П. Развитие теории несимметричных режимов и энергетических процессов асинхронных двигателей сельскохозяйственных электроустановок: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 367 с.

9. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 100–108.

10. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Алгоритмы управления трехфазным устройством выравнивания нагрузки электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 162–172.

11. Пат. 162639 РФ, МПК H02J 1/00 (2006.01) Устройство симметрирования нагрузки / Орлов А.И., Савельев А.А.; заявитель и патентообладатель Орлов А.И., Савельев А.А. № 2015146070/07; заявл. 26.10.2015; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17. 2 с.

12. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2012. Т. 321, № 4. С. 97–100.

13. Юндин М.А., Ханин Ю.И. Дополнительные потери электроэнергии в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101(07). С. 1–11.

14. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p.

15. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and drive systems. 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 2013, 680 p.

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com).

ВОЛКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики, декан электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (eef@marsu.ru).

САВЕЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – инженер 1-й категории, служба технологического развития, инноваций, энергосбережения и повышения энергетической эффективности, Филиал ПАО «Межрегиональная сетевая компания Центра и Приволжья» – «Маризэнерго», Россия, Йошкар-Ола (savelich94@gmail.com).

A. ORLOV, S. VOLKOV, A. SAVELYEV

REDUCTION OF POWER LOSS IN THREE-PHASE TRANSFORMERS AT BALANCING OF NONSYMMETRICAL LOAD

Key words: losses of electric energy, three-phase transformer, nonsymmetrical load, unbalanced load, load balancing, unbalance factor, coefficient of unevenness, quality of electric energy.

The article proposed the mathematical model of a transformer that takes into account the type of magnetic core, as well as losses in its constructive elements from the component of zero sequence currents. It showed the character of the dependence of the transformer losses on the difference in the conductivities of the phase loads with the constant total conductivity. The results of computer simulation determined the relation between the total power losses and the unbalance coefficients of the zero and negative sequence currents and the coefficient of unevenness of load. It is estimated that additional power losses in transformers are reduced while using a three-phase load balancing unit.

References

1. Boshnyaga V.A., Suslov V.M. Modelirovanie trekhfaznykh transformatornykh ustroystv s trekhsterzhnevym magnitoprovodom dlya inzhenernykh raschetov nesimmetrichnykh rezhimov pri razlichnykh skhemakh soedineniya obmotok [Modeling of three-phase transformer devices with a three-rod magnetic cores for engineering calculations of asymmetric modes for various winding connection schemes]. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of regional energy], 2013, no. 2 (22), pp. 38–50.

2. Ded A.V., Volynkin A.I., Denisenko M.Yu., Kirichenko N.V., Sukhov E.S. *Dopolnitel'nye poteri moshchnosti v elektricheskikh setyakh pri nesimmetrichnoi nagruzke* [Extra power losses in electrical networks with unbalanced load]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 1(117), pp. 157–158.

3. Ded A.V. *Opreделение poter' moshchnosti v raspredelitel'nykh setyakh s uchetom vliyaniya nesimmetrichnoi nagruzki* [Determination of power losses in distribution networks taking into account the influence of an asymmetric load]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2009, no. 2(80), pp. 167–170.

4. Ded A.V., Parshukova A.V. *Metod rascheta dopolnitel'nykh poter' moshchnosti pri nesimmetrii rezhima raboty sistemy elektrosnabzheniya* [Method for calculating additional power losses in case of unbalance of the operating mode of the power supply system]. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science], 2015, no. 10/2015, pp. 61–65.

5. Dolinger S.Yu., Lyutarevich A.G., Goryunov V.N., Safonov D.G., Cheremisin V.T. *Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot snizheniya kachestva elektricheskoi energii v elementakh sistem elektrosnabzheniya* [Estimation of additional power losses due to a decrease in the quality of electrical energy in the elements of power supply systems]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 2(120), pp. 178–183.

6. Kirisov I.G., Ovcharenko T.I. *Minimizatsiya poter' v silovykh transformatorakh pri izmenenii rezhima nagruzki* [Minimization of losses in power transformers with changing load conditions]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit* [Energy saving. Power engineering. Energy audit]. 2014, no. 6(124), pp. 49–56.

7. Miroshnik A.A. *Metody vychisleniya poter' moshchnosti v elementakh nesimmetrichno nagruzhennoi seti* [Methods for calculating power losses in elements of an asymmetrically loaded network]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrotechnics and Electromechanics]. 2011, no. 5, pp. 66–69.

8. Kurilin S.P. *Razvitie teorii nesimmetrichnykh rezhimov i energeticheskikh protsessov asinkhronnykh dvigatelei sel'skokhozyaistvennykh elektroustanovok: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Development of the theory of asymmetric modes and energy processes asynchronous engines of agricultural electrical. Doct. Diss.]. Moscow, 2005, 367 p.

9. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'ev A.A. *Analiz vliyaniya ustroystva vyravnivaniya nagruzki na pokazateli nesimmetrii elektricheskoi seti* [Analysis of influence of load balancing unit on indicators of unbalance of power supply]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 100–108.

10. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'ev A.A. *Algoritmy upravleniya trekhfaznym ustroystvom vyravnivaniya nagruzki elektricheskoi seti* [Control algorithms of three-phase balancing unit for power supply network]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 162–172.

11. Orlov A.I., Savel'ev A.A. *Ustroystvo simmetrirovaniya nagruzki* [Load balancing unit]. Patent RF, no. 162639, 2016.

12. Pustovetov M.Yu. *Matematicheskaya model' trekhfaznogo transformatora* [Mathematical model of a three-phase transformer]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2012, vol. 321, no. 4, pp. 97–100.

13. Yundin M.A., Khanin Yu.I. *Dopolnitel'nye poteri elektroenergii v silovykh transformatorakh 10/0,4 kV* [Additional power losses in power transformers 10/0,4 kV]. *Nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of Kuban State Agrarian University], 2014, no. 101 (07), pp. 1–11.

14. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p.

15. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of Electric Machinery and drive systems*. 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 2013, 680 p.

ORLOV ALEKSANDR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electromechanics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com).

VOLKOV SERGEY – Candidate of Technical Sciences, Head of Electro-Mechanics Department, Dean of the Electro Energy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (eef@marsu.ru).

SAVELYEV ALEKSEI – Engineer of the 1st category, Service of Technological Development, Innovation, Energy Saving and Energy Efficiency Improvement, Branch of Joint Stock Company «Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region» – «Marienegro», Russia, Yoshkar-Ola (savelich94@gmail.com).

Ссылка на статью: Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Снижение потерь в трехфазных трансформаторах при выравнивании несимметричной нагрузки // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 52–60.

УДК 621.313.3

ББК 31.261.63

Г.П. ОХОТКИН

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ключевые слова: электрические машины, двигатель постоянного тока, моделирование динамики электродвигателей.

Разработан виртуальный прибор для анализа статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока независимого возбуждения в среде программирования LabVIEW. Виртуальный прибор содержит удобную лицевую панель, позволяющую наглядно вводит паспортные данные двигателя и получить на экране параметры статической характеристики и структурной схемы, а также передаточные функции модели и графики переходных процессов тока якоря и угловой скорости двигателя. Виртуальный прибор позволяет исследовать переходный процесс пуска электродвигателя как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой независимо от вида корней характеристического уравнения. Трансформация модели двигателя из системы второго порядка в первый и наоборот осуществляется автоматически.

Благодаря широким регулировочным характеристикам и плавному диапазону регулирования двигателя постоянного тока (ДПТ) нашли широкое применение в металлообрабатывающих станках и роботах. Эффективное управление ДПТ, осуществляемое системой автоматического управления (САУ), значительно повышает производительность технологического оборудования [1].

Для решения большинства задач анализа и синтеза систем управления необходимо иметь математическую модель объекта управления – ДПТ, которая устанавливает ряд соотношений, позволяющих при каждом входном воздействии и начальных состояниях находить электромагнитный момент и угловую скорость вращения электродвигателя [1–3]. Структура и сложность математической модели зависят от цели исследования и связаны с составлением дифференциальных уравнений. При этом аналитическое исследование статических и динамических характеристик ДПТ представляет определенные трудности.

Машинные методы исследования статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока проще и позволяют быстро оценить требуемые свойства объекта управления. Существует множество пакетов программ для решения подобных задач, одним из наиболее удобных и наглядных является среда программирования LabVIEW [4].

В литературе вопросы разработки виртуальных приборов для анализа статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока освещены недостаточно полно, поэтому данная задача является актуальной.

Целью данной работы является разработка виртуального прибора (программы) для анализа статических и динамических характеристик ДПТ.

При проектировании оптимальных систем управления обычно модель ДПТ независимого возбуждения (НВ) представляется дифференциальными уравнениями в форме Коши

$$\begin{aligned} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} &= -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}i_{\text{я}}(t) + \frac{u_{\text{я}}(t) - E_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}, \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{M(t) - M_{\text{с}}}{J}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, Ом; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи, Гн; $i_{\text{я}}$ – ток якоря, А; $u_{\text{я}}$ – напряжение на якоре, В; $E_{\text{я}} = k\Phi\omega$ – противо-ЭДС ДПТ НВ, В; k – конструктивный коэффициент ДПТ, В·с; Φ – магнитный поток машины, Вб; $\omega = \pi n/30$ – угловая скорость ДПТ, рад/с; n – частота вращения якоря, об/мин; $M = k\Phi i_{\text{я}}$ – электромагнитный (вращающий) момент, Нм; $M_{\text{с}} = k\Phi I_{\text{с}}$ – статический момент сопротивления, Н·м; $I_{\text{с}}$ – ток статической нагрузки, А; J – момент инерции якоря и вращающихся совместно с якорем элементов рабочего органа, кг·м².

К статическим характеристикам ДПТ НВ в первую очередь относятся электромеханическая $\omega = f(I_{\text{я}})$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики, т.е. зависимости угловой скорости от тока якоря или вращающегося момента, соответственно, при постоянном значении напряжения на якоре двигателя [1–3].

Для составления статических характеристик в первое уравнение системы (1) подставляем $di_{\text{я}}(t)/dt = 0$ и с учетом выражения связи противо-ЭДС с угловой скоростью получаем формулы для электромеханических и механических характеристик

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}I_{\text{я}}}{k\Phi}, \quad \omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}M}{(k\Phi)^2}. \quad (2)$$

В соответствии с (2) электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости ω от тока $I_{\text{я}}$ и момента M . На рис. 1 представлены электромеханические и механические характеристики в совмещенном виде для разных полярностей питающего якоря напряжения.

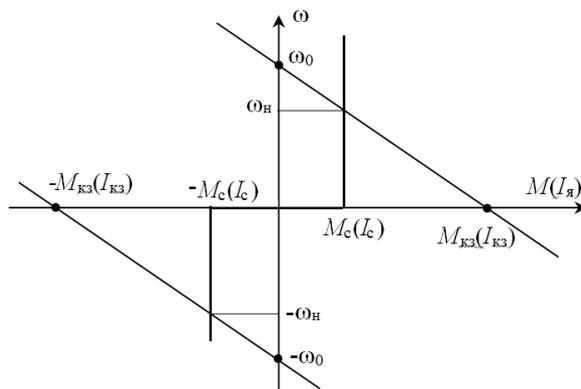


Рис. 1. Электромеханические характеристики

Характерными точками статических характеристик (рис. 1) являются точка холостого хода, в которой $\omega = \omega_0$, а $I_{\text{я}}(M) = 0$, и точка короткого замыкания, где $\omega = 0$, а $I_{\text{я}} = I_{\text{кз}}$ и $M = M_{\text{кз}}$. Значения характерных точек из (2) определяются как

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi}, \quad I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad M_{\text{кз}} = \frac{k\Phi U_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (3)$$

Режим короткого замыкания для электрической машины соответствует неподвижному состоянию якоря при поданном на двигатель напряжении $U_{\text{я}}$. Режим короткого замыкания называется также пусковым режимом, поскольку является начальным при пуске двигателя.

На якорь ДПТ со стороны рабочего органа технологического механизма действует момент сопротивления либо активного, либо реактивного типов. Реактивные моменты сопротивления возникают как реакция на движение якоря. Они обусловлены, например, силами трения и резания и действуют противоположно движению якоря. При изменении направления движения реактивные моменты изменяют знак (рис. 1).

С увеличением нагрузки на валу двигателя скорость ДПТ падает. Изменение скорости ДПТ можно оценить из (2) с учетом (3) в виде

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (4)$$

где $\Delta\omega = R_{\text{я}} I_{\text{я}} / k\Phi = R_{\text{я}} M (k\Phi)^2$ – изменение скорости относительно скорости идеального холостого хода ω_0 .

Статистическая характеристика, приведенная на рис. 1, при номинальном значении напряжения и сопротивления якоря, а также магнитного потока называется естественной. Она также характеризуется модулем статической жесткости механической характеристики β и относительным током короткого замыкания $I_{\text{кз}}/I_{\text{н}}$:

$$\beta = \partial M / \partial \omega = (k\Phi)^2 / R_{\text{я}}; \quad I_{\text{кз}}/I_{\text{н}} = 1/R_{\text{я}} = 10 \div 20.$$

Ток короткого замыкания на естественной характеристике у двигателей средней и большой мощности превышает номинальный в 10-20 раз. Он значительно превосходит допустимый ток по условиям коммутации. Перегрузочная способность ДПТ НВ лежит в пределах $\lambda = M_{\text{доп}}/M_{\text{ном}} = 2 \div 2,5$.

К динамическим характеристикам ДПТ НВ относятся временные характеристики изменения тока якоря $i_{\text{я}}(t)$ и угловой скорости $\omega(t)$ под влиянием напряжения на якоре $U_{\text{я}}$ и момента сопротивления на валу $M_{\text{с}}$. При этом наиболее часто динамические свойства ДПТ оцениваются переходной характеристикой, т.е. реакцией объекта управления при нулевых начальных условиях на входную величину, являющуюся единичной ступенчатой функцией времени [1–3].

Переходная характеристика может быть определена путем решения дифференциальных уравнений (1). Существуют несколько методов определения решений дифференциальных уравнений: классический, операторный и численный. Наиболее удобным инженерным методом является машинное

исследование динамических характеристик на моделях объектов, представленных в виде передаточных функций. После создания модели объекта управления для исследования ее поведения во временной области используются различные функции пакета программирования.

Для создания модели ДПТ НВ вначале дифференциальные уравнения (1) преобразуем по Лапласу при нулевых начальных условиях, а затем решаем алгебраические уравнения относительно искомым переменных в виде

$$\begin{aligned} i_{\text{я}}(p) &= \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}p+1} U_{\text{я}}(p) - \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}p+1} k\Phi \omega(p), \\ \omega(p) &= \frac{k\Phi}{Jp} I_{\text{я}}(p) - \frac{k\Phi}{Jp} I_{\text{с}}(p), \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени ДПТ НВ. Структурная схема ДПТ НВ представлена на рис. 2.

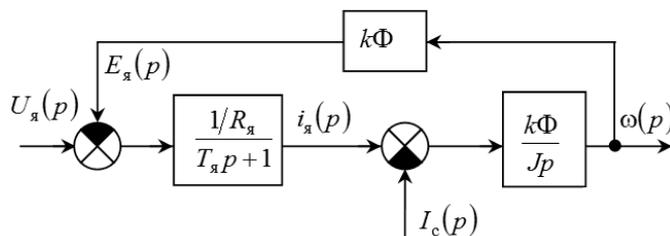


Рис. 2. Структурная схема ДПТ НВ

Теперь, подставив первое уравнение системы (5) во второе и подставив второе уравнение в первое, получаем

$$\begin{aligned} i_{\text{я}}(p) &= \frac{T_{\text{м}}p/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1} U_{\text{я}}(p) + \frac{I_{\text{с}}(p)}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1}, \\ \omega(p) &= \frac{1/k\Phi}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1} U_{\text{я}}(p) - \frac{R_{\text{я}}(T_{\text{я}}p+1)/k\Phi}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1} I_{\text{с}}(p), \end{aligned} \quad (6)$$

где $T_{\text{м}} = J R_{\text{я}} / (k\Phi)^2$ – электромеханическая постоянная времени ДПТ НВ.

Придадим передаточным функциям системы (6) канонические формы типовых звеньев второго порядка. Для этого введем обозначения: $T = \sqrt{T_{\text{я}}T_{\text{м}}}$ – постоянная времени звена; $\omega_0 = 1/T = 1/\sqrt{T_{\text{я}}T_{\text{м}}}$ – резонансная частота звена; $\xi = \sqrt{T_{\text{м}}/(4T_{\text{я}})}$ – коэффициент демпфирования; $k_{\text{д}} = 1/k\Phi$ – статический коэффициент передачи звена. В этом случае уравнения (6) могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} i_{\text{я}}(p) &= \frac{\omega_0^2 T_{\text{м}} p / R_{\text{я}}}{p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2} U_{\text{я}}(p) + \frac{\omega_0^2 I_{\text{с}}(p)}{p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2}, \\ \omega(p) &= \frac{k_{\text{д}} \omega_0^2}{p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2} U_{\text{я}}(p) - \frac{k_{\text{д}} \omega_0^2 R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1)}{p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2} I_{\text{с}}(p). \end{aligned} \quad (7)$$

В зависимости от вида корней характеристического уравнения переходные характеристики бывают колебательными или монотонными. Корни характеристического уравнения ДПТ

$$p^2 + \frac{1}{T_{я}} p + \frac{1}{T_{я}T_{м}} = p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 = 0 \quad (8)$$

определяются как

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_{я}} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_{я}^2} - \frac{1}{T_{я}T_{м}}} = -\xi\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}. \quad (9)$$

Если $T_{м} > 4T_{я}$, то $\xi > 1$ и корни характеристического уравнения действительны и различны. В этом случае характеристическое уравнение может быть представлено как $(p - p_1)(p - p_2) = 0$. При этом переходный процесс при скачкообразном изменении входной переменной носит аperiodический характер. В большинстве ДПТ НВ условие $T_{м} > 4T_{я}$ соблюдается.

В современных быстродействующих электроприводах момент инерции якоря сведен к минимуму и поэтому может быть $T_{м} < 4T_{я}$. При этом $0 < \xi < 1$, а корни характеристического уравнения становятся комплексно-сопряженными: $p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$, где $\alpha = \xi\omega_0$ – коэффициент затухания, $\beta = \omega_0\sqrt{1 - \xi^2}$ – угловая частота колебаний.

В этом случае характеристическое уравнение приобретает вид $(p + \alpha)^2 + \beta^2 = 0$, где $\alpha^2 + \beta^2 = \omega_0^2$, а переходный процесс имеет колебательный характер.

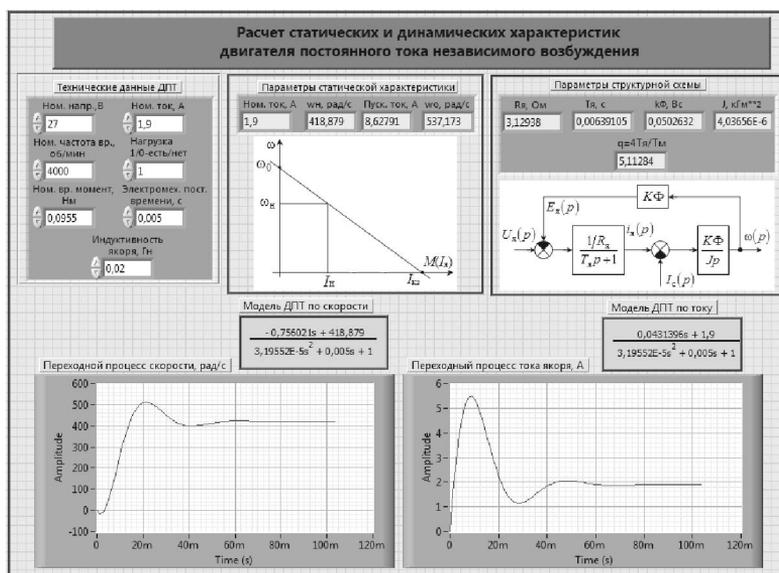
Большинство электродвигателей представляются системой второго порядка (6). Микродвигатели с полым ротором, индуктивность якоря которых $L_{я} = 0$ ($T_{я} = 0$), описываются системой первого порядка. Поэтому модель двигателя, представленная в виде передаточной функции, должна автоматически трансформироваться из системы второго порядка в первый и наоборот. Система уравнений (6) позволяет эту задачу решить автоматически, приняв параметр $L_{я}$ равным нулю.

Выразив входные воздействия ДПТ единичными ступенчатыми функциями $u_{я}(t) = U_{я}1(t)$ и $i_{я}(t) = I_{я}1(t)$, представим их изображения как $U_{я}(p) = U_{я}1(p)$, $I_{я}(p) = I_{я}1(p)$. Тогда из уравнений (6) модель двигателя постоянного тока записывается в виде

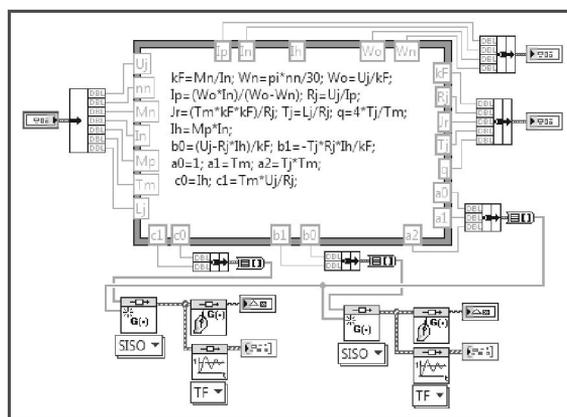
$$\begin{aligned} i_{я}(p) &= \frac{c_0 + c_1 p}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2} 1(p), \\ \omega(p) &= \frac{b_0 - b_1 p}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2} 1(p), \end{aligned} \quad (10)$$

где $a_0 = 1$, $a_1 = T_{м}$, $a_2 = T_{я}T_{м}$, $b_0 = (U_{я} - R_{я}I_{я})/k\Phi$, $b_1 = T_{я}R_{я}I_{я}/k\Phi$, $c_0 = I_{я}$, $c_1 = T_{м}U_{я}/R_{я}$.

На основе вышеизложенного разработан виртуальный прибор (ВП) для расчета статических и динамических характеристик ДПТ НВ на LabVIEW (рис. 3). Передаточные функции (10) реализованы в ВП с помощью специальных функций модуля расширения Control Design [4].



а



б

Рис. 3. Виртуальный прибор:

а – лицевая панель ВП; б – блок-диаграмма ВП

Лицевая панель ВП, представленная на рис. 3, а, содержит кластеры для задания технических данных ДПТ и отображения параметров статической характеристики и структурной схемы, экраны для отображения передаточных функций и осциллографы, отображающие графики переходных процессов тока якоря и угловой скорости двигателя.

Программный код ВП представлен в окне блок-диаграмм (рис. 3, б). Для представления моделей в виде передаточной функции используется функция CD Construct Transfer Function Model, а для их отображения – функция CD Draw Transfer Function Equation. Выходы этих функций представлены кластерным типом данных. Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя

передаточной функции подаются на входы функций CD Construct Transfer Function Model в виде массива элементов управления.

Расчет параметров статической характеристики и структурной схемы ДПТ производится с использованием структуры «Узел формулы». При этом ввод паспортных данных двигателя и вывод расчетных данных организован в виде кластера данных с использованием функций Сборка и Разборка кластеров.

Для передачи кластерных данных из «Узла формулы» в модели передаточных функций использован преобразователь кластерных данных в массив.

Симуляции переходных процессов тока якоря и угловой скорости электродвигателя выполнены с помощью функций CD Step Response.

Виртуальный прибор позволяет исследовать переходный процесс пуска электродвигателя как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой. В зависимости от вида корней характеристического уравнения ДПТ кривые тока $i_a(t)$ и скорости $\omega(t)$ могут иметь либо апериодический, либо колебательный характер. При $L_{\text{я}} = 0$ модель двигателя представляется системой первого порядка и переходный процесс при этом имеет апериодический вид.

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Высш. шк., 1991. 430 с.
3. Электропривод летательных аппаратов / В.А. Полковников, Б.И. Петров, Б.Н. Попов и др.; под общ. ред. В.А. Полковникова. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
4. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 880 с.

ОХОТКИН ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, профессор, декан факультета радиоэлектроники и автоматики, заведующий кафедрой автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elius@list.ru).

G. OKHOTKIN

VIRTUAL INSTRUMENT TO ANALYZE STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DC MOTORS OF INDEPENDENT EXCITEMENT

Key words: electric machines, DC motor, modeling of electric motors dynamics.

A virtual device for analyzing static and dynamic characteristics of independent excitation DC motors in LabVIEW programming environment has been developed. The virtual device contains a convenient front panel that allows to input visually the passport data of the engine and get the parameters of the static characteristics and structural scheme, as well as the transfer functions of the model and graphics of the current transients armature and angular velocity of the engine on the screen. The virtual device allows to investigate the transient process of starting the motor both in idle mode and under load, regardless of the type of roots of the characteristic equation. The transformation of the engine model from the second order to the first and vice versa is carried out automatically.

References

1. Klychev V.I. *Teoriya electroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Energoatomisdat, 2001, 704 p.
2. Moskalenko V.V. *Elektricheskiy privod* [Electric drive]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1991, 430 p.
3. Polkovnikov V.A., ed.; Polkovnikov V.A., Petrov B.I., Popov B.N. et al. *Elektroprivod letatelnykh apparatov* [Electric drive of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 352 p.
4. Travis J., Kring I. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. 3rd ed. Crawfordsville, Prentice Hall, 2007, 1236 p. (Russ. ed.: *LabVIEW dlya vsekh*. Moscow, DMK Press, 2008, 880 p.).

OKHOTKIN GRIGORY – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Radio-electronics and Automatics Faculty, Head of Department of Automation and Management in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elius@list.ru).

Ссылка на статью: *Охоткин Г.П.* Виртуальный прибор для анализа статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока независимого возбуждения // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 61–68.

УДК 624.154.5:621.319.53-229.2

ББК Н582.5-043:3244.1

Н.С. СОКОЛОВ, Г.Н. АЛЕКСЕЕВА, С.С. ВИКТОРОВА,
Г.М. СМЕРНОВА, И.П. ФЕДОСЕЕВА**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА
БУРОВЫХ СВАЙ**

Ключевые слова: батарея конденсаторов, рабочее напряжение, коаксиальный кабель, шаговое напряжение, генератор импульсных токов (ГИТ), буровая свая, разрядно-импульсная технология, электроразрядная технология (ЭРТ), сваи-ЭРТ, многоместные уширения.

Разрядно-импульсная технология устройства буроинъекционных свай открывает новое направление в геотехническом строительстве. Благодаря ее специфическим качествам она является оригинальной. В отличие от других технологий она позволяет изготовить буроинъекционные сваи повышенной несущей способности. Оригинальность этой технологии заключается в использовании генераторов импульсных токов для создания электрогидравлического эффекта в пробуренной и заполненной мелкозернистым бетоном скважине. Технология устройства буровых свай с помощью генератора импульсных токов (ГИТ) способствует повышению надежности и электробезопасности путем уменьшения рабочего напряжения. При формировании высокоэнергетического импульса создаются условия, при которых образуется и развивается ударная волна в виде электрогидравлического эффекта в среде мелкозернистого бетона на грунт стенок буровой скважины. ГИТ и высоковольтный разрядник являются единой конструкцией. При этом он является накопителем электрической энергии, а разрядник разгружает эту энергию в виде электрогидравлического эффекта. Тем самым создается свая-ЭРТ с повышенными значениями несущей способности по грунту. Установка широко используется в геотехнической практике при новом строительстве и реконструкции. Являясь уникальным инструментом при устройстве свай-ЭРТ и цементации оснований, генератор импульсных токов имеет широкое практическое значение в строительстве.

Проблема повышения несущей способности буроинъекционных и буронабивных свай F_d является в настоящее время весьма актуальной проблемой в области геотехнического строительства. Особенно она злободневна при строительстве в стесненных и особо стесненных условиях, а также для случаев строительства оснований, сложенных проблематичными грунтами. Одним из направлений увеличения несущей способности свай по грунту F_d является создание уширений (подпятников) вдоль ствола сваи с конкретным шагом или в зависимости от напластования инженерно-геологических элементов (ИГЭ) основания, а также на уровне пяты буроинъекционной или буронабивной сваи. Для достижения этой цели наиболее приемлемой оказывается разрядно-импульсная технология устройства буроинъекционных свай (свай-ЭРТ) [3].

Для осуществления вышеприведенного алгоритма устройства свай-ЭРТ необходимы технологические устройства для создания уширений в теле бетона, заполняющего буровую скважину. Этой конструкцией является генератор импульсных токов. Энергия, образованная в нем, перемещается через ко-

аксиальный кабель в заполненную бетоном скважину в виде электрогидравлического удара.

Следует отметить, что при использовании генератора импульсных токов часты случаи поражения шаговым напряжением обслуживающего персонала. Это зависит от внешних условий протекания электрического тока в грунте (например, сопротивления грунта), уровня рабочего электрического напряжения и др. При случайном (аварийном) замыкании высоковольтного кабеля возможно физическое (световое, дуговое, электрическое и электродинамическое) воздействие.

Вышеперечисленное ведет к снижению эксплуатационной надежности работы генератора импульсных токов. При аварийном замыкании возможен выход из строя всей установки в целом.

В электроразрядной технологии выполнение обслуживающим персоналом разрядно-импульсной установки (РИУ) условий техники безопасности является обязательным. При этом дополнительные защитные мероприятия и средства по технике безопасности усложняют и удорожают технологию изготовления свай-ЭРТ. При этом они не достаточно эффективны и не могут обеспечить на все 100% безопасность обслуживающего персонала при работе. Это особенно актуально при эксплуатации установки в полевых условиях, как например, во время работы под дождем, снегом, а также при мокром грунте.

Особенно важно, что при изготовлении буроинъекционных свай-ЭРТ должно быть уделено повышенное внимание надежности технологии и электробезопасности посредством уменьшения рабочего электрического напряжения. При формировании высокоэнергетического электрического импульса необходимо создать такие условия, при которых возникнет электрогидравлический удар.

Изготовление буроинъекционной сваи-ЭРТ является многоэтапным процессом (см. рис. 1):

- 1) бурение скважины;
- 2) подача в нее мелкозернистого бетона;
- 3) формирование высоковольтных электрических импульсов для возбуждения в твердеющем материале электрических разрядов с помощью перемещаемого в нем разрядника;
- 4) возникновение высокоэнергетических импульсов низкого напряжения;
- 5) при формировании каждого высокоэнергетического импульса низкого напряжения создание дополнительных маломощных импульсов высокого напряжения для инициирования электрического разряда в перемещаемом разряднике.

С целью обеспечения оптимальных условий изготовления буроинъекционной сваи с высокими значениями несущей способности создаются электрические импульсы свыше 20 кДж напряжением 500–1000 В и дополнительные маломощные импульсы напряжением 5–15 кВ и энергией 200–2000 Дж длительностью $(5-20) \cdot 10^{-6}$ с.

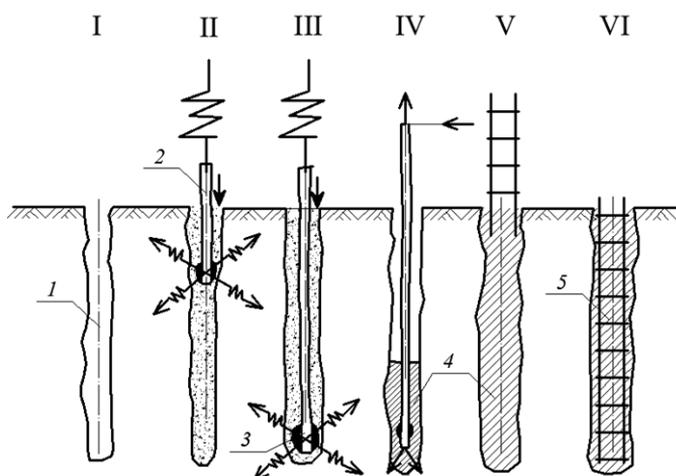


Рис. 1. Технологическая схема устройства свай-ЭРТ:

- I – устройство лидерной скважины; II, III – расширение скважины ЭРТ обработкой;
- IV – замещение рабочей жидкости бетонной смесью и активация ее по ЭРТ;
- V, VI – погружение арматурного каркаса в бетонную смесь;
- 1 – скважина, заполненная рабочей жидкостью; 2 – заливочная штанга;
- 3 – электрический излучатель; 4 – бетонная смесь; 5 – арматурный каркас

Технология устройства буроинъекционных свай-ЭРТ поясняется алгоритмом, приведенным на рис. 2, где $t_1, t_2, t_3... t_8$ – стадии изготовления заглубленной конструкции; 1 – скважина; 2 – мелкозернистый бетон; 3 – излучатель (разрядник); 4 – пространственный армокаркас; 5 – зарядно-выпрямительное устройство, 6 – емкостный высокоэнергетический накопитель электроэнергии; 7 – коммутатор накопителя электроэнергии; 8 – питающий низковольтный кабель; 9 – зарядно-выпрямительное устройство; 10 – маломощный высоковольтный источник; 11 – коммутатор маломощного высоковольтного источника; 12 – блок синхронизации; 13 – кабель; 14 – источник с дополнительным иницирующим электродом, размещенным в разряднике; 15 – область формирования разряда; 16 – часть выполненной свай-ЭРТ. Блок синхронизации 12 выполнен для одновременного реагирования последовательно соединенных через него позиций 7 и 11.

Далее с помощью буровых станков производится проходка скважины 1 рассматриваемого диаметра (стадия t_1). При достижении устья скважины забурник извлекается из скважины 1, часть ее заполняется мелкозернистым бетоном 2 (стадия t_2). Погружается в скважину 1 пространственный армокаркас 4. Разрядное устройство 3 с питающим низковольтным кабелем 8 подсоединено к емкостному низковольтному накопителю энергии 6 (стадия t_3).

Зарядно-выпрямительное устройство 5 заряжает накопитель электрической энергии 6, например, энергоемкостью (20–50) кДж до низкого напряжения порядка до 1000 В (стадия t_4). Параллельно производится зарядка поджигающего устройства 10 энергоемкостью порядка 200–2000 Дж до напряжения 5–15 кВ с его же помощью 9 (стадия t_5).

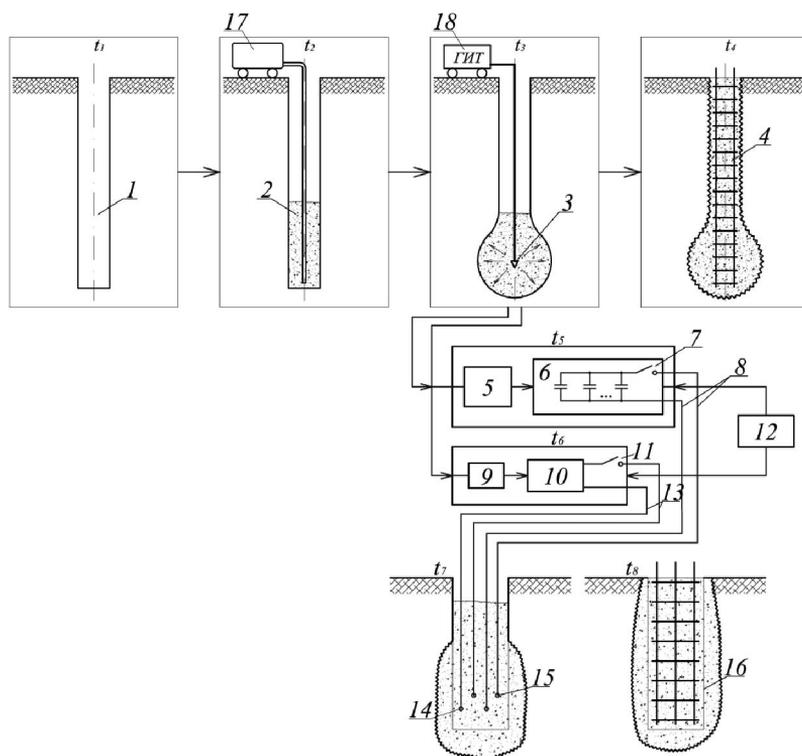


Рис. 2. План-схема устройства буринъекционных свай-ЭРТ

Далее подается серия синхронизированных при помощи блока синхронизации 12 высокоэнергетических низковольтных импульсов от накопителя 6, а также маломощных высоковольтных импульсов от источника 10 через кабели 8 и 13, коммутаторы 7 и 11 на разрядник 3 и дополнительный иницирующий электрод 14. Возникает серия низковольтных разрядов основного емкостного накопителя энергии 6 в результате пробоя при помощи образованного иницирующего разряда в области формирования разряда 15.

Такая технологическая последовательность провоцирует возникновение электрогидравлических ударов. Сформировавшаяся ударная волна воздействует на мелкозернистый бетон 2 и грунт стенок скважины 1, увеличивая тем самым ее поперечное сечение, а также уплотняя мелкозернистый бетон и формируя часть сваи 16.

При подаче импульса низкого напряжения на разрядное устройство 14 не возникает электрического пробоя, вследствие того, что значения напряжений не обеспечивают электрического зазора для пробоя даже при наличии квазипроводящей среды между электродами разрядника. Поэтому в зону электрического разряда для обеспечения этого эффекта подают иницирующий импульс высокого напряжения (5–15) кВ от дополнительного поджигающего устройства энергией, равной (200–2000) Дж, длительностью $(5–20) \cdot 10^{-6}$ с

синхронно с высокоэнергетическим, выше 20 кДж, импульсом низкого напряжения. Выбор оптимальных параметров напряжения электрического поджига, величины энергии и длительности поджигающего импульса осуществляется опытным путем из условий необходимости изготовления сваи с высокими значениями несущей способности и прочности мелкозернистого бетона ствола, а также безопасности процесса изготовления сваи для обслуживающего технического персонала и оптимального использования существующего электрического оборудования.

С точки зрения выделения энергии при электрогидравлическом эффекте зазор между электродами должен быть порядка 10–20 мм по поверхности диэлектрика [1–3]. Следует обратить внимание на то, что при низком электрическом напряжении величиной до 1000 В в этом промежутке разряда не образуется.

Электрическое напряжение до 1 кВ обусловлено граничным значением с точки зрения техники безопасности, так как считается, что высокое напряжение – это значение напряжения свыше 1 кВ [4]. Наиболее оптимальным нижним порогом низкого напряжения является его значение, равное 500 В (выбирается исходя из малогабаритных характеристик накопителя). Необходимо отметить, что при дальнейшем снижении напряжения резко возрастают габариты и масса накопителя [6].

В табл. 1 приведены параметры объема и массы накопителя в зависимости от значения зарядного (рабочего) напряжения для импульсного конденсатора К41И 7 (напряжение 5 кВ; емкость 100 мкФ; габариты $A \times B \times H = 170 \times 122 \times 410$ мм, где A – длина; B – ширина; H – высота конденсатора; объем $V = 0,0014$ м³; масса $m = 15$ кг) при условии накопления электрической энергии накопителем 20 кДж.

Таким образом, наиболее оптимальным является напряжение в интервале 500–1000 В.

Таблица 1

Параметры объема и массы накопителя в зависимости от зарядного (рабочего) напряжения для импульсного конденсатора К41И 7

Показатели	Рабочее напряжение накопителя, кВ				
	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0
Количество конденсаторов К41И7 в накопителе, шт.	4444	2500	1600	675	400
Объем накопителя при использовании конденсаторов К41И7 м ³	37,8	21,3	13,6	5,1	3,4
Масса накопителя при использовании конденсаторов К41И7, К103, кг	66,7	37,5	24,0	9,4	6,0
Объем накопителя при использовании конденсаторов К75-40S, м ³	6,2	3,5	2,2	0,9	0,6
Масса накопителя при использовании конденсаторов К75-40S, кг×10 ³	10,4	5,9	3,8	1,5	1,0

В то же время высокое напряжение поджигающего импульса также безопасно, так как энергия его, равная 200–2000 Дж, мала, импульс кратковременный и, следовательно, мало количество электричества [9].

Влияние выбранных параметров выполнения способа на такую характеристику сваи, как ее несущая способность Fd по грунту, приведено в табл. 2.

Таблица 2

Влияние выбранных параметров выполнения способа устройства буроинъекционных свай-ЭРТ на несущую способность Fd по грунту

Параметры способа	№ примера			
	1	2	3	4
Низкое напряжение накопителя электроимпульсной установки, В	500	700	850	1000
Энергия накопителя электроимпульсной установки, кДж	20	25	30	35
Высокое напряжение поджигающего импульса, кВ	15	20	10	7
Энергия поджигающего устройства, Дж	1100	2000	500	245
Длительность поджигающего импульса, с	$20 \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$
Несущая способность сваи, кН	820	860	900	920

Нами производились статические испытания сваи длиной 12 м, изготовленные из мелкозернистого бетона. Вмещающими грунтами в пределах длины сваи служили четвертичные аллювиальные отложения, представленные песками мелкими и пылеватыми с прослоями суглинков и глин. Грунтами активной сжимаемой толщи под острием сваи являлись пески мелкие и средней крупности. При этом несущая способность полученных свай определялась по существующим методикам в соответствии с ГОСТ 5686-2012¹.

Из табл. 2 следует, что сваи, полученные заявленным способом, обладают высокой несущей способностью, вместе с тем условия техники безопасности существенно улучшены.

Электроразрядная технология устройства буроинъекционных свай-ЭРТ дает возможность при относительно небольших затратах получить положительные результаты, существенно улучшить условия техники безопасности при устройстве буроинъекционных буронабивных свай, грунтовых анкеров, цементаций оснований и т.д.

Ниже приводится один из примеров использования ГИТ для расчета несущей способности буроинъекционной сваи-ЭРТ по грунту.

Сваи с многоместными уширениями (СМУ) применяются давно. Опыт использования таких свай есть в Индии, ФРГ, Великобритании, Японии, СССР, России. Конструкция такой сваи представляет собой буровую сваю с уширением на пяте. Выше этого уширения в зависимости от типа геологических условий и требуемой несущей способности сваи выполняются дополнительные уширения.

Практика изготовления и эксплуатации таких свай показала их высокую эффективность [5]. Несущая способность свай-ЭРТ с одним уширением в 2,0-2,5 раза, а с двумя – в 3,0-3,5 раза выше, чем у свай, выполненных без уширений.

¹ ГОСТ 5686–2012. Методы полевых испытаний сваями. М.: Стандартинформ, 2013.

