

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-83:681.532.55

**А. В. БУБНОВ  
В. А. ЕМАШОВ  
А. Н. ЧУДИНОВ**

Омский государственный  
технический университет

## **ОБОБЩЕНИЕ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОШИБКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

В статье предложен улучшенный метод измерения ошибки по частоте вращения синхронно-синфазного электропривода, а также структура устройства для его реализации. Метод основан на обработке импульсов подстроечной частоты в целях определения моментов обсчета ошибки по частоте вращения, при этом для определения ошибок используются импульсы высокочастотного кварцевого генератора. Структура устройства построена на базе трех делителей частоты, импульсном частотно-фазовом дискриминаторе, кварцевом генераторе и микроконтроллере.

**Ключевые слова:** ошибка по частоте вращения, фазовая автоподстройка частоты вращения, электропривод.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-08-00325.*

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) используются для построения сканирующих обзорно-поисковых систем. Это объясняется высокой точностью и быстродействием ССЭ, а также широким диапазоном регулирования по угловой скорости [1].

ССЭ базируется на широко используемом частотном принципе управления [2–7]. ССЭ может быть представлен в виде двухконтурной схемы, показанной на рис. 1. Для организации внутреннего контура синхронизации используется принцип фазовой автопод-

стройки частоты (ФАПЧ), широко применяемый при построении систем электропривода [7–15]. Принцип ФАПЧ обеспечивает астатизм по частоте вращения [1].

Контур синхронизации — контур фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) — содержит логическое устройство сравнения ЛУС, корректирующее устройство КУ, электродвигатель ЭД и импульсный датчик частоты ИДЧ.

ЛУС обеспечивает три режима управления приводом: ускорение с максимальным ускорением  $\epsilon_m$  при

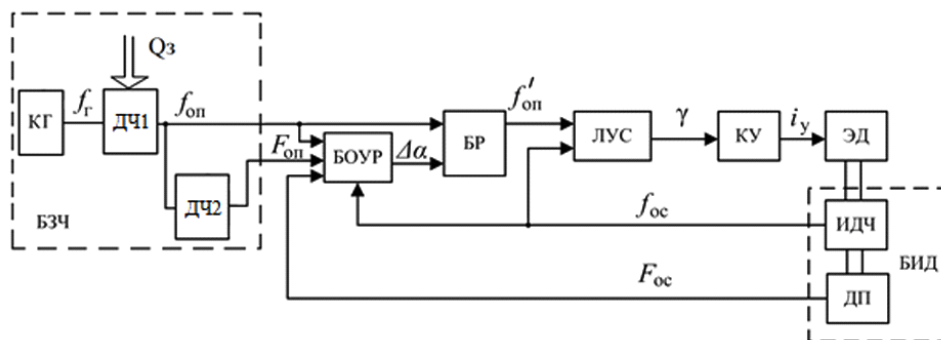


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

$f_{оп} > f_{ос}$  (где  $f_{оп}$  — опорная частота,  $f_{ос}$  — частота следования импульсов в канале обратной связи, поступающая с ИДЧ), режим фазового сравнения (пропорциональный) при  $f_{оп} \approx f_{ос}$  и режим торможения при  $f_{оп} < f_{ос}$ . Система управления разомкнута в режимах разгона и торможения и замкнута в пропорциональном режиме. Для сравнения опорной частоты и частоты обратной связи в качестве ЛУС обычно применяют импульсные частотно-фазовые дискриминаторы (ИЧФД) [12–15]. Благодаря простоте реализации, наиболее широко используется алгоритм работы ИЧФД, основанный на изменении режима работы ИЧФД при поступлении двух или более импульсов опорной частоты между двумя соседними импульсами частоты обратной связи или наоборот [16].

Начальная установка угла поворота вала электродвигателя производится с помощью внешнего контура фазирования. Предустановка угла поворота соотносится с импульсами угловой привязки  $F_{оп}$  и служит для установки сканирующего элемента узла оптико-механической развертки в начальное положение — начало строки. Контур фазирования включает в себя блок определения углового рассогласования БОУР, блок регулирования БР, контур ФАПЧВ и датчик положения ДП.

Оба контура управляются с помощью блока задания частоты БЗЧ, который генерирует частоты  $f_{оп}$  и  $F_{оп}$ . БЗЧ содержит кварцевый генератор КГ и два делителя частоты ДЧ1 и ДЧ2. Частота  $f_{оп} = f_1/Q_3$  задает угловую скорость электропривода согласно выражению

$$\omega_{оп} = f_{оп} \varphi_0, \quad (1)$$

где  $\varphi_0 = 2\pi/z$  ( $z$  — количество меток ИДЧ),  $f_1$  — частота КГ, а  $Q_3$  — код задания для ДЧ1. Частота  $F_{оп}$  задается выражением  $F_{оп} = m f_{оп}/z$ , где  $m$  — количество граней призмы.

Существует много способов регулирования ССЭ. Большинство основано на последовательной стыковке во времени процессов синхронизации и фазирования, причем сначала осуществляют синхронизацию, потом — фазирование [17–19]. Этот принцип характеризуется низким быстродействием привода, которое является причиной больших потерь информации при сканировании [1]. Другое следствие низкого быстродействия — дополнительные энергетические потери, ещё одна большая проблема электромеханики [20].