Свай-ЭРТ с множественными уширениями при нагружении работают следующим образом. На начальном этапе нагружения в работу вступает верхнее уширение. По мере увеличения внешней нагрузки постепенно включаются нижележащие уширения, при этом каждое уширение выполняет функцию дополнительной опоры. Несущие свойства грунтов при опирании на них значительно выше свойств этих же грунтов при трении о них боковой поверхности свай. Это подтверждается анализом формул расчета несущей способности указанных свай.

Расчет несущей способности свай без уширения производится по формуле 7.11 из СП 24.13330.2011¹:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} R A + u \sum_{i=1}^n (\gamma_{cf} f_i h_i)), \quad (1)$$

В формуле (1) первое слагаемое $\gamma_{cR} R A$ представляет собой несущую способность буроинъекционной свай под ее нижним концом, а второе – $u \sum_{i=1}^n (\gamma_{cf} f_i h_i)$ несущую способность по боковой поверхности.

Несущую способность свай с множественными уширениями следует определять по формуле 2 [5]:

$$F_d = \gamma_c \left[\gamma_{cR} R A + (\gamma_{cR} \sum R_{i,бок} A_{i,бок} + u \sum_{i=1}^n \gamma_{cf} f_i h_i) \right]. \quad (2)$$

Авторы настоящей статьи в течение длительного времени занимаются проектированием и устройством свай-ЭРТ. Ими было показано, что свай-ЭРТ с множественными уширениями (СМУ) обладают повышенной несущей способностью по сравнению со сваями без уширений.

Опрессовка стенок скважины по технологии ЭРТ производится с помощью камуфлетных уширений [5]. Это буроинъекционные свай, устраиваемые с использованием разрядно-импульсной технологии (свай-ЭРТ). У этих свай повышенные значения γ_{cR} и γ_{cf} , а именно $\gamma_{cR} = 1,3$, а $\gamma_{cf} = 1,1-1,3$ благодаря восстановительной способности структуры грунта стенок скважин, а в большинстве случаев – уплотнению его сверх природных величин.

Тем самым увеличение несущей способности под нижним концом свай-ЭРТ выше в 1,3 раза, а по боковой поверхности – в $1,1/0,5-1,3/0,5 = 2,2-2,6$ раза.

При определении несущей способности F_d по формуле (7.11) из СП 24.13330.2011 значения расчетных сопротивлений R и f определяются по табл. 7.3 и 7.8. из СП 24.13330.2011. В табл. 7.3 из СП 24.13330.2011 приведены значения f для различных значений I_L , а в табл. 7.8 из СП 24.13330.2011 – то же для R . Для наглядности величины $R/f = f(h)$ для различных значений I_L приведены ниже в табл. 3.

¹ СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. М.: Минрегион России, 2011.

Таблица 3

Зависимость отношения расчетных сопротивлений R к расчетному сопротивлению f по боковой поверхности для различных значений показателей текучести I_L

1	$I_L=0,2$			$I_L=0,3$			$I_L=0,4$			$I_L=0,5$			$I_L=0,6$		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$h, м$	$R, КПа$	$f, КПа$	R/f												
3	650	48	13,5	500	35	14,2	400	25	16,0	300	20	15,0	250	14	17,9
5	750	56	13,7	650	40	16,3	500	29	17,2	400	24	16,7	350	17	20,6
7	850	60	14,2	750	43	17,4	600	32	18,8	500	25	20,0	450	19	23,7
10	1050	65	16,2	950	46	20,7	800	34	23,5	700	27	25,9	600	19	31,6
12	1250	68	18,4	1100	48	22,9	950	36	26,4	800	28	28,6	700	19	36,5
15	1500	72	20,8	1300	51	25,5	1100	38	28,9	1000	28	35,7	800	20	40
18	1700	76	22,4	1500	53	28,3	1300	40	32,5	1150	29	39,7	950	20	47,5
20	1900	79	24,1	1650	56	29,5	1450	41	25,4	1250	30	41,7	1050	20	52,5
30	2600	81	32,0	2300	61	37,7	2000	44	44,0	-	-	-	-	-	-
≥40	3500	93	37,6	3000	66	45,4	2500	47	53,2	-	-	-	-	-	-

Примечание. h – глубина расположения рассматриваемого слоя; I_L – показатель текучести; R – расчетное сопротивление грунта под уширением; f – расчетное сопротивление по боковой поверхности.

Выводы. Разработанный генератор импульсных токов имеет широкое практическое применение. ГИТ, являясь накопителем высокой (до 100 кДж) электрической энергии посредством разрядного устройства, разряжаясь в заполненную мелкозернистым бетоном скважину, за счет возникшего электрогидравлического удара (ЭГУ) создает предпосылки для устройства свай-ЭРТ повышенной несущей способности. При этом многократное использование ЭГУ вдоль ствола сваи создает условия к существенному (до 3,5 раз) увеличению F_d .

Литература

1. Гайдук В.Н., Шмигель В.Н. Практикум по электротехнологии. М.: Агропромиздат, 1989. С. 136–137.
2. Куженин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. М.: Энергия, 1980. 135 с.
3. Пат. 2250957 РФ, МПК E02D 5/34. Способ изготовления набивной сваи / Н.С. Соколов, В.Ю. Таврин, В.А. Абрамушкин.; патентообладатель ООО «Научно-производственная фирма «ФОРСТ» № 2003121751/03; заявл. 14.07.2003. Бюл. № 12, 7 с.
4. Разевича Д.В. Техника безопасности. 2-е изд.: М.: Энергия, 1976. 488 с.
5. Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Об ошибочном способе устройства буринъекционных свай с использованием электроразрядной технологии // Жилищное строительство. 2016. № 11. С. 20–29.
6. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов, конденсаторов. М.; Л.: Энергия, 1965. 488 с.

СОКОЛОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, ведущий кафедрой строительных технологий, геотехники и экономики строительства, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ns_sokolov@mail.ru).

АЛЕКСЕЕВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА – старший преподаватель кафедры строительных технологий, геотехники и экономики строительства, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galina55509@mail.ru).

ВИКТОРОВА СВЕТЛАНА СТАНИСЛАВОВНА – доцент кафедры строительных технологий, геотехники и экономики строительства, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (lark102@rambler.ru).

СМИРНОВА ГАЛИНА МИХАЙЛОВНА – старший преподаватель кафедры строительных технологий, геотехники и экономики строительства, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (geodeos61@mail.ru).

ФЕДОСЕЕВА ИРИНА ПЕТРОВНА – старший преподаватель кафедры строительных технологий, геотехники и экономики строительства, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (sf1279@mail.ru).

N. SOKOLOV, G. ALEKSEEVA, S. VIKTOROVA, G. SMIRNOVA, I. FEDOSEEVA
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INSTALLATION
FOR ELECTROHYDRAULIC TREATMENT OF DRILLING PILES CONCRETE

Key words: capacitor battery, working voltage, coaxial cable KVIM, step voltage, pulse current generator (PDT), boring pile, impulse-discharge technology (IDT), multi-site broadenings.

The impulse-discharge technology of the device for flight augering piles opens a new direction in geotechnical construction. Due to its specific qualities, it is original. Unlike other technologies, it allows to produce flight augering piles with an increased bearing capacity. The originality of this technology is the use of pulse current generators to create an electro-hydraulic effect in a borehole drilled and filled with fine-grained concrete. The technology of drilling piles with the help of a generator of pulse current (GPC) contributes to increased reliability and electrical safety through reducing the operating voltage. When forming a high-energy pulse, conditions are created under which a shock wave is formed and developed in the form of an electrohydraulic effect in a medium of fine-grained concrete on the bottom of the walls of a borehole. GPC and high-voltage spark gap are of a single design. At the same time, it is an accumulator of electrical energy and the discharger unloads this energy in the form of an electrohydraulic effect. This creates a pile-EDT with increased values of the bearing capacity on the ground. The installation is widely used in geotechnical practice in a new construction and reconstruction. Being a unique tool in the construction of pile-EDT and cementation of bases, the generator of pulse currents has wide practical significance in construction.

References

1. Gaiduk V.N., Shmigel' V.N. *Praktikum po elektrotekhnologii* [Workshop on electro-technology]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989, pp. 136–137.
2. Kuzhenin I.P. *Ispytatel'nye ustanovki i izmereniya na vysokom napryazhenii* [Test facilities and measurements on a high tension]. Moscow, Energiya Publ., 1980, p. 135.
3. Sokolov N.S., Tavrin V.Yu., Abramushkin V.A. *Sposob izgotovleniya nabivnoi svai* [Method of manufacture of a stuffed pile]. Patent RF, no. 2250957, 2003.
4. Razevicha D.V. *Tekhnika bezopasnosti. 2-e izd.* [Security regulation. 2nd ed.]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 488 p.
5. Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. *Ob oshibochnom sposobe ustroystva buroin"ekstsiyonnykh svai s ispol'zovaniem elektrorazryadnoi tekhnologii* [About mistaken method of application of continuous flight augering piles by using electric discharge technology]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 11, pp. 20–29.
7. Fryungel' F. *Impul'snaya tekhnika. Generirovanie i primeneniye razryadov, kondensatorov* [Impulse technique. Generation and application of discharges, condensers]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1965, 488 p.

SOKOLOV NIKOLAY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of the Construction Technologies, Geotechnics and Construction Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ns_sokolov@mail.ru).

ALEKSEEVA GALINA – Senior Lecturer, Department of the Construction Technologies, Geotechnics and Construction Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (galina55509@mail.ru).

VIKTOROVA SVETLANA – Associate Professor, Department of the Construction Technologies, Geotechnics and Construction Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (lark102@rambler.ru).

SMIRNOVA GALINA – Senior Lecturer, Department of the Construction Technologies, Geotechnics and Construction Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (geodeos61@mail.ru).

FEDOSEEVA IRINA – Senior Lecturer, Department of the Construction Technologies, Geotechnics and Construction Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (sf1279@mail.ru).

Ссылка на статью: Соколов Н.С., Алексеева Г.Н., Викторова С.С., Смирнова Г.М., Федосеева И.П. Исследование и разработка установки для электрогидравлической обработки бетона буровых свай // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 69–78.

УДК 004.42.056

ББК 3972.53

В.С. БОРОВИК, М.М. ЗЕНИН, Ю.А. ГАТЧИН, А.Н. ЮГАНСОН

К ВОПРОСУ О БЕЗОПАСНОСТИ СМАРТ-КОНТРАКТОВ

***Ключевые слова:** блокчейн, уязвимости программного обеспечения, смарт-контракты, язык программирования Solidity.*

Смарт-контракты предназначены для заключения и поддержания коммерческих контрактов в технологии блокчейн. Эта технология лежит в основе децентрализованных приложений. Наибольшую популярность на данный момент имеют приложения, написанные с помощью смарт-контрактов на платформе Ethereum. Смарт-контракты, как и обычные программы, подвержены различным уязвимостям. В данной работе описаны результаты исследования безопасности смарт-контрактов, написанных на языке Solidity, для блокчейна на платформе Ethereum. Рассмотрены наиболее популярные уязвимости, даны рекомендации по их устранению. Итогом работы стала классификация уязвимостей, основанная на оценке степени возможного ущерба, а также актуальности, сложности и вероятности реализации.

Постановка проблемы. На сегодняшний день широкое применение находят смарт-контракты. Они обрабатывают и передают значительные активы. Очень важно, чтобы данные контракты исполнялись правильно, а их реализация была защищена от атак, направленных на кражу или подделку активов. Данный вопрос рассматривается в отношении смарт-контрактов, написанных на языке программирования Solidity для платформы Ethereum – самой известной и используемой платформы для смарт-контрактов.

Разрабатываемая классификация уязвимостей необходима для формулировки задач, решение которых позволит обеспечить защиту информации, циркулирующей в смарт-контрактах. Обозначенные задачи должны решаться на этапах проектирования и построения систем защиты информации в смарт-контрактах [3].

Технология блокчейн и смарт-контракты. Блокчейн – распределённый цифровой реестр, обеспечивающий принцип неизменности данных, представляющий собой постоянно растущую последовательность блоков, которая распространяется между участниками с помощью пиринговых сетей [7]. В каждый блок добавляется хэш-сумма (рис. 1), которая высчитывается от всех транзакций, входящих в этот блок, и хэш-суммы предыдущего блока по алгоритму merkle tree [6]. Из-за того, что хэш-сумма текущего блока зависит от хэш-суммы предыдущего блока невозможно изменить данные внутри блокчейна (рис. 2). Чтобы никто не мог изменить и пересчитать хэш-сумму, которая будет правильной с точки зрения системы, блокчейн использует несколько способов защиты: Proof of Work (PoW, доказательство работы) и Proof of Stake (PoS, доказательство владения).

Смарт-контракт представляет собой фрагмент кода, хранящийся в блокчейне. Он приводится в действие транзакциями и имеет возможность читать данные или писать их в блокчейн, а также позволяет создавать свои токены,

которые работают на блокчейне Ethereum. Код контракта пишется на языке программирования Solidity, после чего компилируется до байт-кода для виртуальной машины Ethereum (EVM). За все производимые контрактом вычисления его разработчик платит узлу какое-то количество внутренней валюты – газа. Количество газа зависит от сложности вычислений в смарт-контракте, чем сложнее вычисления, тем больше газа придется заплатить.

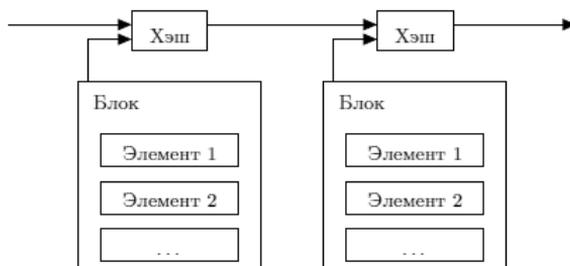


Рис. 1. Формирование цепи блоков

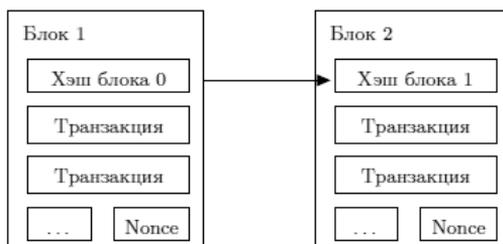


Рис. 2. Связь между блоками

Классификация уязвимостей смарт-контрактов. Далее под уязвимостью будем понимать слабость программного (программно-технического) средства или информационной системы в целом, которая может быть использована для реализации угроз безопасности информации¹. В свою очередь, угроза – совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации².

По области происхождения можно выделить следующие виды уязвимостей:

- 1) уязвимости кода.
- 2) уязвимости архитектуры.

Рассмотрим уязвимости, относящиеся к первой группе.

1. *Уязвимость типа «Состояние гонки»* (рис. 3). Уязвимость заключается в возможности повторного вызова внешнего кода, во время выполнения кода контракта. Это может привести к тому, что различные вызовы функции будут взаимодействовать деструктивными способами.

¹ ГОСТ Р. 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. М.: Стандартинформ, 2015.

² ГОСТ Р. 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2006.

```
1 mapping (address => uint) private userBalances;
2
3 function withdrawBalance() public {
4     uint amountToWithdraw = userBalances[msg.sender];
5     require(msg.sender.call.value(amountToWithdraw)()); // 1
6     /* В строчке 1 вызывается внешний код, который может быть вызван повторно
7     до завершения первого вызова */
8     userBalances[msg.sender] = 0;
9 }
```

Рис. 3. Уязвимость типа «Состояние гонки»

2. *Уязвимость зависимости от временной метки* (рис. 4). При написании контракта нужно иметь в виду, что узел, предлагающий следующий блок, имеет возможность записывать временную метку в него, исходя из своих интересов. Таким образом, он может оказывать влияние на выполнение контракта, полагающегося на значение временной метки в своем коде.

```
1 uint someVariable = now + 1;
2 if (now % 2 == 0) { // now устанавливается майнером
3     // важный код
4 }
5 if ((someVariable - 100) % 2 == 0) { // someVariable зависит от now
6     // важный код
7 }
```

Рис. 4. Уязвимость зависимости от временной метки

3. *Уязвимость переполнения типов данных* (рис. 5). Переполнение типов данных опасно тем, что изменение значения может происходить по не предусмотренной разработчиком логике. Данная уязвимость может происходить как с верхней границей типа данных, так и с нижней.

```
1 mapping (address => uint256) public balanceOf;
2 // Небезопасный вариант
3 function transfer(address _to, uint256 _value) {
4     /* Проверка доступности суммы для отправки */
5     require(balanceOf[msg.sender] >= _value);
6     /* Add and subtract new balances */
7     balanceOf[msg.sender] -= _value;
8     balanceOf[_to] += _value;
9 }
10 // Безопасный вариант
11 function transfer(address _to, uint256 _value) {
12     /* Проверка доступности суммы для отправки и проверка на переполнение */
13     require(
14         balanceOf[msg.sender] >= _value &&
15         balanceOf[_to] + _value >= balanceOf[_to]
16     );
17     /* Изменить балансы */
18     balanceOf[msg.sender] -= _value;
19     balanceOf[_to] += _value;
20 }
```

Рис. 5. Уязвимость переполнения типов данных

К уязвимостям архитектуры можно отнести:

1. *DDOS атака с возможным возвратом средств* (рис. 6). Для примера, рассмотрим следующий контракт аукциона:

```
1 ▾ contract auction {
2     address highestBidder;
3     uint highestBid;
4 ▾     function bid() {
5         if (msg.value < highestBid) throw;
6 ▾         if (highestBidder != 0) {
7 ▾             /*если этот вызов постоянно возвращает ошибку,
8             никто не может сделать ставку*/
9             if (!highestBidder.send(highestBid)) throw;
10        }
11        highestBidder = msg.sender;
12        highestBid = msg.value;
13    }
14 }
```

Рис. 6. Контракт, подверженный DDOS атаке с возвратом средств

Если при попытке контракта вернуть средства предыдущему «лидеру» аукциона, возвращается ошибка – контракт принимает свое начальное состояние, и смены «лидера» не происходит. Это означает, что злоумышленник может стать «лидером» навсегда, убедившись, что попытка возврата ему средств терпит неудачу. Один из способов решения данной проблемы заключается в введение реестра средств участников аукциона и их возврата только по требованию владельца (рис. 7). Таким образом злоумышленник не может повлиять на ход выполнения функции bid().

```
1 ▾ contract auction {
2     address highestBidder;
3     uint highestBid;
4     mapping(address => uint) refunds;
5 ▾     function bid() external {
6         if (msg.value < highestBid) throw;
7 ▾         if (highestBidder != 0) {
8             // Записать средства, которые нужно вернуть пользователю
9             refunds[highestBidder] += highestBid;
10        }
11        highestBidder = msg.sender;
12        highestBid = msg.value;
13    }
14 ▾     function withdrawRefund() external {
15         uint refund = refunds[msg.sender];
16         refunds[msg.sender] = 0;
17 ▾         if (!msg.sender.send(refund)) {
18 ▾             /*
19             Вернуть состояние в исходное,
20             если произошла ошибка при отправке средств
21             */
22             refunds[msg.sender] = refund;
23         }
24    }
25 }
```

Рис. 7. Контракт, не подверженный DDOS атаке с возвратом средств

2. *DDOS атака с ограниченным лимитом газа* (рис. 8). Помимо проблемы, описанной выше, также существует возможность DDOS атаки на использование всего доступного контракту газа. В предыдущем примере уязвимый контракт возвращал средства при возникновении ошибки, что также могло привести к исчерпанию доступного контракту газа. Чтобы избежать данной проблемы, следует проверять доступный лимит газа внутри контракта при выполнении внешних операций, как в примере ниже:

```
1 struct Payee {
2     address addr;
3     uint256 value;
4 }
5 Payee payees[];
6 uint256 nextPayeeIndex;
7
8 function payOut() {
9     uint256 i = nextPayeeIndex;
10    while (i < payees.length && msg.gas > 200000) { //Проверка доступности газа
11        payees[i].addr.send(payees[i].value);
12        i++;
13    }
14    nextPayeeIndex = i;
15 }
```

Рис. 8. Контракт, не подверженный DDOS атаке с ограниченным лимитом газа

3. *Уязвимости мультиподписи* (рис. 9). Мультиподпись – разновидность цифровой подписи, позволяющая группе пользователей подписать один документ. Обычно алгоритм мультиподписи создаёт совместную подпись, которая более компактна, чем набор подписей от всех её участников. На платформе Ethereum мультиподпись интерпретируется в виде смарт-контракта, в котором могут содержаться все вышеописанные, а также специфичные только для него уязвимости. Одной из таких уязвимостей является отсутствие проверки на повторную инициализацию кошелька, что позволяет любому пользователю вызвать функцию инициализации кошелька и стать владельцем, получив полный доступ ко всем средствам [5].

```
1 function initWallet(address[] _owners, uint _required, uint _daylimit) {
2     initDaylimit(_daylimit);
3     initMultiowned(_owners, _required);
4 }
```

Рис. 9. Уязвимость функции создания кошелька с мультиподписью

Сравнительная характеристика уязвимостей смарт-контрактов.

Для проведения сравнения уязвимостей смарт-контрактов использовались следующие критерии [2]:

- вероятность реализации (P);
- степень возможного ущерба (D);
- актуальность реализации (A);
- сложность реализации (C).

Под вероятностью реализации уязвимости смарт-контракта понимается определяемый экспертным путем показатель, характеризующий, насколько вероятным является реализация j -й уязвимости. Вводятся три вербальные градации этого показателя:

– низкая вероятность (1) – отсутствуют объективные предпосылки к реализации j -й уязвимости безопасности информации, отсутствует требуемая статистика по фактам реализации j -й уязвимости, отсутствует мотивация для реализации j -й уязвимости;

– средняя вероятность (2) – существуют предпосылки к реализации j -й уязвимости, зафиксированы случаи реализации j -й уязвимости (возникновения инцидентов безопасности), существуют признаки наличия у нарушителя мотивации для реализации j -й уязвимости;

– высокая вероятность (3) – существуют объективные предпосылки к реализации j -й уязвимости, существует достоверная статистика реализации j -й уязвимости (возникновения инцидентов безопасности), у нарушителя имеются мотивы для реализации j -й уязвимости.

Степень возможного ущерба от реализации конкретной уязвимости определяется степенью негативных последствий от нарушения конфиденциальности, целостности или доступности смарт-контракта. Вводятся три вербальные градации этого показателя:

– низкая степень ущерба (1) – в результате нарушения одного из свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) возможны незначительные негативные последствия, такие как временная недоступность контракта. Владелец контракта (обладатель информации) не может использовать хотя бы одну из возложенных на контракт функций;

– средняя степень ущерба (2) – в результате нарушения одного или нескольких свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) возможны умеренные негативные последствия, такие как потеря средств, временная недоступность контракта. Владелец контракта (обладатель информации) несет финансовые убытки и не может использовать хотя бы одну из возложенных на контракт функций;

– высокая степень ущерба (3) – в результате нарушения одного или нескольких свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) возможны существенные негативные последствия, например, потеря управления над контрактом. Владелец контракта (обладатель информации) не может использовать возложенные на контракт функции.

Определение актуальности уязвимости приводится на основе вероятности реализации и степени возможного ущерба с помощью таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Определение актуальности уязвимости

Вероятность реализации угрозы	Степень возможного ущерба		
	низкая (1)	средняя (2)	высокая (3)
Низкая (1)	неактуальная (0)	неактуальная (0)	актуальная (1)
Средняя (2)	неактуальная (0)	актуальная (1)	актуальная (1)
Высокая (3)	актуальная (1)	актуальная (1)	актуальная (1)

Определение сложности реализации производится на основе экспертной оценки требуемой квалификации для реализации уязвимости. Потенциал, требуемый нарушителю для реализации j -й уязвимости, может быть базовым (низким), базовым повышенным (средним) или высоким. Значение потенциала нарушителя для реализации j -й уязвимости определяется на основе данных, приведенных в банке данных угроз безопасности информации ФСТЭК России [1]. Вводятся три вербальные градации этого показателя:

- низкий потенциал (1) – специальных навыков не требуется;
- средний потенциал (2) – требуются базовые навыки программирования;
- высокий потенциал (3) – требуются глубокие знания.

В результате определения перечисленных показателей для исследуемых типов уязвимостей можно вычислить оценку критичности каждого типа уязвимости по следующей формуле:

$$S_i = \frac{P_i + D_i}{C_i}. \quad (1)$$

Данная оценка показывает, насколько критична та или иная уязвимость для владельца контракта. Полученный результат можно использовать в методике [4] для оценки технологической безопасности смарт-контрактов, написанных на языке Solidity для блокчейна на платформе Ethereum.

Сравнительная характеристика уязвимостей, полученная в результате оценки их критичности, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика уязвимостей смарт-контрактов

Тип уязвимости	Вероятность реализации (P_i)	Степень возможного ущерба (D_i)	Актуальность реализации (A_i)	Сложность реализации (C_i)	Итоговая оценка (S_i)
Уязвимость «состояние гонки»	Высокая (3)	Низкая (1)	Актуальная (1)	Высокая (3)	1,33
Уязвимость зависимости от временных меток	Низкая (1)	Низкая (1)	Неактуальная (0)	Высокая (3)	0,67
Уязвимость переполнения типов данных	Высокая (3)	Средняя (2)	Актуальная (1)	Низкая (1)	5
Уязвимость DDOS с возвратом средств	Высокая (3)	Высокая (3)	Актуальная (1)	Средняя (2)	3
Уязвимость DDOS с ограниченным лимитом газа	Высокая (3)	Высокая (3)	Актуальная (1)	Средняя (2)	3
Уязвимости мультисигнатуры	Средняя (2)	Высокая (3)	Актуальная (1)	Высокая (3)	1,67

На основе табл. 2 можно сделать вывод, что уязвимость переполнения типов данных является наиболее критичной из-за низкой сложности реализации, высокой вероятности реализации и средней степени ущерба. При этом уязвимость зависимости от временных меток является наименее критичной,

так как данная уязвимость требует высокой квалификации у злоумышленников и наносит незначительный ущерб.

Выводы. В результате исследования была рассмотрена проблема обеспечения информационной безопасности смарт-контрактов в блокчейне на платформе Ethereum. Проанализированы основные типы уязвимостей, дана оценка критичности каждого типа уязвимости. Введенная классификация уязвимостей позволяет сформулировать задачу защиты информации, циркулирующей в смарт-контрактах. Данная задача состоит в нивелировании угроз безусловных и условных, создаваемых в том числе в результате выявления ошибок программирования, технологических уязвимостей. Решение данной задачи позволит разработать общий подход к построению системы защиты информации в смарт-контрактах.

Литература

1. Банк данных угроз безопасности информации [Электронный ресурс]. URL: <http://bdu.fstec.ru>.
2. Методика определения безопасности информации в информационных системах [Электронный ресурс]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/812>.
3. Щеглов К.А. Постановка и подходы к решению задачи защиты информации от несанкционированного доступа в общем виде // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 32–44.
4. Югансон А.Н., Заколдаев Д.А. Разработка методики для расчета оценки технологической безопасности программных средств // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2017. № 1(23). С. 20–23.
5. Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK). Proc. of Int. Conf. on Principles of Security and Trust. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017, pp. 164–186.
6. Becker G. Merkle signature schemes, merkle trees and their cryptanalysis. Ruhr-University Bochum, Tech. Rep., 2008. Available at: http://www.emsec.rub.de/media/crypto/attachments/files/2011/04/becker_1.pdf.
7. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. Available at: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

БОРОВИК ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ – студент IV курса факультета безопасности информационных технологий, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (bobahbdb@gmail.com).

ЗЕНИН МИХАИЛ МАКСИМОВИЧ – студент IV курса факультета безопасности информационных технологий, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (mix.zenin.ifmo@yandex.ru).

ГАТЧИН ЮРИЙ АРМЕНАКОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (gatchin@mail.ifmo.ru).

ЮГАНСОН АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – аспирант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (a_yougunson@corp.ifmo.ru).

V. BOROVIK, M. ZENIN, Yu. GATCHIN, A. IUGANSON
TO THE SECURITY ISSUE OF SMART CONTRACTS

Key words: *blockchain, security vulnerabilities, smart contracts, programming language Solidity.*

Smart-contracts are computer programs that can handle and transfer assets of considerable value. Blockchain is a key technology for decentralized applications. Nowadays. Ethereum is the most popular blockchain platform for smart-contracts. However smart-contracts are as vulnerable as common applications. The results of the research for security of Solidity-based smart contracts on the Ethereum blockchain are presented in this article. The most typical vulnerabilities in smart contracts are described in this paper. As a result a vulnerability classification was created based on the threat level, applicability, complexity and probability of the vulnerabilities.

References

1. Bank dannykh ugroz bezopasnosti informatsii [Data Security Threats Database]. Available at: <http://bdu.fstec.ru>.
2. Metodika opredeleniya bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh [The method of determining information security in information systems]. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/812>.
3. Shcheglov K.A. *Postanovka i podkhody k resheniyu zadachi zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v obshchem vide* [Formulation and solving approaches of information securing against unauthorized access task in general]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 32–44.
4. Iuganson A., Zakoldaev D. *Razrabotka metodiki dlya rascheta otsenki tekhnologicheskoi bezopasnosti programmykh sredstv* [A calculation methodology of assess for software security], 2017, no. 1(23), pp. 20–23.
5. Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK). Proc. of Int. Conf. on Principles of Security and Trust. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017, pp. 164–186.
6. Becker G. Merkle signature schemes, merkle trees and their cryptanalysis. Ruhr-University Bochum, Tech. Rep., 2008. Available at: http://www.emsec.rub.de/media/crypto/attachments/files/2011/04/becker_1.pdf.
7. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. Available at: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

BOROVIK VLADIMIR – 4th year Student, Faculty of Information Technology Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (bobahbdb@gmail.com).

ZENIN MIKHAIL – 4th year Student, Faculty of Information Technology Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (mix.zenin.ifmo@yandex.ru).

GATCHIN YURIY – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (gatchin@mail.ifmo.ru).

IUGANSON ANDREY – Post-Graduate Student, Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (a_yougunson@corp.ifmo.ru).

Ссылка на статью: Боровик В.С., Зенин М.М., Гатчин Ю.А., Югансон А.Н. К вопросу о безопасности смарт-контрактов // Вестник Чувашикого университета. – 2018. – № 1. – С. 79–87.

УДК 004.42'274:621.391.083.92

ББК 3811.3-043:В161.911

Н.А. ГАЛАНИНА, А.Г. АЛЕКСЕЕВ, А.В. СЕРЕБРЯННИКОВ

ВЫЧИСЛЕНИЕ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ CUDA*

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, гетерогенное параллельное программирование, технология CUDA, архитектура Kepler, быстрдействие.

В основе различных технологий исследования цифровых сигналов лежит дискретное преобразование Фурье, по возможности вычисляемое быстрыми методами. В статье предлагается решение задачи повышения скорости спектрального анализа сигналов способами гетерогенного параллельного программирования с использованием технологии Cuda. Определяется зависимость времени выполнения преобразования Фурье от размера задачи. Проводится анализ путей повышения эффективности вычислений. В качестве тестовых примеров рассматривается вычисление прямого преобразования Фурье на последовательностях, являющихся степенями двойки. Вычисление быстрого преобразования Фурье проводится с использованием библиотеки cuFFT. Для исследования используются графические ускорители GeForce GT 750M и GeForce GTX 670, изготовленные на базе архитектуры Kepler.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) является одним из наиболее востребованных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) и моделирования физических процессов [1, 2]. Большинство существующих процессоров ЦОС и устройств на ПЛИС эффективно работают только с выборками до 2^{14} отсчетов. Обработка выборок большего размера, требуемая в ряде задач для получения высокой точности, традиционно выполнялась только на процессорах общего назначения. Благодаря развитию гетерогенного параллельного программирования появились возможности реализации алгоритма спектрального анализа с использованием графических адаптеров для работы с большими данными.

В настоящее время для гетерогенных вычислений широко используется технология CUDA (Compute Unified Device Architecture) от компании NVIDIA. Исследовательский интерес представляют реализации вычисления БПФ с ее использованием, анализ путей повышения эффективности вычислений и дальнейшая выработка практических рекомендаций.

Технология CUDA (архитектура Kepler). Гетерогенными называются вычисления, которые выполняются с использованием различных видов вычислительных устройств. В качестве таких устройств могут выступать процессоры общего назначения (GPP), процессоры цифровой обработки сигналов (DSP), графические процессоры (GPU), процессоры специального назначения и т.д. Ключевым аспектом является то, что эти устройства построены на архитектурах с различающимися наборами команд. Технология CUDA разработана компанией NVIDIA в 2006 г. и поддерживается несколькими поколениями графических ускорителей. В рамках исследования использовались два графических ускорите-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета Министров Чувашской Республики в рамках научного проекта № 17-47-210790 p_a.

ля – GeForce GT 750M и GeForce GTX 670, изготовленные на базе архитектуры Kepler (рис. 1).

На рис. 1 видно, что в состав потокового мультипроцессора (*Streaming Multiprocessor, SMX*), являющегося базовым элементом технологии CUDA и выполняющего основную работу, входят 192 ядра CUDA (*Core*). Помимо них имеется 64 блока для работы с вещественными числами двойной точности (*Double Precision Unit, DP Unit*) и 32 блока специального назначения (*Special Function Unit, SFU*). Кроме того, имеется 32 блока для доступа к видеопамяти (*Load/Store, LD/ST*).

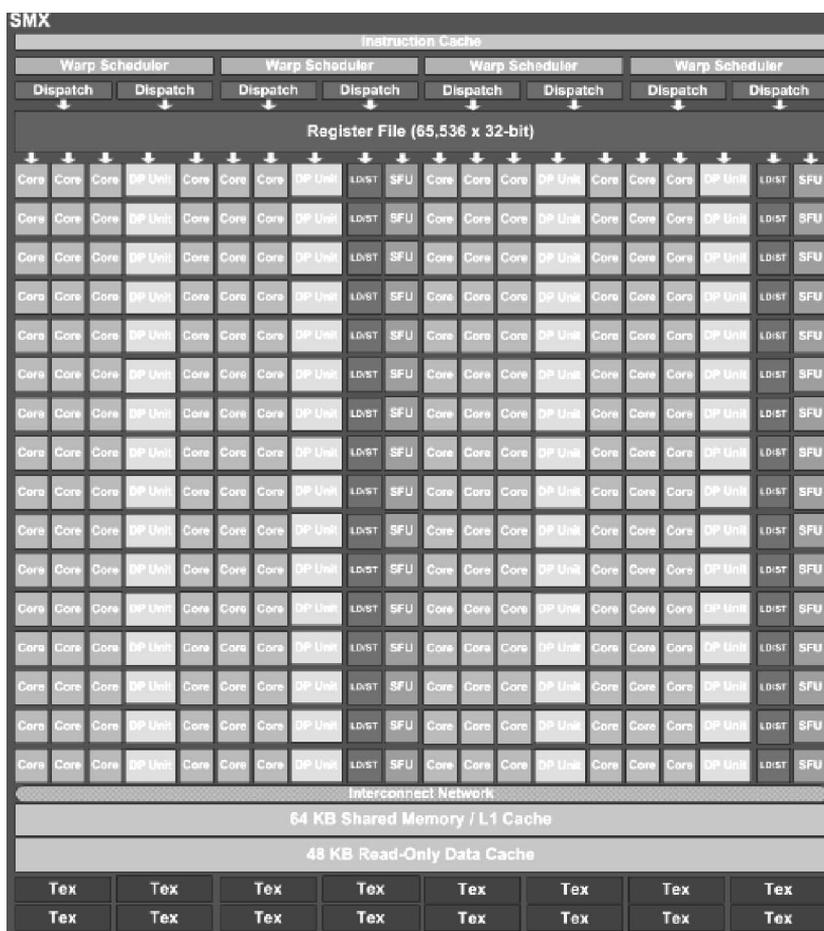


Рис. 1. Архитектура SMX (Kepler) [7]

Все эти блоки используются для параллельных SIMD-вычислений (*Single Instruction Multiple Data*) по 32 потоков в каждой группе. Такая группа потоков получила название *warp*. В рассматриваемой архитектуре одновременно могут выполняться до 4 warp (диспетчеризацией групп занимаются специальные планировщики *Warp Scheduler*). Каждый планировщик может обрабатывать до 16 warp, но активен в каждый момент времени может быть только один.

Мультипроцессор содержит:

- 65 536 32-разрядных регистров, используемых для хранения значений переменных потоков;
- 64 Кб разделяемой памяти, через которую потоки могут обмениваться данными между собой;
- 48 Кб памяти, доступной только для чтения (используется для хранения констант).

Также существует возможность работы с текстурной памятью (*Texture*, *Tex*). На одном графическом ускорителе, как правило, устанавливается несколько таких потоковых мультипроцессоров. Кроме того, графические ускорители отличаются количеством и типом видеопамяти.

Использование библиотеки cuFFT. Библиотека cuFFT с широким спектром возможностей от компании NVIDIA [5] основана на алгоритме БПФ Кули – Тьюки, использующем принцип «разделяй и властвуй», и предназначена для эффективного вычисления БПФ. Будем применять ее для прямого преобразования на последовательностях, являющихся степенями двойки.

Программирование на CUDA C. Для программирования в технологии CUDA используется синтаксис языка C. Для разработки программ необходим программный пакет CUDA Toolkit, а для их выполнения – драйвер устройства с поддержкой CUDA (обычно устанавливается в комплекте с CUDA Toolkit). В состав CUDA Toolkit входит прикладной программный интерфейс среды выполнения – CUDA Runtime API, который представляет собой набор C/C++ функций для выполнения на основной ЭВМ, предназначенных для получения информации об устройстве, управления его конфигурацией, запуска вычислительных задач и т.п.

В состав программного пакета входит специальный компилятор языка C – NVCC. Файлы, предназначенные для компилирования при помощи NVCC, обычно имеют расширение «.cu».

В состав программы входят участки кода (функции), которые выполняются на основной ЭВМ, и участки кода, которые выполняются на устройстве (видеоадаптере).

Текст программы на CUDA C:

```
#include <cuda.h>
#include <cuda_runtime.h>
#include <cufft.h>
#include "device_launch_parameters.h"
#include <stdio.h>
#include <vector>
#include <iostream>
#include <fstream>

const float PI_F = 3.14159265358979f;

// Макрос для проверки на ошибку, при вызове функций CUDA
#define CUDA_CHECK(call) \
if((call) != cudaSuccess) { \
    cudaError_t err = cudaGetLastError(); \
    printf( "CUDA error calling \"%s\n", error code is %d\n", #call, \
err); \
    printf( "Error %d: %s\n", err, cudaGetErrorString(err)); \
    exit(-1); }
```

```
int main(int argc, char* argv[])
{
    // определяем размер последовательности из аргументов
    if (argc != 2) return -1;
    size_t N = 1 << atol(argv[1]);
    printf("Sequence length: %d\n", N);

    // генерируем входной сигнал и сохраняем его в файл "source.dat"
    std::ofstream myfile;
    myfile.open("source.dat");

    cufftReal *source_signal = (cufftReal*)malloc(N * sizeof(cufftReal));
    float w = 2 * PI_F / N;
    for (size_t i = 0; i < N; ++i)
    {
        source_signal[i] =
        // синусоида с амплитудой A1 и частотой f1
        0.3 * sinf(N / 17 * w * static_cast<float>(i)) +
        // синусоида с амплитудой A2 и частотой f2
        0.3 * sinf(N / 3 * w * static_cast<float>(i)) +
        // синусоида с амплитудой A2 и частотой f2
        0.5 * sinf(N / 5 * w * static_cast<float>(i)) +
        // случайный шум
        0.2 * rand() / static_cast<float>(RAND_MAX) - 0.1;

        myfile << source_signal[i] << "\n";
    }
    myfile.close();

    // проверка на наличие устройств с поддержкой CUDA
    int deviceCount = 0;
    CUDA_CHECK(cudaGetDeviceCount(&deviceCount));
    if (deviceCount == 0)
    {
        printf("There are no available device(s) that support CUDA\n");
        return 0;
    }

    // используем первое устройство
    cudaSetDevice(0);

    cudaEvent_t evt1, evt2, evt3, evt4, evt5, evt6;
    cudaEventCreate(&evt1);
    cudaEventCreate(&evt2);
    cudaEventCreate(&evt3);
    cudaEventCreate(&evt4);
    cudaEventCreate(&evt5);
    cudaEventCreate(&evt6);

    // выделение видеопамати
    cudaEventRecord(evt1, 0);
    cufftComplex *device_data;
    CUDA_CHECK(cudaMalloc((void**)&device_data, N * sizeof(cufftComplex)));

    // копирование исходных данных в видеопамать
    cudaEventRecord(evt2, 0);
    size_t nBytes = N / 2 * sizeof(cufftReal);
    CUDA_CHECK(cudaMemcpy(device_data, source_signal, nBytes,
        cudaMemcpyHostToDevice));

    // обработка сигнала
    cudaEventRecord(evt3, 0);
    cufftHandle plan;
    CUDA_CHECK(cufftPlan1d(&plan, N, CUFFT_R2C, 1));
    CUDA_CHECK(cufftExecR2C(plan, (cufftReal*)device_data, device_data));
    CUDA_CHECK(cufftDestroy(plan));
```

```

// копирование результата из видеопамати
cudaEventRecord(evt4, 0);
std::vector<cufftComplex> result(N / 2 + 1);
CUDA_CHECK(cudaMemcpy(result.data(), device_data,
sizeof(cufftComplex)*(N / 2 + 1), cudaMemcpyDeviceToHost));
// освобождаем видеопамать
cudaEventRecord(evt5, 0);
CUDA_CHECK(cudaFree(device_data));
// окончание работы
cudaEventRecord(evt6, 0);
cudaEventSynchronize(evt6);

// сохраняем результаты работы в файл "result.dat"
myfile.open("result.dat");
for (size_t i = 0; i < (N / 2 + 1); ++i)
myfile << sqrt(result[i].x * result[i].x + result[i].y * result[i].y) /
N << "\n";
myfile.close();

float elapsedTime;
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt1, evt2);
printf("Video memory allocation: %g ms\n", elapsedTime);
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt2, evt3);
printf("Copying source data to video memory: %g ms\n", elapsedTime);
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt3, evt4);
printf("Calculation: %g ms\n", elapsedTime);
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt4, evt5);
printf("Copying results from video memory: %g ms\n", elapsedTime);
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt5, evt6);
printf("Video memory free: %g ms\n", elapsedTime);
cudaEventElapsedTime(&elapsedTime, evt1, evt6);
printf("Total time: %g ms\n", elapsedTime);

cudaEventDestroy(evt1);
cudaEventDestroy(evt2);
cudaEventDestroy(evt3);
cudaEventDestroy(evt4);
cudaEventDestroy(evt5);
cudaEventDestroy(evt6);

return 0;

```

На рис. 2. представлены официальные тесты производительности библиотеки от компании NVIDIA для одинарной и двойной точности вычислений [4].

Экспериментальная часть. В качестве входных данных будем использовать смесь трех синусоидальных сигналов с разными амплитудами и шума. Проверку выходных результатов будем осуществлять по спектру сигнала, на котором теоретически ожидаются три пика, соответствующие частотам первоначальных синусоид. Для построения спектрограммы воспользуемся программой gnuplot 5.0 [6].

Приведем характеристики используемых устройств:

Device: "GeForce GT 750M"

CUDA Driver Version / Runtime Version 8.0 / 8.0

CUDA Capability Major/Minor version number: 3.0

Total amount of global memory: 4096 MBytes (4294967296 bytes)

(2) Multiprocessors, (192) CUDA Cores/MP: 384 CUDA Cores

GPU Max Clock rate: 1085 MHz (1.09 GHz)

Memory Clock rate: 900 Mhz

Memory Bus Width: 128-bit

CUDA Device Driver Mode (TCC or WDDM): WDDM (Windows Display Driver Model)

Device: "GeForce GTX 670"

CUDA Driver Version / Runtime Version 8.0 / 8.0

CUDA Capability Major/Minor version number: 3.0

Total amount of global memory: 2048 MBytes (2147483648 bytes)

(7) Multiprocessors, (192) CUDA Cores/MP: 1344 CUDA Cores

GPU Max Clock rate: 1059 MHz (1.06 GHz)

Memory Clock rate: 3004 Mhz

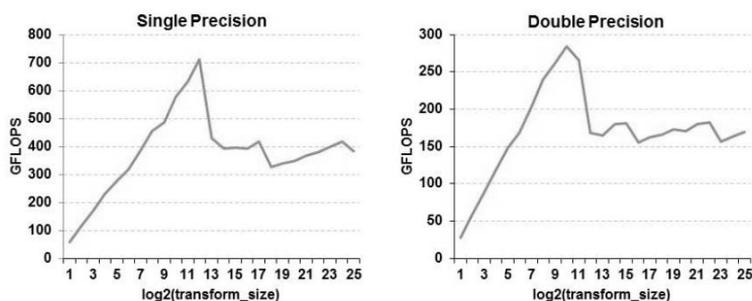
Memory Bus Width: 256-bit

CUDA Device Driver Mode (TCC or WDDM): WDDM (Windows Display Driver Model)

cuFFT: up to 700 GFLOPS

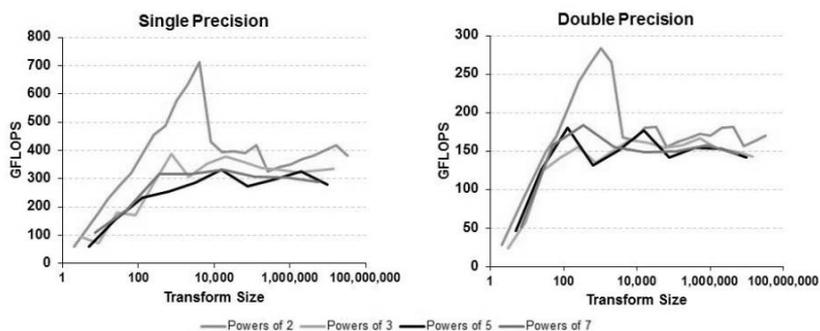
1D Complex, Batched FFTs

Used in Audio Processing and as a Foundation for 2D and 3D FFTs



Performance may vary based on OS version and motherboard configuration

• cuFFT 6.0 on K40c, ECC ON, 32M elements, input and output data on device

cuFFT: Consistently High Performance

Performance may vary based on OS version and motherboard configuration

• cuFFT 6.0 on K40c, ECC ON, 28M-32M elements, input and output data on device

Рис. 2. Официальные тесты производительности библиотеки cuFFT [5]

Отметим, что используемые устройства различаются объемом памяти, типом шины памяти, а также количеством мультимикропроцессоров.

В табл. 1 и 2 приведены результаты испытаний: определены зависимости времени выполнения преобразования Фурье от размера входных данных для обоих устройств. Заметим, что продолжительность операции «выделение видеопамяти» не зависит от размерности данных, а операции копирования и

освобождения памяти зависят от размера данных линейно. Интересно отметить, что время самого преобразования нелинейно зависит от размера данных. Это можно объяснить тем, что чем больше размер задачи, тем больше коэффициент использования ядер. Также можно отметить, что большее количество ядер дает выигрыш только на задачах большего размера (см. рис. 3).

Таблица 1

**Зависимость времени вычисления
от размера последовательности (GeForce GT 750M), мс**

Показатели	Размерность преобразования (степень 2)							
	20	21	22	23	24	25	26	27
Выделение видеопамати	0,001024	0,001024	0,001024	0,001024	0,000992	0,00112	0,001024	0,000992
Копирование исходных данных в видеопамати	2,20333	2,43507	3,6991	5,84538	9,50858	17,6326	33,8018	64,0628
Вычисление преобразования	250,174	255,708	281,294	278,413	376,489	375,963	514,677	837,595
Копирование результатов из видеопамати	1,10218	2,1575	4,81293	8,44077	14,7201	29,6889	61,3887	130,991
Освобождение видеопамати	0,520288	0,794912	1,10707	1,77584	3,00832	6,00768	10,6497	21,9966
Общее время	254,001	261,097	290,914	294,476	403,727	429,293	620,518	1054,65

Таблица 2

**Зависимость времени вычисления
от размера последовательности (GeForce GTX 670), мс**

Показатели	Размерность преобразования (степень 2)							
	20	21	22	23	24	25	26	27
Выделение видеопамати	0,001088	0,00112	0,001152	0,001088	0,00112	0,001088	0,00112	0,001088
Копирование исходных данных в видеопамати	2,62835	3,71878	4,42819	6,87091	11,518	23,3011	61,5019	119,947
Вычисление преобразования	277,942	276,493	284,707	285,379	303,753	337,943	402,187	612,738
Копирование результатов из видеопамати	1,36029	1,90547	5,19194	7,62822	18,7774	40,571	55,102	109,396
Освобождение видеопамати	0,89744	0,686432	1,37133	1,6361	3,33808	6,70675	14,4116	27,4431
Общее время	282,829	282,805	295,7	301,515	337,387	408,523	533,203	869,525

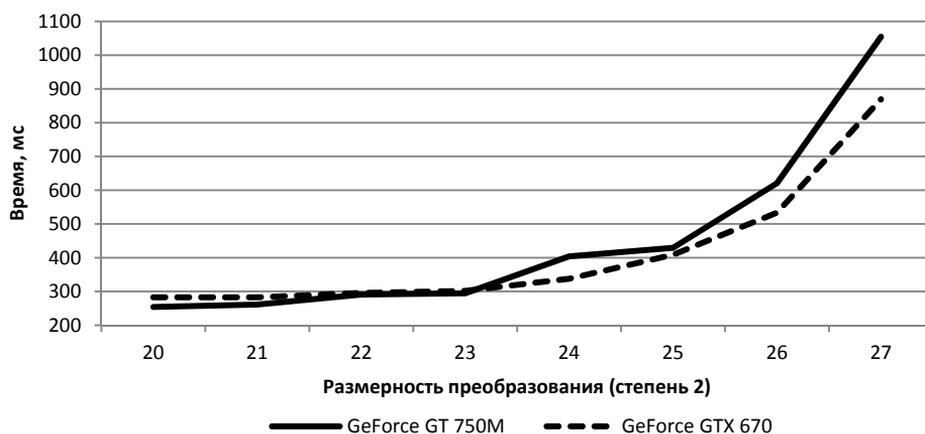
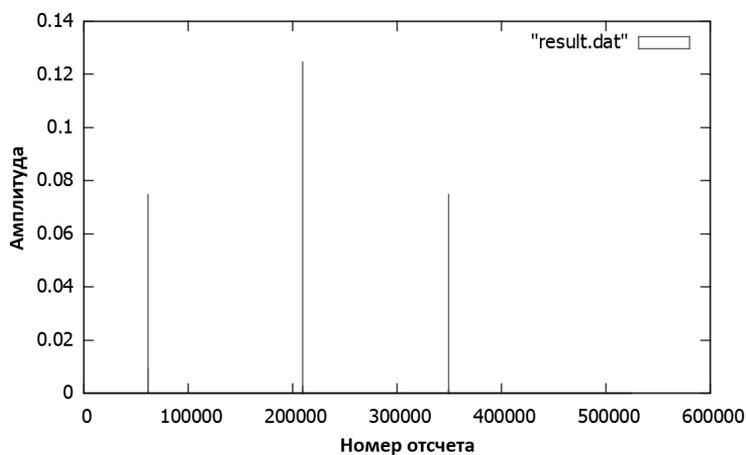


Рис. 3. Зависимость времени вычисления от размера задачи

На рис. 4 представлен спектр исследуемого сигнала, полученный на основе БПФ. Как и ожидалось, на нем присутствуют три пика, соответствующие частотам синусоид во входном сигнале.

Рис. 4. Спектр выходного сигнала на основе БПФ (2²⁰ отсчетов)

Выводы. Библиотека cuFFT от компании NVIDIA предоставляет широкие возможности для вычисления БПФ. Данная библиотека является оптимизированной под вычисления с использованием графических ускорителей с поддержкой технологии CUDA. Она очень проста в использовании и требует минимальных усилий со стороны разработчика при работе с ней.

Зависимость времени выполнения преобразования Фурье от размера задачи носит нелинейный характер, что объясняется неравномерной загрузкой вычислительных ядер CUDA. В пользу этой гипотезы говорит и тот факт, что наличие большего числа ядер не дает заметного увеличения на задачах малой размерности.

Визуализация результатов БПФ в виде спектра выходного сигнала вызывает сложности при размерностях большой длины. Используемая программа Gplot «справляется» только с данными меньше одного миллиона записей. Другие программы для визуализации результатов сталкиваются с подобными трудностями.

Таким образом, для достижения максимальной производительности необходимо выполнить три условия: максимально использовать доступные ядра, эффективно работать с памятью и обеспечить эффективное выполнение инструкций.

Литература

1. Алексеев А.Г., Йовенко А.Р. Параллельное программирование. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. 194 с.
2. Галанина Н.А. Синтез функциональных модулей БПФ // Вестник Чувашского университета. 2005. № 2. С. 124–127.
3. Галанина Н.А., Песошин В.А., Иванова Н.Н. Разработка устройств цифровой фильтрации и спектрального анализа с индексированием данных в системе остаточных классов // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. С. 93–97.
4. CuFFT [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.nvidia.com/cufft> (дата обращения 22.12.2016).
5. CuFFT User Guide [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.nvidia.com/cuda/cufft/index.html> (дата обращения 22.12.2016).
6. Gplot tutorial [Электронный ресурс]. URL: http://www.gplot.info/docs_5.0/gplot.pdf (дата обращения 22.12.2016).
7. Kepler Compute Architecture White Paper [Электронный ресурс]. URL: <http://international.download.nvidia.com/pdf/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-GK210-Architecture-Whitepaper.pdf> (дата обращения 22.12.2016).

ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galaninacheb@mail.ru).

АЛЕКСЕЕВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ – старший преподаватель кафедры вычислительной техники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (alexander_alexeyev@hotmail.com).

СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (alex-silver@mail.ru).

N. GALANINA, A. ALEKSEEV, A. SEREBRYANNIKOV

CALCULATION OF FOURIER TRANSFORM USING CUDA TECHNOLOGY

Key words: digital signal processing (DSP), fast Fourier transform (FFT), heterogeneous parallel programming, CUDA technology, Kepler architecture, speed.

The discrete Fourier transform, possibly computed by fast methods, underlies the various technologies for studying digital signals. The paper proposes the solution of the problem of increasing the speed of spectral analysis of signals by means of heterogeneous parallel programming using Cuda technology. The dependence of the execution time of the Fourier transform on the size of the problem is determined. As test examples, the calculation of the direct Fourier transform on sequences that are powers of two is chosen. The FFT was calculated using the cuFFT library. For the study, GeForce GT 750M and GeForce GTX 670 graphics accelerators were used, both based on the Kepler architecture.

References

1. Alekseev A.G., Iovenko A.R. *Parallel'noe programmirovaniye* [Parallel Programming]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2015, 194 p.
2. Galanina N.A. Synthes tablichnykh moduley BPF v SOK [Synthesis of tabular FFT modules in RNS]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2005, no. 2, pp. 124–127.
3. Galanina N.A., Pesoshin V.A., Ivanova N.N. *Razrabotka ustroystv tsifrovoy fil'tratsii i spektral'nogo analiza s indeksirovaniem dannykh v sisteme ostatochnykh klassov* [Development of devices of Digital Filtration and Spectral Analysis with the index of the data in Residue Number System]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2014, no. 2, pp. 93–97.
4. CuFFT. Available at: <https://developer.nvidia.com/cufft> (Access Date 22 Dec. 2016).
5. CuFFT User Guide. Available at: <http://docs.nvidia.com/cuda/cufft/index.html> (Access Date 22 Dec. 2016).
6. Gnuplot tutorial. Available at: http://www.gnuplot.info/docs_5.0/gnuplot.pdf (Access Date 22 Dec. 2016).
7. Kepler Compute Architecture White Paper. Available at: <http://international.download.nvidia.com/pdf/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-GK210-Architecture-Whitepaper.pdf> (Access Date 22 Dec. 2016).

GALANINA NATALIYA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (galaninacheb@mail.ru).

ALEKSEEV ALEKSANDER – Senior Lecturer, Department of Computer Science, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (alexander_alexeyev@hotmail.com).

SEREBRYANNIKOV ALEXANDER – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (alex-silver@mail.ru).

Ссылка на статью: Галанина Н.А., Алексеев А.Г., Серебрянников А.В. Вычисление быстрого преобразования Фурье с использованием технологии CUDA // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 88–97.

УДК 621.391.037.37:004.31
ББК 3811.3-043

Н.А. ГАЛАНИНА, Н.Н. ИВАНОВА

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ СИНТЕЗА УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ В ОСТАТОЧНЫХ КЛАССАХ*

Ключевые слова: оптимизация, цифровой фильтр (ЦФ), система остаточных классов (СОК), масштабирующий множитель, основания СОК.

Цифровые устройства обработки сигналов на основе СОК по сравнению с позиционными аналогами обладают большим быстродействием, точностью и надежностью. В СОК целое число представляется в виде упорядоченного набора неотрицательных вычетов (остатков) по группе взаимно простых оснований (модулей). Для синтеза ЦФ в СОК необходимо предварительное масштабирование весовых коэффициентов фильтра (позиционного прототипа). Выбор масштабирующего множителя основан на идеи корреляции величины модуля СОК со значением весовых коэффициентов ЦФ, благодаря чему достигается дополнительное сокращение количества арифметических операций. В статье разработан алгоритм оптимального выбора масштабирующего множителя для представления весовых коэффициентов ЦФ в СОК, позволяющий упростить реализацию специпроцессора. На языке программирования C++ была написана программа, которая позволяет производить расчеты цифровых фильтров Баттерворта, Чебышева 1-го и 2-го рода, эллиптического фильтра, осуществлять перевод цифрового фильтра в систему остаточных классов с заданными основаниями, подбирать оптимальный набор модулей СОК, выбирать масштабирующий множитель, производить расчет погрешности, вносимой перекодированием коэффициентов фильтра, и коэффициента оптимизации фильтра в СОК, а также выводить зависимости коэффициента оптимизации, погрешности и суммы остатков от масштабирующего множителя в виде графиков. Проведенное компьютерное моделирование показало, что возможно подобрать масштабирующий множитель, при котором коэффициент оптимизации будет максимальным, а погрешность перекодировки – минимальной.

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования в области цифровой обработки сигналов с применением непозиционных систем счисления, наиболее перспективной из которых является система счисления в остаточных классах (СОК) [1, 2, 4, 6, 8]. СОК обладает высоким уровнем естественного параллелизма, что позволяет увеличить быстродействие, точность и надежность синтезируемых устройств. Целое число в данной системе счисления представляется в виде упорядоченного набора неотрицательных вычетов (остатков) по группе взаимно простых оснований (модулей). При этом такие операции, как сложение, вычитание и умножение, являются модульными и выполняются без межразрядных переносов. Небольшая разрядность оснований СОК делает возможным реализацию выполнения модульных операций табличным способом.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета министров Чувашской Республики в рамках научного проекта № 17-47-210790 p_a.

Цифровые фильтры (ЦФ) на основе СОК можно реализовать двумя способами. Первый способ основывается на синтезе ЦФ на операционных устройствах (ОУ) в традиционной двоичной системе счисления, которая, как известно, является позиционной. В этом случае основная проблема заключается в выборе быстродействующих цифровых сигнальных процессоров с прогрессивной архитектурой. Второй способ основывается на разработке спецпроцессоров с учетом свойств вычетов СОК. При этом следует отметить, что переход к обработке сигналов в СОК простым копированием позиционного прототипа не является целесообразным, так как предварительное двоичное кодирование весовых коэффициентов вызывает двойной эффект ошибок округления результатов перекодирования для ЦФ в СОК, а простой переход к целым числам в рекурсивных фильтрах приведет к их неустойчивости [2].

В процессе разработки алгоритма фильтрации на первом этапе в обоих случаях определяются форма реализации и весовые коэффициенты фильтра при условии обеспечения требуемых энергетических характеристик, а на втором разрабатываются вычислительные алгоритмы цифровой фильтрации сигналов, кодированных вычетами СОК [3, 5].

К проблематике проектирования устройств цифровой фильтрации относится и вопрос о критериях их качества. Понятие оптимального решения при проектировании имеет определенное толкование – лучшее в том и ином смысле проектное решение, допускаемое обстоятельствами. Объективная сложность сравнительной оценки вариантов реализации ЦФ обусловлена тем, что при этом имеет значение набор свойств для каждого варианта, к которым в случае фильтрации в СОК относятся: быстродействие, аппаратные затраты, точность, помехо- и отказоустойчивость, потребляемая мощность, простота реализации, а также показатели качества ЦФ, учитывающие специфику СОК.

При синтезе вычислительных алгоритмов цифровой фильтрации в СОК необходимо предварительно решить следующие задачи:

- выбрать оптимальный набор оснований СОК $\{N_S\}$ (разрядности R_S) [7];
- выбрать оптимальный масштабирующий множитель для представления весовых коэффициентов ЦФ в СОК с целью упрощения реализации спецпроцессора, т.е. блока устройств в каналах СОК, в которых происходит обработка полученных вычетов в соответствии с заданным алгоритмом.

Вопросы выбора оптимального набора оснований СОК рассматривались авторами ранее, в частности в статье [5, 7]. Оптимальный набор оснований позволяет сократить аппаратные затраты, необходимые для реализации блоков шифрования (перевода позиционного кода сигнала в СОК), и повысить точность обработки.

Целью данной статьи является разработка алгоритма оптимального выбора масштабирующего множителя для представления весовых коэффициентов ЦФ в СОК для упрощения реализации спецпроцессора и его программная реализация.

Как правило, коэффициенты цифрового фильтра являются дробными числами (т.е. нецелыми), а зачастую и отрицательными. Для их корректного представления в СОК используются масштабирующие множители. Множители выбираются из некоторого заданного интервала таким образом, чтобы как можно больше вычетов коэффициента цифрового фильтра, представленного в СОК, было равно основанию системы остаточных классов или отличалось от него на ± 1 . Такой выбор масштабирующих множителей позволяет сократить количество арифметических операций и, как следствие, упростить реализацию спецпроцессора и самого фильтра.

Упростить аппаратную реализацию ЦФ в СОК можно также и за счет подбора модулей СОК, коррелированных со значениями весовых коэффициентов фильтра. Это позволяет исключить из алгоритма ряд сложных операций или упростить их.

Можно выделить следующие основные этапы решения задачи выбора модулей СОК и оптимального масштабирующего множителя [2, 7]:

- 1) предварительный выбор множества оснований СОК;
- 2) изменение выбранных оснований с целью их приближения к весовым коэффициентам ($A, B = N_S \pm 1$) путем введения масштабирующего множителя M ;
- 3) подсчет аппаратных затрат и быстродействия во всех случаях;
- 4) вычисление погрешностей.

Для оценки качества полученных решений в ходе синтеза устройств ЦФ был использован эвристический общий критерий:

$$K_{opt} = \frac{\sum_{m=1}^v \left(\sum_{k=1}^n D_{ПСС_k} - \sum_{k=1}^n D_{СОК_{opt_{k,m}}} \right)}{v \cdot \sum_{k=1}^n D_{ПСС_k}} \cdot 100\%,$$

где n – количество коэффициентов фильтра; v – количество каналов СОК; $D_{ПСС_k}$ – количество арифметических операций для k -го коэффициента фильтра в ПСС; $D_{СОК_{opt_{k,m}}}$ – количество арифметических операций для k -го коэффициента фильтра в СОК в m -м канале после оптимизации.

Таким образом, в ходе интерактивного синтеза устройств выбирались варианты с минимальными значениями таких параметров, как количество каналов СОК, суммарная разрядность модулей СОК, общее число арифметических операций.

На величину K_{opt} также влияет значение масштабирующего множителя M . Выбирались такие значения M , при которых $K_{opt} = \max$, а ошибки округления, возникающие при перекодировании в СОК, принимали минимальные значения.

Для выбора оптимального набора модулей СОК определялись следующие параметры: оптимальные наборы взаимно простых чисел $\{N_S\}$: N_1, N_2, \dots, N_v , имеющие минимальную суммарную разрядность, для которых

$\prod_{S=1}^v N_S = N \geq 2^{16} - 2^{20}$; погрешность ΔF , вносимая перекодированием весовых

коэффициентов фильтра А, В в СОК; сумма остатков $S_{\text{ост}}$ для контроля максимальности результата; коэффициент K_{opt} ; нормирующий множитель M и интервал его изменения. Для этого последовательно производился поиск наборов чисел $\{N_S\}$ при изменении M . Таким образом, были найдены оптимальные наборы $\{N_S\}$ для различных коэффициентов фильтра.

Далее производился поиск оптимальных множителей M для фиксированных наборов модулей $\{N_S\}$ в случае, когда для разного количества коэффициентов фильтра используется одна система СОК $\{N_S\}$.

Программно данный алгоритм был реализован на языке C++. Написанная программа позволяет подбирать оптимальный набор модулей СОК, выбирать масштабирующий множитель, производить расчет погрешности, вносимой перекодированием коэффициентов фильтра и коэффициента оптимизации фильтра в СОК, а также выводить зависимости коэффициента оптимизации, погрешности и суммы остатков от масштабирующего множителя в виде графиков. Кроме того, программа производит расчеты цифровых фильтров Баттерворта, Чебышева 1-го и 2-го рода, эллиптического фильтра, осуществляет перевод цифрового фильтра в систему остаточных классов с заданными основаниями.

Входными данными для расчета оптимального набора модулей СОК являлись интервал и шаг изменения масштабирующего множителя, а также максимально возможный результат фильтрации ρ_{max} . Блок-схема выбора оптимальных модулей СОК представлена на рис. 1.

Сначала программа генерировала наборы оснований, при которых коэффициент оптимизации K_{opt} принимал максимальные значения.

Далее подбирался масштабирующий множитель для перевода коэффициентов фильтра в СОК. При этом критерием выбора также служит значение максимального коэффициента оптимизации K_{opt} . При подборе масштабирующего множителя на каждом шаге рассчитывались погрешность перекодировки, сумма остатков и коэффициент оптимальности. Блок-схема подбора масштабирующего множителя и перевода коэффициентов фильтра в СОК показана на рис. 2.

В качестве примера на рис. 3 приведена форма приложения с загруженным фильтром, введенным интервалом изменения масштабирующего множителя и выбранным ρ_{max} . Коэффициенты фильтра отображаются в окне приложения в виде списка числовых значений в многострочном текстовом поле, значения интервала и шага изменения масштабирующего множителя вводятся в однострочное текстовое поле, а ρ_{max} выбирается из выпадающего списка.

Окно формы, содержащей рассчитанные (выходные) данные, представлена на рис. 4.

На рис. 5 представлено окно программы, в которой раскрыта вкладка с графиком.

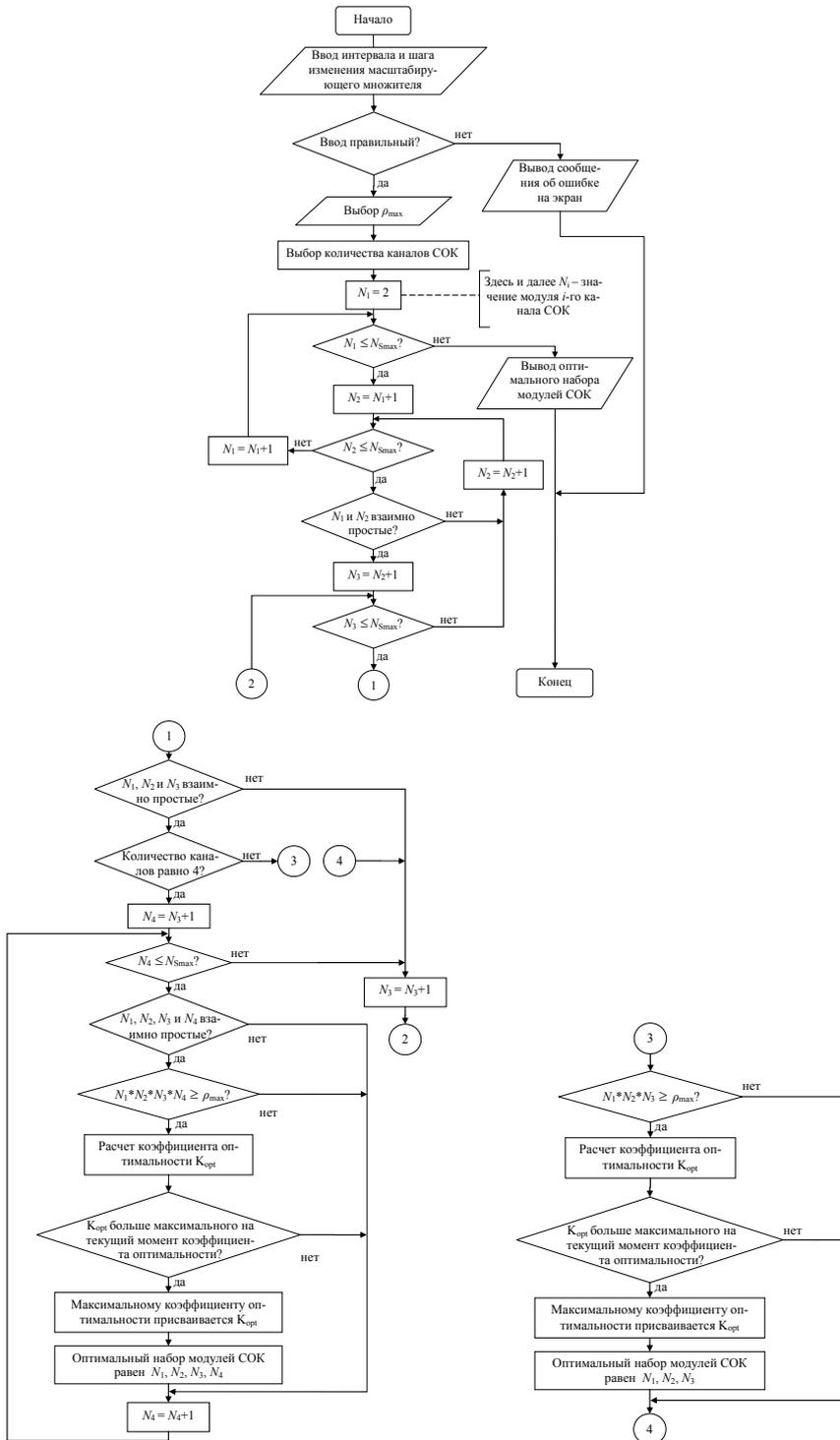


Рис. 1. Блок-схема выбора оптимальных модулей СОК

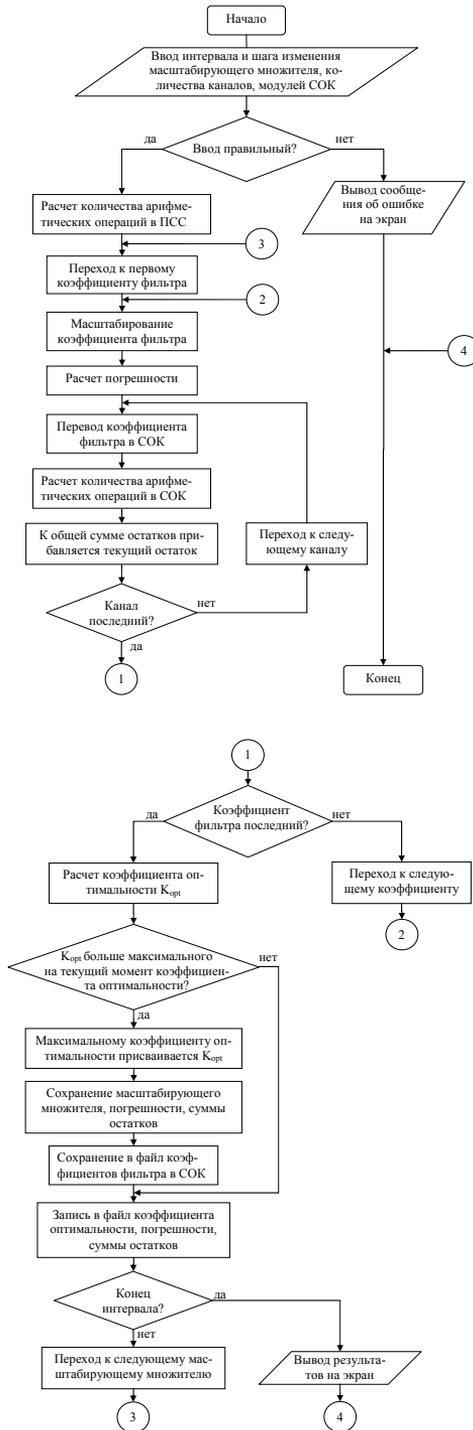


Рис. 2. Блок-схема выбора масштабирующего множителя

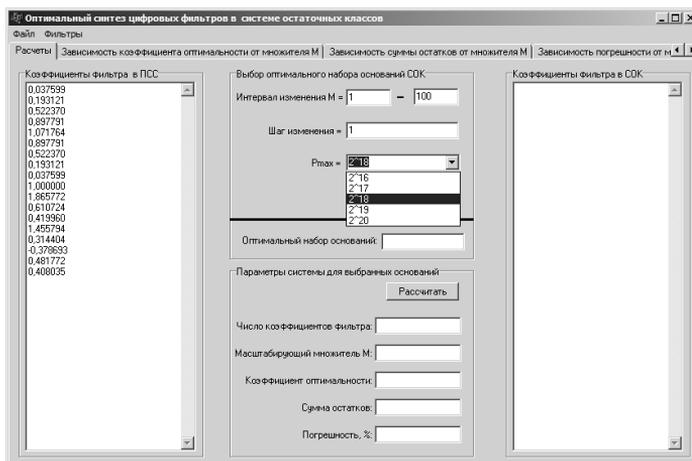


Рис. 3. Окно основной программы с введенными входными данными

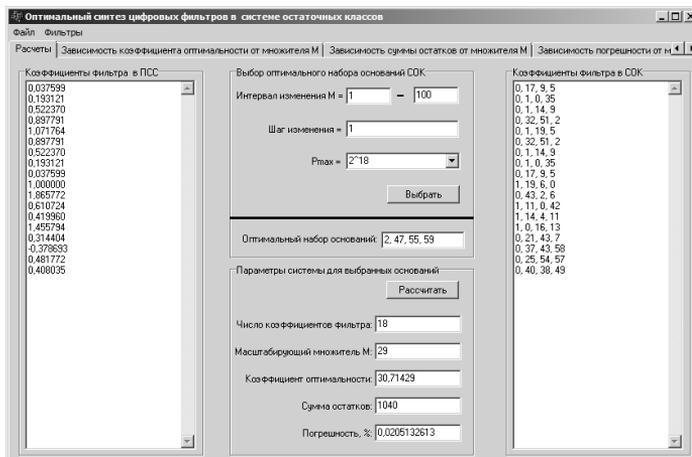


Рис. 4. Окно основной программы с рассчитанными данными

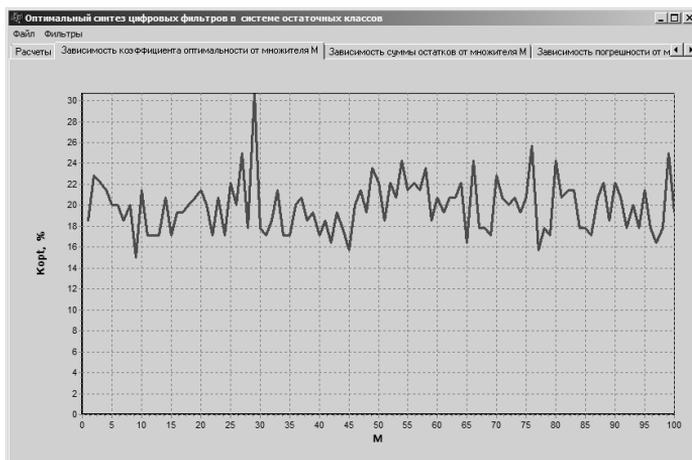


Рис. 5. Окно основной программы, вкладка с графиком

В таблице представлены результаты определения оптимального масштабирующего множителя (M) для выбранной системы оснований СОК при $\rho_{\max} = 2^{17}$ и $\rho_{\max} = 2^{18}$.

Результаты определения оптимального масштабирующего множителя

Максимальный результат фильтрации, ρ_{\max}	Основания СОК (N_1, N_2, N_3)	Интервал изменения множителя M	Оптимальный множитель M	Коэффициент оптимизации, K_{opt} , %	Сумма остатков, $S_{ост.}$	Погрешность перекодировки, ΔF , %
2^{16}	30, 47, 61	1-400	279	80,952	40	0,023
	27, 49, 50	1-350	344	89,124	20	0,049
	31, 49, 60	100-150	103	70,370	90	0,173
	32, 45, 47	100-150	150	63,636	170	0,151
	31, 43, 57	100-150	106	64,103	246	0,254
	47, 53, 55	1-200	139	75,000	204	0,124
2^{17}	44, 53, 61	100-150	109	71,429	54	0,251
	52, 55, 61	1-350	156	88,987	10	0,164
	41, 57, 59	100-150	116	66,667	284	0,147
	43, 52, 61	100-150	139	57,576	250	0,121
	43, 54, 61	100-150	130	61,538	416	0,159

Из результатов видно, что при увеличении масштабирующего множителя погрешность вычислений снижается и всегда можно найти такое значение M , при котором коэффициент оптимизации K_{opt} будет максимальным, а средняя сумма остатков и погрешность перекодировки будут минимальными.

Таким образом, добавление в основные этапы синтеза ЦФ в СОК этапа выбора оптимальных масштабирующего множителя и наборов оснований, коррелированных со значениями весовых коэффициентов фильтра, позволяет исключить из алгоритма обработки сигналов ряд сложных операций, а это, в свою очередь, дает возможность существенно упростить аппаратную реализацию ЦФ в СОК.

Литература

1. Абдикаликов К.А. О некоторых эффективных алгоритмах вычисления модулярной арифметики // Наука и Мир. 2014. № 8(12). С. 13–16.
2. Галанина Н.А. Непозиционные алгоритмы и устройства цифровой фильтрации и спектрального анализа. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009.
3. Галанина Н.А., Лебедев Е.К., Давыдов О.Е., Егоров Г.Е. Методы синтеза цифровых фильтров в системе остаточных классов // Вестник Чувашского университета. 2000. № 3-4. С. 145–156.
4. Коржавина А.С., Князьков В.С. Нестандартные системы счисления и области их применения // Общество, наука, инновации (НПК-2016): сб. ст. 2-е изд., испр. и доп. Киров: Вятский гос. ун-т, 2016. С. 2452–2459.
5. Лебедев Е.К., Галанина Н.А., Иванова Н.Н., Буланкина Е.Ю. Оптимизация непозиционных устройств цифровой обработки сигналов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. С. 199–203.

6. *Оцоков Ш.А.* Ускорение высокоточных вычислений за счет распараллеливания операции округления в комплексе систем счисления // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 5. С. 352–356.

7. *Песошин В.А., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* Моделирование наборов оснований системы счисления в остаточных классах с минимальными суммарными разрядностями // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и техники: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Тольятти, 2010. С. 90–98.

8. *Червяков Н.И., Ляхов П.А., Шульженко К.С.* Цифровые фильтры в двухступенчатой системе остаточных классов с модулями специального вида // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 41–55.

ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galaninacheb@mail.ru).

ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (naadeezdaa@rambler.ru).

N. GALANINA, N. IVANOVA

**TO THE QUESTION OF OPTIMIZATION OF SYNTHESIS
OF COMPUTERS DEVICES FOR DIGITAL FILTERING
OF RESIDUE NUMBER SYSTEM**

Key words: optimization, digital filter (DF), Residue Number System (RNS), a scaling multiplier, the base of the RNS.

Digital devices of signal processing based on the RNS in comparison with composite counterparts have greater speed, accuracy and reliability. In RNS an integer is represented as an ordered set of non-negative deductions (residues) in the group of coprime bases (modules). To synthesize digital filters into the RNS it is necessary to scale in advance the weighting filter coefficients (positional prototype). The choice of the scaling coefficient is based on the idea of correlation values of module RNS with a value of the weight coefficients of the fit, and thus, a further reduction in the number of arithmetic operations is achieved. The article developed the algorithm of optimal choice of the scaling coefficient to represent the weight coefficients of the fit in the RNS, enabling to simplify the implementation of special processor 1. In the programming language C++ there was written a program that allows to make calculations, digital filters Butterworth, Chebyshev of 1 and 2 kind, elliptic filter, to implement a digital filter in a residue number system with the specified grounds, to select the optimal set of modules RNS, select a scaling multiplier to calculate the error introduced by encoding the filter coefficients, and the coefficient optimization, the filter in the RNS, and output dependence of the coefficient of the optimization error and the amount of residue from a scale factor in graphs. Computer modeling showed that it is possible to choose the scaling multiplier, the coefficient optimization being maximum and the accuracy of conversion being minimal.

References

1. Abdikalikov K.A. *O nekotorykh effektivnykh algoritmakh vychisleniya modulyarnoi arifmetiki* [Some efficient algorithms for calculating in modular arithmetic]. *Nauka i Mir*, 2014, no. 8(12), pp. 13–16.

2. Galanina N.A. *Nepozitsionnye algoritmy i ustroistva tsifrovoi fil'tratsii i spektral'nogo analiza* [Non-positional algorithms and devices for digital filtering and spectral analysis]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2009.

3. Galanina N.A., Lebedev E.K., Davydov O.E., Egorov G.E. *Metody sinteza tsifrovyykh fil'trov v sisteme ostatochnyykh klassov* [Methods of synthesis of Digital Filters in the of Residual Number System] *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2000, no. 3-4, pp. 145–156.

4. Korzhavina A.S., Knyaz'kov V.S. *Nestandartnye sistemy schisleniya i oblasti ikh primeneniya* [Non-standard number systems and their applications]. In: *Obshchestvo, nauka, innovatsii (NPK-2016): sb. st. 2-e izd., ispr. i dop.* [Society, science, innovation (NPK-2016). Collection of scientific articles. 2nd ed.] Kirov, Vyatka University Publ., 2016, pp. 2452–2459.

5. Lebedev E.K., Galanina N.A., Ivanova N.N., Bulankina E.Yu. *Optimizatsiya nepozitsionnykh ustroystv tsifrovoi obrabotki signalov* [Optimization of non-position digital signal processing devices]. *Dinamika nelineinykh diskretnyykh elektro-tekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy V Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Rus. Sci. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2003, pp. 199–203.

6. Otsokov Sh.A. *Uskorenie vysokotochnyykh vychislenii za schet rasparallelivaniya ope-ratsii okrugleniya v komplekse sistem schisleniya* [Acceleration of High-Precision Computation Based on Parallelization of Group Number Systems]. *Informatsionnye tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 352–356.

7. Pesoshin V.A., Galanina N.A., Ivanova N.N. *Modelirovanie naborov osnovanii sistemy schisleniya v ostatochnyykh klassakh s minimal'nymi summarnymi razryadnostyami* [Simulation of base sets of the number system in residual classes with minimal total discharges]. *Tatishchevskie chteniya: aktual'nye problemy nauki i tekhniki: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of VII Int. Sci. Conf. «Tatishchev readings: actual problems of science and technology»]. Togliatti, 2010, pp. 90–98.

8. Chervyakov N.I., Lyakhov P.A., Shul'zhenko K.S. *Tsifrovyye fil'try v dvukhstupenchatoi sisteme ostatochnyykh klassov s modulyami spetsial'nogo vida* [Digital filters in two-stage residue number system with special modules]. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 41–55.

GALANINA NATALIYA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (galaninacheb@mail.ru).

IVANOVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (naadeezdaa@rambler.ru).

Ссылка на статью: *Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* К вопросу об оптимизации синтеза устройств вычислительной техники для цифровой фильтрации в системе счисления в остаточных классах // *Вестник Чувашского университета.* – 2018. – № 1. – С. 98–107.

УДК 004.9:[519.852:519.6]

ББК В 183.41:В193.1

А.Ю. ИВАНИЦКИЙ, А.М. УРУСОВ

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДА ПОТОЧЕЧНОЙ НЕВЯЗКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ И ДВОЙСТВЕННОЙ НЕУСТОЙЧИВОЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С ПРИБЛИЖЁННЫМИ ДАННЫМИ

Ключевые слова: некорректно поставленные задачи, прямая и двойственная задача линейного программирования, неустойчивые технические и инженерные задачи, сходимость, оценка погрешности.

В работе предлагается численный анализ метода поточечной невязки для решения прямых и двойственных задач линейного программирования с приближенными данными. В качестве модельной задачи взята «сильно» неустойчивая система линейных алгебраических уравнений с большим числом обусловленности, которая получена путем дискретизации интегрального уравнения Фредгольма I рода. В статье показана численная сходимость метода поточечной невязки для подобных задач. Предложенный метод может применяться для решения неустойчивых технических и инженерных задач.

1. В работе [3] предложен метод поточечной невязки для решения неустойчивых систем линейных алгебраических уравнений и неравенств с приближенными данными. В статье [4] рассмотрен один из вариантов этого метода для решений прямой и двойственной задачи линейного программирования, когда входные данные задачи известны приближенно: доказаны теоремы существования, сходимости и получены оценки погрешности аппроксимации точных решений приближенными. В этой же работе проведен численный анализ метода поточечной невязки для неустойчивой задачи линейного программирования с приближенными данными в пространстве \mathbf{R}^2 . В настоящей работе основная цель – показать сходимость метода на примере «сильно» неустойчивой задачи большой размерности из статьи [5].