Некоторые известные методы регулирования ССЭ основаны на организации процесса фазирования до синхронизации, их основным достоинством является улучшение динамических характеристик ССЭ [18]. Но для таких методов необходимо с вы-

сокой точностью определять ошибку по частоте вращения  $\Delta\omega$  [21], что можно обеспечивать использованием методов косвенного определения  $\Delta\omega$ , основанных на определении временного интервала  $\Delta t$ , за который угловое рассогласование  $\Delta\alpha$  электропривода изменится на известную заранее величину, путем логической обработки последовательности импульсов сравниваемых ЛУС частот —  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$  [22]. Интервал  $\Delta t$  должен выбираться автоматически в соответствии со скоростью электропривода.

Ещё одной особенностью высокоточного регулирования ССЭ является необходимость поддержания относительной ошибки регулирования угловой скорости в пределах  $\pm 0,02\%$  [23].

В связи с вышеописанными положениями можно выделить две цели данной статьи:

- обобщение известных методов определения ошибки по частоте вращения;
- разработка структуры устройства для реализации улучшенного метода определения ошибки по частоте вращения.

В работе [24] описаны два метода определения ошибки по частоте вращения  $\Delta\omega$ .

Первый метод заключается на подсчете количества совпадений импульсов  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ . Для его описания обозначим  $\tau_{оп}$  длительность импульсов  $f_{оп}$  и  $\tau_{ос}$  — длительность импульсов  $f_{ос}$ . Подсчет начинается с момента времени  $t_n$  до момента  $t_k$  первого несовпадения импульсов  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ . При этом  $t_n - t_k = \Delta t$ ,  $N_c$  — количество импульсов на интервале времени  $\Delta t$ ,  $\Delta\omega_n$ ,  $\Delta\omega_k$  — значения ошибки по угловой скорости в моменты времени  $t_n$  и  $t_k$  соответственно.

Тогда для режима ускорения ССЭ ( $\varepsilon = \varepsilon_m$ )  $\Delta\omega_k$  находят по выражению [24]

$$|\Delta\omega_k| = \left| (2\varphi_0 \sigma - \varepsilon_m N_c^2 T_{оп}^2) / (2N_c T_{оп}) \right|, \quad (2)$$

где  $\sigma = (\tau_{оп} - \tau_{ос}) / T_{оп}$ ,  $T_{оп}$  — период частоты  $f_{оп}$ .

Следующий метод более точен [1, 24]. Он основан на подсчете количества  $N_{оп}$  импульсов частоты  $f_{оп}$  между двумя последовательными моментами времени, в которые нуль или два и более импульсов частоты обратной связи приходят между двумя соседними импульсами опорной частоты (ситуации «0/2» и «2/2»). Величина фазового рассогласования импульсов частот в расчетные моменты времени равна  $\Delta\alpha = \varphi_0/2 + n\varphi_0$ . Для данного метода  $\Delta\omega_k$  находят по выражению [1, 24]

$$|\Delta\omega_k| = \left| (2\varphi_0 - \varepsilon_m N_{оп}^2 T_{оп}^2) / (2N_{оп} T_{оп}) \right|. \quad (3)$$

В данном методе для задания опорного сигнала используется поделенная в соответствии с кодом задания частота КГ  $f_1$ . Представляется наиболее

рациональным использовать для определения  $\Delta\omega_k$  преобразованный сигнал  $f_r$ . Тогда ошибку по частоте вращения можно найти по формуле

$$|\Delta\omega_k| = |(2\varphi_0 - \varepsilon_m N_r^2 T_r^2) / (2N_r T_r)|, \quad (4)$$

где  $T_r = 1/f_r$ , а  $N_r$  — количество импульсов  $f_r$  между двумя последовательными моментами времени, в которые нуль или два и более импульсов частоты обратной связи приходят между двумя соседними импульсами опорной частоты.

Использование частоты КГ для определения ошибки устраняет зависимость метода от текущей угловой скорости, к тому же этот метод более точен, потому что  $f_r \gg f_{оп}$ .

Как показано в работах [1, 16], на ранних этапах режимов насыщения ИЧФД значение  $\Delta\omega$  подсчитывается недостаточно точно. Но погрешность снижается по мере того, как значение ошибки по скорости приближается к нулю. В работе [16] был сделан вывод о том, что косвенные методы определения ошибки по скорости реализуемы только при условии, что заданная угловая скорость ССЭ близка к реальной  $\omega$ . Это условие делает невозможным применение косвенных методов измерения ошибки по частоте вращения, описанных в работе [18].

В работе [16] описывается метод вычисления ошибки по угловой скорости ССЭ на ранних стадиях разгона и торможения. Метод заключается в формировании в системе дополнительной подстроечной опорной частоты  $f_A$  с целью удержания отношения

$$\omega/\omega_A \geq 0,98,$$

где  $\omega_A = 2f_A \pi/z$ , а  $\omega$  — измеренное значение угловой скорости.

В то же время в этом методе используется деление частоты КГ на заданный коэффициент с целью генерации импульсов, которые подсчитываются между ситуациями «0/2» и «2/2» для частот  $f_A$  и  $f_{oc}$ .