Сформулируем стандартную (основную) задачу линейного программирования

$$\varphi(\mathbf{u}) = \langle \mathbf{c}, \mathbf{u} \rangle \rightarrow \inf, \mathbf{u} \in \mathbf{U}, \quad (1)$$

где

$$\langle \mathbf{c}, \mathbf{u} \rangle = c_1 u_1 + c_2 u_2 + \dots + c_n u_n,$$

$$\mathbf{U} = \{ \mathbf{u} \in \mathbf{R}_+^n : \mathbf{B}\mathbf{u} \leq \mathbf{d} \}, \quad \mathbf{R}_+^n = \{ \mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T : u_j \geq 0, j = \overline{1, n} \}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{p1} & b_{p2} & \dots & b_{pn} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{p \times n}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_p \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^p, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix},$$

$\mathbf{R}^{p \times n}$ и \mathbf{R}^p – пространство матриц порядка $p \times n$ и пространство векторов размерности p с действительными элементами, соответственно. Задачу, двойственную к (1), запишем в виде

$$\psi(\mathbf{v}) = -\langle \mathbf{d}, \mathbf{v} \rangle \rightarrow \sup, \mathbf{v} \in \mathbf{V}, \quad (2)$$

где $\mathbf{V} = \{\mathbf{v} \in \mathbf{R}_+^p : -\mathbf{B}^T \mathbf{v} - \mathbf{c} \leq \mathbf{0}\}$, $\mathbf{B}^T \in \mathbf{R}^{n \times p}$. Как следует из [9], задачи (1) и (2) одновременно разрешимы, т.е.

$$\mathbf{U}_* = \left\{ \mathbf{u} \in \mathbf{U} : \varphi(\mathbf{u}) = \varphi_*, \varphi_* = \inf_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \varphi(\mathbf{u}) \right\} \neq \emptyset$$

и

$$\mathbf{V}^* = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{V} : \psi(\mathbf{v}) = \psi^*, \psi^* = \sup_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} \psi(\mathbf{v}) \right\} \neq \emptyset,$$

при выполнении условий

$$\mathbf{U} \neq \emptyset, \varphi_* > -\infty \quad (3)$$

и $\mathbf{u}_* \in \mathbf{U}_*$, $\mathbf{v}^* \in \mathbf{V}^*$, тогда и только тогда, когда

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_* \\ \mathbf{v}^* \end{bmatrix} \in \mathbf{W} = \left\{ \mathbf{w} \in \mathbf{R}_+^{n+p} : \mathbf{B}\mathbf{u}_* - \mathbf{d} \leq \mathbf{0}, -\mathbf{B}^T \mathbf{v}^* - \mathbf{c} \leq \mathbf{0}, \langle \mathbf{c}, \mathbf{u}_* \rangle + \langle \mathbf{d}, \mathbf{v}^* \rangle \leq 0 \right\}.$$

Таким образом, если мы найдем вектор $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n, w_{n+1}, \dots, w_{n+p}]^T$, то вектор $\mathbf{u}_* = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ из его первых n -компонент будет решением задачи (1), а вектор $\mathbf{v}^* = [w_{n+1}, w_{n+2}, \dots, w_{n+p}]^T$ – решением задачи (2). Переход к множеству \mathbf{W} позволяет нам найти одновременно решение прямой задачи (1) и двойственно к ней задачи (2).

В дальнейшем будем искать вектор $\mathbf{w} \in \mathbf{W}$ с минимальной нормой (нормальное решение), что приводит к задаче

$$f(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|_1 = |w_1| + |w_2| + \dots + |w_{n+p}| \rightarrow \inf, \mathbf{w} \in \mathbf{W}$$

или, с учетом $\mathbf{W} \subseteq \mathbf{R}_+^{n+p}$,

$$f(\mathbf{w}) = w_1 + w_2 + \dots + w_{n+p} \rightarrow \inf, \mathbf{w} \in \mathbf{W}. \quad (4)$$

Множество $\mathbf{W} \neq \emptyset$, так как при выполнении условий (3) $\mathbf{U}_* \neq \emptyset$ и $\mathbf{V}^* \neq \emptyset$, и ограниченная снизу функция $f(\mathbf{w}) \geq 0$ достигает своей точной нижней грани на непустом множестве \mathbf{W} . Следовательно, множество решений задачи (4)

$$\mathbf{W}_* = \left\{ \mathbf{w} \in \mathbf{W} : f(\mathbf{w}) = f_*, f_* = \inf_{\mathbf{w} \in \mathbf{W}} f(\mathbf{w}) \right\} \neq \emptyset.$$

Пусть данные $\{\mathbf{B}, \mathbf{d}, \mathbf{c}\}$ в задаче (1) известны приближенно

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \tilde{b}_{11} & \tilde{b}_{12} & \dots & \tilde{b}_{1n} \\ \tilde{b}_{21} & \tilde{b}_{22} & \dots & \tilde{b}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{b}_{p1} & \tilde{b}_{p2} & \dots & \tilde{b}_{pn} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{p \times n}, \tilde{\mathbf{d}} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_1 \\ \tilde{d}_2 \\ \dots \\ \tilde{d}_p \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^p, \tilde{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \dots \\ \tilde{c}_n \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^n,$$

так, что выполняются соотношения

$$\left| \tilde{b}_{sj} - b_{sj} \right| \leq \Delta_{sj}, \left| \tilde{d}_s - d_s \right| \leq \delta_s, \left| \tilde{c}_j - c_j \right| \leq \xi_j, \quad (5)$$

где $\Delta_{sj} \geq 0, \delta_s \geq 0, \xi_j \geq 0, s = \overline{1, p}, j = \overline{1, n}$ – заданные поточечные уровни погрешностей. В общем случае задача (4) с приближенными данными $\{\tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{d}}, \tilde{\mathbf{c}}\}$

$$f(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|_1 \rightarrow \inf, \mathbf{w} \in \tilde{\mathbf{W}},$$

где $\tilde{\mathbf{W}} = \{\mathbf{w} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}]^T \in \mathbf{R}_+^{n+p} : \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{d}} \leq \mathbf{0}, -\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{v} - \tilde{\mathbf{c}} \leq \mathbf{0}, \langle \tilde{\mathbf{c}}, \mathbf{u} \rangle + \langle \tilde{\mathbf{d}}, \mathbf{v} \rangle \leq 0\}$ может оказаться неразрешимой, а в случае разрешимости может быть неустойчивой [9] [см. также ниже пример из пункта 2]. Поэтому для ее решения необходимо использовать методы регуляризации [1–9]. Одним из таких методов является метод поточечной невязки, описанный ниже.

Обозначим

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} \Delta_{12} \dots \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} \Delta_{22} \dots \Delta_{2n} \\ \dots \\ \Delta_{p1} \Delta_{p2} \dots \Delta_{pn} \end{bmatrix}, \delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_p \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \dots \\ \xi_n \end{bmatrix},$$

$\sigma = \{\Delta, \delta, \xi\}$ – набор погрешностей входных данных из (5). Рассмотрим множество

$$\mathbf{W}(\sigma) = \{\mathbf{w} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}]^T \in \mathbf{R}_+^{n+p} : \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{d}} \leq \Delta\mathbf{u} + \delta, -\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{v} - \tilde{\mathbf{c}} \leq \Delta^T \mathbf{v} + \xi, \langle \tilde{\mathbf{c}}, \mathbf{u} \rangle + \langle \tilde{\mathbf{d}}, \mathbf{v} \rangle \leq \langle \xi, \mathbf{u} \rangle + \langle \delta, \mathbf{v} \rangle\}$$

или эквивалентное ему множество

$$\mathbf{W}(\sigma) = \{\mathbf{w} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}]^T \in \mathbf{R}_+^{n+p} : (\tilde{\mathbf{B}} - \Delta)\mathbf{u} \leq \tilde{\mathbf{d}} + \delta, -(\tilde{\mathbf{B}} + \Delta)^T \mathbf{v} \leq \tilde{\mathbf{c}} + \xi, \langle \tilde{\mathbf{c}} - \xi, \mathbf{u} \rangle + \langle \tilde{\mathbf{d}} - \delta, \mathbf{v} \rangle \leq 0\}.$$

В определении множества $\mathbf{W}(\sigma)$ заложена идея согласования компонент векторов-невязок с поточечными погрешностями входных данных Δ, δ, ξ . Заметим, что впервые такая идея была высказана в [7], хотя формально понятие «слабого» решения для систем линейных неравенств, введенное в [10], приводит к таким же неравенствам, как и определению множества $\mathbf{W}(\sigma)$. Множество $\mathbf{W}(\sigma) \neq \emptyset$, так как $\mathbf{W} \subseteq \mathbf{W}(\sigma)$ и $\mathbf{W} \neq \emptyset$, и является специальным расширением множества \mathbf{W} .

Рассмотрим задачу

$$f(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|_1 \rightarrow \inf, \mathbf{w} \in \mathbf{W}(\sigma). \quad (6)$$

Теорема 1. При выполнении условий (3) и (5) множество решений задачи (6)

$$\mathbf{W}_*(\sigma) = \left\{ \mathbf{w} \in \mathbf{W}(\sigma) : f(\mathbf{w}) = f_*(\sigma), f_*(\sigma) = \inf_{\mathbf{w} \in \mathbf{W}(\sigma)} f(\mathbf{w}) \right\} \neq \emptyset$$

и

$$\beta(\mathbf{W}_*(\sigma), \mathbf{W}_*) = \sup_{\mathbf{w}(\sigma) \in \mathcal{W}_*(\sigma, \varepsilon)} \inf_{\mathbf{w} \in \mathbf{W}_*} \|\mathbf{w}(\sigma) - \mathbf{w}\| \xrightarrow{\sigma \rightarrow 0} 0.$$

Доказательство этой теоремы приведено в теоремах 2 и 3 в работе [4]. Эта теорема показывает, что в качестве приближенных решений задачи (4)

при условии задания оценок (5) можно взять решения задачи (6). Более того, в работе [4] получена оценка погрешности решений задачи (4) решениями задачи (6) такого же порядка, что и порядок задания погрешностей входных данных, т.е. получены оптимальные оценки по порядку

$$\sup_{\mathbf{w} \in W_*(\delta)} \rho(\mathbf{w}, \mathbf{W}_*) = O(\hat{\Delta} + \hat{\delta} + \hat{\xi})$$

или, более точно,

$$\rho(\mathbf{w}, \mathbf{W}_*) \leq M \left\{ 4\hat{\Delta} + 2M(\hat{\delta}, \hat{\xi})(f_*) + 2(\|\delta\|_\infty + \|\xi\|_\infty) \right\}, \forall \mathbf{w} \in \mathbf{W}_*(\sigma), \quad (7)$$

где $\hat{\Delta} = \max_{s,j} \Delta_{sj}$, $\hat{\delta} = \|\delta\|_\infty = \max_s \delta_s$, $\hat{\xi} = \max_j \xi_j$, $M(\hat{\delta}, \hat{\xi}) = \max \{\hat{\delta}, \hat{\xi}\}$, $s = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, n}$.

Заметим, что в отличие от традиционных методов регуляризации из [8] метод поточечной невязки, заключающийся в решении задачи (6), приводит к оптимизационной задаче такого же типа, как и исходные задачи (1) и (3), т.е. мы остаёмся в классе задач линейного программирования, что, несомненно, является достоинством этого метода.

2. Рассмотрим модельную задачу, которая относится к «сильно» неустойчивым задачам [6] в том смысле, что число обусловленности матрицы системы уравнений, аппроксимирующей интегральное уравнение, очень большое.

Модельная задача. Найти решение $u(s)$ интегрального уравнения Фредгольма I рода

$$\int_a^b K(x,s)u(s)ds = f(x), \quad c \leq x \leq d, \quad (8)$$

где $K(x,s) = [1+(x-s)^2]^{-1}$, $[c;d] = [-2; 2]$, $[a;b] = [-1; 1]$,

$$f(x) = (2-x^2) \cdot [\arctg(1-x) + \arctg(1+x)] - 2-x \cdot \ln \frac{1+(1-x)^2}{1+(1+x)^2}.$$

Точное решение уравнения (8) – известная функция $\bar{u}(s) = 1-s^2$.

Аппроксимируем уравнение (8) на равномерных сетках $x_{i+1} = x_i + h_i$, $x_1 = -2, i = \overline{1, 41}, h_i = 0.1$ и $s_{j+1} = s_j + h_j, s_1 = -1, j = \overline{1, 41}, h_j = 0.05$, используя формулу Симпсона. Мы приходим к системе линейных алгебраических уравнений

$$\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{f}}, \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \{\tilde{a}_{ij}\} \in \mathbf{R}^{41 \times 41}, \tilde{a}_{ij} = \frac{N_j h_i}{1+(x_i-s_j)^2}, \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{f}} = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_{41})]^T$$

где N_j – квадратурные коэффициенты формулы Симпсона.

Если решать систему (9) традиционным методом Гаусса в среде Maple2015, то мы получим её приближенное решение, сильно отличающимся от точного решения $\bar{u}(s)$. Результаты вычислений представлены на рис. 1. и табл. 1.

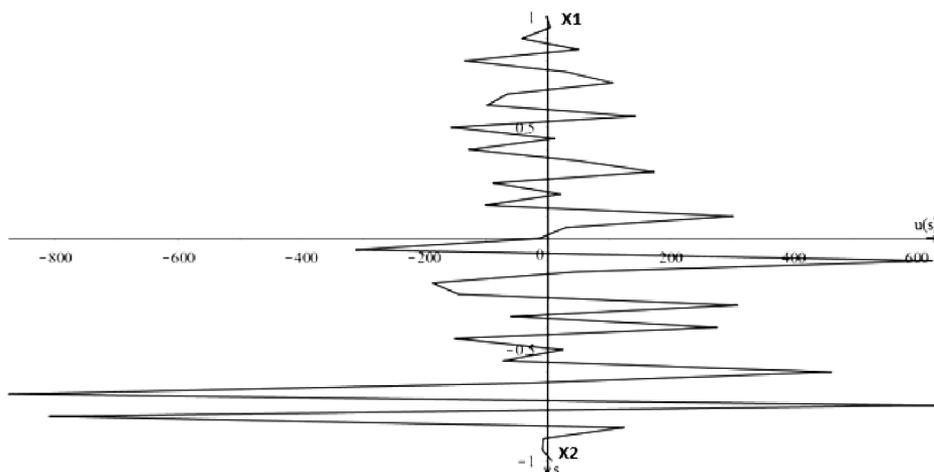


Рис. 1. Решение системы (9) методом Гаусса

Таблица 1

Решение системы (9) методом Гаусса

Норма	Погрешность решения $\ \tilde{u} - u\ _1$	Невязка $\ \tilde{A}\tilde{u} - \tilde{f}\ _1$
$\ \bullet\ _1$	6911.6993266410008	12.9239639973000

На рис. 1. пилообразность приближенного решения $\bar{u}(s)$ системы (9) настолько велика, что точное решение в данном масштабе выглядит как вертикальный отрезок $X1X2$. Из табл. 4 видно, что погрешность аппроксимации точного решения приближенным очень велика порядка $O(10^3)$.

Будем искать решение интегрального уравнения (8) на классе неотрицательных ($u(s) \geq 0$), монотонных ($u'(s) \geq 0, s \in [-1, 0]$ и $u'(s) \leq 0, s \in [0, 1]$) и выпуклых ($u(s)'' \leq 0, s \in [-1, 1]$) функций. Для этого рассмотрим множество D , векторы которого компонентно удовлетворяют условиям монотонности

$$u_{j+1} - u_j \geq 0, j = \overline{1, 20}, \quad (11)$$

$$u_{j+1} - u_j \leq 0, j = \overline{21, 40}$$

и выпуклости

$$\frac{u_{j+1} - u_j}{h_j} - \frac{u_j - u_{j-1}}{h_{j-1}} \leq 0, j = \overline{2, 40}, \quad (12)$$

и задачу нахождения нормального решения системы (9), записанную в эквивалентной форме:

$$\varphi(u) = \|\mathbf{u}\|_1 = u_1 + u_2 + \dots + u_{41} \rightarrow \inf, \mathbf{u} \in \tilde{U}_D,$$

где $\tilde{U}_D = \tilde{U}_+ \cap D, \tilde{U}_+ = \{\mathbf{u} \in \mathbf{R}_+^{41} : \tilde{A}\mathbf{u} \leq \tilde{f}, -\tilde{A}\mathbf{u} \leq -\tilde{f}\}$, или в виде

$$\varphi(u) = \|\mathbf{u}\|_1 = u_1 + u_2 + \dots + u_{41} \rightarrow \inf, \mathbf{u} \in \tilde{U}_D, \quad (13)$$

где

$$\tilde{\mathbf{U}}_D = \{\mathbf{u} \in \mathbf{R}_+^{41} : \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} \leq \tilde{\mathbf{d}}\}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} \\ -\tilde{\mathbf{A}} \\ \mathbf{F} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{161 \times 41}, \tilde{\mathbf{d}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}} \\ -\tilde{\mathbf{f}} \\ \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{161}, \quad (14)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \dots & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \dots & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{40 \times 41},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{39 \times 41}.$$

Матрицы \mathbf{F} и \mathbf{L} – матрицы неравенств условий монотонности (11) и выпуклости (12), соответственно. Естественно считать их известными точно. Таким образом, мы находимся в условиях задачи линейного программирования (1) с приближёнными матрицей $\tilde{\mathbf{B}}$ и вектором $\tilde{\mathbf{d}}$, имеющими специальную структуру (14).

Переходим к описанию метода поточечной невязки аналогично (6) для задачи (13). Пусть

$$\bar{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta \\ \Delta^T \\ \mathbf{O}_1 \\ \mathbf{O}_2 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{161 \times 41}, \bar{\delta} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_4 \\ \mathbf{O}_5 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{161},$$

где элементы Δ_{ij} матрицы Δ и компоненты δ_i вектора δ определяются следующим образом: $\Delta_{ij} = |\xi_{ij}| \cdot 10^{-k}$, $\delta_i = |\eta_i| \cdot 10^{-k}$, где ξ_{ij} и η_i , $i = \overline{1, 41}$, $j = \overline{1, 41}$ – равномерно распределенные случайные числа на отрезке $[-1; 1]$, полученные с помощью стандартной программы «RandomTools(uniform)» в среде Maple2015, $k = \overline{1, 6}$, \mathbf{O}_1 – это нулевая матрица порядка 40×41 (правая часть ограничений – неравенства условий монотонности (11)), \mathbf{O}_2 – нулевая матрица порядка 39×41 (правая часть ограничений – неравенств условий выпуклости (12)), \mathbf{O}_3 , \mathbf{O}_4 и \mathbf{O}_5 – векторы с нулевыми компонентами размерности 41, 40 и 39, соответственно. Тогда множество $\mathbf{W}(\sigma)$ для задачи (13) с учётом точно заданных матриц \mathbf{F} и \mathbf{L} и вектора $c = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \in \mathbf{R}_+^{41}$ выглядит следующим образом:

$$\bar{\mathbf{W}}(\sigma) = \{\mathbf{w} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}] \in \mathbf{R}_+^{202} : \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} - \mathbf{d} \leq \bar{\Delta}\mathbf{u} + \bar{\delta}, -\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{v} - \mathbf{c} \leq \bar{\Delta}^T \mathbf{v}, \langle \mathbf{c}, \mathbf{u} \rangle + \langle \tilde{\mathbf{d}}, \mathbf{v} \rangle \leq \langle \bar{\delta}, \mathbf{v} \rangle\}.$$

Таким образом, метод поточечной невязки для решения задачи линейного программирования (13) и двойственной к ней задачи приводит к задаче линейного программирования

$$\mathbf{f}(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|_1 = w_1 + w_2 + \dots + w_{202} \rightarrow \inf, \mathbf{w} \in \overline{\mathbf{W}}(\delta). \quad (15)$$

Заметим, что в данном случае нас не интересует двойственное решение $\mathbf{w} = [w_{42} + w_{43} + \dots + w_{202}]^T$, поскольку наша цель:

1) посмотреть, как ведет себя метод поточечной невязки для решения прямой и двойственной задачи линейного программирования для «сильно» неустойчивых задач большой размерности;

2) получить приемлемые приближённые решения для функции $u(s) = 1 - s^2$, являющейся решением интегрального уравнения (8).

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метод поточечной невязки для решения интегрального уравнения Фредгольма I рода на классе неотрицательных, монотонных и выпуклых функций

Погрешность, невязка	k					
	1	2	3	4	5	6
$\ \tilde{u} - \bar{u}\ _1$	14,6	4,12	1,356	1,1118	1,07908	0,534178
$\ \tilde{A}\tilde{u} - \tilde{f}\ _1$	5,7	1,52	0,214	0,0251	0,00223	$4,84 \cdot 10^{-4}$

Далее на рис. 2 представлены графики точного решения интегрального уравнения Фредгольма I рода и приближённых решений на классе неотрицательных, монотонных и выпуклых функций, полученных методом поточечной невязки для прямой и двойственной неустойчивой задачи линейного программирования.

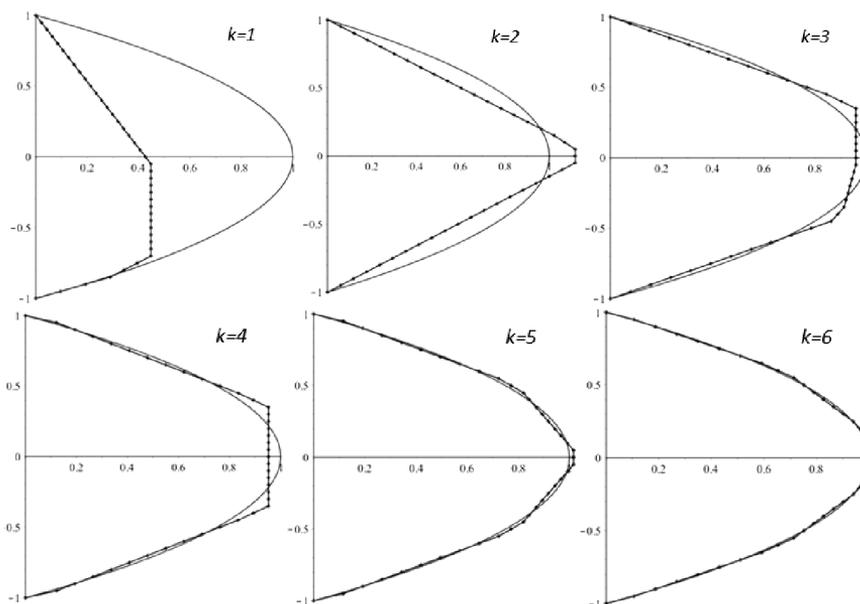


Рис. 2. Точное решение $u(s) = 1 - s^2$ (непрерывная кривая); приближённое решение при $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (пунктирная кривая)

Как видно из табл. 2 и рис. 2, приближённые решения, полученные методом поточечной невязки (6) для задачи (13), сходятся к точному решению $u(s) = 1 - s^2$ интегрального уравнения (8) при увеличении знака k . При этом невязка $\|\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{f}}\|_1$ уменьшается с большей скоростью (при $k = 6$ имеем $\|\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{f}}\|_1 = 4,84 \cdot 10^{-4}$), чем погрешность $\|\tilde{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}\|_1$ (при $k = 6$ – $\|\tilde{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}\|_1 = 0,534178$). Последнее, по-видимому, объясняется тем, что в оценке погрешности (7) константа $M = M_k$ (для каждого k своё значение M_k) принимает большое значение и она «гасит» значение выражения в фигурных скобках, которое имеет порядок $O(0,5 \cdot 10^{-k})$.

Литература

1. Агаян Г.М. О задаче линейного программирования с поэлементным заданием погрешностей в исходных данных // Доклады АН СССР. 1986. Т. 221, № 2. С. 256–269.
2. Агаян Г.М., Рютин А.А., Тихонов А.Н. О задаче линейного программирования с приближенными данными // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1984. Т. 24, № 3. С. 1303–1311.
3. Васильев Ф.П., Иваницкий А.Ю., Морозов В.А. Метод поточечной невязки для некоторых задач линейной алгебры и линейного программирования // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1998. Т. 38, № 7. С. 1140–1152.
4. Иваницкий А.Ю., Карасева Ж.К. Об одном методе регуляризации прямой и двойственной задачи линейного программирования с приближенными данными // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 141–148.
5. Иваницкий А.Ю., Урусов А.М. Численный анализ метода поточечной невязки // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 127–144.
6. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач. М.: URSS, 2009. 326 с.
7. Морозов В.А. Об устойчивых численных методах решения совместных систем линейных алгебраических уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1984. Т. 24, № 2. С. 179–186.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 284 с.
9. Vasilyev F.P., Ivanitskiy A.Yu. In-depth analysis of linear programming. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2001, 312 p.
10. Oettli W., Prager W. Compatibility of approximate solution of linear equation with given error bounds for coefficients and right-hand sides. *Numerische Mathematik*, 1964, no. 6, pp. 405–409.

ИВАНИЦКИЙ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ – кандидат физико-математических наук, профессор, декан факультета прикладной математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ivanitskiy@hotmail.com).

УРУСОВ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ – магистрант кафедры прикладной математики и информатики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (imurusov@mail.ru).

A. IVANITSKIY, A. URUSOV

NUMERICAL ANALYSES OF POINTWISE RESIDUAL METHOD TO SOLVE MAIN AND DUAL ILL-POSED LINEAR PROGRAMMING PROBLEMS WITH APPROXIMATE DATA

Key words: ill-posed problems, direct and dual problem of linear programming, ill-posed technical and engineering problems, convergence, inaccuracy estimation.

The paper proposes the numerical analyses of pointwise residual method to solve direct and dual problems of linear programming with approximate data. 'Highly' ill-posed linear algebraic equation system with high condition number which is obtained by discretization of Fredholm integral equation of the first kind is observed in the article as a model problem. Numerical analyses of convergence of pointwise residual method for such problems is shown in the paper. The proposed method can be used to solve ill-posed technical and engineering problem.

References

1. Agayan G.M., *O zadache lineinogo programmirovaniya s poelementnym zadaniem pogreshnostey v ishodnyh dannyh* [About linear programming problems with elementwise setting of errors in initial data]. *Doklady AN SSSR* [Reports of USSR Academy of Science], 1986, vol. 221, no. 2, pp. 256–269.
2. Agayan G.M., Ryutin A.A., Tihonov A.N. *O zadache lineinogo programmirovaniya s priblizhennymi dannymi* [About linear programming problems with approximate data]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1984, vol. 24, no 3, pp. 1303–1311.
3. Vasil'ev F.P., Ivanitskiy A.Yu., Morozov V.A. *Metod potochechnoi nevyazki dlya nekotorykh zadach lineinoi algebrы i lineinogo programmirovaniya* [Pointwise Residual Method for Solving Some Problems of Linear Algebra and Linear Programming]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1998, vol. 38, no. 7, pp. 1140–1152.
4. Ivanitskiy A.Yu., Karaseva Zh.K. *Ob odnom metode regularizatsii pryamoy I dvoistvennoy zadachi lineinogo programmirovaniya s priblizhennymi dannymi* [One of regularization method of direct and dual problems of linear programming with approximate data]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 141–148.
5. Ivanitskiy A.Yu., Urusov A.M. *Chislennyy analiz metoda potochechnoy nevyazki* [Numerical analysis of pointwise residual method]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 127–144.
6. Leonov A.S. *Reshenie nekorrektno postavlennykh obratnykh zadach* [Solving Ill-Posed inverse problems]. Moscow, URSS Publ., 2009, 326 p.
7. Morozov V.A. *Ob ustoychivyyh chislennykh metodah resheniya sovmestnykh system lineynykh algebraicheskikh uravneniy* [About stable numerical methods for solving of joint systems of linear equations]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1984, vol. 24, no. 2, pp. 179–186.
8. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 284 p.
9. Vasilyev F.P., Ivanitskiy A.Yu. *In-depth analysis of linear programming*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2001, 312 p.
10. Oettli W., Prager W. Compatibility of approximate solution of linear equation with given error bounds for coefficients and right-hand sides. *Numerische Mathematik*, 1964, no. 6, pp. 405–409..

IVANITSKIY ALEXANDER – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Dean of the faculty of Applied Mathematics, Physics and Information Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ivanitskiy@hotmail.com).

URUSOV ANDREY – Master's Program Student of Department of Applied Mathematics and Informatics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (imurusov@mail.ru).

Ссылка на статью: Иванцкиий А.Ю., Урусов А.М. Численный анализ метода поточечной невязки для решения прямой и двойственной неустойчивой задачи линейного программирования с приближенными данными // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 108–116.

УДК 007.51
ББК 32.973.202

А.Г. КОРОБЕЙНИКОВ, А.Ю. ГРИШЕНЦЕВ, Д.И. ДИКИЙ,
В.Д. АРТЕМЬЕВА, И.Г. СИДОРКИНА

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СИСТЕМЕ «ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ»

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), интероперабельность, протокол, межмашинное взаимодействие (M2M), криптография, математическая модель, модель безопасности, потоки данных, беспроводные сенсорные сети, исполнительные устройства, шлюзы.

Прогнозируется, что к 2020 г. число устройств, интегрированных в среду «Интернет вещей», превысит один миллиард. Наряду с интенсивным распространением по всему миру и широким применением этой технологии во многих отраслях производства и жизнеобеспечения остро встает вопрос о безопасности не только рядовых пользователей этой технологии, но и критически важной информации, циркулирующей при межмашинном взаимодействии. Целью работы было определение наиболее удобной формы структурирования аспектов безопасности применительно к среде «Интернет вещей». В статье рассмотрены вопросы безопасности, характерные угрозы среды «Интернет вещей». Так был произведен обзор работ различных исследователей, предлагающих тот или иной подход к формированию структурированной формы определения безопасности. На данный момент нет единой системы критериев, определяющих состояние безопасности в среде «Интернет вещей». На основе рассмотренных моделей авторами предлагается собственная трехуровневая структура безопасности, включающая также свойства «fog» слоя в архитектуре среды «Интернет вещей»: исполнительные и сенсорные устройства, шлюзы и сеть Интернет, приложения и облачные сервисы. Описаны основные методы повышения безопасности для всех трех слоев, а также приведена математическая модель, с помощью которой можно сделать качественную и количественную оценку безопасности.

В настоящее время происходит новый виток технического развития цивилизации, который заключается в переходе к автоматизации не только процессов на производственных предприятиях, но и процессов, протекающих в повседневной жизни каждого человека. Идея состоит в использовании большого числа небольших маломощных с вычислительной и энергетической точки зрения устройств для выполнения однотипных простых задач. Такая технология заложена в основе «Умного дома» и «Умного города» и обобщенно называется «Интернет вещей» (IoT) [28]. Сходные технологии используются в распределённых геоинформационных системах [3, 4]. При этом управление этими устройствами осуществляется с помощью компьютера или смарт-устройства, а в случае межмашинного взаимодействия (M2M) – и вообще без участия человека [22].

Наряду со всеми преимуществами и возможностями новых технологий производители компонентов системы «Интернет вещей» не уделяют должного внимания проблемам информационной безопасности, которые возникают при повседневном использовании как отдельных компонентов системы, так и целого аппаратно-программного комплекса. Основная причина отказа произ-

водителей внедрять компоненты безопасности – это большие вычислительные затраты, а следовательно, большой расход электрической энергии, что имеет критическую важность для аппаратуры, работающей от автономного источника питания, например от аккумуляторных батарей. К тому же это приводит к удорожанию системы «Интернет вещей».

С выходом на рынок большого количества производителей оконечного, коммуникационного и управляющего оборудования встал вопрос об интероперабельности компонентов сложной структуры, а также о возможности их работы без угрозы возникновения несанкционированного доступа, утечки или раскрытия информации, циркулирующей в системе.

Исходя из всего вышеизложенного далее будут рассматриваться основные угрозы, свойственные системам «Интернет вещей».

Проблемами безопасности среды «Интернет вещей» в настоящее время занимаются многие исследователи по всему миру. Это связано прежде всего с большим кругом проблем, возникающих при эксплуатации устройств «Интернета вещей».

В научной литературе представлено множество вариантов классификации угроз для среды «Интернет вещей». Как правило, такие работы основаны на архитектуре безопасности среды «Интернет вещей» в целом с подчеркиванием угроз, характерных для тех или иных звеньев. Поэтому авторы предлагают собственные модели, учитывающие все аспекты безопасности для рассматриваемой технологии. Так, в работе [16] элементы безопасности распределены на четыре большие группы, а именно: идентификация, агрегация данных, принятие решений, объединение элементов в единую систему.

К идентификации относится, как правило, применение RFID датчиков и считывателей с целью однозначно идентифицировать устройство в сети, а также определить его местоположение [11, 25]. Стоит отметить, что так как «Интернет вещей» работает в режиме ограниченного использования электроэнергии, применение RFID технологии удовлетворяет всем требованиям этой парадигмы.

Под агрегацией данных понимается способность собирать огромные объемы информации от сенсоров и исполнительных устройств, в том числе RFID датчиков, и передавать их в необходимом формате, например в формате JSON или XML, на WEB-сервис или иное устройство, обладающее необходимыми вычислительными мощностями.

К фазе принятия решений относится выделение из всего объема данных, собранных от датчиков, только тех, которые носят наиболее информативный характер. На основе отобранных сведений в случае межмашинного взаимодействия принимается то или иное решение и выполняется действие. В случае с взаимодействием человек – машина пользователю предлагается выбрать одно из предложенных действий. Данный этап должен быть вычислительно быстрым и обеспечивать незамедлительное воздействие на исполнительные устройства и сенсоры.

Объединение элементов в единую систему определяет следующий уровень этапа принятия решений, где должное внимание уделяется интероперабельности, взаимодействию устройств различных производителей, протоколов передачи, обработки и хранения данных и др.

В работе [19] была предложена развернутая система классификации процессов в среде «Интернет вещей». Так, архитектура безопасности среды рассматривается как три измерения: службы безопасности, сетевой слой и домен безопасности. Причем первое измерение включает в себя: аутентификацию, управление доступом, конфиденциальность, целостность, доступность и др. Второе измерение, состоящее из физического слоя, сетевого слоя, пользовательского слоя и слоя управления, соотносится со слоями сетевой модели OSI. Третье измерение включает в себя четыре подраздела, которые характеризуют принцип работы среды «Интернета вещей». Первый подраздел – это домен исполнительных и сенсорных устройств. Он отвечает за требования к надежности, специфику эксплуатации и др. Второй подраздел – домен доступа, в задачи которого входит определение правомерности доступа к системе не только пользователя, но и устройств между собой. Третий – сетевой домен определяет условия доступа к узлам сети, маршрутизацию информационного трафика и т.п. Последний домен приложений отвечает за безопасность информации, циркулирующей внутри среды программного обеспечения. Здесь большее внимание уделяется ошибкам в проектировании и программировании, а также особенностям работы с критически важной или персональной информацией, например с информацией о состоянии здоровья пациента [21]. Обсуждаемая классификация представлена на рис. 1.

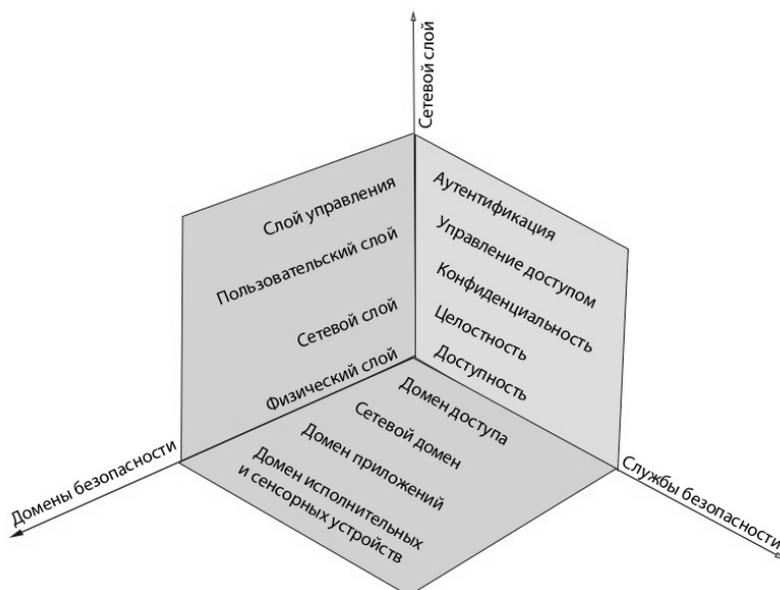


Рис. 1. Составляющие безопасности среды «Интернет вещей»
авторов Li H, Zhou X

В работе [20] предложено разбиение на восемь составляющих:

- 1) коммуникационное оборудование, отвечающее за передачу информации между устройствами;
- 2) датчики, собирающие и представляющие физические величины в цифровой форме;
- 3) исполнительные устройства, выполняющие действия по управляющему сигналу;
- 4) хранение, идентификация и локализация данных;
- 5) интерфейсы для взаимодействия человек – машина;
- 6) вычислительные устройства;
- 7) определение местоположения устройств как физических объектов;
- 8) идентификация физических устройств как уникальных объектов.

По данной методике каждому из перечисленных компонентов ставится в соответствие экспертная оценка по следующим параметрам: целостности, подлинности, конфиденциальности, секретности, доступности и регулированию. По данной методике оценивается состояние защищенности на основании принятых мер для конкретных компонентов среды «Интернет вещей» [20].

Альтернативная модель безопасности представлена в работе [17], в которой рассматриваются уровень исполнительных устройств, транспортный уровень и прикладной уровень. В работе проанализированы особенности и вопросы безопасности каждого уровня и введены соответствующие типичные решения характерных для них проблем. В ней дано сравнение характеристик различных разрешений путем анализа особенностей технологий, обсуждены вопросы безопасности среды «Интернет вещей» как неделимой сущности и представлены некоторые потенциальные направления развития общей архитектуры безопасности для всей системы «Интернет вещей», а также простые и эффективные решения для обеспечения безопасности данных большого объема. Структура модели представлена в таблице.

**Составляющие безопасности среды «Интернет вещей»
авторов Q. Jing, A.V. Vasilakos и др. [17]**

Уровень исполнительных устройств		Транспортный уровень			Прикладной уровень	
Безопасность устройств	Безопасность сети устройств	Доступ в сети	Сеть Интернет	Локальная сеть	Приложения «Интернет вещей»	Поддержка приложений
RFID устройства, беспроводные сенсорные устройства, GPS устройства		Wifi сети, Ad hoc сети	Мобильный интернет, Интернет	Безопасность локальной сети	Информационная логистика, интеллектуальная сетевая безопасность, мониторинг среды	Безопасность среды разработки, платформы облачных вычислений, промежуточные технологии безопасности

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на данный момент не существует единственно верного подхода к формализации безопасности среды «Интернет вещей». Тот или иной способ либо отражает общие аспекты, либо углубляется в частные случаи. Следует отметить, что с быстрым темпом развития рассматриваемой технологии видоизменяются также характерные угрозы, что приводит к неактуальности моделей.

Исходя из всего вышеизложенного и учитывая требования к безопасности информационных систем, можно заключить, что существует несколько подходов к определению угроз и математическому моделированию среды «Интернет вещей» [1, 2, 5–8]. На основе структур, рассмотренных выше, а также с учетом тенденций развития технологии «Интернет вещей» нами предложена архитектура безопасности (рис. 2), а также приведены методы повышения защищенности объектов на том или ином уровне в зависимости от специфики устройств и их интероперабельности. Основным отличием предлагаемой модели является наличие промежуточного слоя шлюзов, или «fog» слоя, который выполняет несколько задач безопасности: расширяют облачные вычисления до края сети, предоставляя новые приложения и сервисы среды «Интернет вещей», которые могут включать обработку критически важных данных, требующих конфиденциальности и безопасности без передачи их облачным сервисам. В «fog» слое выделяют три элемента: шлюзы, которые собирают данные от исполнительных и сенсорных устройств, «fog» шлюзы, которые обмениваются информацией между собой, и шлюзы среды «Интернет вещей», которые обмениваются сообщениями с облаком. Применение дополнительного слоя позволяет избежать передачи конфиденциальной информации по общедоступным сетям, если это не противоречит функционированию системы. Можно организовать также систему проверки достоверности данных, получаемых от исполнительных и сенсорных устройств, и решить задачу «узкого» места, когда один шлюз не справляется с вычислительной и пропускной нагрузками.

Согласно рис. 2 под унификацией кодирования понимается разработка единого для всех устройств протокола кодирования информации. Это в первую очередь касается RFID технологии, где используется европейский и японский стандарты. Коды коррекции помогают избежать коллизий, возникающих при одновременном считывании информации с множества беспроводных устройств [15]. Разделение временного и физического пространства может также помочь избежать появления коллизий, связанных с наложением радиосигналов друг на друга. Защита конфиденциальности RFID и хранение в метках минимального количества компрометирующей информации предполагают тот факт, что данные могут быть считаны и скопированы злоумышленником. Это можно сделать несколькими путями, например, как показано в работе [26]. Открытое расположение устройств может способствовать получению сведений злоумышленником о развернутой системе. Поэтому не стоит забывать о скрытии демаскирующих признаков. Протоколы аутентификации устройств, как правило, реализованы в виде парольной схемы. Многие производители используют стандартные пароли для доступа к устройствам, и пользователи зачастую их не изменяют, что приводит к потере управления над устройством [9]. Ввиду того, что большинство устройств среды «Интернет вещей» ограничены в вычислительных возможностях, а

все данные, передаваемые по беспроводным протоколам, должны шифроваться, здесь предполагается использование легковесных симметричных алгоритмов [12]. Так как шифрование симметрично, остро встает вопрос конфигурации, передачи, обновления ключей шифрования [27]. Протоколы безопасной маршрутизации, а также управления доверием между устройствами на данный момент строятся на использовании сертификатов подлинности, например X.509 и др. [23]. Унификация протокола передачи данных состоит из определения формата представления данных: XML, JSON или др.

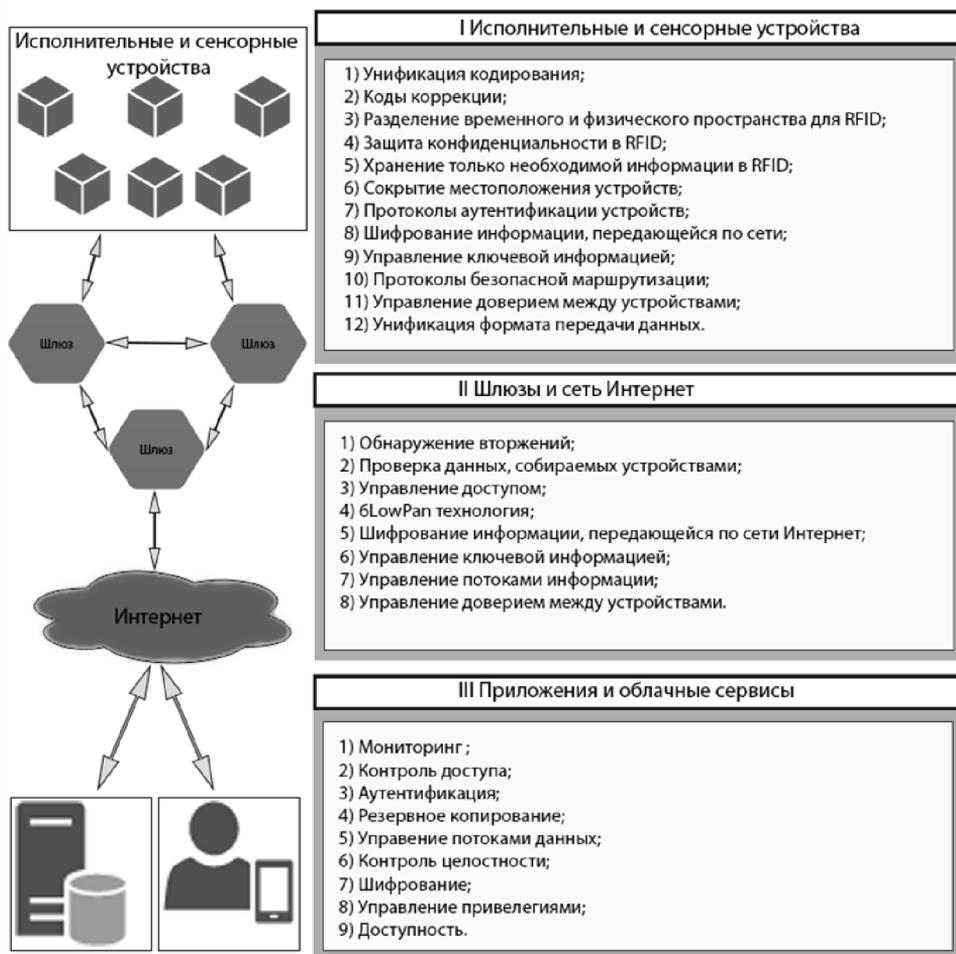


Рис. 2. Архитектура безопасности среды «Интернет вещей»

На следующем уровне можно выделить средства обнаружения вторжений, используемые с целью определения злонамеренных действий [10, 18]. Также отдельно выделен пункт о проверке информации от исполнительных и сенсорных устройств и сокращении ее объема [14]. Управление доступом на данном уровне включает возможность межмашинного взаимодействия, чтобы была исключена возможность перехвата устройством информации,

ему не предназначавшейся. Применение новой технологии 6LowPAN позволит внедрять устройства среды «Интернет вещей» в рамках существующей инфраструктуры [24]. Для шифрования информации, передающейся по сети Интернет, здесь используются протоколы с алгоритмами асимметричного шифрования, применяемые в сети Интернет. Управление ключевой информацией, потоками информации, доверием между устройствами осуществляется на основе принципов безопасности в сети Интернет.

На последнем уровне рассмотрены аспекты безопасности, связанные с web-сервисами и облачными вычислениями. Так как эти элементы не имеют явной специфики относительно среды «Интернет вещей», внимание на них акцентироваться не будет. Однако в последнее время появилась необходимость разработки безопасного протокола аутентификации пользователей с помощью web-сервиса. Как правило, авторы предлагают использовать двухфакторную аутентификацию с помощью смарт-карт или биометрических признаков человека [13].

Структуру безопасности среды «Интернет вещей» можно представить в виде следующей математической модели. Пусть имеется m исполнительных устройств X_m и n шлюзов G_n . Тогда можно описать связи исполнительных и сенсорных устройств между собой в виде матрицы C_x размером $m \times m$. Определим матрицу P_x размером $m \times p_x$, элементами которой являются количественные параметры безопасности взаимодействия каждого устройства с другим, приведенные к единой шкале, согласно первому уровню (рис. 2). Тогда произведение матриц будет характеризовать безопасность взаимодействия устройств в виде матрицы размером $m \times p_x$:

$$S_x = C_x \times P_x. \quad (1)$$

Затем описываем связи между устройствами и шлюзами в виде матрицы C_b размером $n \times m$. Определим матрицу P_b размером $m \times p_b$, элементами которой являются количественные параметры безопасности каждого устройства при взаимодействии со шлюзом, приведенные к единой шкале согласно первому уровню (рис. 2). Тогда произведение матриц будет характеризовать безопасность на границе шлюзов в виде матрицы размером $n \times p_b$:

$$D_b = C_b \times P_b. \quad (2)$$

Далее рассчитывается относительная оценка безопасности по формуле

$$V_1 = \frac{\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{p_x} s_{rk} + \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^{p_b} d_{rk}}{T_x + T_b}, \quad (3)$$

где V_1 – итоговая оценка безопасности первого уровня; T_x и T_b – максимально возможные оценки безопасности в матрицах S_x и D_b , соответственно; s_{rk} – элементы матрицы S_x ; d_{rk} – элементы матрицы D_b .

Ввиду того, что некоторые параметры безопасности изменяются с истечением времени, то рассчитывается оценка, зависящая от времени:

$$V_1(t) = \frac{\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{p_x} s_{rk}(t) + \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^{p_b} d_{rk}(t)}{T_x + T_b}. \quad (4)$$

Это удобно при проектировании среды «Интернет вещей» и определении текущего состояния безопасности.

Для второго уровня оценить уровень безопасности можно путем учета взаимосвязей шлюзов G_n в виде матрицы C_g размером $n \times n$ и характеристик безопасности в виде матрицы P_g размером $n \times p_g$. Затем вычисляется их произведение в виде матрицы S_g , количественно описывающей состояние безопасности взаимодействия шлюзов между собой.

Для оценки защищенности с выходом информации в сеть Интернет составляется матрица C_v , описывающая связь шлюзов с сетью Интернет, и матрица P_v , элементами которой являются параметры безопасности второго уровня. Применяя операции по формулам (1)-(4), получаем матрицы S_g , D_v и оценку V_2 (5). Аналогично для третьего уровня рассчитывается оценка V_3 (6) для облачных сервисов, абонентских устройств и выхода в сеть Интернет:

$$V_2 = \frac{\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{p_x} s_{rk} + \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^{p_b} d_{rk}}{T_g + T_v}; \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{p_x} s_{rk} + \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^{p_b} d_{rk}}{T_f + T_z}. \quad (6)$$

Имея все три матрицы и относительные оценки, можно сделать количественную и качественную оценку состояния безопасности всей системы. Причем добавление, изменение или удаление устройств и связей, а также параметров безопасности производится добавлением, изменением, удалением строк и столбцов соответствующих матриц.

Выводы. В данной работе выполнен анализ архитектуры и предложен метод оценки безопасности среды «Интернет вещей». Благодаря декомпозиции среды «Интернет вещей» на три архитектурных компонента, а именно: уровень исполнительных и сенсорных устройств, уровень шлюзов и сети Интернет, уровень приложений и облачных сервисов – стало возможным произвести анализ и численную оценку комплексных параметров безопасности каждого уровня. Так для первого уровня свойственны двенадцать методов повышения безопасности. Они характерны, в основном, конкретно для среды «Интернет вещей» и имеют свои особенности. Здесь важную роль играет совместимость устройств различных производителей. На втором уровне предлагается использовать не единый шлюз, а несколько шлюзов. Тем самым формируется «fog» слой, обеспечивающий межкомпонентную устойчивость информационного обмена, позволяющий обрабатывать небольшие объемы информации внутри компонентного уровня без передачи критически важной информации на облачные сервисы. На третьем архитектурном уровне предложенной модели декомпозиции среды «Интернет вещей» аспекты безопасности схожи с множеством других систем, использующих web-инфраструктуру, и не требуют дополнительного анализа.

Полученная декомпозиционная модель безопасности среды «Интернет вещей» достаточно универсальна и может быть масштабирована на различные объекты соответствующего кластера информационных технологий. Бла-

годаря относительно небольшой вычислительной сложности предлагаемой модели оценки безопасности она может быть реализована на вычислительных средствах с ограниченным вычислительным ресурсом (характерным для компонентов среды «Интернет вещей») и в масштабе реального времени производить численную оценку параметров безопасности, что может быть актуально, например, при аутентификации или подключении новых устройств к среде «Интернет вещей» и задействовании протоколов информационного обмена различного уровня защищённости, а значит, при необходимости выбора наиболее безопасных маршрутов передачи данных.

Литература

1. Гришенцев А.Ю., Гурьянов А.В., Кузнецова О.В., Шукалов А.В., Коробейников А.Г. Математическое обеспечение в системах автоматизированного проектирования. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 88 с.
2. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Постановка задачи оптимизации распределённых вычислительных систем // Программные системы и вычислительные методы. 2013. № 4. С. 370–375.
3. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Проектирование и технологическая подготовка сетей станций вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 61–66.
4. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Средства интероперабельности в распределённых геоинформационных системах // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 19.
5. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю. Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 100 с.
6. Коробейников А.Г. Проектирование и исследование математических моделей в средах MATLAB и Maple. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012. 160 с.
7. Коробейников А.Г. Разработка и анализ математических моделей с использованием MATLAB и Maple. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 144 с.
8. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Кутузов И.М., Пирожникова О.И., Соколов К.О., Литвинов Д.Ю. Разработка математической и имитационной моделей для расчета оценки защищенности объекта информатизации от несанкционированного физического проникновения // NB: Кибернетика и программирование. 2014. № 5. С. 14–25.
9. Проблема «admin:password»: стандартные пароли помогли создать ботнет из почти 400 000 IoT-устройств [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/company/pt/blog/311754/> (дата обращения: 30.10.2017).
10. Смирнов В.И., Сидоркина И.Г. Методика анализа технических средств разведки с использованием физических эффектов // Вестник Чувашского университета. 2017. № 3. С. 273–281.
11. Сокольников А.М., Сидоркина И.Г. Способ реализации централизованной grid-системы, ускоряющий горизонтальное увеличение вычислительной мощности // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 285–291.
12. Batra I., Luhach A.K., Pathak N. Research and analysis of lightweight cryptographic solutions for internet of things. Proc. 2nd Int. Conf. on Information and Communication Technology for Competitive Strategies, ICTCS, 2016, vol. (04-05).
13. Dhillon P. K., Kalra S. A lightweight biometrics based remote user authentication scheme for IoT services. *Journal of Information Security and Applications*, 2017, vol. 34, pp. 255–270.
14. Dias G.M., Bellalta B., Oechsner S. The impact of dual prediction schemes on the reduction of the number of transmissions in sensor networks. *Computer Communications*, 2017, vol. 112, pp. 58–72.
15. Finkenzeller K. RFID handbook fundamentals and applications in contactless smart cards and identification West Sussex. Wiley, 2003.
16. Gigli M., Koo S. Internet of things: services and applications categorization. *Adv Internet Things*, 2011, no. 1(02), pp. 27–41.
17. Jing Q., Vasilakos A. V., Wan J., Lu J., Qiu D. Security of the internet of things: Perspectives and challenges. *Wireless Networks*, 2014, no. 20(8), pp. 2481–2501.
18. Kotenko I., Saenko I., Skorik F., Bushuev S. Neural network approach to forecast the state of the Internet of Things elements. Proc. of XVIII Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg, 2015, pp. 133–135.

19. Li H., Zhou X. Study on security architecture for Internet of Things. In: Applied informatics and communication. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 404–411.
20. Mayer C.P. Security and privacy challenges in the internet of things. *Electron Commun EASST*, 2009, no. 17, pp. 1–12.
21. McMahon E., Williams R., El M., Samtani S., Patton M., Chen H. Assessing medical device vulnerabilities on the internet of things. In: Paper presented at the 2017 IEEE Int. Conf. on Intelligence and Security Informatics: Security and Big Data, ISI, 2017, pp. 176–178.
22. Nikolov A., Pencheva E., Atanasov I., Nikolova K. A case of service interaction in M2M device management. In: Paper presented at the 2016 8th IFIP Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security, NTMS, 2016.
23. Park C.-S. A Secure and Efficient ECQV Implicit Certificate Issuance Protocol for the Internet of Things Applications. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, pp. 2215–2223.
24. Rghioui A., Abdmeziem R., Bouchkaren S., Bouhorma M. Symmetric cryptography keys management for 6lowpan networks. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, vol. 73(3), pp. 336–345.
25. Seol S., Lee E., Kim W. Indoor mobile object tracking using RFID. *Future Generation Computer Systems*, 2017, no. 76, pp. 443–451.
26. Spiekermann S., Berthold O. Maintaining privacy in RFID enabled environments. Privacy, security and trust within the context of pervasive computing. In: Robinson P., Vogt H., Wagealla W., eds. Privacy, Security and Trust within the Context of Pervasive Computing. The International Series in Engineering and Computer Science. Springer, Boston, MA, 2005, vol 780.
27. Wang Y., Attebury G., Ramamurthy B. A survey of security issues in wireless sensor networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2006, vol. 8(2), pp. 2–23.
28. Wu Q., Ding G., Xu Y., Feng S., Du Z., Wang J., Long, K. Cognitive internet of things: A new paradigm beyond connection. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, no. 1(2), pp. 129–143.

КОРОБЕЙНИКОВ АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (korobeynikov_a_g@mail.ru).

ГРИШЕНЦЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (grishentcev@yandex.ru).

ДИКИЙ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ – аспирант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (dimandikiy@mail.ru).

АРТЕМЬЕВА ВИКТОРИЯ ДЕНИСОВНА – студентка IV курса, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия, Калининград (Vika_med2019@mail.ru).

СИДОРКИНА ИРИНА ГЕННАДЬЕВНА – доктор технических наук, декан факультета информатики и вычислительной техники, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола (igs592000@mail.ru).

**A. KORUBEYNIKOV, A. GRISHENTSEV, D. DIKII,
V. ARTEMYEVA, I. SIDORKINA**

INFORMATION SECURITY IN THE SYSTEM «INTERNET OF THINGS»

Key words: *Internet of things (IoT), interoperability, protocol, machine to machine interaction (M2M), cryptography, mathematical model, security model, data streams, wireless sensor networks, end devices, gateways.*

It is predicted, that by 2020 the number of devices integrated in the environment of the Internet of things will exceed one billion. Along with the intense spread of this technology all over the world and wide use in many industries and livelihoods, there occurs a question about the safety of not only ordinary users, but also critical information circulating

in machine-to-machine interaction. The aim of the work was to determine the most convenient form of structuring security aspects related to the environment. The article discusses the security issues, typical environment threatens "Internet of things". It contains a survey of works by various authors, offering a particular approach to the formation of the structured form to define security. Now there is no single system of criteria that determines the security status in the field of Internet of things. On the basis of the discussed models, the authors propose their own three-layer security structure that includes the same properties of the «fog» layer in the environment architecture of the Internet of things: perceptions, gateways and the Internet, applications and cloud services. The authors describe the basic methods to increase safety for all three layers and the mathematical model. It can help to make qualitative and quantitative safety assessment.

References

1. Grishentsev A.Yu., Gur'yanov A.V., Kuznetsova O.V., Shukalov A.V., Korobeinikov A.G. *Matematicheskoe obespechenie v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Mathematical Support in Computer Aided Design Systems]. St. Petersburg, University ITMO Publ., 2017, 88 p.
2. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G. *Postanovka zadachi optimizatsii raspredelennykh vychislitel'nykh sistem* [Problem definition for optimization of distributed computing systems]. *Programmye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2013, no. 4, pp. 370–375.
3. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G. *Proektirovanie i tekhnologicheskaya podgotovka setei stantsii vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery* [Design and engineering background for station networks of vertical ionosphere sounding]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 3(85), pp. 61–66.
4. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G. *Sredstva interoperabel'nosti v raspredelennykh geoinformatsionnykh sistemakh* [Interoperability tools in distributed geoinformation systems]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2015, no. 3, p. 19.
5. Korobeinikov A.G., Grishentsev A.Yu. *Razrabotka i issledovanie mnogomernykh matematicheskikh modelei s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoi algebry* [Development and research of multidimensional mathematical models using computer algebra systems]. St. Petersburg, University ITMO Publ., 2014, 100 p.
6. Korobeinikov A.G. *Proektirovanie i issledovanie matematicheskikh modelei v sredakh MATLAB i Maple* [Designing and researching mathematical models in MATLAB and Maple environments]. St. Petersburg, University ITMO Publ., 2012, 160 p.
7. Korobeinikov A.G. *Razrabotka i analiz matematicheskikh modelei s ispol'zovaniem MATLAB i Maple* [Development and analysis of mathematical models using MATLAB and Maple]. St. Petersburg, University ITMO Publ., 2010, 144 p.
8. Korobeinikov A.G., Grishentsev A.Yu., Kutuzov I.M., Pirozhnikova O.I., Sokolov K.O., Litvinov D.Yu. *Razrabotka matematicheskoi i imitatsionnoi modelei dlya rascheta otsenki za-shchishchennosti ob'ekta informatizatsii ot nesantsionirovannogo fizicheskogo proniknoveniya* [Developing of the mathematical and simulation models for calculation of an estimate of informatization object protection from unauthorized physical access]. *NB: Kibernetika i programirovanie*, 2014, no. 5, pp. 14–25.
9. *Problema «admin:passshchord»: standartnye paroli pomogli sozdat' botnet iz pocht 400 000 IoT-ustroystv* ["Admin: password" problem: standard passwords helped create a botnet from almost 400 000 IoT-devices]. Available at: <https://khabrakhabr.ru/tsompany/pt/blog/311754>.
10. Smirnov V.I., Sidorkina I.G. *Metodika analiza tekhnicheskikh sredstv razvedki s ispol'zovaniem fizicheskikh effektivov* [Methods of analyzing technical means of reconnaissance equipment using physical effects]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 273–281.
11. Sokol'nikov A.M., Sidorkina I.G. *Sposob realizatsii tsentralizovannoi grid-sistemy, uskoryayushchii gorizonta'noe uvelichenie vychislitel'noi moshchnosti* [Method of centralized grid-system implementation accelerating horizontal scaling of computing power]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 285–291.
12. Batra I., Luhach A.K., Pathak N. Research and analysis of lightweight cryptographic solutions for internet of things. Proc. 2nd Int. Conf. on Information and Communication Technology for Competitive Strategies, ICTCS, 2016, vol. (04-05).
13. Dhillon P.K., Kalra S. A lightweight biometrics based remote user authentication scheme for IoT services. *Journal of Information Security and Applications*, 2017, vol. 34, pp. 255–270.
14. Dias G.M., Bellalta B., Oechsner S. The impact of dual prediction schemes on the reduction of the number of transmissions in sensor networks. *Computer Communications*, 2017, vol. 112, pp. 58–72.

15. Finkenzeller K. RFID handbook fundamentals and applications in contactless smart cards and identification West Sussex. Wiley, 2003.
16. Gigli M., Koo S. Internet of things: services and applications categorization. *Adv Internet Things*, 2011, no. 1(02), pp. 27–41.
17. Jing Q., Vasilakos A.V., Wan J., Lu J., Qiu D. Security of the internet of things: Perspectives and challenges. *Wireless Networks*, 2014, no. 20(8), pp. 2481–2501.
18. Kotenko I., Saenko I., Skorik F., Bushuev S. Neural network approach to forecast the state of the Internet of Things elements. Proc. of XVIII Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg, 2015, pp. 133–135.
19. Li H., Zhou X. Study on security architecture for Internet of Things. In: Applied informatics and communication. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 404–411.
20. Mayer C.P. Security and privacy challenges in the internet of things. *Electron Commun EASST*, 2009, no. 17, pp. 1–12.
21. McMahon E., Williams R., El M., Samtani S., Patton M., Chen H. Assessing medical device vulnerabilities on the internet of things. In: Paper presented at the 2017 IEEE Int. Conf. on Intelligence and Security Informatics: Security and Big Data, ISI, 2017, pp. 176–178.
22. Nikolov A., Pencheva E., Atanasov I., Nikolova K. A case of service interaction in M2M device management. In: Paper presented at the 2016 8th IFIP Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security, NTMS, 2016.
23. Park C.-S. A Secure and Efficient ECQV Implicit Certificate Issuance Protocol for the Internet of Things Applications. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, pp. 2215–2223.
24. Rghioui A., Abdmeziem R., Bouchkaren S., Bouhorma M. Symmetric cryptography keys management for 6lowpan networks. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, vol. 73(3), pp. 336–345.
25. Seol S., Lee E., Kim W. Indoor mobile object tracking using RFID. *Future Generation Computer Systems*, 2017, no. 76, pp. 443–451.
26. Spiekermann S., Berthold O. Maintaining privacy in RFID enabled environments. Privacy, security and trust within the context of pervasive computing. In: Robinson P., Vogt H., Wagealla W., eds. Privacy, Security and Trust within the Context of Pervasive Computing. The International Series in Engineering and Computer Science. Springer, Boston, MA, 2005, vol 780.
27. Wang Y., Attebury G., Ramamurthy B. A survey of security issues in wireless sensor networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2006, vol. 8(2), pp. 2–23.
28. Wu Q., Ding G., Xu Y., Feng S., Du Z., Wang J., Long, K. Cognitive internet of things: A new paradigm beyond connection. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, no. 1(2), pp. 129–143.

KOROBAYNIKOV ANATOLIY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (Korobeynikov_a_g@mail.ru).

GRISHENTSEV ALEKSEY – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (Grishentsev@yandex.ru).

DIKII DMITRY – Post-Graduate Student, Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, Saint-Petersburg (dimandikiy@mail.ru).

ARTEMYEVA VICTORIYA – 4th year Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, Kaliningrad (Vika_med2019@mail.ru).

SIDORKINA IRINA – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Computer Science, Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola (igs522000@yandex.ru).

СЫЛКА НА СТАТЬЮ: Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Дикий Д.И., Артемьева В.Д., Сидоркина И.Г. Информационная безопасность в системе «Интернет вещей» // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 117–128.

УДК 004.942
ББК 22.18

А.Г. КОРОБЕЙНИКОВ, А.Ю. ГРИШЕНЦЕВ,
М.Е. ФЕДОСОВСКИЙ, А.Н. ЮГАНСОН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФЕКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ РАБОТЕ С СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ MAPLE*

Ключевые слова: Maple, дифференциальные уравнения, математическая модель, учебный процесс, эпидемия.

В настоящее время в РФ происходит интенсивное внедрение современных информационных технологий в образовательный процесс слушателей различных специальностей. В связи с этим задача обучения студентов работе с различным современным инструментарием является крайне актуальной. Одним из таких инструментов, доказавшим свою эффективность, является система символьной математики, или система компьютерной алгебры Maple. Повышение мотивации изучения методов компьютерного моделирования можно получить благодаря решению бытовых задач, с которыми слушателям приходится сталкиваться в повседневной жизни. Одна из таких задач – эпидемиологическое распространение вирусных инфекций. В работе рассмотрен подход к решению задачи компьютерного моделирования эпидемиологического процесса в связи с необходимостью наличия прогноза по распространению вирусной инфекции. Представлены примеры решения этой задачи при помощи использования системы Maple.

Задачу повышения мотивации применения слушателями различных специальностей современных информационных технологий можно решать при помощи различных подходов. Одним из самых эффективных является решение или моделирование задач, с которыми студенты встречаются в повседневной жизни. Одной из таких проблем является сохранение здоровья в период эпидемий, например, в период эпидемии гриппа.

В настоящее время задача создания и исследования математических моделей (ММ) эпидемиологических процессов является крайне актуальной. Это связано с необходимостью наличия прогноза распространения вирусных инфекций, из которого следует оценка не только состояния здоровья населения, но и состояния экономики неблагоприятного по эпидемиологической обстановке региона или даже страны.

Используя систему Maple, можно достаточно эффективно проводить процесс обучения разработки ММ в различных областях [1–10]. Немаловажным является и тот факт, что Maple считается одной из наиболее привлекательнейших систем компьютерной алгебры как по простоте языка программирования, функциональным возможностям, так и по стоимости.

Математическая модель развития эпидемиологического процесса. История разработок ММ взаимодействий вирусов и клеток является достаточной долгой. Базирующиеся на очень большом и разнообразном материале в области эпидемиологии ММ являются эффективным инструментом для анализа экспе-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 170700700.

риментальных данных, прогноза всевозможных последствий вирусной инфекции, выработки оптимальных стратегий проведения противовирусной терапии.

Исходя из вышесказанного задача оптимального управления иммунным ответом, где управление представляется динамической функцией, отражающей всевозможные воздействия на иммунный процесс, является актуальной.

В данной статье будет рассмотрена ММ, базирующаяся на фундаментальных механизмах иммунной защиты, сформулированных в клонально-селекционной теории Ф. Бернета. Первым такую ММ предложил советский ученый Г.И. Марчук [11].

При формировании ММ были учтены следующие положения иммунологии:

– даже небольшое количество вирусов, попадая в организм, начинают размножаться в клетках органа-мишени и поражают его;

– запуск процесса регенерации тканей органа-мишени происходит в случае наличия повреждения;

– для более адекватного описания кинетики иммунного ответа задача размножения лимфоцитов формулируется при помощи уравнения с запаздывающим аргументом;

– для описания повреждения органа-мишени вводится переменная $m = m(t)$. Эта функция влияет на ослабление жизнедеятельности организма. При таком формализме происходит превращение модели иммунного ответа в модель инфекционного заболевания;

– зависимость в виде обратной связи степени повреждения органа от силы иммунного ответа представляется функцией $\zeta(m)$.

Кроме того, учитывая представления о динамике иммунного ответа, введем следующие переменные непрерывные функции:

$V(t)$ – величина концентрации при размножении вирусов в пораженной части органа-мишени с размерностью част/мл (частица/миллилитр).

$C(t)$ – число плазматических клеток с размерностью клет/мл (клетка/миллилитр).

$F(t)$ – число антител в крови с размерностью част/мл.

Базовая ММ инфекционного заболевания построена на основе соотношений баланса для всех переменных [5].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV(t)}{dt} = \beta \cdot V(t) - \gamma F(t) \cdot V(t); \\ \frac{dC(t)}{dt} = \zeta(m) \cdot \alpha \cdot V(\tau - t) \cdot F(\tau - t) - \mu_C (C(t) - C^*); \\ \frac{dF(t)}{dt} = \rho \cdot C(t) - (\mu_f + \eta \cdot \gamma \cdot V(t)) \cdot F(t); \\ \frac{dm(t)}{dt} = \sigma \cdot V(t) - \mu_m \cdot m(t), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \mu_C, \rho, \mu_f, \sigma, \mu_m$ – константы скорости: размножения специфических лимфоцитов, продуцентов антител, размножения вируса, нейтрализации вируса антителами, естественного старения лимфоцитов, продукции антител

лимфоцитами, естественного разрушения антител, разрушения клеток органа-мишени вирусом, константа скорости регенерации органа-мишени, соответственно; η – константа расхода антител на нейтрализацию единицы вируса; C^* – гомеостатический уровень лимфоцитов, продуцентов специфических антител; V_0 – доза заражения; C_0 – концентрация специфических клеток памяти в момент заражения; τ – время, необходимое для распространения иммунных клеток (через это время появляется бесчисленная популяция плазматических клеток, производящие антитела, которые реагируют с вирусом).

Начальные условия: $V(0) = V_0$, $C(0) = C_0$, $F(0) = F_0$, $m(0) = m_0$ и фазовые ограничения: $V(t) \geq 0$, $C(t) \geq 0$, $F(t) \geq 0$, $m(t) \geq 0$.

Первое уравнение (1) показывает скорость изменения числа вирусов в организме. В правой части этого уравнения первый член отвечает за прирост количества вирусов за счет размножения, а второй – за их уменьшение за счет нейтрализации вирусов антителами.

Второе уравнение в (1) показывает скорость изменения в организме числа плазматических клеток. В правой части этого уравнения первый член отвечает за образование плазматических клеток, где τ – время (в сутках), в течение которого происходит формирование клона плазматических клеток. Второй член этого уравнения отвечает за поддержание в организме плазматических клеток за счет притока из костного мозга и естественного старения.

Третье уравнение в (1) отвечает за скорость изменения числа антител. В правой части этого уравнения первый член отвечает за появление антител плазматическими клетками, а второй – за расход антител на нейтрализацию вирусов, третий – за уменьшение количества антител за счет разрушения.

Четвертое уравнение в (1) описывает скорость изменения степени поражения органа-мишени. В правой части этого уравнения первый член отвечает за поражение органа вследствие действия вирусов, а второй – за уменьшение степени поражения органа-мишени за счет регенерации.

Моделирование развития эпидемиологического процесса. Используя средства Maple, покажем, как достаточно просто промоделировать, например, субклиническую форму заболевания при $\zeta(m) = 1 - m^2$ и различных τ : $\tau = 0$, $\tau = 10$ и $\tau = 100$. При субклинической форме постоянные параметры (1) имеют следующие значения:

$\alpha = 1000$, $\beta = 8$, $\gamma = 10$, $\rho = 0,17$, $\eta = 10$, $\sigma = 10$, $\mu_c = 0,5$, $\mu_f = 0,15$, $\mu_m = 0,15$, $C^* = CC = 1$.

Начальные условия имеют следующие значения:

$V_0 = 10^{-5}$, $C_0 = 1$, $F_0 = 1$, $m_0 = 0$.

Исходный текст на Maple может выглядеть следующим образом:

```
> restart
> local  $\xi, \gamma$ 
>  $\xi := m \rightarrow 1 - m^2$ :  $\xi(m) := \xi(m)$ :
> assume( $V(t) \geq 0$ ,  $F(t) \geq 0$ ,  $C(t) \geq 0$ ,  $m(t) \geq 0$ )
> my_vars := [ $V(t)$ ,  $F(t)$ ,  $C(t)$ ,  $m(t)$ ]:
> my_ode1 :=  $\frac{d}{dt} V(t) = (\beta - \gamma \cdot F(t)) \cdot V(t)$ :
```

```

> my_ode2 := d/dt C(t) = zeta(m(t)) * alpha * V(t - tau) * F(t - tau) - mu_c * (C(t) - CC):
> my_ode3 := d/dt F(t) = rho * C(t) - (mu_f + eta * gamma * V(t)) * F(t):
> my_ode4 := d/dt m(t) = sigma * V(t) - mu_m * m(t):
> my_sys_ode := seq(my_ode[i], i=1..4):

> V0 := 10^-5: C0 := 1: F0 := 1: m0 := 0: tau := 0:
> my_ini_cond := V(0) = V0, C(0) = C0, F(0) = F0, m(0) = m0:
> Субклиническая форма
> alpha := 1000: beta := 8: gamma := 10: rho := 0.17: eta := 10: sigma := 10:
> mu_c := 0.5: mu_f := 0.15: mu_m := 0.15: CC := 1:
> t0 := "tau=0": t10 := "tau=10": t100 := "tau=100":
> my_solve_0 := dsolve({my_sys_ode, my_ini_cond}, numeric, method = rosenbrock, my_vars):
> p0V := plots[odeplot](my_solve_0, [t, V(t)], 0..10, color = red, view = 0..1.1 * 10^-5,
numpoints = 1000, title = t0):
> p0F := plots[odeplot](my_solve_0, [t, F(t)], 0..50, color = red, view = 0.999..1.01, numpoints = 1000,
title = t0):
> p0C := plots[odeplot](my_solve_0, [t, C(t)], 0..35, color = red, view = 1..1.04, numpoints = 1000,
title = t0):
> p0m := plots[odeplot](my_solve_0, [t, m(t)], 0..50, color = red, view = 0..0.00005, numpoints = 1000,
title = t0):
> Изменение задержки
> tau := 10:
> my_solve_10 := dsolve({my_sys_ode, my_ini_cond}, numeric, method = rosenbrock, my_vars):
> p10V := plots[odeplot](my_solve_10, [t, V(t)], 0..10, color = red, view = 0..1.1 * 10^-5, numpoints = 1000,
title = t10):
> p10F := plots[odeplot](my_solve_10, [t, F(t)], 0..50, color = red, view = 0.999..1.16, numpoints = 1000,
title = t10):
> p10C := plots[odeplot](my_solve_10, [t, C(t)], 0..35, color = red, view = 1..1.2, numpoints = 1000,
title = t10):
> p10m := plots[odeplot](my_solve_10, [t, m(t)], 0..50, color = red, view = 0..0.000042, numpoints = 1000,
title = t10):
> Изменение задержки
> tau := 100:
> my_solve_100 := dsolve({my_sys_ode, my_ini_cond}, numeric, method = rosenbrock, my_vars):
> p100V := plots[odeplot](my_solve_100, [t, V(t)], 0..10, color = red, view = 0..1.1 * 10^-5, numpoints = 1000,
title = t100):
> p100F := plots[odeplot](my_solve_100, [t, F(t)], 0..50, color = red, view = 0.999..1.2, numpoints = 1000,
title = t100):
> p100C := plots[odeplot](my_solve_100, [t, C(t)], 0..35, color = red, view = 1..1.2, numpoints = 1000,
title = t100):
> p100m := plots[odeplot](my_solve_100, [t, m(t)], 0..50, color = red, view = 0..0.000042, numpoints = 1000,
title = t100):
> plots[display](array(1..3, [p0V, p10V, p100V]))
> plots[display](array(1..3, [p0F, p10F, p100F]))
> plots[display](array(1..3, [p0C, p10C, p100C]))
> plots[display](array(1..3, [p0m, p10m, p100m]))

```

На рис. 1. представлены результаты, которые будут получены после выполнения программы.

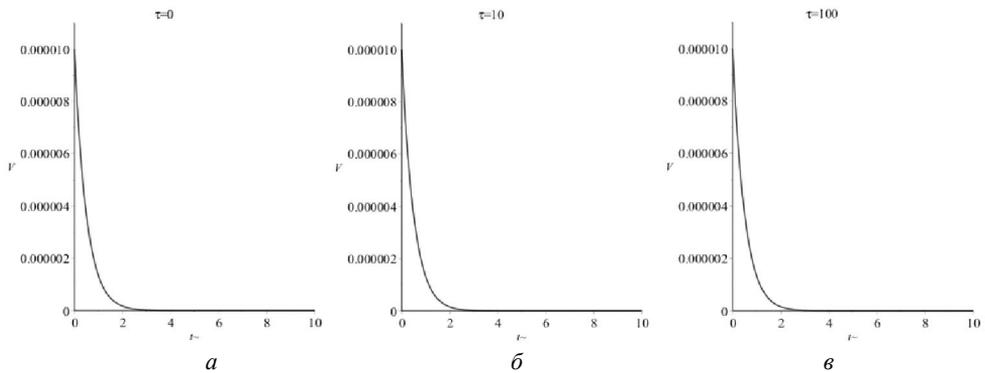


Рис. 1. Концентрация размножающихся вирусов $V(t)$ при разных τ :
 $a - \tau = 0$; $б - \tau = 10$; $в - \tau = 100$

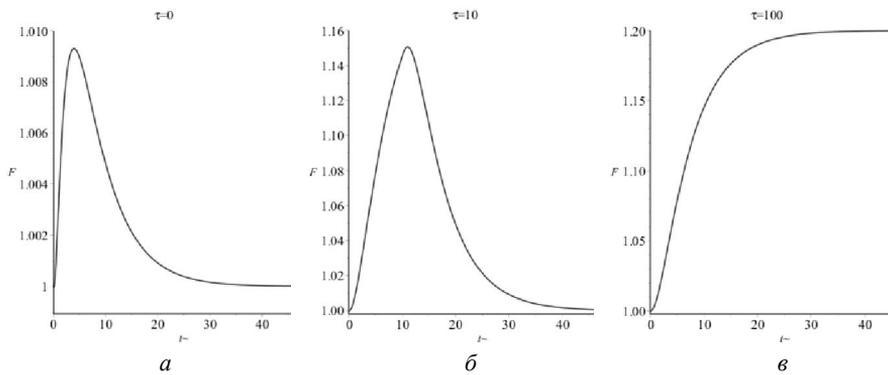


Рис. 2. Концентрация антител $F(t)$ при разных τ :
 $a - \tau = 0$; $б - \tau = 10$; $в - \tau = 100$

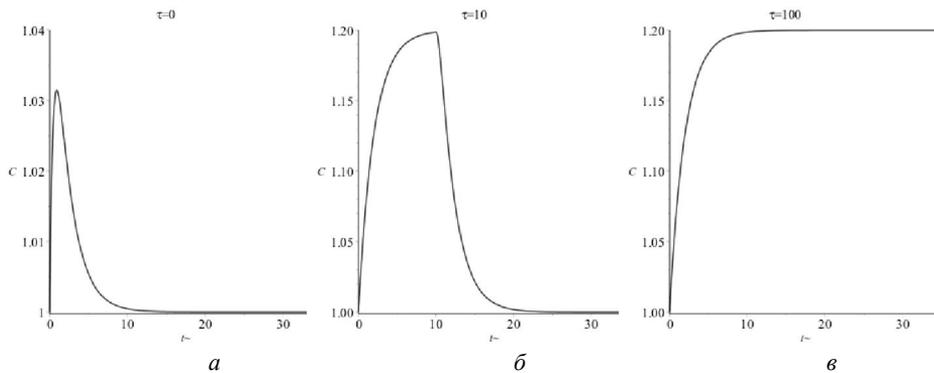


Рис. 3. Концентрация плазматических клеток $C(t)$ при разных τ :
 $a - \tau = 0$; $б - \tau = 10$; $в - \tau = 100$

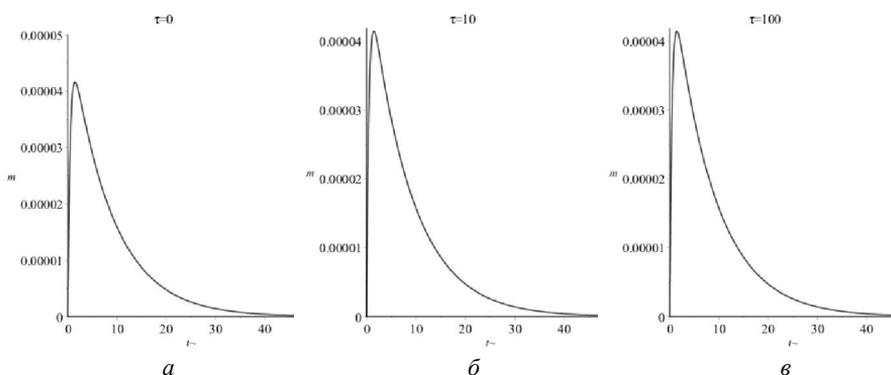


Рис. 4. Относительная характеристика пораженного органа $m(t)$ при разных τ :
 $a - \tau = 0$; $б - \tau = 10$; $в - \tau = 100$

Представленная программа может быть легко модифицирована. То есть можно в реальном масштабе времени моделировать протекание любой из четырех форм заболевания – субклинической, острой, хронической и летального исхода. Для этого необходимо лишь изменять параметры α , β , γ , μ_C , ρ , μ_f , σ , μ_m , η , C^* , V_0 , F_0 , m_0 , C_0 и τ .

Выводы. Анализируя полученные в ходе моделирования результаты, обучаемые могут сделать вывод, что распространение заболевания за длительный период зависит не от количества проникшей в организм инфекции, а от иммунологического статуса организма относительно определенного типа вируса. Отсюда вытекает вывод о необходимости прививок. И этот вывод необходим обучаемым в повседневной жизни, так как от него напрямую зависит их здоровье.

Литература

1. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели распределения плотности токов при возбуждении ионосферы высокочастотным облучением // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 12. С. 41–47.
2. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 2(72). С. 109–113.
3. Коробейников А.Г. Проектирование и исследование математических моделей в средах MATLAB и Maple. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012. 160 с.
4. Коробейников А.Г. Разработка и анализ математических моделей с использованием MATLAB и MAPLE. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 144 с.
5. Коробейников А.Г., Ахапкина И.Б., Безрук Н.В., Демина Е.А., Ямщикова Н.В. Применение системы компьютерной алгебры Maple в обучении проектированию и анализу многомерных математических моделей // Информатика и образование. 2014. № 4(253). С. 69–75.
6. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю. Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры. СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. 100 с.
7. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Комарова И.Э., Ашевский Д.Ю., Алексанин С.А., Маркина Г.Л. Математическая модель расчета информационных рисков для информационно-логистической системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 3. С. 538–545.
8. Коробейников А.Г., Зыков А.Г., Поляков В.И., Ашевский Д.Ю., Алексанин С.А. Проектирование математических моделей расчета оценки рисков перемещения материальных грузов на

железнодорожных узлах с использованием лингвистических переменных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2. С. 68–73.

9. Коробейников А.Г., Маркина Г.Л., Алексанин С.А., Ахапкина И.Б., Безрук Н.В., Демина Е.А., Ямицкова Н.В. Применение системы компьютерной алгебры Maple в учебном процессе обучения генерации систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Программные системы и вычислительные методы. 2015. № 2. С. 139–144.

10. Коробейников А.Г., Пирожникова О.И. Математическая модель расчета вероятности не-санкционированного физического проникновения на объект информатизации // Программные системы и вычислительные методы. 2014. № 2. С. 160–165.

11. Марчук Г.И. Математические модели в иммунологии. М.: Наука, 1991. 276 с.

КОРОБЕЙНИКОВ АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (korobeynikov_a_g@mail.ru).

ГРИШЕНЦЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (grishentcev@yandex.ru).

ФЕДОСОВСКИЙ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем и технологий техногенной безопасности, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (mefedosovskii@corp.ifmo.ru).

ЮГАНСОН АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – аспирант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург (a_yougunson@corp.ifmo.ru).

A. KOROBAYNIKOV, A. GRISHENTSEV, M. FEDOSOVSKY, A. IUGANSON
MODELING OF INFECTIOUS PROCESS TO TRAIN STUDENTS
IN MAPLE COMPUTER ALGEBRA SYSTEM STUDYING

Key words: *Maple, differential equations, mathematical model, educational process, epidemic.*

Currently in the Russian Federation there is an intensive introduction of modern information technologies into the educational process of listeners of various specialties. In this regard, the task of teaching students to work with various modern tools is extremely relevant. One such tool that has proved its effectiveness is the system of symbolic mathematics or the computer algebra Maple. Increasing the motivation for studying computer modeling techniques can be obtained by solving everyday problems that listeners have to face in their daily lives. One of such tasks is the epidemiological spread of viral infections. The paper considers the approach to the solution of the problem of computer modeling of the epidemiological process in connection with the need for a prognosis for the spread of a viral infection. Using the Maple system, there are examples presented to solve this problem.