Исходя из представленного выше анализа, предлагается в данном методе использовать частоту  $f_r$  для подсчета количества импульсов  $N_r$  между ситуациями «0/2» и «2/2» для частот  $f_A$  и  $f_{oc}$ . Таким образом, сохранится возможность автоматически определять моменты  $t_n$  и  $t_k$  для частот  $f_A$  и  $f_{oc}$ . Кроме того, увеличится точность вычисления ошибки по угловой скорости путем подсчета импульсов  $f_r$ . В этом случае можно представить выражение (4) в виде

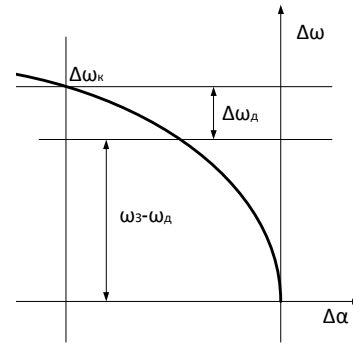


Рис. 2. Фазовый портрет разгона электропривода

$$|\Delta\omega_A| = |(2\varphi_0 - \varepsilon_m N_r^2 T_r^2) / (2N_r T_r)|, \quad (5)$$

где  $\Delta\omega_A$  (рис. 2) — разница между  $\omega_A$  и  $\omega$ :

$$\Delta\omega_A = \omega - \omega_A. \quad (6)$$

Тогда  $\Delta\omega_k$  можно найти по формуле

$$\Delta\omega_k = (\omega_z - \omega_A) + \Delta\omega_A. \quad (7)$$

С учетом (1), (5–7),  $\Delta\omega_k$  можно выразить

$$\Delta\omega_k = f_r \varphi_0 \left( \frac{1}{Q_3} - \frac{1}{Q_A} \right) + (2\varphi_0 - \varepsilon_m N_r^2 T_r^2) / (2N_r T_r), \quad (8)$$

где  $Q_A$  — код задания подстроечной частоты для дополнительного делителя частоты ДЧЗ (рис. 3).

Описанный выше расчет  $\Delta\omega_k$  повторяется каждый раз, когда два или более последовательных импульса одной из сравниваемых частот приходят между двумя соседними импульсами другой частоты до тех пор, пока  $\omega < \omega_A$ . При этом, значение  $f_A$  необходимо изменить на значение  $\Delta f_A = f(\Delta\omega)$  в тот момент, когда  $\omega$  достигнет значения  $\omega_A$ , чтобы удерживать относительную погрешность измерения ошибки по частоте вращения в заданных пределах [23].

Для реализации данного метода предлагается структура устройства (рис. 3).

Устройство включает в себя: БЗЧ — блок задания частоты с КГ и делителями ДЧ1 и ДЧ2, делитель частоты ДЧЗ, ИЧФД, БПИ — блок подсчета импульсов, МК — микроконтроллер. КГ генерирует частоту  $f_r$

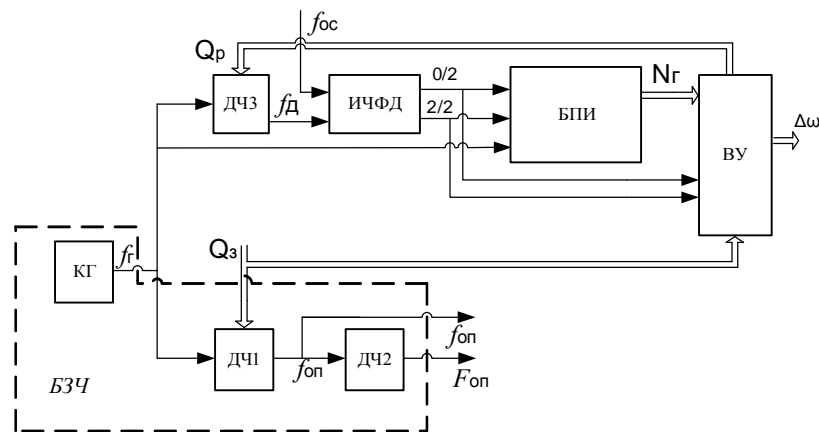


Рис. 3. Функциональная схема устройства косвенного определителя ошибки по угловой скорости заданной точности

которая преобразуется делителями ДЧ1 и ДЧ2 в частоты  $f_{оп}$  и  $F_{оп}$ . ДЧ1 управляется кодом задания  $Q_3$ , формируемым с внешнего устройства. Сигнал  $f_A$  формируется на выходе ДЧ3, управляемого кодом  $Q_p$ , который формируется с помощью МК. ИЧФД анализирует сигналы  $f_A$  и  $f_{ос}$  и на основе их обработки формирует импульсы для ситуаций «0/2» или «2/2». БПИ подсчитывает количество  $N_r$  импульсов частоты  $f_r$  между двумя соседними ситуациями «0/2» или «2/2» и передает код в МК, где подсчитывается значение  $\Delta\omega_k$  согласно выражению (8) и формируется новый код задания  $Q_p$ . Для высокоскоростной обработки этих значений рекомендуется использовать DSP-процессоры, а для постройки ИЧФД — FPGA-устройства [12, 25].

Предложенная структура позволит определять ошибки по частоте вращения ССЭ с высокой точностью на ранних стадиях разгона и торможения, что, в свою очередь, позволит сделать более эффективными способы регулирования ССЭ.

Кроме того, указанный метод расчёта ошибки по частоте вращения видится перспективным для развития адаптивных систем управления и систем, работающих в скользких режимах [26–28].

#### Библиографический список

1. Bubnov, A. V. Measurement methods for angular acceleration and errors for angular velocity of synchrophase electric drive / A. V. Bubnov, V. A. Emashov, A. N. Chudinov, A. N. Alpysova // *Measurement Techniques*. — 2014. — № 57. — Т. 8. — С. 860–865. DOI: 10.1007/s11018-014-0549-2.
2. Meersuk, W. A PSPWM with variable frequency control for a two-output three-level series resonant inverter / W. Meersuk, A. Jangwanitert, W. Suwan-ngam // 12th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). — Hua Hin, Thailand, 2015. DOI: 10.1109/ECTICon.2015.7207028.
3. Maklakov, A. S. EMC evaluation of three level NPC converter based on space vector PWM / A. S. Maklakov, A. A. Radionov // *Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*. — Saint-Petersburg, 2015. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102269.
4. Ramirez-Figueroa, F. D. Model based control of a PMSM with variable switching frequency and torque ripple control / F. D. Ramirez-Figueroa, M. Pacas // *Industrial Electronics Society, IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE*. — Yokohama, Japan, 2015. — С. 1418–1423. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392299.
5. Demytyev, Y. N. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor / Y. N. Demytyev, N. V. Kojain, A. D. Bragin, L. S. Udut // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. — Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147008.
6. Radionov, A. A. New control method of back to back converter / A. A. Radionov, A. S. Maklakov, E. A. Karyakina // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. — Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147135.
7. Best, R. E. Phase-locked loop design, simulation & applications. — Taipei, Taiwan : McGraw-Hill, 2003. — 293 с. — Режим доступа : <https://accessengineeringlibrary.com/browse/phase-locked-loops-design-simulation-and-applications-sixth-edition> (дата обращения: 10.09.2016).
8. Hsieh, G. C. Phase-locked loop techniques. A survey / G. C. Hsieh, J. C. Hung // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 1996. — № 43. — Т. 6. — С. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547.
9. Sen, P. C. Stability analysis of induction motor drives using phase-locked loop control system / P. C. Sen, M. L. Macdonald // *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*. — 1980. — № IECI-27. — Т. 3. — С. 147–155. DOI: 10.1109/TIECI.1980.351668.
10. Prasad, E. S. N. High-Performance DC Motor Drive with Phase-Locked Loop Regulation / E. S. N. Prasad, G. K. Dubey, S. S. Prabhu // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1985. — № IA-21. — Т. 1. — С. 192–201. DOI: 10.1109/TIA.1985.349680.
11. Pan, C.-T. A Phase-Locked-Loop-Assisted Internal Model Adjustable-Speed Controller for BLDC Motors / C.-T. Pan, E. Fang // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2008. — № 55. — Т. 9. — С. 3415–3425. DOI: 10.1109/TIE.2008.922600.
12. Wu, Y. PLL Control System Based on FPGA for Brushless DC Motor / Y. Wu, H. Zhao, N. Zhao // *Proc. of the 33rd Chinese Control Conf.* — Nanjing, China, 2014. — С. 7897–7902. DOI: 10.1109/ChiC.2014.6896319. — Режим доступа : <http://oversea.cnki.net/Kcms/detail/detail.aspx?filename=KZLL201407005225&dbcode=IPFD&dbname=IPFDTEMP> (дата обращения: 10.09.2016).
13. Zhang, J. Phase-Locked Loop in Constant Speed Control for the Flywheel Motor / J. Zhang, H. Zhao, K. Ma // *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*. — 2012. — № 129. — С. 323–330. DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0\_45.
14. Feng, K. Modeling and Bifurcation Research of Phase-Locked Loop Speed Control of Induction Motor Drive / K. Feng, C. C. Chan, Wu Jie, G. Shuying; Q. Shouzhi // *Industrial Electronics Society 26th Annual Conference of the IEEE*. — Aichi, Japan, 2000. — С. 2327–2333. DOI: 10.1109/IECON.2000.972361.
15. Xue, F. Passivity-Based Control for Phase-Locked Loop Induction Motor Drive / F. Xue // *IEEE Int. Symp. on Ind. Electron. Proc.* — Pusan, Korea, 2001. DOI: 10.1109/ISIE.2001.931636. — Режим доступа : <http://ieeexplore.ieee.org/document/931636/> (дата обращения: 10.09.2016).
16. Bubnov, A. V. Iterative Method of Measurement with a Given Accuracy for Angular Velocity Errors / A. V. Bubnov, V. A. Emashov, A. N. Chudinov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. — Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147052.
17. Парамонова, А. А. Особенности построения электропривода сканирующего устройства с цифровым контуром фазовой синхронизации скорости / А. А. Парамонова, В. С. Ивахно // *Известия Тульского государственного ун-та. Технические науки*. — 2012. — № 11-1. — С. 222–228.
18. Bubnov, A. V. The Methods of Preliminary Phasing Adjustment of the Rotor Speed and Position Control Electric Drive / A. V. Bubnov, V. A. Emashov, A. N. Chudinov // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. — Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005648.
19. Bubnov, A. V. Methods of Phasing Electric Drive with Phase Lock / A. V. Bubnov, T. A. Bubnova // *Russian Electrical Engineering*. — 2010. — № 81. — Т. 5. — С. 221–226. DOI: 10.3103/S106837121005001.
20. Vinin, A. D. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train / A. D. Vilnin, S. N. Kladiev, B. I. Pyakillya // *The 2nd Int. Youth Forum "Smart Grids", MATEC Web of Conf.* — Tomsk, Russia, 2014. DOI: 10.1051/mateconf/20141901040.
21. Brock, S. New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives / S. Brock, K. Zawirski // 38th Ann. Conf. on IEEE Ind. Electron. Soc. — Montreal, Canada, 2012. — С. 6291–6296. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389020.
22. Incze, I. I. Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation / I. I. Incze, A. Negrea, M. Imecs, C. Szabo // *Acta Universitatis Sapientiae. — Electrical and Mechanical Engineering*. — 2010. — № 2. — С. 27–39. — Режим доступа : <http://www.acta.sapientia.ro/acta-emeng/C2/emeng2-3.pdf> (дата обращения: 10.09.2016).
23. Veselov, O. V. High-Quality Microprocessor System for Position, Velocity, and Acceleration Measurements of Electric Drives / O. V. Veselov, A. V. Eremin, A. O. Veselov, A. N. Ni-

kashkin // Measurement Techniques. — 1999. — № 42. — Т. 4. — С. 383—339. DOI: 10.1007/BF02504401.