References

1. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. *Razrabotka modeli raspredeleniya plotnosti tokov pri vozbuzhdenii ionosfery vysokochastotnym oblucheniem* [Development of current density distribution in ionosphere under highfrequency radiation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2010, vol. 53, no. 12, pp. 41–47.

2. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. *Razrabotka modeli resheniya obratnoi zadachi vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery* [Solution model of inverse problem of ionosphere vertical sounding]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2011, no. 2(72), pp. 109–113.

3. Korobeynikov A.G. *Proektirovanie i issledovanie matematicheskikh modelei v sredakh MATLAB i Maple* [Designing and research of mathematical models in MATLAB and Maple environments]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2012, 160 p.

4. Korobeynikov A.G. *Razrabotka i analiz matematicheskikh modelei s ispol'zovaniem MATLAB i MAPLE* [Development and analysis of mathematical models using MATLAB and MAPLE]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2010, 144 p.

5. Korobeynikov A.G., Akhapkina I.B., Bezruk N.V., Demina E.A., Yamshchikova N.V. *Primenenie sistemy komp'yuternoi algebry Maple v obuchenii proektirovaniyu i analizu mnogomernykh matematicheskikh modelei* [Application of the computer algebra system Maple in the teaching of designing and analysis of multidimensional mathematical models]. *Informatika i obrazovanie*, 2014, no. 4(253), pp. 69–75.

6. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu. *Razrabotka i issledovanie mnogomernykh matematicheskikh modelei s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoi algebry* [Development and research of multidimensional mathematical models with the use of computer algebra systems]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2014, 100 p.

7. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu., Komarova I.E., Ashevskii D.Yu., Aleksanin S.A., Markina G.L. *Matematicheskaya model' rascheta informatsionnykh riskov dlya informatsionno-logisticheskoi sistemy* [Mathematical model for calculation of information risks for information and logistics system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 538–545.

8. Korobeynikov A.G., Zykov A.G., Polyakov V.I., Ashevskii D.Yu., Aleksanin S.A. *Proektirovanie matematicheskikh modelei rascheta otsenki riskov peremeshcheniya material'nykh gruzov na zheleznodorozhnykh uzlakh s ispol'zovaniem lingvisticheskikh peremennykh* [Design of mathematical models to assess the risks related to reallocation of material freights across railway junctions with the usage of linguistic variables]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2015, no. 2, pp. 68–73.

9. Korobeynikov A.G., Markina G.L., Aleksanin S.A., Akhapkina I.B., Bezruk N.V., Demina E.A., Yamshchikova N.V. *Primenenie sistemy komp'yuternoi algebry Maple v uchebno protsesse obucheniya generatsii sistem obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii* [Using the MAPLE system of computer algebra in studying the generation of systems of the ordinary differential equations]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2015, no. 2, pp. 139–144.

10. Korobeynikov A.G., Pirozhnikova O.I. *Matematicheskaya model' rascheta veroyatnosti nesanktsionirovannogo fizicheskogo proniknoveniya na ob'ekt informatizatsii* [Model of mathematical calculations of the probability of unauthorized physical penetration to information assets]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2014, no. 2, pp. 160–165.

11. Marchuk G.I. *Matematicheskie modeli v immunologii* [Mathematical models in immunology]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 276 p.

KOROBAYNIKOV ANATOLIY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (Korobeynikov_a_g@mail.ru).

GRISHENTSEV ALEKSEY – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (Grishentcev@yandex.ru).

FEDOSOVSKY MIKHAIL – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department Systems and Technologies of Tech Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (Mefedosovskii@corp.ifmo.ru).

IUGANSON ANDREI – Post-Graduate Student, Department of Computer System Design and Security, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg (A_yougunson@corp.ifmo.ru).

Ссылка на статью: Коробейников А.Г., Гришентцев А.Ю., Федосовский М.Е., Югансон А.Н. Моделирование инфекционного процесса при обучении студентов работе с системой компьютерной алгебры Maple // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 129–136.

УДК 658.51:338.364-55

ББК 3966-5-05-048.9

Е.А. МУРАВЬЕВА, Д.С. РАДАКИНА, М.И. ШАРИПОВ,
Э.Р. ЕНИКЕЕВА, Э.М. АРТЫКАЕВА**РАЗРАБОТКА МЕТОДА АДАПТАЦИИ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Ключевые слова: нечеткий регулятор, двойная база правил, автоматизированная система управления, котлоагрегат, регулирование.

На сегодняшний день в автоматизированных системах управления технологическими процессами все чаще используется нечеткий регулятор, базирующийся на нечеткой логике. В ходе исследования был изучен нечеткий регулятор с двойной базой правил, который был применен для синтеза автоматизированной системы управления, разработан метод адаптации нечеткого регулятора. Адаптация позволяет регулятору в автоматическом режиме компенсировать параметрические возмущения, возникающие на объекте. Представлена модель нечеткого регулятора температуры уходящего пара в котлоагрегате БКЗ-75-39 ГМА, написан программный код в среде программирования UnityProXL, предназначенный для адаптации данного регулятора.

В данной работе нечеткий регулятор [7] используется для управления одним из параметров технологического процесса получения перегретого пара в котлоагрегате БКЗ-75-39 ГМА. В качестве параметра, по значению которого ведется регулирование степени открытия клапана, выбрана температура уходящего от котла пара. На данный параметр может оказывать влияние такое параметрическое возмущение, как изменение паропроизводительности котла, вследствие чего происходит изменение температуры пара за первой ступенью пароперегревателя и температуры конденсата, именно поэтому необходимо, чтобы регулятор мог автоматически, без участия человека, компенсировать указанные возмущения.

В качестве регуляторов рассматривались ПИ- и ПИД-регуляторы, а также регулятор, базирующийся на нечеткой логике [10].

Основной целью исследования является разработка метода адаптации нечеткого регулятора. Адаптация нечеткого регулятора предназначена для осуществления регулятором автоматической подстройки под параметрические возмущения [11].

Регулирование температуры пара $t_{\text{вых}}$ осуществляется изменением расхода на впрыск «собственного» конденсата в пароохладитель, который расположен между первой и второй ступенями пароперегревателя. Изменение данного расхода осуществляется с помощью регулирующего клапана, степень открытия которого зависит от температуры пара за первой ступенью пароперегревателя $t_{\text{п1}}$, от температуры за второй ступенью пароперегревателя $t_{\text{пара уход}}$, т.е. от конечной температуры пара, и, соответственно, от температуры самого конденсата $t_{\text{к}}$. Изменение паропроизводительности котла влечет за собой изменение как температуры пара за первой ступенью пароперегревателя, так и уходящего пара. Изменение температуры пара приводит к изменению температуры конденсата.

Для настройки адаптации нечеткого регулятора необходимо иметь представление о протекании рассматриваемого процесса, т.е. необходимо построить модель, характеризующую работу впрыскивающего пароохладителя. Модель построена с использованием регрессионного анализа – статистического метода исследования [1, 4]. Это наиболее распространенный способ показать зависимость какого-либо параметра от одной или нескольких независимых переменных. Таким образом, можно использовать регрессионную модель, чтобы показать влияние трех параметров: температуры пара за первой ступенью пароохладителя $t_{п1}$, температуры конденсата t_k и степени открытия клапана α (%) на температуру уходящего пара.

Используя данные, полученные непосредственно от работающего котлоагрегата и показывающие изменение температуры уходящего пара при температуре пара $t_{п1} = 360, 380, 400^\circ\text{C}$, температуре конденсата $t_k = 50, 80, 110^\circ\text{C}$ при степени открытия клапана $0 \dots 100\%$, построим регрессионную модель в MS Excel [6].

Из регрессионной модели получаем следующее уравнение:

$$y = 3,33 + 1,1 \cdot x_1 - 0,48333 \cdot x_2 - 0,81556 \cdot x_3, \quad (1)$$

где x_1 – температура пара за первой ступенью пароперегревателя $t_{п1}$; x_2 – температура конденсата t_k ; x_3 – степень открытия клапана α ; y – температура пара за второй ступенью пароперегревателя $t_{вых}$.

Полученную модель используем при адаптации нечеткого регулятора.

Расчет производим при паропроизводительности котла 70 т/ч, потому что это наиболее часто вырабатываемая производительность данного вида котла. Аналогичным образом можно провести расчеты и для другого значения паропроизводительности котла [2, 5].

Таким образом, на вход нечеткого регулятора будут подаваться значения температуры пара $t_{п1}$, поступающего с первой ступени пароперегревателя, и температуры конденсата t_k . Выходной переменной регулятора является степень открытия клапана (в процентах), с помощью которого как раз и осуществляется регулирование температуры пара.

Синтез нечеткого регулятора. Построение концептуальной модели определяет, какие значения параметров необходимо собрать для правильной работы нечеткого регулятора в процессе сбора экспертной информации [12]. В результате сбора экспертной информации опорные точки для нечеткого регулятора были выведены в таблицу, в которую включена вся область определения входов и выходов нечеткого регулятора. Таблица строится на основе сбора экспертной информации, данные этой таблицы можно увидеть в [9, 13].

Следующим этапом в синтезе нечеткого регулятора является определение лингвистических переменных входов и выходов нечеткого регулятора, которые описываются диапазоном четких значений и функциями принадлежности для каждого термина. Для описания входных лингвистических переменных используются термины треугольной формы, вершины которых размещаются в опорных точках, а основания расположены между двумя ближайшими опорными точками [3]. Используются термины именно треугольной формы, потому что они позволяют получить плавную статическую характеристику.

Таблица 1

Желаемые значения степени открытия клапана α

№	$t_{н1}$	$t_{к}$	α	№	$t_{н1}$	$t_{к}$	α
1	TP_1	tk_1	23	10	TP_1	tk_{10}	94
2	TP_1	tk_2	36	11	TP_1	tk_{11}	93
3	TP_1	tk_3	58	12	TP_1	tk_{12}	91
4	TP_1	tk_4	82	13	TP_1	tk_{13}	92
5	TP_1	tk_5	98	14	TP_2	tk_1	22
6	TP_1	tk_6	93	15	TP_2	tk_2	21
7	TP_1	tk_7	96
8	TP_1	tk_8	99	64	TP_5	tk_{12}	77
9	TP_1	tk_9	97	65	TP_5	tk_{13}	97

Далее необходимо произвести синтез продукционных правил, для этого составляем таблицу желаемых значений выходной переменной нечеткого регулятора – степени открытия клапана α – для каждого значения термина температуры пара $t_{н1}$ и температуры конденсата $t_{к}$.

На основе табл. 1 были построены продукционные правила. Получилось 65 продукционных правил, данное число получилось путем перемножения количества термов входных переменных ($5 \cdot 13 = 65$), т.е. 5 значений температуры пара за первой ступенью пароохладителя $t_{н1}$ (360, 370, 380, 390, 400°C), 13 значений температуры конденсата $t_{к}$ (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110°C). В полученных правилах определено, какой из консеквентов является базовым, какой – дополнительным, у дополнительного консеквента определена степень истинности. Способ определения консеквентов и их степени истинности описан в работах [6].

Полученные продукционные правила представлены ниже:

$$\begin{aligned} 1. & \text{If } t_n = TP_1 \text{ and } t_k = tk_1 \text{ then } \alpha = \alpha_2 \text{ and } \alpha = \alpha_3^{0,12}; \\ 2. & \text{If } t_n = TP_1 \text{ and } t_k = tk_2 \text{ then } \alpha = \alpha_2^{0,17} \text{ and } \alpha = \alpha_3; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dots$$

$$65. \text{If } t_n = TP_5 \text{ and } t_k = tk_{13} \text{ then } \alpha = \alpha_5^{0,12} \text{ and } \alpha = \alpha_6.$$

Рассмотрим, первое правило: *If* $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_1$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,12}$. Как видно из следствия этого правила (*then* $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,12}$), у α_2 степень равна 1, у α_3 – 0,12. Это означает, что α_2 – является базовым консеквентом, а α_3 – дополнительным.

Таким образом, изучив каждое правило по отдельности, определяем базовый и дополнительный консеквенты.

Адаптация нечеткого регулятора. Далее произведем адаптацию разработанного нечеткого регулятора с помощью алгоритма обучения. В качестве алгоритма обучения выбран алгоритм градиентного спуска, в котором исходной точкой для алгоритма можно взять нечеткий регулятор Мамдани. Модель нечеткого вывода Мамдани является универсальным аппроксиматором и отличается своей легкостью в понимании и объяснении принятого решения.

Если обозначить целым числом N «левый» из термов, используемых в консеквентах продукционного правила, то «правый» терм будет иметь номер $(N+1)$ [3, 8]. Левый терм – это терм с меньшим номером, т.е. находящийся слева относительно другого термина из продукционного правила. Следовательно, правый терм – это терм с большим номером и находящийся относительно другого термина из правила с правой стороны.

Введем обозначение

$$W = N + v, \quad (3)$$

где W – характеристика продукционного правила, которая получается на основе значений истинности базового и дополнительного консеквентов, т.е. на основе данной характеристики можно вернуться к продукционному правилу; N – номер левого терма; v – число, определяемое по формуле:

$$v = \frac{C + r}{2}, \quad (4)$$

где $r = 1$, если в консеквенте используется «правый» терм, и $r = 0$, если – «левый» терм; C – степень истинности дополнительного консеквента.

Рассмотрим определение характеристики продукционного правила на первом правиле: *If $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_1$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,12}$* . В данном правиле номер левого терма – 2. Степень истинности дополнительного консеквента равна 0,12, $r = 0$, так как базовым является левый терм. Следовательно, получаем характеристику продукционного правила: $W_1 = 2 + \frac{0,12 + 0}{2} = 2,06$.

Используя формулу (3), получаем характеристики остальных продукционных правил:

$$W_2 = 2 + \frac{0,17 + 0}{2} = 2,585; \dots; W_{65} = 5 + \frac{0,12 + 0}{2} = 5,06.$$

В процессе синтеза нечеткого регулятора определялись базовые и дополнительные консеквенты, а также степени истинности дополнительных консеквентов. При определении степени истинности дополнительного консеквента за основу были взяты опорные точки, которые представляют собой максимумы термов лингвистических входных переменных. На практике входные параметры могут принимать различные значения, именно поэтому должна быть проведена адаптация нечеткого регулятора, которая позволит регулятору автоматически подстраиваться под параметрические возмущения. С использованием разработанной модели (1), характеризующей работу впрыскивающего пароохладителя и построенной по экспериментальным данным, произведен синтез нечеткого регулятора, получены продукционные правила, рассчитаны их характеристики, на основе которых производим адаптацию нечеткого регулятора. При адаптации будут использоваться произвольные значения температуры пара за первой ступенью пароперегревателя $t_{п1}$ в пределах от 360° до 400°С, температура конденсата $t_{к}$ в пределах от 50° до 110°С, температура на выходе $t_{вых}$ может быть задана в пределах от 270° до 400°С.

В модель (1) вводим произвольные значения температуры пара $t_{п1}$ и конденсата $t_{к}$ и желаемой конечной температуры $t_{вых}$, в свою очередь модель выводит значения необходимой степени открытия клапана α (табл. 2) для получения новых продукционных правил в методе адаптации.

Данная модель (1) может использоваться не только для нечетких, но и для стандартных регуляторов. Но стоит учитывать, что как только начинаются нелинейные изменения параметров, ПИД-регулятор не в состоянии самостоятельно подстраиваться под них (пересчитывать полученную модель в

режиме реального времени), именно поэтому был выбран нечеткий регулятор и разработан метод его адаптации. Адаптация позволит регулятору успешно компенсировать существенные возмущения, влияющие на объект, и быстрее устранять возникшие отклонения.

Таблица 2

Значения, рассчитанные моделью
с использованием произвольных значений

№	$t_{п1}$	$t_{к}$	$t_{вых}$	α
1	363	54	362	18
2	365	56	345	40
3	368	58	310	86
4	372	63	327	68
...
45	399	109	340	68

Полученные с помощью модели (1) значения необходимы для реализации метода адаптации нечеткого регулятора. Эти значения используются при получении новых продукционных правил и их характеристик, которые учитывают больший возможный диапазон изменения параметров по сравнению с диапазоном экспериментальных данных.

В табл. 2 245 точек, данное число получилось путем перемножения количества входных параметров нечеткого регулятора при построении модели (1), т.е. 3 значения температуры пара за первой ступенью пароохладителя $t_{п1}$ (360, 380, 400°C), 3 значения температуры конденсата $t_{к}$ (50, 80, 100°C), 5 значений степеней открытия клапана α (0, 25, 50, 75, 100).

Введем обозначение

$$V = W - \Delta W \cdot \min(C_p, C_k), \quad (5)$$

где V – характеристика для новых продукционных правил, полученных по табл. 2; W – характеристика продукционных правил (2); $\min(C_p, C_k)$ – степень принадлежности входных переменных (C_p – степень принадлежности температуры пара за первой ступенью пароперегревателя, C_k – степень принадлежности температуры конденсата, т.е. необходимо C_p умножить на C_k); ΔW – шаг адаптации, который определяется экспертом для задания точности регулятора.

Для создания новых продукционных правил и их характеристик, выбирая по очереди строки из табл. 2, необходимо определить, между какими термами лежат температура пара за первой ступенью пароперегревателя $t_{п1}$ и температура конденсата $t_{к}$. Далее из полученных ранее правил находим правила, в которых термы температуры пара $t_{п1}$ и температуры конденсата $t_{к}$ совпадают с термами из табл. 2. Используя характеристику выбранного правила, переходим к новому продукционному правилу с помощью формулы (3), где W заменяется на V .

Таким образом, получая характеристику продукционного правила, переходим к новому правилу.

Процедура получения нового правила:

1. Выбрав 1-ю строку из табл. 2, определяем, что температура пара $t_{п1}$ лежит между термами TP_1 и TP_2 , температура конденсата $t_{к}$ лежит также ме-

жду термами TK_1 и TK_2 . Далее находим правило, полученное на этапе синтеза нечеткого регулятора, где встречаются температуры, лежащие между этими же номерами термов. Выбираем первое правило.

2. Сначала необходимо получить характеристику нового продукционного правила $V_1=2,06 - 0,15 \cdot 0,7 \cdot 0,1=2,0495$.

3. Рассчитав ее, можно, используя формулу (3), перейти к новому правилу: *If $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_1$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,099}$* . Аналогичным образом, рассчитываются остальные 44 правила:

1. $V_1=2,0495$; *If $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_1$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,099}$* ;

2. $V_2=2,5175$; *If $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_2$ then $\alpha = \alpha_2^{0,035}$ and $\alpha = \alpha_3$* ;

3. $V_3=3,042$; *If $t_n = TP_1$ and $t_k = tk_3$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,084}$* ;

...

65. $V_3=5,0585$; *If $t_n = TP_5$ and $t_k = tk_{13}$ then $\alpha = \alpha_5$ and $\alpha = \alpha_6^{0,117}$* .

Данные характеристики и правила используются при написании программного кода для реализации разработанного метода адаптации нечеткого регулятора.

Программный код для реализации разработанного метода адаптации. Программа для управления температурой уходящего пара, а также для адаптации нечеткого регулятора реализована в пакете UnityProXL на языке ST на базе ПЛК Modicon M340. Регулируемым параметром является температура уходящего пара после впрыскивающего пароохладителя. Программный код включает в себя все этапы произведенного синтеза и адаптации нечеткого регулятора. Фрагмент программного кода представлен ниже:

```
«(// фаззификация //)
for i:=1 to 5 domp[i]:=0.0; end for; (// вычисление функций принадлежности входных переменных tp //)
for i:=1 to 13 domk[i]:=0.0; end for; (// вычисление функций принадлежности входных переменных tk //)
if tp<=up[1] then
  mp[1]:=1.0;
else
  i:=1;
  while (tp>up[i])and(i<=5) do i:=i+1;end_while;
  if i=6 then
    mp[5]:=1.0;
  else
    mp[i]:=(tp-up[i-1])/(up[i]-up[i-1]);
    mp[i-1]:=1.0-mp[i];
  end if;
end if;
if tk<=uk[1] then
  mk[1]:=1.0;
else...»
```

Таким образом, использование нечеткого регулятора с адаптацией в системе управления котлоагрегатом позволило снизить перерегулирование значения температуры уходящего пара котла и повысить точность регулирования.

Выводы. Таким образом, впервые разработан метод адаптации нечеткого регулятора с двойной базой правил, основанный на обучении регулятора и выборе того консеквента в продукционных правилах с двойным консеквентом, который является оптимальным для текущих значений параметров кот-

ла. Применение нечеткого регулятора с адаптацией для управления параметрами технологического объекта дало возможность повысить качество управления за счет внедрения механизмов адаптации к неопределенностям, возникающим при функционировании сложных объектов.

Литература

1. Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф., Дургарян И.С., Келина А.Ю., Кудинов И.Ю., Пащенко А.Ф. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 1 // Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы. Датчики и системы. 2017. № 1(210). С. 4–19.
2. Ишметьев Е.Н., Зыков И.Е. Разработка модели нечеткой логики и регулятора для управления процессом плавки медного сульфидного концентрата в печи Ванюкова // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 2. С. 59–62.
3. Кайшев А.И., Емеев А.А., Сагдатуллин А.М. Автоматизация электропривода насосной станции на основе многомерного нечеткого логического регулятора // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 4. С. 30–33.
4. Коваленко С.Н., Левенец А.В. Разработка и исследование модели нечеткого регулятора уровня кубовой жидкости ректификационной колонны // Информационные технологии XXI века: материалы Междунар. науч. конф. (Хабаровск, 20–24 мая 2013 г.). Хабаровск: Изд-во Тхоокеанского ун-та, 2013. С. 139–144.
5. Муллабаев И.З. Разработка системы регулирования температуры воды на основе нечеткого регулятора // Научный вестник. 2015. № 4(6). С. 77–88.
6. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Мустафина М.З. Синтез нечеткого регулятора с двойными консеквентами для регулирования температуры смазочной станции // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 4. С. 172–179.
7. Пат. 167890 РФ. Нечеткий регулятор с двойной базой правил / Соловьев К.А., Надришин А.С., Баширов М.Г., Султанов Р.Г., Соловьева О.И., Муравьева Е.А., Крышко К.А., Гареев И.М.; патентообладатель Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т. 2015154253; заявл. 16.12.2015; опубл. 11.01.2017, Бюл. № 2.
8. Сагдатуллин А.М., Емеев А.А., Муравьева Е.А. Системно-интегративный подход к автоматизации процессов проектирования и контроля разработки нефтегазовых месторождений // Нефтяное хозяйство. 2015. № 3. С. 92–95.
9. Соловьев К.А., Муравьева Е.А. Методы синтеза нечеткого регулятора с двойной базой правил // Proc. of the 4th Int. Conf. «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016)». Уфа, 2016. С. 200–203.
10. Финаев В.И., Глод О.Д. Нечеткий регулятор для производственных процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. 1997. № 1(4). С. 87–88.
11. Kayashev A., Muravyova E., Sharipov M., Emekeev A., Sagdatullin A. Verbally defined processes controlled by fuzzy controllers with input/output parameters represented by set of precise terms. Proc. of 2014 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014.
12. Khuntia P.S., Mitra D. Fuzzy model reference learning controller. *Computer Sciences and Telecommunications*, 2009, no. 3, pp. 36–46.
13. Sagdatullin A., Muravyova E., Sharipov M. Modelling of Fuzzy Control Modes for the Automated Pumping Station of the Oil and Gas Transportation System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, vol. 132, conf. 1.

МУРАВЬЕВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА – доктор технических наук, заведующая кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем, Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамак, Россия, Стерлитамак (muraveva_ea@mail.ru).

РАДАКИНА ДАРЬЯ СЕРГЕЕВНА – магистрант кафедры автоматизированных технологических и информационных систем, Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамак, Россия, Стерлитамак (darya.radakina@yandex.ru).

ШАРИПОВ МАРСЕЛЬ ИЛЬГИЗОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных технологических и информационных систем, Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамак, Россия, Стерлитамак (sharipovm@mail.ru).

ЕНИКЕЕВА ЭЛЬЗА РАШИТОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, Альметьевск (elza.enikeeva@mail.ru).

АРТЫКАЕВА ЭЛЬМИРА МИДХАТОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, Альметьевск (8selmira@bk.ru).

**E. MURAVYOVA, D. RADAKINA, M. SHARIPOV,
E. ENIKEEVA, E. ARTYKAEVA**

**DEVELOPMENT OF METHOD OF FUZZY REGULATOR ADAPTATION
TO REGULATE FUZZY TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

Key words: fuzzy controller, double base of rules, automated control system, boiler unit, controlling.

At present fuzzy controllers based on fuzzy logics have been of still greater use in automatic control systems to control the parameters of complex processes. While doing research fuzzy controller with double base of rules was studied, then it was used to synthesize automated control system, and a method of fuzzy regulator adaptation was developed. The adaptation allows the fuzzy controller in an automated mode to compensate parametric interferences occurring in the control object. The work presents the fuzzy controller of the temperature of the outlet steam in the boiler unit BKZ-75-39 of GMA model. Software code was written for the fuzzy controller adaptation in the programming support environment Unity Pro XL.

References

1. Vasil'ev S.N., Kudinov Yu.I., Pashhenko F.F., Durgaryan I.S., Kelina A.Yu., Kudinov I.Yu., Pashhenko A.F. *Intellektual'nye sistemy upravleniya i nechetkie regulatory. Ch. 1* [Intelligent control systems and fuzzy controllers. Part 1]. *Nechetkie modeli, logiko-lingvisticheskie i analiticheskie regulatory. Datchiki i sistemy* [Fuzzy models, logical-linguistic and analytical regulators. Sensors and Systems], 2017, no. 1(210), pp. 4–19.
2. Ishmet'ev E.N., Zykov I.E. *Razrabotka modeli nechetkoi logiki i regulatora dlya upravleniya processom plavki mednogo sul'fidnogo koncentrata v pechi Vanyukova* [Developing a model of fuzzy logic and a controller to control smelting of copper sulfide concentrate in the Vanyukov furnace]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya* [Russian Journal of Non-Ferrous Metals], 2009, no. 2, pp. 59–62.
3. Kayashev A.I., Emekeev A.A., Sagdatullin A.M. *Avtomatizatsiya elektroprivoda nasos-noy stantsii na osnove mnogomernogo nechetkogo logicheskogo regulatora* [Pumping station electric drive automation based on multidimensional fuzzy logic controller]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiyaisvyaz' v nefyanoi promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry], 2014, no. 4, pp. 30–33.
4. Kovalenko S.N., Levenec A.V. *Razrabotka i issledovanie modeli nechetkogo regulatora urovnya kubovoi zhidkosti rektifikatsionnoi kolonny* [Development and research a fuzzy controller model for the level of the bottom liquid of the distillation column]. *Informatsionnye tehnologii XXI veka: materialy Mezhdunarod. nauch. konf.* [Proc. of Int. Conf. «Information technology of the 21st century»]. Habarovsk, 2013, pp. 139–144.
5. Mullabaev I.Z. *Razrabotka sistemy regulirovaniya temperatury vody na osnove nechetkogo regulatora* [Development of water temperature control system based on fuzzy controller]. *Nauchnyi vestnik* [Science Bulletin], 2015, no. 4(6), pp. 77–88.

6. Muravyova E.A., Solovev K.A., Mustafina M.Z. *Sintez nechetkogo regulyatora s dvoimi konsekvantami dlya regulirovaniya temperatury smazochnoi stancii* [The fuzzy controller synthesis with double consequents to control the lubricating station temperature]. *Neftegazovoe delo* [Oil and gas business], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 172–179.

7. Solovev K.A., Nadrshin A.S., Bashirov M.G., Sultanov R.G., Soloveva O.I., Muraveva E.A., Kryshko K.A., Gareev I.M. *Nechetkii regulyator s dvoimoi bazoi pravil* [Fuzzy controller with a double basis of rules]. Patent RF, no. 167890, 2017.

8. Sagdatullin A.M., Emekeev A.A., Murav'eva E.A. *Sistemno-integrativnyy podhod k avtomatizatsii processov proektirovaniya i kontrol'nykh razrabotkin neftegazovykh mestorozhdeniy* [System-integrative approach to automation of the oil and gas fields design and development control] // *Neftjanoe hozjajstvo* [Oil Industry]. 2015, no. 3, pp. 92–95.

9. Solovev K.A., Muraveva E.A. *Metody sinteza nechetkogo regulyatora s dvoimoi bazoi pravil* [Synthesis methods for fuzzy controller with double base of rules]. Proc. of the 4th Int. Conf. «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016)». Ufa, 2016, pp. 200–203.

10. Finaev V.I., Glod O.D. *Nechetkii regulyator dlya proizvodstvennykh processov* [Fuzzy controller for industrial process]. *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki*, 1997, no. 1(4), pp. 87–88.

11. Kayashev A., Muravyova E., Sharipov M., Emekeev A., Sagdatullin A. *Verbally defined processes controlled by fuzzy controllers with input/output parameters represented by set of precise terms* [Verbally defined processes controlled by fuzzy controllers with input/output parameters represented by set of precise terms]. Proc. of 2014 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS, 2014.

12. Khuntia P.S., Mitra D. *Fuzzy model reference learning controller* [Fuzzy model reference learning controller]. *Computer Sciences and Telecommunications* [Computer Sciences and Telecommunications], 2009, no. 3, pp. 36–46.

13. Sagdatullin A., Muravyova E., Sharipov M. *Modelling of Fuzzy Control Modes for the Automated Pumping Station of the Oil and Gas Transportation System* [Modelling of Fuzzy Control Modes for the Automated Pumping Station of the Oil and Gas Transportation System]. IOP Conference Series: Materials Science and, 2016, vol. 132, conf. 1.

MURAVYOVA ELENA – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Automated Technological and Information Systems, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Russia, Sterlitamak (muraveva_ea@mail.ru).

RADAKINA DARYA – Master's Program Student, Department of Automated Technological and Information Systems, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Russia, Sterlitamak (darya.radakina@yandex.ru).

SHARIPOV MARSEL – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Automated Technological and Information Systems, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Russia, Sterlitamak (sharipovm@mail.ru).

ENIKEEVA ELZA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical and Thermal Power Engineering, Almet'yevsk State Oil Institute, Russia, Almet'yevsk (elza.enikeeva@mail.ru).

ARTYKAEVA ELMIRA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical and Thermal Power Engineering, Almet'yevsk State Oil Institute, Russia, Almet'yevsk (85elmira@bk.ru).

Ссылка на статью: *Муравьева Е.А., Радакина Д.С., Шарипов М.И., Еникеева Э.Р., Артыкаева Э.М.* Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 137–145.

УДК 004.056.5
ББК 32.973.202

И.Г. НАЗАРОВ, Д.В. СУСЛОВ,
М.В. НИКАНДРОВ, Л.А. СЛАВУТСКИЙ

КОМПЛЕКС ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДЕГРАДАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТА ПРИ КИБЕРИНЦИДЕНТАХ

Ключевые слова: кибербезопасность, электросетевой комплекс, защита информации, контролируемая деградация.

Повышение уровня автоматизации объектов электросетей ставит перед необходимостью искать новые пути решения проблемы безопасной и безотказной работы объектов с позиции кибербезопасности. В статье рассматриваются вопросы кибербезопасности во взаимосвязи с функциональной безопасностью. На современном этапе развития средств обеспечения информационной безопасности назрела объективная необходимость создания комплексов, способных осуществлять проактивные действия и пресечение компьютерных атак на критически важные информационные ресурсы. Предложен метод обеспечения информационной защиты от кибернетических атак путем контролируемой деградации системы управления. Обоснована необходимость создания современных систем защиты информации на новых проактивных принципах.

Энергетика во всем мире в настоящее время находится на пороге больших изменений. Повышение уровня автоматизации объектов электросетевого хозяйства средствами современных информационно-технологических и телекоммуникационных систем и усложнение информационных систем автоматизации и управления (ИСАУ), переход к необслуживаемым объектам и удаленному управлению ставят в совершенно новом аспекте задачу надежного и безопасного функционирования объектов с позиции обеспечения кибербезопасности внедряемых информационных технологий¹. Энергетическая инфраструктура рассматривается как одна из важных критических инфраструктур [4].

Объектом защиты являются информация, информационные процессы программно-технических средств автоматизированных систем управления, обеспечивающих контроль и управление технологическим оборудованием (исполнительными устройствами) и реализованными на нем технологическими процессами, информационный обмен которых осуществляется протоколами передачи данных.

Современным типам угроз, таким, как новые методы преодоления «защитного периметра», легальные и непреднамеренные «бекдоры», реальная угроза технологическому оборудованию, нам практически ничего противо-

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

поставить. Количество уязвимостей в информационных системах ежегодно возрастает [5, 6].

Следует признать, что защита только на периметре неэффективна и заранее проигрышна. Уже сейчас существует множество способов по преодолению «периметра» и в будущем, несомненно, появятся новые. Современные и перспективные системы киберзащиты работают и в ближайшее время продолжат работать только на обнаружение угроз и атак. Это происходит не потому что комплексы защиты так несовершенны, а потому, что системы управления сегодня не готовы к каким-либо воздействиям на свою информационную инфраструктуру.

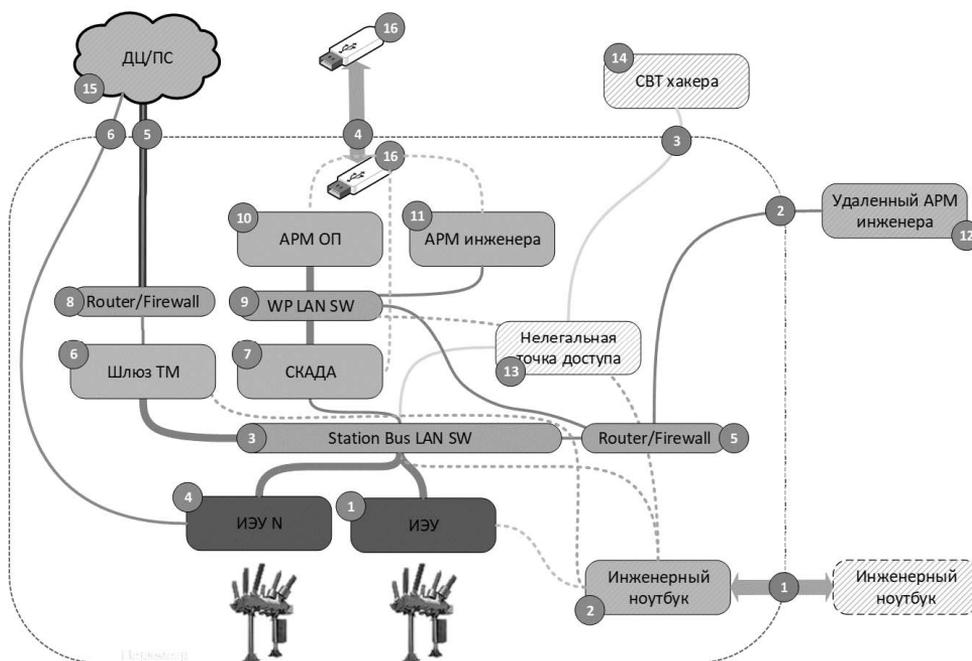


Рис. 1. Векторы проникновения в информационный периметр

На современном этапе развития средств обеспечения информационной безопасности назрела объективная необходимость создания систем, способных осуществлять предупреждение и заблаговременное пресечение компьютерных атак на критически важные информационные ресурсы [2].

Анализ отечественных (БДУ ФСТЭК России) и зарубежных (National Vulnerability Database, Open Sourced Vulnerability Database, National Vulnerability Database) банков данных угроз безопасности информации, широко применяемых ИСАУ, показывает наличие дефектов и уязвимостей, использование которых злоумышленником позволяет не только снижать ключевые показатели надежности и обходить механизмы функциональной безопасности, но и реализовывать атаки, напрямую влияющие на безопасность технологического процесса [1, 3].

Возникает вопрос – что же делать, если, даже внедрив системы защиты на периметре и внутри систем управления, мы кардинально не меняем ситуацию?

Авторами предлагается концепция комплекса «Контролируемая деградация системы управления». Современные ИСАУ обладают функциональной избыточностью, резервированием функций для повышения отказоустойчивости, поэтому во время инцидента – атаки, заражения или других кибервоздействий – можно сознательно отказаться от некоторых функций управления и информационного обмена и отойти на заранее подготовленные «рубежи деградации».

К разрабатываемому комплексу были предъявлены следующие требования:

- комплекс должен быть реализован в виде программно-технического комплекса и обеспечивать защиту информационного периметра и контролируемую деградацию информационной сети системы управления электроэнергетических объектов;

- комплекс должен быть реализован с применением компонентов, имеющих широкое распространение, в том числе в промышленных системах, обладающих умеренной рыночной стоимостью;

- не должен использовать сложные алгоритмы разбора информационного трафика и сигнатурного анализа;

- должен быть дешевле классических комплексов защиты (IDS, IPS, SIEM) и иметь пониженную стоимость эксплуатации.

Результаты исследования. В результате работ компанией «Интеллектуальные Сети» была разработана концепция и изготовлен прототип комплекса «Контролируемая деградация системы управления».

Суть концепции заключается в том, что во время инцидента (атаки, заражения или других кибервоздействий) можно сознательно отказываться от некоторых функций управления и информационного обмена и отходить на заранее подготовленные «рубежи деградации». Комплекс «Контролируемая деградация сети» будет работать совместно с системами пассивного мониторинга сетевого трафика промышленной сети и обнаружения угроз. Например, Kaspersky Industrial CyberSecurity for Networks (KICS for Networks) [8] – разработка компании Лаборатория Касперского. Если объектовая система защиты обнаружила аномалию во внутренней сети энергообъекта или поступила информация от KICS for Networks, то комплекс отключает от локальной сети второстепенные системы, которые непосредственно не отвечают за основной технологический процесс и сегментирует локальную сеть, тем самым сильно сужая среду, где развивается киберинцидент (высокоскоростные сети и вычислительные мощности под управлением многозадачных операционных систем). Это первый уровень деградации, который может включаться персоналом на рабочем месте или удаленно, в том числе в качестве превентивной меры.

Для более наглядного представления рассмотрим работу комплекса в типовой структурной схеме энергообъекта, которая включает в себя режимы коммутации и аварийные режимы [7] (рис. 2).

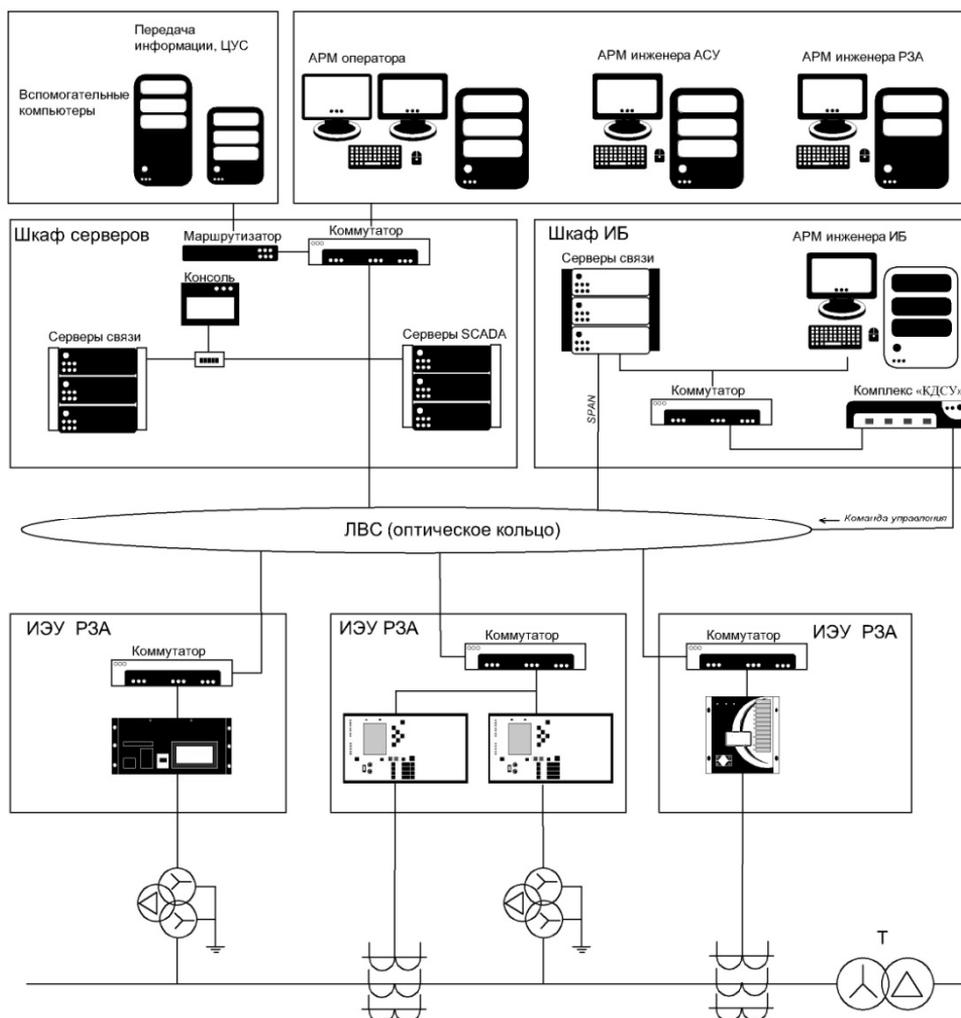


Рис. 2. Структурная схема энергообъекта

Следующий уровень – максимальная «деградация»: в работе остаются только основные защиты и функции управления (автономный режим работы МП РЗА и максимально «ручной режим»). Этот режим включается персоналом по месту в случае серьезных инцидентов.

Предлагаемый комплекс реализовывает три режима работы:

1) «нормальный режим» – контроль всех физических и логических подключений к информационной сети (не только такой внешний периметр, как классические Firewall) путем управления промышленными коммутаторами и контроля подключения по технологии IEEE 802.1x и MAD (MAC, IP) авторизации;

2) «аварийный режим» – обеспечение автоматизированного перехода информационной сети системы управления на заранее подготовленные рубежи деградации в случае кибернетической атаки или другой активности нару-

шителей (как внутренних, так и внешних). Это должно значительно уменьшить поверхность атаки и в большинстве случаев купировать нападения при сохранении работоспособности основных компонентов системы, хотя и с потерей второстепенных функций и части наблюдаемости технологического процесса;

3) «режим восстановления» – обеспечение автоматизированного перехода информационной сети системы управления к первоначальному проектному состоянию.

Работа комплекса подразумевает под собой разработку и внедрение эксплуатационной и организационно-распорядительной документации, регламентирующей порядок взаимодействия работы комплекса, системы управления и персонала. Коллектив электроэнергетического объекта должен быть готов к переходам к рубежам деградации, а не усугублять ситуацию хаотичными действиями во время атак.