24. Бубнов, А. В. Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией / А. В. Бубнов, А. Н. Чудинов, В. А. Емашов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2011. — № 5. — С. 46—49.

25. Hong, S. The Research on Adaptive Fuzzy Control Systems of Brushless DC Motors Based on DSP / S. Hong, Z. Xiaohui, L. Ming // Int. Journal of Control and Automation. — 2014. — № 9. — Т. 3. — С. 257—364. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.3.33.

26. Maklakov, A. S. Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial smart grid / A. S. Maklakov, A. A. Radionov // 12th Int. Conf. on Actual Problems of Electron. Instrument Eng. — Novosibirsk, Russia, 2014. — С. 770—774. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040790.

27. Lanza, P. T. Improved acquisition in a phase-locked loop using sliding mode control techniques / P. T. Lanza, Y. B. Shtessel, J. L. Stensby // Journal of the Franklin Institute. — 2015. — № 352 (10). — С. 4188—4204. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.06.001.

28. Radionov, A. A. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand / A. A. Radionov, A. S. Maklakov, V. R. Ga-

siyarov // Proc. of 2014 Int. Conf. on Mech. Eng., Automation and Control Syst. — Tomsk, Russia, 2014. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986842.

**БУБНОВ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электрической техники.

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

**ЕМАШОВ Василий Алексеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: emashov@omgtu.ru

**ЧУДИНОВ Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: chudinov\_al@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.10.2016 г.

© А. В. Бубнов, В. А. Емашов, А. Н. Чудинов

УДК 62-83:681.532.55

**В. Р. ВЕДРУЧЕНКО  
В. В. КРАЙНОВ  
Е. С. ЛАЗАРЕВ  
П. В. ЛИТВИНОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения

## О ВЫБОРЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДИЗЕЛЯ С НАДДУВОМ ПРИ РАБОТЕ НА МАЛЫХ НАГРУЗКАХ И ХОЛОСТОМ ХОДУ

Выполнен теоретический анализ расчетных и опытных соотношений по определению характеристик турбокомпрессоров для дизелей транспортного назначения. Приведена методика выбора и расчета основных показателей дизеля и газотурбоагнетателя с учетом режима работы двигателя. Сформированы методы и технические решения, направленные на экономичную работу дизелей с турбонаддувом в режимах малых нагрузок и холостом ходу.

**Ключевые слова:** наддув, холостой ход двигателя, характеристики турбоагнетателя и дизеля, плотность и давление воздушного заряда, цикловая подача топлива, экономичность, тепловая напряженность деталей двигателя.

**Введение.** Тепловозные и судовые дизели с наддувом в эксплуатации работают на полной мощности не более 30—60 % от всего времени работы [1, 2]. Остальная часть времени работы приходится на малые нагрузки, холостой ход и переменные режимы. Длительность работы на режимах холостого хода и малых нагрузок достигает 90 % у маневровых и 60 % у магистральных тепловозов. А принятая в отрасли среднеэксплуатационная экономичность работы тепловоза зависит от экономичности работы дизеля на всех режимах [1].

Переход в работе дизеля с наддувом с расчетного режима полной мощности к малым нагрузкам ведет

не только к утрате высокой удельной топливной экономичности, но и к появлению дымления вследствие ухудшения организации рабочего процесса. В результате усиливается нагарообразование, засоряется смазочное масло нагаром и несгоревшим топливом, что приводит к ускорению износа деталей двигателя. Устранение или хотя бы ослабление этих недостатков работы дизелей является не менее важной задачей, чем обеспечение высокой топливной экономичности на режиме номинальной мощности. Особенно это важно для дизелей вспомогательного флота и маневровых тепловозов, где удельный вес затрат на ремонт и техническое обслуживание зани-

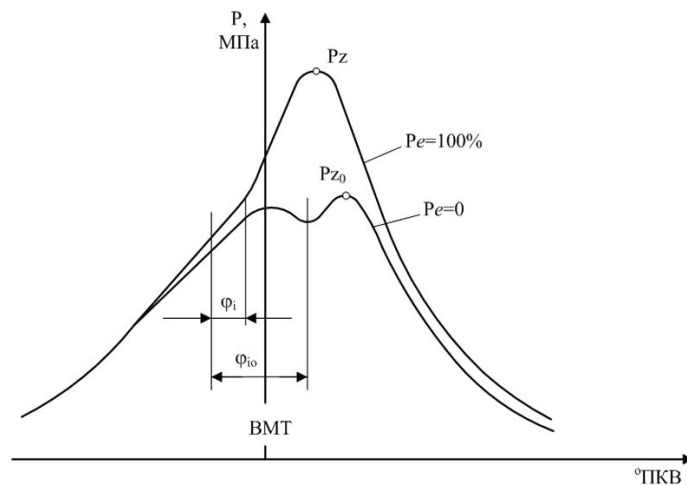


Рис. 1. Изменение давления в цилиндре дизеля (индикаторные диаграммы) при полной нагрузке ( $P_e=100\%$ ) и холостом ходе ( $P_e=0\%$ ) с соответствующими периодами задержки воспламенения  $\varphi_i$  и  $\varphi_{ю}$

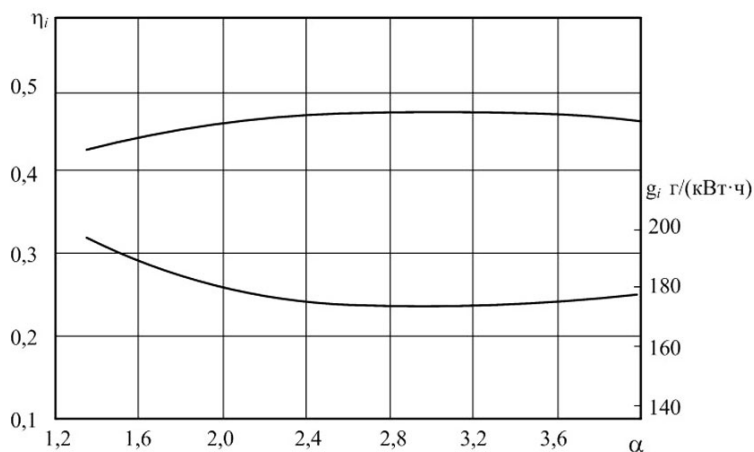


Рис. 2. Изменение индикаторного КПД  $\eta_i$  и удельного индикаторного расхода топлива  $g_i$  в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в быстроходном дизеле с открытой камерой сгорания типа ЯМЗ

мает первое место в расходах на судовое и локомотивное хозяйство.

**Анализ особенностей режимов эксплуатации дизелей и агрегатов наддува.** При переходе дизеля с расчетного режима к малым нагрузкам вследствие резкого нарушения нормальной работы топливной аппаратуры, снижения температуры внутренней поверхности камеры сгорания и температуры наддувочного воздуха ухудшается процесс смесеобразования и сгорания топлива, одновременно растут относительные потери на теплопередачу [1–7]. Появляется недожог и унос топлива и, как следствие, снижается индикаторный КПД до 0,4 и ниже на холостом ходу. С уменьшением нагрузки происходит падение механического КПД двигателя ( $\eta_m$ ), усугубляемое снижением температуры смазочного масла. В итоге резко падает эффективный КПД двигателя ( $\eta_e$ ).

Наиболее чувствительны к ухудшению работы на малых оборотах и нагрузках четырехтактные средне- и высокооборотные двигатели. Поэтому в последних модификациях этих двигателей увеличивают давление впрыскивания на номинальном режиме до 150–200 МПа [8]. Фирма «Катерпиллар» с этой же целью ввела гидравлический привод плун-

жера ТНВД, позволивший сохранять высокое давление впрыскивания на всем диапазоне скоростных режимов [8].

**Предпосылки для формирования методики выбора характеристик турбокомпрессора.** Располагая кривыми механического и индикаторного КПД  $\eta_m$  и  $\eta_i$ , не представляет труда объяснить и изменение эффективного КПД ( $\eta_e = \eta_i \eta_m$ ) [2, 7]. Так, на режиме холостого хода  $\eta_e = 0$ . С увеличением нагрузки  $\eta_e$  достигает максимума при среднем эффективном давлении  $p_e = 70–75\%$  от номинального. К выходу на режим номинальной мощности  $\eta_e$  несколько снижается вследствие снижения индикаторного КПД (рис. 1–2).

На малых нагрузках на устойчивую работу двигателя оказывает влияние техническое состояние топливной аппаратуры, неравномерность подачи топлива по отдельным цилиндрам [6, 7]. Чем выше степень неравномерности подачи, тем больше колебание частоты вращения.

Влияние перечисленных факторов учитывается при регулировке двигателя на режиме полного хода, но с уменьшением частоты вращения неравномерность подачи топлива возрастает тем больше, чем выше износ топливной аппаратуры [5–7].

С другой стороны, в области холостого хода и малых нагрузок имеется значительное снижение температуры стенок камеры сгорания [4, 6].

Известно, что параметры агрегатов газотурбинного наддува, обеспечивающие работу дизельного двигателя, выбирают таким образом, чтобы обеспечить надежную и экономичную работу на номинальном и близком к нему режимах [6–8]. С уменьшением нагрузки или скоростного режима рассогласование между требуемыми и выдаваемыми агрегатами наддува параметрами воздуха значительно возрастает, приводя к существенному ухудшению экономичности.

**Теоретический анализ расчетных соотношений и методика расчета характеристик наддува.** Проанализируем изменение показателей наддува — давления  $p_k$  и плотности воздуха  $\rho_k$ , поступающего в цилиндр двигателя.

Эффективную мощность двигателя можно определить по формуле [8]:

$$N_e = \frac{L_{ц}}{t_{ц}} = \frac{P_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{120} = \frac{P_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30m}, \quad (1)$$

где  $m$  — тактность двигателя (для четырехтактного — 4, двухтактного — 2);  $i$  — число цилиндров;  $n$  — частота вращения коленчатого вала, об/мин;  $V_h$  — рабочий объем цилиндра, см<sup>3</sup>.