Выводы. Изменение ландшафта угроз информационной безопасности критически важных объектов энергетики обуславливает необходимость пересмотра функциональных характеристик систем управления как объектов информационной инфраструктуры электрических сетей.

Изменение методов воздействия на технологические системы, использование современных технологий кибератак обуславливают острую необходимость проведения активных работ по формированию комплексной защиты информационной инфраструктуры объектов электросетевого хозяйства как критически важных объектов Российской Федерации.

Комплекс «Контролируемая деградация сети» – один из вариантов проактивной защиты, который уже сейчас можно внедрять в пилотных зонах в качестве как отдельного комплекса, так и в дополнение к проектируемым системам обнаружения вторжения.

Литература

1. *Ахметьянова А.И., Кузнецова А.Р.* Проблемы обеспечения информационной безопасности в России и её регионах // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 8-1. С. 82–86.
2. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Петренко С.А.* Порождение сценариев предупреждения компьютерных атак // *Защита информации*. Инсайд. 2017. № 4(76). С. 70–79.
3. *Колосок И.Н., Гурина Л.А.* Определение показателя уязвимости к кибератакам задачи оценивания состояния по данным SCADA и синхронизированным векторным измерениям // *Электротехника*. 2017. № 1. С. 52–59.
4. *Массель Л.В., Воропай Н.И., Сендеров С.М., Массель А.Г.* Киберопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России // *Вопросы кибербезопасности*. 2016. № 4(17). С. 2–10.
5. *Петренко А.С., Петренко С.А.* О кибербезопасности АСУ ТП транспортной инфраструктуры // *Защита информации*. Инсайд. 2017. № 6(78). С. 38–43.
6. *Петренко С.А., Петренко А.А.* Онтология кибербезопасности самовосстанавливающихся SMART GRID // *Защита информации*. Инсайд. 2016. № 2(68). С. 12–24.
7. *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.
8. Kaspersky Industrial CyberSecurity. URL: <https://ics.kaspersky.ru/solution-overview/1>.

НАЗАРОВ ИГОРЬ GERMANOVICH – магистрант кафедры автоматки и управления в технических системах, Чувашский государственный университет; специалист по технической защите информации, ООО «Интеллектуальные Сети», Россия, Чебоксары (i-nazarov94@mail.ru).

СУСЛОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – магистрант кафедры автоматки и управления в технических системах, Чувашский государственный университет; специалист по технической защите информации, ООО «Интеллектуальные Сети», Россия, Чебоксары (suslov.dmitry@mail.ru).

НИКАНДРОВ МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, директор, ООО «Интеллектуальные Сети», Россия, Чебоксары (nixmak@mail.ru).

СЛАВУТСКИЙ ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор кафедры автоматки и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (las_co@mail.ru).

I. NAZAROV, D. SUSLOV, M. NIKANDROV, L. SLAVUTSKII
COMPLEX TO PROVIDE CONTROLLED DEGRADATION OF ELECTRICAL FACILITY CONTROL SYSTEM AT CYBER INCIDENTS

Key words: cybersecurity, power grid, information safety, controlled degradation.

Increasing the automation level of power grid facilities requires looking for new solutions of a problem of the safe and trouble-free operation of facilities in the terms of cybersecurity. Cybersecurity issues in interrelation with functional safety are considered in the article. At the present stage of cybersecurity means development there is an objective need of the complexes capable to carry out pro-active actions and computer attacks suppression for critical information resources. The method of ensuring information protection against the cybernetic attacks by controlled degradation of a control system is proposed. Necessity to create modern systems of information security according to the new pro-active principles is justified.

References

1. Akhmetyanova A.I., Kuznetsova A.R. *Problemy obespechenia informatsionnoy bezopasnosti v Rossii i regionov* [Problems of information security in Russia and its regions]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 8-1, pp. 82–86.
2. Birykov D.N., Lomako A.G., Petrenko S.A. *Porozhdenie scenariyev predyprezhdenia kompyutrenih atak* [Generating Scenarios for Preventing Computer Attacks]. *Zashchita informatsii. Insaid*, 2017, no. 4(76), pp. 70–79.
3. Kolosok I.N., Gurina L.A. *Opreделение pokazatelya uiazvimosti k kiberatakam zadachi ocenivaniia sostoianiia po dannym SCADA i sinkhronizirovannym vektornym izmereniyam* [Determination of the vulnerability index to cyberattacks and state-estimation problems according to SCADA data and timed vector measurements]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 52–59.
4. Massel' L.V., Voropai N.I., Senderov S.M., Massel' A.G. *Kiberopasnost' kak odna iz strategicheskikh ugroz energeticheskoi bezopasnosti Rossii* [Cyber danger as one of the strategic threats to Russia's energy security]. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2016, no. 4(17), pp. 2–10.
5. Petrenko A.S., Petrenko S.A. *O Kiberbezopasnosti ASU TP transportnoi infrastruktury* [About Cyber Security of Automated Control Systems for Transport Infrastructure]. *Zashchita informatsii. Insaid*, 2017, no. 6(78), pp. 38–43.
6. Petrenko S.A., Petrenko A.A., *Ontologia kiberbezopasnosti samovostanavlivaushih SMART GRID* [Ontology of cyber security of self-recovering smart grid systems]. *Zashchita informatsii, Insaid*, 2016, no. 2(68), pp. 12–24.

7. Slavutskii A.L., Prynikov V.S., Slavutskii L.A. *Modelirovanie perehodnih rezhimov uzla nagruzki s trekhobmotochnim transformatorom na raznih urovniah naprizhenia* [Transient processes in the load node with at different voltage levels]. *Elektrotehnika*, 2017, no. 7, pp. 20–24.

8. Kaspersky Industrial CyberSecurity. Available at: <https://ics.kaspersky.ru/solution-overview/l>.

NAZAROV IGOR – Master’s Program Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University; specialist in Technical Protection of Information, LLC «iGRIDS», Russia, Cheboksary (i-nazarov94@mail.ru).

SUSLOV DMITRIY – Master’s Program Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University; specialist in Technical Protection of Information, LLC «iGRIDS», Russia, Cheboksary (suslov.dmitry@mail.ru).

NIKANDROV MAXIM – Candidate of Technical Sciences, Director, LLC «iGRIDS» ltd., Russia, Cheboksary (nixmak@mail.ru).

SLAVUTSKII LEONID – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (las_co@mai.ru).

Ссылка на статью: Назаров И.Г., Суслов Д.В., Никандров М.В., Славутский Л.А. Комплекс обеспечения контролируемой деградации системы управления энергообъекта при киберинцидентах // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 146–152.

УДК 004.942:[517.938]

ББК В162.7

Н.В. НОВОЖИЛОВА, В.Х. ФЕДОТОВ

**ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ПОВЕДЕНИЯ
ПРОСТЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ключевые слова: динамические системы, неустойчивость, одномерные модели, сложное поведение, странные аттракторы, хаос.

Поведение динамических систем зависит от их размерности. В гладких трехмерных системах возможны различные сложные хаотические колебания (странные аттракторы). В гладких двухмерных системах возможны только более простые регулярные колебания (предельные циклы). В гладких одномерных системах возможны только монотонные режимы. Примером гладких трехмерных моделей хаоса является модель прогноза погоды Лоренца, которая описывается трехмерной системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В негладких системах, содержащих особые (сингулярные) точки, в которых производные не существуют, предельное поведение может быть более сложным и при размерности меньшей трех. Примером таких систем являются модели Диксона, которые описывают хаотическую динамику сингулярными автономными двухмерными системами ОДУ. В сингулярных одномерных системах хаос до настоящего времени не обнаружен. В данной статье приведены примеры сингулярных одномерных динамических систем, описываемых одномерными ОДУ, демонстрирующими непредсказуемую динамику при их численном решении. Наблюдаемое при этом квазихаотическое поведение решений таких ОДУ связано не с потерей устойчивости алгоритма, а с отсутствием устойчивых равновесий в некоторой сингулярной области фазового пространства с неустойчивыми границами. На практике это означает, что если некоторые технические устройства используют алгоритмы численного решения ОДУ, то они могут быть причиной непредсказуемого динамического поведения технической системы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технических устройств, способных демонстрировать сложное поведение, а также соответствующих систем защиты и подавления хаотических режимов.

Из качественной теории динамических систем на плоскости известно, что предельные движения (аттракторы) двухмерных динамических систем могут быть только равновесиями или периодическими колебаниями (автоколебаниями) [1]. При этом понятие динамической системы предполагает, что она не содержит сингулярных точек, т.е. ее правые части определены на всей или части фазовой плоскости (аналитичны/регулярны в окрестности некоторой точки). Этих условий достаточно для того, чтобы динамическая система удовлетворяла условиям теоремы существования и единственности и не допускала более сложных аттракторов. При нарушении этих условий, т.е. при наличии сингулярностей, даже двухмерная динамическая система может демонстрировать более сложное поведение, которое может быть интерпретировано как хаос.

Малоизвестным примером таких систем являются сингулярные модели Диксона, которые описывают сложную аperiodическую динамику непрерывными автономными двухмерными системами обыкновенных дифференциальных уравнений [5] вида

$$x' = xy / (x^2 + y^2) - ax, \quad y' = y^2 / (x^2 + y^2) - b - c.$$

Эта сингулярная система имеет одну особую точку (0,0), в которой производные не определены, и допускает до трех равновесий

$$x_1 = 0, \quad y_1 = (1 - c) / b, \quad x_{2,3} = \pm [c(a - b - ac) / a]^{0.5} / (a - b), \quad y_{2,3} = c / (a - b).$$

Хаос в модели Диксона возникает вблизи сингулярной точки при отсутствии устойчивых равновесий и устойчивых бесконечностей. В сингулярных одномерных системах хаос до настоящего времени не обнаружен. Представляет интерес вопрос о том, могут ли демонстрировать хаотическую динамику непрерывные автономные одномерные системы сингулярного типа?

Как известно из теории, динамика таких систем при отсутствии сингулярностей может быть только монотонной. В работе [2] приведены и исследованы две одномерные (1D) непрерывные модели хаоса, представляющие собой автономные обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) с одной независимой переменной и недифференцируемой особенностью (сингулярностью) в знаменателе.

Первая из этих моделей характеризуется кубической нелинейностью в числителе

$$x' = x(x^2 - 1) / (x - c),$$

где c – параметр.

Эта модель имеет три равновесия $x_1 = 0$, $x_{2,3} = \pm 1$ и может демонстрировать нерегулярные колебания даже тогда, когда одно из них устойчиво.

Вторая отличается квадратичной нелинейностью в числителе

$$x' = (x^2 - 1) / (x - c),$$

допускает только два равновесия $x_{1,2} = \pm 1$ и демонстрирует нерегулярные колебания тогда, когда они оба неустойчивы. Такое квазихаотическое поведение наблюдается на графике зависимости от времени $x(t)$ при численном решении этих ОДУ различными методами и с различной точностью в некоторой области фазового пространства (фазовой прямой) при определенных начальных условиях (н.у.) $x(0) = x_0$.

Кроме этих моделей до настоящего времени не найдено других 1D-непрерывных моделей с непредсказуемым поведением. Ниже сконструированы и исследованы еще более простые 1D-квазихаотизаторы с меньшей нелинейностью (в числителе) и, соответственно, меньшим числом равновесий. Сформулированы условия существования сингулярных 1D-квазихаотизаторов.

Модель 1. Линейный хаотизатор с одним неустойчивым равновесием. Рассмотрим сингулярное ОДУ с линейным числителем и линейным знаменателем

$$x' = (x - 1) / (x - c) \equiv P(x), \quad c \neq 1. \quad (1)$$

Качественный анализ. Это уравнение имеет одно равновесие $x = 1$ и одну сингулярную особую точку (о.т.) $x = c$, в которой производная не существует. Устойчивость решений (в линейном приближении) определяется знаком собственного числа $\lambda = P_x = (1 - c) / (x - c)^2$. Если $c < 1$, то $\lambda > 0$ и равновесие $x = 1$ неустойчиво, иначе, т.е. при $c > 1$, – равновесие устойчиво. На бесконечности $\lambda > 0$ и решения возрастают (траектории идут вверх), т.е. плюс бесконечность $(+\infty)$ устойчива, а минус бесконечность $(-\infty)$ – неустойчива. Рассмотрим два случая:

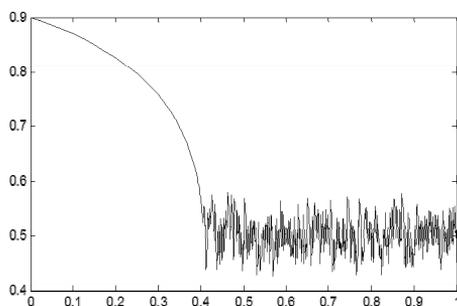
1) если $c < 1$, то единственное равновесие $x = 1$ неустойчиво и о.т. $x = c$ расположена в области фазового пространства между этим неустойчивым равновесием и неустойчивой минус бесконечностью. Тогда при выборе н.у. внутри этой области, т.е. «ниже» равновесия $x_0 < 1$, траектории решений обязатель-

но попадут в окрестность о.т. и можно ожидать непредсказуемого поведения на графике зависимости $x(t)$. При н.у. вне этой области, т.е. «выше» равновесия $x_0 > 1$, траектории решений не попадут в окрестность о.т. и будут монотонно двигаться от неустойчивого равновесия к устойчивой плюс бесконечности;

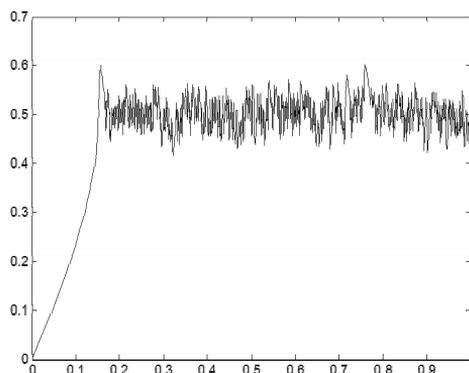
2) если $c > 1$, то единственное равновесие $x = 1$ устойчиво и о.т. расположена между устойчивым равновесием и устойчивой плюс бесконечностью. В этом случае сингулярность не оказывает влияния на траектории решений и происходит только вполне предсказуемое монотонное движение к устойчивому равновесию или к устойчивой плюс бесконечности в зависимости от выбора н.у.

Примеры. Пусть $c = 1/2$, тогда равновесие $x = 1$ неустойчиво. Если при этом выбрать н.у. выше равновесия $x_0 > 1$, система не попадает в сингулярную область и монотонно удаляется от неустойчивого равновесия к устойчивой плюс бесконечности.

При н.у. выше о.т. $c < x_0 < 1$ система вначале удаляется от неустойчивого равновесия, затем попадает в сингулярную область и не может уйти из нее из-за отталкивающего действия минус бесконечности. В результате возникают сложные колебания около особой точки $x = c$, ограниченные сверху неустойчивым равновесием и неустойчивой минус бесконечностью – снизу (рис. 1, а).



а



б

Рис. 1. Модель 1. Зависимость $x(t)$ при разных н.у.:
 $a - x_0 = 0,9$; $б - x_0 = 0$

При н.у. ниже особой точки $x_0 < c$ система испытывает отталкивающее влияние минус бесконечности и движется вначале в сторону неустойчивого равновесия, затем также попадает в сингулярную область и не может уйти из нее. В результате возникают сложные колебания около особой точки $x = c$, ограниченные сверху неустойчивым равновесием и неустойчивой минус бесконечностью – снизу (рис. 1, б). Если н.у. близки к о.т., то монотонный начальный период отсутствует и нерегулярные колебания начинаются сразу.

Аналитическое решение. Уравнение (1) интегрируется в квадратурах при любых c . Так, при $c = 1/2$ его решение имеет вид

$$x(t) = 1/2 W(2(x_0 - 1) \exp(2x_0 - 2) / \exp(-2) \exp(2t - 2)) + 1,$$

где W – специальная функция Ламберта [4].

Это решение вещественно в интервале $[0, 5; 1]$, монотонно и не допускает колебаний. В момент времени $t_{\text{срыва}}$ вещественная ветвь становится мнимой.

Модель 2. Хаотизатор нулевого порядка с одним неустойчивым равновесием

$$x' = -1 / (x + c) + a \equiv P(x), \quad a \neq 0. \quad (2)$$

Качественный анализ. Это ОДУ имеет одно равновесие $x_\infty = 1/a - c$ (существует при $a \neq 0$) и одну особую точку $x^* = -c$ (существует, если н.у. не находятся в точке равновесия). Производная $P_x = 1 / (x + c)^2 > 0$ при любых c , т.е. система неустойчива при любых н.у. во всей области определения. Следовательно, единственное равновесие тоже всегда неустойчиво. При этом $x' \rightarrow a$ при $x \rightarrow \pm\infty$, т.е. при $a > 0$ плюс бесконечность всегда притягивает траектории (устойчива), а минус бесконечность отталкивает их (неустойчива). Поэтому если выбрать н.у. ниже неустойчивого равновесия $x_0 < x_\infty$, то траектории системы обязательно «встретятся» с особой точкой и начнется непредсказуемое поведение.

Если же выбрать н.у. выше равновесия, то траектории не встретятся с о.т. и будут двигаться к устойчивой плюс бесконечности «без помех». При $a < 0$ устойчивость бесконечностей и поведение траекторий меняются на противоположные, но качественное поведение не меняется.

Примеры. При $c = -1/2$, $a = 1$ неустойчивое равновесие $x_\infty = 3/2$, а особая точка $x^* = 1/2$. При этом $x' \rightarrow 1$ при $x \rightarrow \pm\infty$, т.е. плюс бесконечность притягивает траектории (устойчива), а минус бесконечность отталкивает их (неустойчива). Тогда при $x_0 < 3/2$ (ниже неустойчивого равновесия) должны наблюдаться сложные колебания около о.т. $x^* = 1/2$ между неустойчивым равновесием $x_\infty = 3/2$ и неустойчивой минус бесконечностью. При $x_0 = 3/2$ система должна оставаться в покое. При $x_0 > 3/2$ система должна двигаться к устойчивой плюс бесконечности. Результаты численного решения уравнения (2) при разных н.у. и положениях о.т. приведены на рис. 2.

Аналитическое решение. Уравнение (2) интегрируется в квадратурах и его решение

$$x(t) = (W((ac + x_0 a - 1) \exp(+ac + x_0 a + ta^2 - 1)) + 1 + ac) / a$$

содержит одну монотонную вещественную ветвь и не допускает колебаний. Срыв на мнимую ветвь происходит при $x^* = -c$ в момент времени $t = t_{\text{срыва}}$.

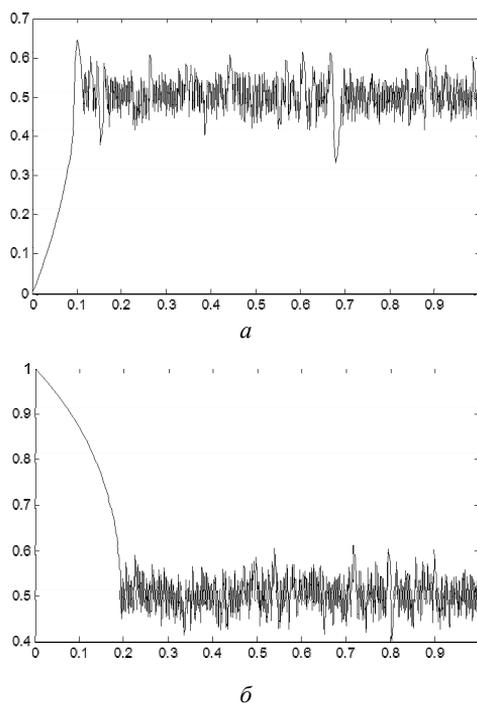


Рис. 2. Модель 2. Зависимость $x(t)$ при разных н.у.:
 $a - x_0 = 0 < x^* = 1/2$; $b - x_0 = 1 > x^* = 1/2$

Модель 3. Хаотизатор нулевого порядка без равновесий (ранее в [3] исследован дискретный аналог этой модели). Рассмотрим частный случай модели 3 при $a = 0$:

$$x' = -1/(x + c) \equiv P(x), \quad x \neq -c. \quad (3)$$

Аналитическое решение. Решение этого ОДУ

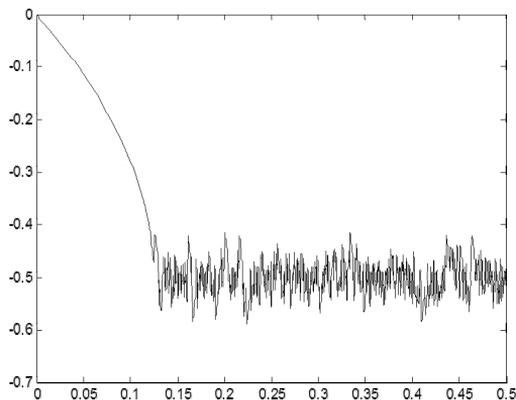
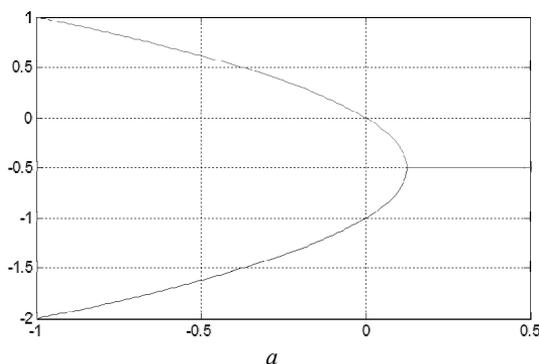
$$x(t) = -c \pm [(c + x_0)^2 - 2t]^{1/2}$$

имеет две монотонных ветви, существует только при $t \leq (c + x_0)^2 / 2 = t_{\text{срыва}}$ и не допускает колебаний. При $t > t_{\text{срыва}}$ решение становится мнимым. График решения представляет собой параболу, ветви которой направлены влево вдоль оси времени (рис. 3, а).

Качественный анализ. Это ОДУ совсем не имеет равновесий (они смещаются на плюс-минус бесконечность!) при любом c и имеет одну особую точку $x^* = -c$. Производная $P_x = 1 / (x + c)^2 > 0$ всегда положительна, т.е. система неустойчива при любых c и н.у. во всей области определения (как и в предыдущем примере). При этом и плюс, и минус бесконечность отталкивают все траектории, т.е. обе всегда неустойчивы ($x' < 0$ при $x \rightarrow \infty$ и $x' > 0$ при $x \rightarrow -\infty$). Поэтому при любых н.у. траектории системы обязательно «встретятся» с особой точкой и в окрестности о.т. должно наблюдаться непредсказуемое поведение между двумя неустойчивыми бесконечностями.

Примеры. При $c = 1/2$ срыв на колебания происходит в момент времени $t_{\text{срыва}} = (1/2 + x_0)^2 / 2$ вблизи вершины параболы, которая соответствует особой

точке $x^* = -0,5$. Далее с ростом t вещественные решения ОДУ перестают существовать (становятся мнимыми) и ведут себя непредсказуемо (в зависимости от алгоритма численного решения ОДУ). Сложные нерегулярные колебания наблюдаются около о.т. между двумя неустойчивыми плюс и минус бесконечностями. Результаты численного интегрирования уравнения (3) показаны на рис. 3, б.



б

Рис. 3. Модель 3. Зависимость $x(t)$:

а – точное решение: $x_0 = 0$, $t_{срыва} = 1/8$ (горизонтальная линия – мнимая);

б – численное решение (квазихаос около о.т. $x^* = -1/2$)

Отличительная черта модели 3 состоит в том, что сложная динамика наблюдается здесь при любых н.у. при движении по времени в положительную сторону. Аналогичное поведение будет при движении по времени в отрицательную сторону, если парабола направлена вправо. Например, ОДУ $x' = 1/(x+c)$ также демонстрирует непредсказуемую динамику, аналогичную уравнению (3), но при движении по времени в отрицательную сторону.

Модель 4. Простой хаотизатор нулевого порядка без равновесий. Рассмотрим ОДУ

$$x' = -1/x \equiv P(x), x \neq 0. \quad (4)$$

Эта модель является частным случаем модели 3 и обладает аналогичными ей свойствами. Как и предыдущая модель, она не имеет равновесий и имеет одну о.т. $x^* = 0$. Аналитическое решение $x(t) = \pm(x_0^2 - 2t)^{1/2}$ существует только при $t < x_0^2/2 = t_{\text{срыва}}$ и становится мнимым иначе. График этого решения также представляет собой параболу, направленную вдоль оси времени. При н.у. $x_0 > 0$ реализуется верхняя ветвь (плюс), а при н.у. $x_0 < 0$ реализуется нижняя ветвь (минус). Производная $P_x = 1/x^2 > 0$ всегда положительна, т.е. система всегда неустойчива во всей области определения. При этом и плюс и минус бесконечность отталкивают все траектории, т.е. обе всегда неустойчивы ($x' < 0$ при $x \rightarrow \infty$ и $x' > 0$ при $x \rightarrow -\infty$). Поэтому при любых н.у. траектории системы обязательно встретятся с особой точкой и около нее должна наблюдаться непредсказуемая динамика между двумя неустойчивыми бесконечностями.

Примеры. Выберем $x_0 = \varepsilon \neq 0 \ll 1$ близко к особой точке, чтобы быстрее выйти на хаос. Результаты численного интегрирования при разных н.у. показаны на рис. 4 (счет идет на малых временах быстро, но на больших временах очень долго).

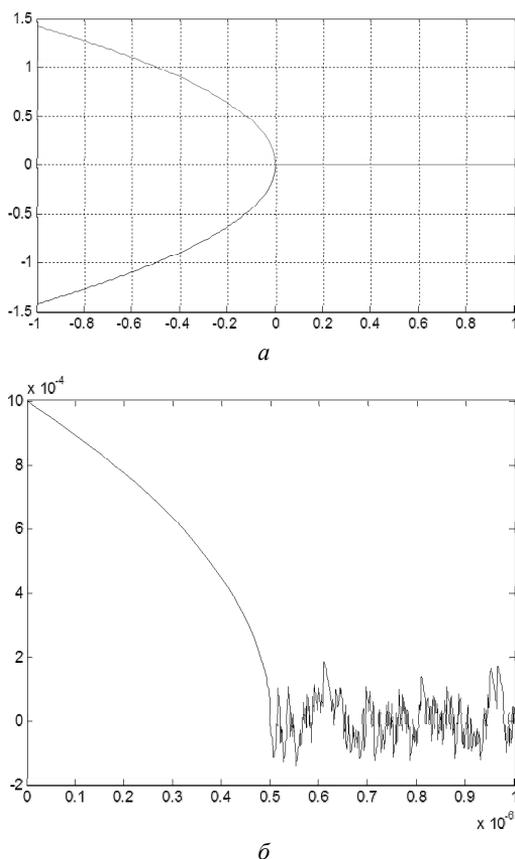


Рис. 4. Модель 4. Зависимость $x(t)$:
 а – точное решение: $x_0 = 0,001$ (горизонтальная линия – мнимая);
 б – численное решение (квазихаос около о.т. $x^* = 0$)

Отличительная черта модели 4 состоит в том, что сложная динамика наблюдается здесь всегда (как и в модели 3) при движении по времени в положительную сторону, но амплитуда колебаний очень мала (заметна только при большом увеличении). Аналогичное поведение будет при движении по времени в отрицательную сторону, если парабола направлена вправо. Например, решения ОДУ $x' = 1/x$ демонстрируют сложную динамику, которая наблюдается при движении по времени в отрицательную сторону.

Рассмотренные выше непрерывные сингулярные 1D-модели описываются простыми одномерными ОДУ и способны демонстрировать непредсказуемую динамику только при их численном решении. Условиями возникновения нерегулярного поведения решений таких моделей являются: 1) отсутствие устойчивых равновесий в этой области; 2) неустойчивость границ этой области; 3) наличие сингулярной особой точки внутри этой области; 4) начальные условия расположены внутри этой области; 5) численное решение ОДУ. Эти условия выполняются тогда, когда решение ОДУ существует только на ограниченном временном интервале $t < t_{\text{срыва}}$. Специфика численного решения таких ОДУ связана не с потерей устойчивости алгоритма, а с отсутствием устойчивых равновесий при $t > t_{\text{срыва}}$ в некоторой сингулярной области фазового пространства. Наблюдаемое при этом нерегулярное динамическое поведение следует рассматривать как квазихаос (не истинный хаос), так как соответствующие аналитические решения не описывают хаотических режимов.

Приведенные в работе модели и результаты их исследования показывают, что если некоторые технические устройства используют алгоритмы численного решения сингулярных ОДУ, то они могут быть причиной непредсказуемого динамического поведения технической системы. Особенности решения таких ОДУ необходимо учитывать при разработке технических устройств, способных демонстрировать сложную аперiodическую динамику, а также соответствующих систем защиты и подавления хаотических режимов.

Литература

1. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. М.: Наука, 1966. 588 с.
2. Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Модели хаотической динамики. Часть 4. Одномерные инварианты // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 13. С. 24–28.
3. Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Модели хаотической динамики. Часть 5. Дискретные инварианты // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 14. С. 68–74.
4. Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E., Jeffrey D.J., Knuth D.E. On the Lambert W function. *Adv. Computational Maths.*, 1996, vol. 5, pp. 329–359.
5. Dixon D.D., Cummings F.W., Kaus P.E. Continuous chaotic dynamics in two dimensions, *Phys. Nonlinear Phenom.*, 1993, vol. 65, pp. 109–116.

НОВОЖИЛОВА НИНА ВАСИЛЬЕВНА – кандидат экономических наук, доцент кафедры бухгалтерского учета и электронного бизнеса, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mallin@mail.ru).

ФЕДОТОВ ВЛАДИСЛАВ ХАРИТОНОВИЧ – кандидат химических наук, доцент, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

N. NOVOZHILOVA, V. FEDOTOV
ONE-DIMENSIONAL MODELS OF COMPLICATED BEHAVIOR
OF SIMPLE DYNAMIC SYSTEMS

Key words: *dynamic systems, instability, complicated behavior, one-dimensional models, strange attractors, chaos.*

The behavior of dynamic systems depends on their dimension. Different complicated chaos vibrations (strange attractors) are possible in smooth three-dimensional systems. In smooth two-dimensional systems there can be only simpler regular vibrations (limiting cycles). Smooth one-dimensional systems allow only monotonic regimes. Lorenz weather monitoring model can be served as an example of smooth three-dimensional models of chaos; the model is described by three-dimensional system of common differential equations (CDE). In non-smooth systems, containing particular (singular) points, where there are no derivatives, limiting behavior can be more complicated and in the dimension of less than three. Dickson models can be served as an example of such systems; these models describe chaos dynamics through singular autonomous two-dimensional systems (CDE). There is no chaos in singular one-dimensional systems. The article under review gives examples of singular one-dimensional dynamic systems, being described by one-dimensional CDE; demonstrating unpredictable dynamics when they are numerically solved. Quasi-chaos behavior of CDE equations solution, observed in this case is not connected with the loss of algorithm stability but with the absence of stable equilibriums in some singular zone of phase space with unstable borderlines. In practice, this means that if some engineering appliances use algorithm of numerical solution CDE, they can cause unpredictable dynamic behavior of engineering system. Received results can be used while developing engineering appliances, capable to demonstrate complicated behavior as well as corresponding systems to protect and suppress chaos regime.

References

1. Andronov A.A., Leontovich E.A., Gordon I.I., Maier A.G. *Kachestvennaya teoriya dinamicheskikh sistem vtorogo poryadka* [Qualitative theory of second-order dynamical systems]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 588 p.
2. Fedotov V.Kh., Kol'tsov N.I. *Modeli khaoticheskoi dinamiki. Chast' 4. Odnomernye invarianty* [Models of chaotic dynamics. Part 4. One-dimensional invariants]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 13, pp. 24–28.
3. Fedotov V.Kh., Kol'tsov N.I. *Modeli khaoticheskoi dinamiki. Chast' 5. Diskretnye invarianty* [Models of chaotic dynamics. Part 5. Discrete invariants]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 14, pp. 68–74.
4. Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E., Jeffrey D.J., Knuth D.E. On the Lambert W function. *Adv. Computational Maths.*, 1996, vol. 5, pp. 329–359.
5. Dixon D.D., Cummings F.W., Kaus P.E. Continuous chaotic dynamics in two dimensions, *Phys. Nonlinear Phenom*, 1993, vol. 65, pp. 109–116.

NOVOZHILOVA NINA – Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Department of Accounting and E-Business, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mallin@mail.ru).

FEDOTOV VLADISLAV – Candidate of Chemical Sciences, Associated Professor, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

Ссылка на статью: *Новожилова Н.В., Федотов В.Х.* Одномерные модели сложного поведения простых динамических систем // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 153–161.

УДК 004.8.032.26:159.922.7.016.2

ББК 397:Ю983.402

А.Н. ПЕТРОВ, Г.Ф. ИВАНОВА, Е.В. СЛАВУТСКАЯ

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОСЕТИ КАК ИНСТРУМЕНТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ ПСИХОДИАГНОСТИКИ

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, системный анализ, многомерные данные, психодиагностика.

Предлагается использование аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) для анализа внутрисистемных связей многомерных случайных данных. В основу положены статистические оценки качества обучения нейросетевых моделей: распределение среднеквадратичной ошибки и процент распознавания связей. На примере многомерных данных психодиагностики с использованием нейросети прямого пространства и простой архитектуры показаны возможности предлагаемого подхода. Иерархический анализ опосредованных, нелинейных связей экспериментальных данных строится на последовательном исключении данных из процедуры обучения нейросети. Обсуждаются его преимущества по сравнению с традиционным факторным и кластерным анализом.

Нейросетевые алгоритмы основаны на когнитивных принципах [12] и получили достаточно широкое распространение [1, 8, 10]. Аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) чаще всего используется при анализе случайных данных и процессов в том случае, когда создание аналитической или детерминированной численной модели затруднительно в принципе или требует больших вычислительных ресурсов. После обучения ИНС-модель позволяет быстро установить связь между входными данными и целевой функцией [1, 10]. Выбор структуры ИНС и условий ее обучения основывается на эмпирически установленных правилах [5, 9].

Одними из главных условий успешного обучения и использования ИНС являются наличие и определенная устойчивость связей между входными и выходными данными, даже если эти связи носят сильно нелинейный и опосредованный (латентный) характер. При системном анализе многомерных случайных данных наличие и структура таких связей сами по себе могут являться предметом исследования. Результат обучения ИНС, как решение задачи многопараметрической нелинейной оптимизации [5, 8], может описываться такими статистическими критериями, как среднеквадратичное отклонение от целевых значений или их случайное распределение [6].

В настоящей работе на примере анализа результатов психодиагностики показано, что статистические оценки качества нейросетевых моделей могут служить для анализа системных связей многомерных случайных данных.

Выборка и методика анализа данных. Для обработки данных использованы результаты психодиагностики 56 подростков в возрасте 14-15 лет, полученные при помощи 14-факторного опросника Р.Б. Кеттелла [11]. Этот стандартизированный, широко используемый психодиагностический тест

выявляет личностные черты испытуемых, которые можно дифференцировать по группам с определенными свойствами: группа коммуникативных свойств, группа интеллектуальных свойств, группа эмоциональных свойств, группа поведенческих регуляторных свойств.

Каждой личностной черте соответствует целочисленное значение от 0 до 10. Таким образом, исходными данными для анализа служила таблица из 14 столбцов и 56 очищенных от дублирующих комбинаций строк. Использована простейшая двухслойная нейронная сеть с двумя нейронами в скрытом слое (рис. 1). Обучение ИНС прямого распространения с обратным распространением ошибки осуществлялось в аналитической программе «Deductor» [2]. Число циклов (эпох) обучения – 10 000, 5-10% общей выборки использовалось для тестирования.

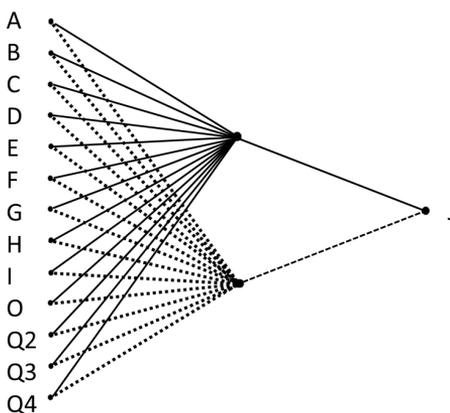


Рис. 1. Структура ИНС:

группа коммуникативных свойств: А – общительность (аффектомия – шизотимия); Н – (смелость – робость в контактах); Е – (стремление к доминированию – пассивность); Q2 – самостоятельность (степень групповой зависимости); *группа интеллектуальных свойств:* В – вербальный интеллект; *группа эмоциональных свойств:* С – (степень эмоциональной устойчивости); D – (возбудимость – флегматичность); F – (легкомыслие – осторожность); I – эмоциональная чувствительность (сензитивность – реализм); J – (неврастения, фактор Гамлета – интерес к участию в общих делах); O – тревожность (склонность к чувству вины – самоуверенность); Q4 – (степень внутреннего напряжения); *группа поведенческих регуляторных свойств:* Q3 – (степень самоконтроля); G – моральная нормативность (степень принятия моральных норм)

На рис. 2 показан пример диаграммы рассеяния и распределения ошибок при обучении ИНС рис. 1. Как видно из рис. 2, максимальная ошибка $\sigma_{\max} < 5\%$, среднеквадратичная ошибка $\sigma_s < 1\%$, при этом уровень распознавания связей при обучении сети $S = 100\%$ (все целевые значения на диаграмме рассеяния попадают в обозначенные границы).

Для того чтобы оценить, насколько каждый из признаков (столбцы в исходной матрице данных) связан с остальными 13 признаками, при обучении ИНС этот признак подавался на выход, а остальные 13 признаков – на вход (аналогично рис. 1). Соответствующие результаты приведены в табл. 1.

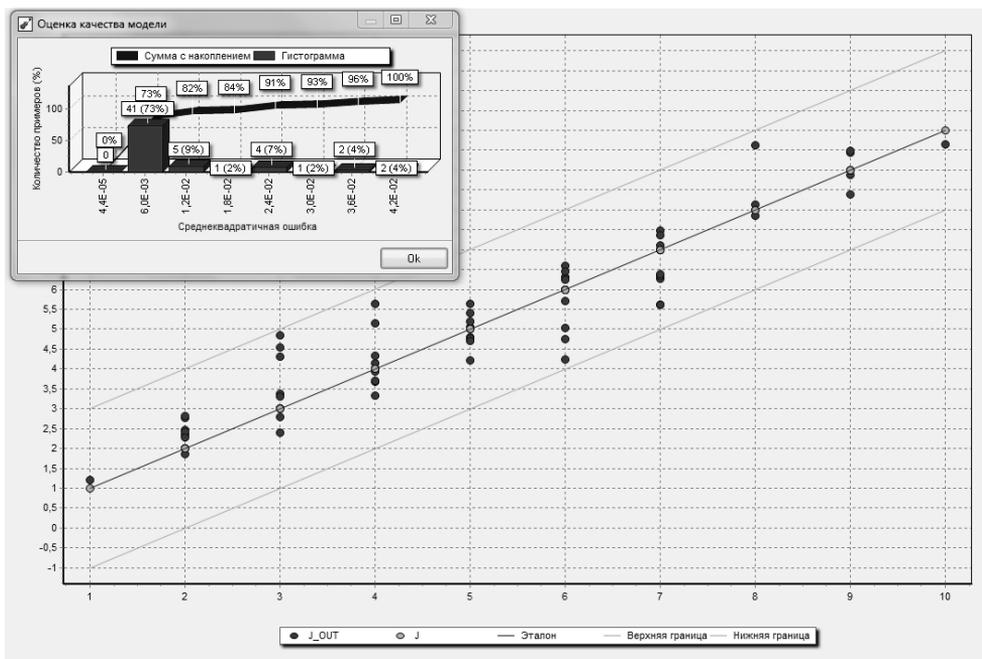


Рис. 2. Структура ИНС, диаграмма рассеяния и гистограмма распределения среднеквадратичной ошибки при обучении сети

Таблица 1

Результаты обучения с разными признаками на выходе ИНС

Признак	Максимальная ошибка σ_{\max}	Средняя ошибка σ_s	Распознавание S
A	$3,59 \times 10^{-1}$	$1,57 \times 10^{-2}$	94,64%
B	$1,53 \times 10^{-1}$	$1,44 \times 10^{-2}$	89,29%
C	$1,12 \times 10^{-1}$	$9,71 \times 10^{-3}$	96,43%
D	$8,96 \times 10^{-2}$	$6,34 \times 10^{-3}$	96,43%
E	$1,39 \times 10^{-1}$	$1,96 \times 10^{-2}$	92,86%
F	$9,46 \times 10^{-2}$	$9,16 \times 10^{-3}$	94,64%
G	$1,02 \times 10^{-1}$	$5,92 \times 10^{-3}$	96,43%
H	$4,37 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-3}$	100%
I	$1,75 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-2}$	91,07%
J	$4,19 \times 10^{-2}$	$7,29 \times 10^{-3}$	100%
O	$1,76 \times 10^{-1}$	$1,76 \times 10^{-2}$	87,50%
Q2	$7,83 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$	96,43%
Q3	$1,13 \times 10^{-1}$	$9,56 \times 10^{-3}$	96,43%
Q4	$3,06 \times 10^{-1}$	$2,19 \times 10^{-2}$	89,29%

Анализ результатов. Три численных критерия качества обучения ИНС из табл. 1 оказываются связанными между собой. Коэффициент корреляции R_{12} между σ_{\max} и σ_s равен 0,73, а R_{13} R_{13} между σ_{\max} и S равен $-0,59$. При выборке в 14 значений такие коэффициенты корреляции имеют уровень значимости меньше 0,01 и 0,02. Таким образом, данные табл. 1 позволяют утверждать, что наиболее тесно связанными с остальными признаками являются величины H, J

(минимальная ошибка и 100% распознавания), а наименее связанными – В, Е, I, О, Q4. Взаимосвязи могут быть опосредованными, поэтому возникает необходимость селективно оценить уровень влияния каждого признака из входных данных ИНС на качество ее обучения. Для этого отдельные признаки на входе ИНС последовательно исключались. В табл. 2 приведены соответствующие результаты для признака J на выходе ИНС, когда обучение проводилось по 12 входным признакам вместо 13. Как следует из таблицы, обучение ИНС в целом улучшилось по сравнению с результатами табл. 1: 100% связей распознано в 4 из 12 случаев (в 2 случаях в табл. 1), среднеквадратичная ошибка больше 1% в одном случае (в 7 случаях в табл. 1).