Из анализа формулы (1) следует, что при постоянном объеме  $iV_h$  величину  $N_e$  можно увеличить, повышая  $n$  и  $P_e$ . Величина  $P_e$  представляет собой среднее эффективное давление, которое за один такт (ход поршня) совершает работу, равную работе, выполняемой переменным давлением в цилиндре за цикл.

Известно, что

$$P_e = \frac{H_u \cdot \eta_i}{L_0 \cdot \alpha} \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \rho_k, \quad (2)$$

где  $H_u$  — низшая теплотворная способность топлива;  $\eta_i$  — индикаторный КПД;  $L_0$  — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  $\eta_v$  — коэффициент наполнения;  $\eta_m$  — механический КПД;  $\rho_k$  — плотность заряда (воздуха).

Для повышения  $P_e$  увеличивают  $\rho_k$ , повышая давление воздуха  $p_k$  и пропорционально увеличивая подачу топлива.

Величина плотности воздушного заряда будет:

$$\rho_k = \frac{p_k}{R \cdot T_k}, \quad (3)$$

где  $p_k = (0,15–0,18)P_e$ .

При  $P_e$  до 0,6 МПа значение  $p_a = p_0 = 0,1$  МПа (атмосферное давление без наддува).

Величины  $\rho_k$  и  $p_k$  связаны уравнением:

$$p_k = \rho_k \cdot R \cdot T_k. \quad (4)$$

Плотность воздуха, поступившего в цилиндр, рекомендуется определять по [8]. Необходимый часовой расход воздуха (кг/ч), при котором обеспечивается полное сгорание топлива:

$$G_k = \alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot N_e, \quad (5)$$

где  $g_e$  — эффективный удельный расход топлива, кг/(кВт·ч).

За одну секунду в цилиндры двигателя поступает количество воздуха (кг/с):

$$G_{кc} = \frac{G_k}{3600}. \quad (6)$$

Масса воздуха, поступившего в цилиндр за цикл (два оборота):

$$M_{вц} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot N_e \cdot 120}{n \cdot 3600}. \quad (7)$$

Плотность воздуха, поступившего в цилиндр:

$$\rho_k = \frac{M_{вц}}{i \cdot V_h} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot N_e \cdot 120}{n \cdot i \cdot V_h \cdot 3600}. \quad (8)$$

**Пример.** Определим  $\rho_k$  для быстроходного дизельного двигателя 4ЧН13/14 при  $N_e = 100$  кВт,  $iV_h = 8$  л,  $n = 1750$  мин<sup>-1</sup>:

$$\rho_k = \frac{1,8 \cdot 14,5 \cdot 0,23 \cdot 100 \cdot 120}{1750 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 3600} = 1,43 \text{ кг/м}^3.$$

Определяя необходимую плотность, находят давление, которое должен создать компрессор.

Из уравнения равенства мощностей компрессора и турбины ( $N_k = N_m$ ), принимая

$$\beta = \frac{k_m}{k_m - 1} \cdot \frac{k - 1}{k} \cdot \frac{R_1}{R} \text{ и } \tau_\gamma = \frac{G_m T_m}{G_{возг} T_0} \eta_{аг,м} \eta_{аг,к}, \quad (9)$$

где  $k_m$  — показатель адиабаты воздуха;  $k$  — средний показатель адиабаты;  $R_1$  — газовая постоянная выпускных газов;  $R$  — газовая постоянная воздуха;  $G_m$  — расход газов через турбину;  $T_m$  — температура газов;  $G_{возг}$  — расход воздуха через двигатель;  $T_0$  — температура воздуха перед нагнетателем;  $\eta_{аг,м}$  — адиабатный КПД турбины;  $\eta_{аг,к}$  — адиабатный КПД компрессора, можно получить известное соотношение [3–6]:

$$\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 = \beta \tau_\gamma \left[1 - \left(\frac{p_\gamma}{p_m}\right)^{\frac{k_m-1}{k_m}}\right] \eta_{аг,м} \eta_{аг,к}. \quad (10)$$

На основе данной формулы при заданном давлении  $p_k$  и известной  $T_m$  можно определить давление перед турбиной  $p_m$ , необходимое для работы системы. Требуемый баланс энергии определяется величинами  $p_m$ ,  $T_m$ ,  $\eta_{аг,м}$ ,  $\eta_{аг,к}$ .

Добавим, что излишне большие количества воздуха, подаваемого в двигатель, не только увеличивают затраты мощности на его подачу, но и ухудшают рабочий процесс двигателя [1–9].

Таким образом, соотношения (1)–(10) позволяют выполнить не только качественные, но и оценить количественные соотношения параметров рабочего процесса агрегатов наддува дизеля при работе на различных нагрузочных и скоростных режимах.