Таблица 2

Результаты обучения ИНС с J на выходе
и последовательным исключением признаков на входе

Признак	Максимальная ошибка σ_{\max}	Средняя ошибка σ_s	Распознавание S
Без А	$1,26 \times 10^{-1}$	$9,61 \times 10^{-3}$	96,43%
Без В	$5,89 \times 10^{-2}$	$9,22 \times 10^{-3}$	94,64%
Без С	$5,76 \times 10^{-2}$	$7,59 \times 10^{-3}$	94,64%
Без D	$6,05 \times 10^{-2}$	$9,35 \times 10^{-3}$	98,21%
Без E	$6,97 \times 10^{-2}$	$8,59 \times 10^{-2}$	92,86%
Без F	$3,39 \times 10^{-2}$	$6,34 \times 10^{-3}$	100%
Без G	$7,62 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$	98,21%
Без H	$6,33 \times 10^{-2}$	$9,95 \times 10^{-3}$	98,21%
Без I	$5,62 \times 10^{-2}$	$7,74 \times 10^{-3}$	94,64%
Без O	$3,86 \times 10^{-2}$	$6,33 \times 10^{-3}$	100%
Без Q2	$6,07 \times 10^{-2}$	$9,33 \times 10^{-3}$	96,43%
Без Q3	$4,02 \times 10^{-2}$	$5,83 \times 10^{-2}$	100%
Без Q4	$4,02 \times 10^{-2}$	$6,69 \times 10^{-3}$	100%

Следующим шагом анализа можно исключить все признаки, без которых наблюдается 100% распознавание связей (F, O, Q3, Q4). Структура соответствующей нейросети показана на рис. 3. Качество обучения не сильно отличается от ИНС (рис. 1): $\sigma_{\max} = 0,064$, $\sigma_s = 0,0098$, $S = 92,86\%$.

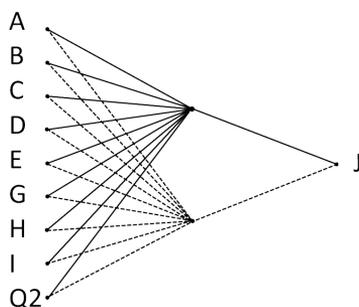


Рис. 3. Структура ИНС после исключения четырех признаков

Таким образом, можно считать, что признак J наиболее тесно связан с признаками, обозначенными на рис. 3. С другой стороны, исключение при-

знаков J, H, как наиболее связанных с остальными признаками (см. табл. 1), должно нарушать общую структуру связей в системе и «ухудшать» качество обучения ИНС для других признаков. Соответствующие результаты показаны в табл. 3. Исключение J, H со входа ИНС или увеличивает среднеквадратичную ошибку σ_s , или уменьшает процент распознавания связей S (сравнение табл. 1 и 3). Исключение составляет признак F, при исключении которого качество обучения несколько «улучшилось». Однако это не противоречит показанным выше результатам, поскольку этот признак мало влияет на связь J с остальными признаками (см. табл. 2 и рис. 3).

Таблица 3

Результаты обучения с разными признаками на выходе ИНС при исключении J, H на входе

Признак	Максимальная ошибка σ_{\max}	Средняя ошибка σ_s	Распознавание S
A	$1,64 \times 10^{-1}$	$9,59 \times 10^{-3}$	94,64%
B	$2,06 \times 10^{-1}$	$1,91 \times 10^{-2}$	87,50%
C	$6,69 \times 10^{-2}$	$8,67 \times 10^{-3}$	94,64%
D	$1,20 \times 10^{-1}$	$8,73 \times 10^{-3}$	96,43%
E	$1,45 \times 10^{-1}$	$1,34 \times 10^{-2}$	92,86%
F	$7,11 \times 10^{-2}$	$7,76 \times 10^{-3}$	98,21%
G	$2,50 \times 10^{-1}$	$1,35 \times 10^{-2}$	94,64%
I	$1,57 \times 10^{-1}$	$2,10 \times 10^{-2}$	85,71%
O	$2,04 \times 10^{-1}$	$2,60 \times 10^{-2}$	82,14%
Q2	$3,86 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-2}$	91,07%
Q3	$6,07 \times 10^{-2}$	$1,78 \times 10^{-2}$	89,29%
Q4	$1,75 \times 10^{-1}$	$2,16 \times 10^{-2}$	85,71%

Выводы. Системный анализ прикладного объекта подразумевает определенную иерархию и классификацию связей между элементами системы [3]. Для многомерных случайных данных такая иерархическая классификация может проводиться традиционными методами факторного [4] или кластерного [13] анализа. Предлагаемый в настоящей работе подход, основанный на статистических критериях оценки качества обучения нейросетевых моделей, имеет значительно меньше ограничений:

- 1) позволяет оценить сильно нелинейные связи, которые невозможно выявить корреляционным или факторным анализом;
- 2) не накладывает ограничений на числовую размерность данных;
- 3) не требует априорного задания меры связей (метрика Чебышева, евклидово расстояние, коэффициент корреляции и т.д.).

Использование статистических критериев при обучении и оценке структуры ИНС позволяет проводить анализ по достаточно ограниченной выборке, что является принципиальным для значительного числа практических задач, где ИНС до настоящего времени не используются. Предлагаемый подход может быть программно автоматизирован и продолжен для селективной оценки внутрисистемных связей. Можно провести общую аналогию между предлагаемым алгоритмом и многократной (последовательной) факторизацией данных [4, 7].

Литература

1. Аbruков В.С., Николаева Я.Г. Количественные и качественные методы: соединяем и властвуем! // Социологические исследования. 2010. № 1. С. 142–145.
2. Аbruков В.С., Ефремов Л.Г., Коцеев И.Г. Возможности создания системы поддержки принятия решений и управления вузом с помощью аналитической платформы deductor // Интеграция образования. 2013. № 1(70). С. 17–23.
3. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: СПбГТУ, 1997. 510 с.
4. Иберла К. Факторный анализ. М.: Статистика, 1980. 308 с.
5. Крулов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.
6. Славутская Е.В., Славутский Л.А. Использование искусственных нейронных сетей для анализа гендерных различий младших подростков // Психологические исследования. 2012. Т. 5, № 23. С. 4. URL: <http://psystudy.ru>.
7. Славутская Е.В., Славутский Л.А. Факторный анализ взаимосвязи индивидуально-психологических и личностных характеристик младших подростков с уровнем школьной дезадаптации // Экспериментальная психология. 2013. Т. 6, № 4. С. 40–51.
8. Славутская Е.В., Славутский Л.А. Нейросетевой анализ взаимосвязи вербального и невербального интеллекта младших подростков // Психологический журнал. 2014. Т. 35, №5. С. 48–56.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
10. Baxt W.G. Complexity, chaos and human physiology: the justification for non-linear neural computational analysis. *Cancer Lett*, 1994, vol. 77, no. 2-3, pp. 85–93.
11. Cattell R.B. Advanced in Cattellian Personality Theory. Handbook of Personality. Theory and Research. New York, The Guilford Press, 1990.
12. Hebb D. Organization of behavior. New York, Science Edition, 1961.
13. Slonim N., Atwal G.S., Tkachic G., Bialek W. Information-based clustering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, vol. 102, pp. 18297–18302.

ПЕТРОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – студент IV курса факультета радиоэлектроники и автоматки, Чувашский государственный университет, Чебоксары, Россия (petrov_rea-11-14@mail.ru).

ИВАНОВА ГУЛЬНАРА ФАРХАДОВНА – аспирантка кафедры психологии и социальной педагогики, Чувашский государственный педагогический университет, Чебоксары, Россия (gulnara_biametov@mail.ru).

СЛАВУТСКАЯ ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА – доктор психологических наук, профессор кафедры психологии и социальной педагогики, Чувашский государственный педагогический университет, Чебоксары, Россия (elena@slavutskii.ru).

A. PETROV, G. IVANOVA, E. SLAVUTSKAYA
NEURO NET TRAINING AS INSTRUMENT OF SYSTEM ANALYSIS
OF MULTIDIMENSIONAL PSYCHODYAGNOSTIC DATA

Key words: *artificial neural networks, systems analysis, multidimensional data, psychodiagnostics.*

The use of the apparatus of artificial neural networks (ANN) for the analysis of intra-system links of multidimensional random data is proposed. The approach is based on statistical assessments of the quality to train neural network models: the distribution of the mean square error and the percentage of links recognition. On the example of multidimensional psycho diagnostic data using a direct distribution neural network with a simple architecture, the possibilities of the proposed approach are shown. Hierarchical analysis of the indirect, non-linear links of the experimental data is based on the consistent exclusion of data from the procedure of the neural network training. Advantages over traditional factor and cluster analysis are discussed.

References

1. Abrukov V.S., Nikolaeva Y.G. *Kolichestvennii i kachestvennii metodi: soedinayem i vlastyem* [Quantitative and qualitative methods: we unite and rule]. *Sotsiologicheskie issledovania* [Sociological research], 2010, no. 1, pp. 142–145.
2. Abrukov V.S., Efremov L.G., Kosheev I.G. *Vozможности sozdania sistemi prinyatia reshenii i upravleniya vuzom s pomosh'yu platformi deductor* [Opportunities to create a decision support and management system with the help of the analytic platform deductor]. *Integratsia obrazovania* [Integration of education], 2013, no. 1(70), pp. 17–23.
3. Volkova V.N., Denisov A.A. *Osnovi teorii sistem i sistemnogo analiza* [Fundamentals of systems theory and systems analysis]. St. Petersburg, 1997, 510 p.
4. Iberla K. *Factorny analiz* [Factor analysis]. M.: «Statistics», 1980. 308 p.
5. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskustvennii neironnii seti. Teoria i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaiya liniya – Telecom Publ., 2002, 382 p.
6. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. *Ispolzovanie iskysstvenniih neironnih setei dlya analiza gendernih razlichii mladchih podrostkov* [The use of artificial neural networks for the analysis of gender differences in younger adolescents]. *Psichologicheskie issledovania* [Psychological research], 2012, vol. 5, no. 23, p. 4.
7. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. *Factornii analiz vzaimosvyazi individualno-psihologicheskikh i lichnostnih harakteristik mladchih podrostkov s yrovnem shkolnoi dezadaptatsii* [Factor analysis of the relationship between the individual psychological and personal characteristics of younger adolescents with the level of school disadaptation]. *Ekspериментальная psihologiya* [Experimental Psychology], 2013, vol. 6, no. 4, pp. 40–51.
8. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. *Neirosetevoi analiz vzaimosvyazi verbalnogo i neverbalnogo intellekta mladchih podrostkov* [Neural network analysis of the interrelation between verbal and nonverbal intelligence of younger adolescents]. *Psihologicheskii jurnal* [Psychological journal], 2014, vol. 35, no. 5, pp. 48–56.
9. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Delhi, Publ. by Pearson Education, 2001 (Russ. ed.: *Neironnii seti: polnyi kurs: 2-e izd.* Moscow, Williams Publ., 2006, 1104 p.).
10. Baxt W.G. Complexity, chaos and human physiology: the justification for non-linear neural computational analysis. *Cancer Lett*, 1994, vol. 77, no. 2-3, pp. 85–93.
11. Cattell R.B. *Advanced in Cattellian Personality Theory*. Handbook of Personality. Theory and Research. New York, The Guilford Press, 1990.
12. Hebb D. *Organization of behavior*. New York, Science Edition, 1961.
13. Slonim N., Atwal G.S., Tkachic G., Bialek W. Information-based clustering. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, vol. 102, pp. 18297–18302.

PETROV ANDREY – 4th year Student, Radioelectronics and Automation Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (petrov_rea-11-14@mail.ru).

IVANOVA GULNARA – Post-Graduated Student of Psychology and Social Pedagogic Department, Chuvash State Pedagogical University, Russia, Cheboksary (gulnara_biametov@mail.ru).

SLAVUTSKAYA ELENA – Doctor of Psychological Sciences, Professor of Psychology and Social Pedagogic Department, Chuvash State Pedagogical University, Russia, Cheboksary (elena@slavutskii.ru).

Ссылка на статью: Петров А.Н., Иванова Г.Ф., Славутская Е.В. Обучение нейросети как инструмент системного анализа многомерных данных психодиагностики // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 162–168.

УДК 004.8.023+621.311.22
ББК 32.813

С.И. РОДЗИН

**РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЕ ДИСПЕТЧИРОВАНИЕ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ:
ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ***

Ключевые слова: диспетчирование, оптимизация, потоковый алгоритм, ресурсосбережение, электроэнергетика.

На примере диспетчирования в электроэнергетике рассмотрен перспективный, инспирированный природой подход к решению трудных оптимизационных проблем, связанный с балансировкой электроэнергетических режимов по критерию минимизации расхода топлива с учетом ограничений на мощность и рабочие зоны энергоблоков. Формализована задача ресурсосберегающего диспетчирования и разработан эвристический алгоритм ее решения. Проведены эксперименты для двух различных систем энергоблоков. Эффективность алгоритма сравнивалась с аналогами: роевым, генетическим и биогеографическим алгоритмами. Результаты свидетельствуют о преимуществах разработанного эвристического алгоритма.

Автоматизация проектирования, биоинформатика, диспетчирование, сети и телекоммуникации, транспортная логистика, интеллектуальный анализ данных, финансы и бизнес – вот далеко не полный перечень областей, где имеется широкий круг реальных задач оптимизации, которые затруднительно точно решить в течение разумного времени. Причина в том, что пространство поиска решений растет экспоненциально, в зависимости от размерности задачи, что делает поиск оптимального решения путем полного перебора нереальным для любого компьютера. К тому же постановки оптимизационных задач зачастую содержат данные, которые имеют определенные погрешности, что делает значительные вычислительные затраты для нахождения точного решения неоправданными. Перспективным подходом к решению многих оптимизационных проблем в указанных областях являются эвристические, инспирированные природой алгоритмы, позволяющие найти близкие к оптимальным решения. Эвристические алгоритмы характеризуются такими свойствами, как наличие стратегий, которые направляют процесс поиска решения, а также наличие элементов стохастической оптимизации со случайными переменными. Разработка эвристических алгоритмов бурно развивается последние 30 лет в рамках таких направлений, как искусственный интеллект, мягкие вычисления, математическое программирование, исследование операций, принятие решений.

Многие эвристики используют для решения трудных оптимизационных задач природные метафоры, например, модели эволюции [1], роевой интеллект [5], искусственные нейросети [4], поиск с запретами (табу) [6], генетические алгоритмы [10], миметические и культурные алгоритмы [1], модели биогеографии [8], которые способны достаточно быстро находить решения, близкие к глобальному оптимуму.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00336.

Оптимизация электроэнергетических режимов работы системы по критерию минимизации затрат является одной из основных задач диспетчирования в электроэнергетике. Для достижения этой цели малопригодны классические методы [9]. Основными причинами трудностей здесь являются экспоненциальный рост пространства возможных решений, а также зашумленность целевой функции и невозможность диспетчера «вручную» найти оптимальное решение.

Статья посвящена разработке эвристического алгоритма для решения задачи ресурсосберегающего диспетчирования системы электростанций.

Постановка задачи ресурсосберегающего диспетчирования для системы электростанций, в которую входят n энергоблоков, генерирующих мощности W_i , МВт ($i=1..n$), состоит в следующем. Требуется осуществить загрузку энергоблоков с минимальным расходом топлива V при выполнении заданных эксплуатационных ограничений:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i(W_i) \rightarrow \min,$$

где V_i – расход топлива i -го энергоблока.

Из [3] известна функция, описывающая расход топлива для теплогенераторов: $V_i(W_i) = a_i + b_i W_i + c_i W_i^2$, где a_i , b_i , c_i – некоторые коэффициенты. В [9] рекомендуется прибавить к $V_i(W_i)$ некоторую величину, отражающую сезонный характер энергопотребления:

$$\tilde{V}_i(W_i) = a_i + b_i W_i + c_i W_i^2 + \left| d_i \sin(e_i (W_i^{\min} - W_i)) \right|,$$

где d_i и e_i – коэффициенты, отражающие это сезонное добавление; W_i^{\min} – величина минимальной выходной мощности i -го энергоблока.

Необходимо также учесть ограничения в задаче. Они связаны с условиями энергетического баланса и величиной рабочих зон энергоблоков. Тогда

$$\tilde{V} = \sum_{i=1}^n \tilde{V}_i(W_i) + \lambda_1 \sum_{i=1}^n (W_i - W_{\text{п.т.з}} - W_{\text{потери}}) + \lambda_2 \sum_{j=1}^n x_j^k,$$

где λ_1 и λ_2 – константы-штрафы ($\lambda_1, \lambda_2 > 0$) из-за невыполнения ограничений; $W_{\text{п.т.з}}$ – мощность энергоблока при полной его загрузке; $W_{\text{потери}}$ – суммарные потери передающих сетей; x_j^k – булева переменная, равная

$$x_j^k = \begin{cases} 1, & \text{если ограничения нарушены для } W_j, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Если $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, то ограничения выполняются. Инициализируемые начальные значения констант-штрафов были определены эмпирически и составляли $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 5n$.

Формализуем ограничения в задаче ресурсосберегающего диспетчирования согласно [3].

1. Балансировка мощности

$$\sum_{i=1}^n W_i = W_{\text{п.т.з}} + W_{\text{потери}},$$

причем расчет $W_{\text{потери}}$ производится с помощью симметричной матрицы коэффициентов потерь L порядка $(n \times n)$:

$$W_{\text{потери}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i l_{ij} W_j + \sum_{i=1}^n l_i W_i + l_0,$$

где l_{ij} – элемент матрицы потерь L ; l_i – i -й элемент n -мерного вектора l коэффициентов потерь; l_0 – коэффициент постоянных потерь.

2. Ограничения на минимальную и максимальную выходную мощность, генерируемую i -м энергоблоком:

$$W_i^{\min} \leq W_i \leq W_i^{\max},$$

где W_i^{\min} и W_i^{\max} – минимальная и максимальная выходные мощности i -го энергоблока, соответственно.

3. Ограничения на рабочие зоны энергоблоков W_i :

$$W_i \in \begin{cases} W_i^{\min} \leq W_i \leq W_{i,1}^l, \\ W_{i,l-1}^u \leq W_i \leq W_{i,k}^l, \\ W_{i,m_i}^u \leq W_i \leq W_i^{\max}, \end{cases} \quad k = \overline{2, m_i},$$

где $W_{i,k}^l$ и $W_{i,k}^u$ – нижняя и верхняя границы рабочих зон W_i энергоблока; m_i – число рабочих зон.

Потоковый алгоритм ресурсосберегающего диспетчирования. Предлагаемый алгоритм использует следующую природную метафору. Поток воды в речном водоеме находит почти оптимальный путь из самых низких точек почвы. Поток характеризуется двумя переменными: площадью P ; скоростью s движения в каждый момент времени [9]. Капли воды, объединенные в общий поток, зависят друг от друга и способны найти путь, близкий к оптимальному, с наименьшим сопротивлением.

При известном пункте назначения наилучшим является кратчайший путь, иначе оптимальное решение ищется дискретными шагами с учетом критериев, характеризующих задачу.

Скорость s является нелинейной величиной, обратно пропорциональной площади потока P . Площадь P растет нелинейно. Она обратно пропорциональна времени перехода из текущего местоположения потока к последующему. В свою очередь, зависимость времени от скорости потока s подчиняется линейному закону.

Ясно, что путь с более высоким уровнем почвы является менее предпочтительным, нежели русло с более низким уровнем. Чтобы реализовать такое поведение, в алгоритме используется механизм случайного равномерного распределения.

Граф, состоящий из множества вершин, соединенных дугами, используем для интерпретации эвристического потокового алгоритма. На каждой итерации алгоритма ищется путь на графе, представляющий локально-оптимальное решение \check{Y} , в отличие от глобально-оптимального решения Y^* . Критерием останова алгоритма является максимальное число итераций t_{\max} или достижение оптимального решения Y^* . Эвристический потоковый алгоритм управляется статическими (неизменными в течение всего времени работы алгоритма) и динамическими параметрами (изменяются итерационно).

Предлагаемый эвристический потоковый алгоритм включает следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Инициализируем начальное значение Y^* равным ∞ , начальное число итераций $t = 0$, устанавливается t_{\max} . Скорость потока s обновляется параметрами $a_s = 1$, $b_s = 0,01$, $c_s = 1$. Для обновления площади потока P используются следующие значения параметров: $a_p = 1$, $b_p = 0,01$, $c_p = 1$, а также параметр $r_{\text{лок}} = 0,9$ (положительное число меньше 1) для локального обновления и параметр $r_{\text{глоб}}$ из интервала $[0, 1]$ для глобального обновления (вначале он равен 0,9). Веса дуг графа $P(i, j) = P_0$, а начальная скорость потока равна s_0 .

Шаг 2. Устанавливаем список вершин графа $X_{\text{п.а}} = \emptyset$.

Шаг 3. Рандомно распределяем потоки воды по вершинам графа.

Шаг 4. Обновляем список вершин графа.

Шаг 5. Повторяем 5.1–5.4:

Шаг 5.1. Из вершины i выбираем такую вершину j , в которой выполнены все ограничения задачи и которая не принадлежит $X_{\text{п.а}}$. Выбор осуществляется с помощью вероятности $q_i^{\text{п.а}}(j)$, вычисляемой по формуле:

$$q_i^{\text{п.а}} = \frac{F(P(i, j))}{\sum_{k \in X_{\text{п.а}}} F(P(i, k))},$$

где

$$F(P(i, j)) = \frac{1}{o_i + z(P(i, j))};$$

$$z(P(i, j)) = \begin{cases} P(i, j), & \text{если } \min_{l \in X_{\text{п.а}}} P(i, l) \geq 0, \\ P(i, j) - \min_{l \in X_{\text{п.а}}} P(i, l), & \text{иначе,} \end{cases}$$

с малой константой $o = 0,001$.

Добавляем j в список $X_{\text{п.а}}$, если указанная вероятность максимальна для вершины j .

Шаг 5.2. Для потока из i в j его скорость в момент времени $t + 1$ определяется как

$$s^{\text{п.а}}(t + 1) = s^{\text{п.а}}(t) + \frac{a_s}{b_s} + c_s P^2(i, j),$$

где $s^{\text{п.а}}(t)$ – скорость потока момент времени t .

Шаг 5.3. Для потока из i в j определяем изменение площади:

$$\Delta P(i, j) = \frac{a_p}{b_p + c_p \cdot T^2(i, j; s^{\text{п.а}}(t + 1))},$$

где $T(i, j; s^{\text{п.а}}(t + 1)) = \frac{R(i, j)}{s^{\text{п.а}}(t + 1)}$, а $R(i, j)$ – расстояние между вершинами i, j .

Шаг 5.4. Производим локальное обновление площади потока от вершины i к вершине j $P(i, j)$ и $P^{\text{п.а}}(i, j)$:

$$P(i, j) = (1 - r_{\text{лок}}) \cdot P(i, j) - r_{\text{лок}} \Delta P(i, j),$$

$$P^{\text{п.а}}(i, j) = P^{\text{п.а}}(i, j) + \Delta P(i, j).$$

Шаг 6. Поиск $\check{Y} = \arg \max_{Y} f(Y)$,

где функция $f(Y)$ определяет оценку качества полученного решения.

Шаг 7. Обновляем $P(i, j)$:

$$P(i, j) = (1 + r_{\text{глоб.}})P(i, j) - r_{\text{глоб.}} \frac{1}{n_{\text{лок.}} - 1} P^{\text{п.а}}, \quad \forall (i, j) \in \check{Y},$$

где $n_{\text{лок.}}$ – количество вершин, входящих в путь для решения \check{Y} .

Шаг 8. Обновляем лучшее решение

$$Y^* = \begin{cases} Y^*, & \text{если } f(Y^*) \geq f(\check{Y}), \\ \check{Y}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Шаг 9. $t = t + 1$. Если $t < t_{\text{max}}$, переход к шагу 2.

Шаг 10. Конец работы алгоритма с выводом решения Y^* .

Учитывает или нет предлагаемый алгоритм ограничения задачи?

Результаты экспериментов. Эксперименты с эвристическим потоковым алгоритмом выполнялись в среде MATLAB [2]. В качестве аналогов для сравнения эффективности использовались роевой PSO-алгоритм [5], генетический алгоритм [5] и биогеографический ВВО-алгоритм [8].

Вначале для сравнения была выбрана система из 6 энергоблоков с несколькими десятками линий электропередач. В качестве исходных данных и ограничений были взяты следующие значения:

– диапазон ограничений по мощности $[W_{\text{imin}}, W_{\text{imax}}]$ от [100; 500] (МВт) для 1-го энергоблока и до [50; 120] для 6-го энергоблока;

– диапазон изменений коэффициентов a_i, b_i, c_i для расхода топлива W_i -го энергоблока находится в интервалах [0,0070; 0,0095], [7; 12], [120; 240], соответственно;

– число потоков $n = 6$;

– параметры скорости $a_s = 1, b_s = 0.01, c_s = 1$;

– параметры площади потока $a_p = 1; b_p = 0.01; c_p = 1$;

– параметры $r_{\text{лок.}} = 0.9; r_{\text{глоб.}} = 0.9$;

– $P_0 = 10000; s_0 = 200$;

– $t_{\text{max}} = 100$;

– границы рабочих зон W_i энергоблоков изменялись в интервалах от [350, 380] до [75, 85].

Мощность системы из 6 энергоблоков при полной загрузке $P_{\text{птз}} = 1263$ МВт. Матрица L , вектор l и коэффициент l_0 равны:

$$L = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 1.7 & 1.2 & 0.7 & -0.1 & -0.5 & -0.2 \\ 1.2 & 1.4 & 0.9 & 0.1 & -0.6 & -0.1 \\ 0.7 & 0.9 & 3.1 & 0.0 & -1.0 & -0.6 \\ -0.1 & 0.1 & 0.0 & 2.4 & -0.6 & -0.8 \\ -0.5 & -0.6 & -1.0 & -0.6 & 12.9 & -0.2 \\ -0.2 & -0.1 & -0.6 & -0.8 & -0.2 & 15.0 \end{bmatrix}, \quad l = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0.39 \\ -0.13 \\ 0.71 \\ 0.06 \\ 0.22 \\ 0.66 \end{bmatrix}, \quad l_0 = 0.0056.$$

Сравнение проводилось с известными результатами для роевого, генетического и биогеографического ВВО-алгоритмов. Сравнились минимальное, среднее и максимальное значения целевой функции. Результаты эвристиче-

ского потокового алгоритма свидетельствуют о его преимуществе и устойчивости – среднее квадратичное отклонение у алгоритма за 100 итераций меньше, нежели у конкурирующих алгоритмов.

Среднее время работы эвристического потокового алгоритма для расчета системы из 6 энергоблоков оказалось равным 2,86 с. Это время почти на порядок меньше времени работы роевого и генетического алгоритма. Оно сопоставимо с временем работы биогеографического алгоритма. Для системы из 6 энергоблоков алгоритм сходится к оптимальному решению уже после 50 итераций.

Далее, для сравнения была выбрана система из 20 энергоблоков общей мощностью $W_{\text{пгз}} = 2500$ МВт. Исходные данные и параметры потокового алгоритма выбирались такими же, как и для системы из 6 энергоблоков, за исключением того, что $t_{\text{max}} = 250$. В качестве аналогов для сравнения эффективности также использовались роевой PSO-алгоритм, генетический алгоритм и биогеографический ВВО-алгоритм. Для системы из 20 энергоблоков алгоритм сходится к оптимальному решению уже после 100 итераций.

Выводы. Предложен эвристический потоковый алгоритм решения задачи оптимального диспетчирования системы энергоблоков. Проведены эксперименты для двух различных систем энергоблоков. Эффективность алгоритма сравнивалась с конкурирующими аналогами: роевым, генетическим и биогеографическим алгоритмами. Результаты свидетельствуют о преимуществах разработанного эвристического алгоритма.

Литература

1. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. М.: Физматлит, 2012. 260 с.
2. Курейчик В.М., Родзин С.И. Компьютерный синтез программных агентов и артефактов // Программные продукты и системы. 2004. № 1. С. 23–27.
3. Coelho L.S., Mariani V.C. Improved Differential Evolution Algorithms for Handling Economic Dispatch Optimization with Generator Constraints. *Energy Conversion and Management*, 2007, no. 48, pp. 1631–1639.
4. Da Silva I.N., Nepomuceno L., Bastos T.M. An Efficient Hopfield Network to Solve Economic Dispatch Problems with Transmission System Representation. *Electr. Power Energ. System.*, 2004, no. 26(9), pp. 733–738.
5. Gaing Z.-L. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 1187–1195.
6. Lin W.M., Chen F.S., Tsay M.T. An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima. *IEEE Trans. on Power System*, 2002, no. 17(1), pp. 108–112.
7. Rayapudi S.R. An Intelligent Water Drop Algorithm for Solving Economic Load Dispatch Problem. *Int. Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2011, no. 5(1), pp. 43–49.
8. Rodzin S., Rodzina O. Effectiveness evaluation of memetics and biogeography algorithms using benchmark and trans computational tasks of combinatorial optimization. Proc. of the First Int. Scientific Conf. «Intelligent Information Technologies for Industry» (ИИТ'16), vol. 1, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, pp. 463–475.
9. Rodzin S.I. Smart Dispatching and Metaheuristic Swarm Flow Algorithm. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 109–115.
10. Walters D.C., Sheble G.B. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading. *IEEE Trans. on Power System*, 1993, no. 8(3), pp. 1325–1332.

РОДЗИН СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ – кандидат технических наук, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ, Южный федеральный университет, Россия, Таганрог (srodzin@sfnedu.ru).

S. RODZIN

**RESOURCE SAVING DISPATCHING IN ELECTRIC POWER INDUSTRY:
HEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHM**

Key words: *dispatching, optimization, streaming algorithm, recourse saving, power engineering.*

Dispatching in electric power industry is considered to be an example of promising and inspired by nature approach to solve complicated optimization problems, connected with balancing of power engineering modes to minimize fuel consumption taking into account power limits and operating zones of power unit. The objective of resource saving dispatching is formalized and heuristic algorithm to solve it is developed. Experiments for two power units of different systems are carried out. Efficiency of the algorithm was compared with analogs: crooked, genetic and biogeography based algorithms. The results justify advantages of the developed heuristic algorithm.

References

1. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. *Teoriya evolyutsionnykh vyichisleniy* [Theory of Evolutionary Computation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012, 260 p.
2. Kureychik V.M., Rodzin S.I. *Kompyuternyi sintez programnykh agentov i artefaktov* [Computer synthesis of software agents and artifacts]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2004, no. 1. pp. 23–27.
3. Coelho L.S., Mariani V.C. Improved Differential Evolution Algorithms for Handling Economic Dispatch Optimization with Generator Constraints. *Energy Conversion and Management*, 2007, no. 48, pp. 1631–1639.
4. Da Silva I.N., Nepomuceno L., Bastos T.M. An Efficient Hopfield Network to Solve Economic Dispatch Problems with Transmission System Representation. *Electr. Power Energ. System.*, 2004, no. 26(9), pp. 733–738.
5. Gaing Z.-L. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 1187–1195.
6. Lin W.M., Chen F.S., Tsay M.T. An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima. *IEEE Trans. on Power System*, 2002, no. 17(1), pp. 108–112.
7. Rayapudi S.R. An Intelligent Water Drop Algorithm for Solving Economic Load Dispatch Problem. *Int. Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2011, no. 5(1), pp. 43–49.
8. Rodzin S., Rodzina O. Effectiveness evaluation of memetics and biogeography algorithms using benchmark and trans computational tasks of combinatorial optimization. Proc. of the First Int. Scientific Conf. «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'16), vol. 1, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, pp. 463–475.
9. Rodzin S.I. Smart Dispatching and Metaheuristic Swarm Flow Algorithm. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 109–115.
10. Walters D.C., Sheble G.B. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading. *IEEE Trans. on Power System*, 1993, no. 8(3), pp. 1325–1332.

RODZIN SERGEY – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Mathematical Support of Computer Applications, Southern Federal University, Russia, Taganrog (srodzin@sfnu.ru).

Ссылка на статью: *Родзин С.И.* Ресурсосберегающее диспетчирование в электроэнергетике: эвристический алгоритм оптимизации // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 169–175.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Чувашского университета» просит авторов руководствоваться нижеприведенными правилами.

1. Авторские оригиналы представляются на бумажном и электронном носителе. Авторский текстовый оригинал должен быть пронумерован и подписан авторами на титульном листе с указанием даты.

2. К статьям, направляемым в редакцию, прилагаются:

- 1) *заявление автора на имя главного редактора;*
- 2) *анкета авторов;*
- 3) *две внешние рецензии;*
- 4) *ходатайство научного руководителя;*
- 5) *экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.*

3. Авторы должны указать рубрику, в которой следует поместить статью.

4. Оформление статьи:

- 1) *классификационные индексы Универсальной десятичной классификации (УДК), Библиотечно-библиографического классификатора (ББК);*
- 2) *инициалы и фамилия авторов;*
- 3) *название статьи;*
- 4) *ключевые слова;*
- 5) *аннотация статьи;*
- 6) *название статьи, инициалы и фамилия автора на английском языке;*
- 7) *ключевые слова на английском языке;*
- 8) *аннотация на английском языке;*
- 9) *текст статьи;*
- 10) *пристатейный библиографический список;*
- 11) *транслитерированный библиографический список References;*
- 11) *сведения об авторе.*

Авторские оригиналы подготавливаются с помощью компьютера в среде Microsoft Word (файлы типа doc). Формат бумаги А4, поля: справа и слева 4 см, сверху 4,5 см, снизу 5,7 см, от края до верхнего колонтитула 3 см, красная строка 0,75 см. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размера 11 пт через 1 интервал.

Текст статьи представляется в двух экземплярах с приложением файла в электронном виде.

5. Рисунки. Количество рисунков не более 4. На рисунки должны быть ссылки. Рисунки должны быть внедрены в режиме Вставка Объект Рисунок Microsoft Word. Подрисуночные подписи выполняются шрифтом размера 9 пт.

6. Формулы и буквенные обозначения по тексту. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Шрифт для греческих букв – Symbol, для всех остальных – Times New Roman, основной размер 11 пт, крупный индекс 7 пт, мелкий 5 пт.

Латинские буквы набираются курсивом, буквы греческого алфавита и кириллицы – прямым шрифтом, обозначения матриц, векторов, операторов – прямым полужирным шрифтом.

Формулы располагаются по центру страницы. Номер формулы ставится у правого края. Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

При выборе единиц физических величин рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

7. Таблицы. Текст в таблицах набирается шрифтом размером 9 пт, заголовки выделяются полужирным шрифтом. На таблицы должны быть ссылки.

8. Список литературы. Список строится по алфавиту, записи рекомендуется располагать сначала на языке издания, в которое включен список, затем на других языках. Источники набираются шрифтом Times New Roman размера 9 пт. При оформлении списка литературы необходимо руководствоваться ГОСТом Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления».

Ссылки на источники в тексте даются в квадратных скобках, например [1], [1. С. 5].

9. Список References. Транслитерацию русского текста в латиницу следует производить в соответствии со стандартом BSI.

10. Сведения об авторах набираются полужирным шрифтом размера 10 пт *на русском и английском языках в именительном падеже* по следующей форме: *Фамилия, имя, отчество – ученая степень, должность, место работы, страна, город. Контактная информация (e-mail).*

11. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, возвращаются без рассмотрения. Возвращение рукописи автору на доработку не означает, что статья принята к печати. После получения доработанного текста рукопись вновь рассматривается редколлегией. Доработанный текст автор должен вернуть вместе с первоначальным экземпляром статьи, а также ответами на все замечания. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

12. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

13. В одном номере журнала может быть опубликовано, как правило, не более двух статей одного автора, в том числе в соавторстве.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Токмаков Д.А. Электромагнитные моменты магнитного редуктора с обмоткой переменного тока на статоре	5
Ашмарин В.В., Блохинцев А.А. Разработка и исследование шунтирующего разрядника для мощных емкостных накопителей энергии, работающих на малоиндуктивные электродинамические устройства	14
Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ	24
Горбачевский Н.И., Сидоров С.Н., Ганиев Р.Н. Активный корректор коэффициента мощности на основе демпфирующего конденсатора	36
Нгуен Конг Там Влияние высоты магнитов на рабочие свойства магнитоэлектрического беспазового вентильного двигателя	44
Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Снижение потерь в трехфазных трансформаторах при выравнивании несимметричной нагрузки	52
Охоткин Г.П. Виртуальный прибор для анализа статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока независимого возбуждения	61
Соколов Н.С., Алексеева Г.Н., Викторова С.С., Смирнова Г.М., Федосеева И.П. Исследование и разработка установки для электрогидравлической обработки бетона буровых свай	69

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Боровик В.С., Зенин М.М., Гатчин Ю.А., Югансон А.Н. К вопросу о безопасности смарт-контрактов	79
Галанина Н.А., Алексеев А.Г., Серебрянников А.В. Вычисление быстрого преобразования Фурье с использованием технологии CUDA	88
Галанина Н.А., Иванова Н.Н. К вопросу об оптимизации синтеза устройств вычислительной техники для цифровой фильтрации в системе счисления в остаточных классах	98
Иваницкий А.Ю., Урусов А.М. Численный анализ метода поточечной невязки для решения прямой и двойственной неустойчивой задачи линейного программирования с приближенными данными	108
Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Дикий Д.И., Артемьева В.Д., Сидоркина И.Г. Информационная безопасность в системе «Интернет вещей»	117

Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Федосовский М.Е., Югансон А.Н. Моделирование инфекционного процесса при обучении студентов работе с системой компьютерной алгебры Maple	129
Муравьева Е.А., Радакина Д.С., Шарипов М.И., Еникеева Э.Р., Артыкаева Э.М. Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров.....	137
Назаров И.Г., Сулов Д.В., Никаноров М.В., Славутский Л.А. Комплекс обеспечения контролируемой деградации системы управления энергообъекта при киберинцидентах	146
Новожилова Н.В., Федотов В.Х. Одномерные модели сложного поведения простых динамических систем.....	153
Петров А.Н., Иванова Г.Ф., Славутская Е.В. Обучение нейросети как инструмент системного анализа многомерных данных психодиагностики	162
Родзин С.И. Ресурсосберегающее диспетчирование в электроэнергетике: эвристический алгоритм оптимизации.....	169
Правила для авторов	176

CONTENTS

ELECTRICAL TECHNOLOGY AND POWER ENGINEERING

Afanasyev A., Efimov V., Tokmakov D.
ELECTROMAGNETIC MOMENTS OF MAGNETIC GEARBOX
WITH ALTERNATING CURRENT WINDING ON STATOR..... 5

Ashmarin V., Blokhintsev A.
DEVELOPMENT AND STUDY OF SHUNT DISCHARGER
FOR HIGH-POWER CAPACITIVE ENERGY STORAGE
TO RUN LOW-INDUCTANCE ELECTROMAGNETIC APPARATUSES 14

Bulychev A., Dementiy Yu., Kozlov V.
FULL EARTH CURRENT COMPENSATION IN 6-10 kV NETWORK..... 24

Gorbachevsky N., Sidorov S., Ganiev R.
ACTIVE POWER COEFFICIENT CORRECTOR
ON BASIS OF DAMPING CAPACITOR 36

Nguyen Cong Tam
INFLUENCE OF HEIGHT OF MAGNETS ON WORKING PROPERTIES
OF MAGNETIC-ELECTRIC SLOT-LESS VALVE MOTOR 44

Orlov A., Volkov S., Savelyev A.
REDUCTION OF POWER LOSS IN THREE-PHASE TRANSFORMERS
AT BALANCING OF NONSYMMETRICAL LOAD 52

Okhotkin G.
VIRTUAL INSTRUMENT TO ANALYZE STATIC
AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DC MOTORS
OF INDEPENDENT EXCITEMENT..... 61

Sokolov N., Alekseeva G., Viktorova S., Smirnova G., Fedoseeva I.
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INSTALLATION
FOR ELECTROHYDRAULIC TREATMENT OF DRILLING PILES CONCRETE 69

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Borovik V., Zenin M., Gatchin Yu., Iuganson A.
TO THE SECURITY ISSUE OF SMART CONTRACTS..... 79

Galanina N., Alekseev A., Serebryannikov A.
CALCULATION OF FOURIER TRANSFORM USING CUDA TECHNOLOGY..... 88

Galanina N., Ivanova N.
TO THE QUESTION OF OPTIMIZATION OF SYNTHESIS
OF COMPUTERS DEVICES FOR DIGITAL FILTERING
OF RESIDUE NUMBER SYSTEM 98

Ivanitskiy A., Urusov A.
NUMERICAL ANALYSES OF POINTWISE RESIDUAL METHOD
TO SOLVE MAIN AND DUAL ILL-POSED LINEAR PROGRAMMING PROBLEMS
WITH APPROXIMATE DATA 108

<i>Korobeynikov A., Grishentsev A., Dikii D., Artemyeva V., Sidorkina I.</i> INFORMATION SECURITY IN THE SYSTEM «INTERNET OF THINGS»	117
<i>Korobeynikov A., Grishentsev A., Fedosovsky M., Iuganson A.</i> MODELING OF INFECTIOUS PROCESS TO TRAIN STUDENTS IN MAPLE COMPUTER ALGEBRA SYSTEM STUDYING.....	129
<i>Muravyova E., Radakina D., Sharipov M., Enikeeva E., Artykaeva E.</i> DEVELOPMENT OF METHOD OF FUZZY REGULATOR ADAPTATION TO REGULATE FUZZY TECHNOLOGICAL PARAMETERS	137
<i>Nazarov I., Suslov D., Nikandrov M., Slavutskii L.</i> COMPLEX TO PROVIDE CONTROLLED DEGRADATION OF ELECTRICAL FACILITY CONTROL SYSTEM AT CYBER INCIDENTS	146
<i>Novozhilova N., Fedotov V.</i> ONE-DIMENSIONAL MODELS OF COMPLICATED BEHAVIOR OF SIMPLE DYNAMIC SYSTEMS.....	153
<i>Petrov A., Ivanova G., Slavutskaya E.</i> NEURO NET TRAINING AS INSTRUMENT OF SYSTEM ANALYSIS OF MULTIDIMENSIONAL PSYCHODIAGNOSTIC DATA	162
<i>Rodzin S.</i> RESOURCE SAVING DISPATCHING IN ELECTRIC POWER INDUSTRY: HEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHM.....	169
RULES FOR THE AUTHORS	176

ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Технические науки № 1 2018

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 25.01.18. Подписано в печать 22.03.18. Выход в свет 30.03.18.
Формат 70×100/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,7. Уч.-изд. л. 13,5.
Тираж 200 экз. Заказ № 324. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя
428015, Чебоксары, Московский просп., 15

Типография Чувашского университета
428015, Чебоксары, Московский просп., 15