**Результаты экспериментов в условиях стенда.**

На рис. 3 приведена схема дизельного двигателя со свободным турбокомпрессором и турбиной постоянного давления [9]. Воздух поступает на лопатки крыльчатки центробежного компрессора 3 и из улитки диффузора нагнетается в цилиндр. На одном валу с крыльчаткой компрессора сидит рабочее колесо газовой турбины 2. Отработавшие газы из цилиндра двигателя 1 по трубопроводу поступают в сопловой

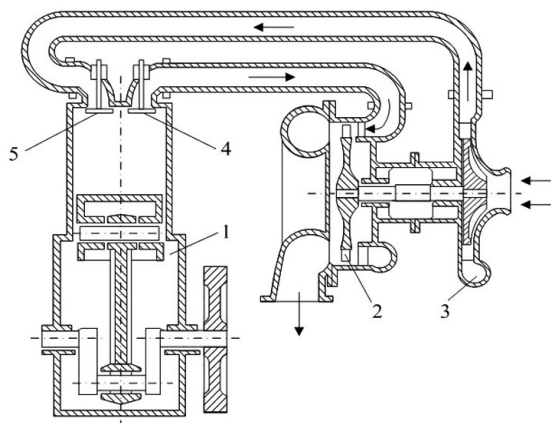


Рис. 3. Схема двигателя с турбокомпрессором:  
1 — двигатель; 2 — газовая турбина;  
3 — центробежный компрессор;  
4 — выпускной клапан; 5 — впускной клапан

аппарат газовой турбины, а из него на рабочее колесо. Из турбины газы выходят в атмосферу.

Проблема повышения экономичности двигателя на холостом ходу и малых нагрузках имеет много различных решений. К ним можно отнести:

- ступенчатое и бесступенчатое регулирование скорости вращения вала турбокомпрессора с изменением нагрузки;
- дросселирование воздуха на впуске в двигатель;
- дросселирование отработавших газов на выпуске из двигателя перед турбиной;
- перепуск части выпускных газов в атмосферу;
- перепуск воздуха на вход в газовую турбину или за турбину;
- регулирование подачи воздуха путем изменения проходного сечения турбины или компрессора;
- применение надувочного агрегата с независимым приводом и др.

Указанные способы в той или иной степени повышают экономичность двигателя на малых нагрузках, но либо приводят к усложнению конструкции двигателя, либо к ухудшению условий работы турбины или компрессора.

В работе [9] приведены результаты экспериментов с системой рециркуляции воздуха через компрессор турбоагрегата дизеля 8ЧН25/34, которые показали, что предлагаемое техническое решение позволяет повысить экономичность дизеля на малых нагрузках и холостом ходу.

На рис. 4 показана схема системы надува, которая позволяет реализовать предложенный способ [9]. Система содержит двигатель 1, турбокомпрессор, включающий рабочее колесо компрессора 3, корпус 6, кольцевую камеру 5 и направляющий аппарат 4, рабочее колесо турбины 7, нагнетательный патрубок компрессора 8, поворотную заслонку 9, установленную в нем, перепускной трубопровод 2 и выхлопной трубопровод 10.

Система работает следующим образом [9]. При работе двигателя на малых нагрузках или холостом ходу заслонка 9 приоткрывается и сообщает нагнетательный патрубок 8 с перепускным трубопроводом 2, а часть сжатого воздуха будет поступать обратно на вход в компрессор через кольцевую камеру 5, предварительно получив положительную закрутку в направляющем аппарате 4. Это обеспечивает снижение плотности воздуха на этих нагрузках,

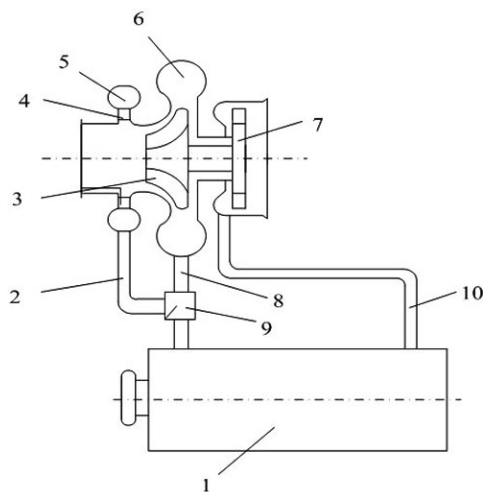


Рис. 4. Схема системы надува с рециркуляцией воздуха через компрессор:

- 1 — дизельный двигатель;  
2 — перепускной трубопровод;  
3 — турбокомпрессор; 4 — направляющий аппарат;  
5 — кольцевая камера; 6 — корпус;  
7 — рабочее колесо турбины;  
8 — нагнетательный патрубок компрессора;  
9 — поворотная заслонка; 10 — выхлопной трубопровод

что приводит к уменьшению коэффициента избытка воздуха и повышению экономичности двигателя на этих режимах.

Для опытной проверки эффективности указанного способа повышения экономичности на дизель-генератор ДГР630/500 (двигатель 8ЧН25/34) была оборудована система перепуска (рециркуляции) надувочного воздуха. Надувочный воздух из переходного патрубка подводился в полость вокруг фасонной вставки турбокомпрессора ТК 23СЧЗ. Посадка фасонной вставки была тщательно уплотнена резиновыми кольцами, а в самой вставке было выполнено 12 отверстий диаметром 8 мм с общей площадью 6 см<sup>2</sup>. Положительное влияние рециркуляции надувочного воздуха на экономичность двигателя наблюдается при мощностях, меньших 150 кВт (24 % от номинальной мощности). Наибольший положительный эффект от рециркуляции воздуха имеет место на режиме холостого хода, где экономичность двигателя с рециркуляцией надувочного воздуха увеличивается на 8,6 % [9].

#### Выводы.

1. При работе дизельного двигателя с газотурбинным надувом на режимах малых нагрузок и холостого хода имеет место рассогласование характеристик дизеля и газотурбокомпрессора.
2. При выборе способа повышения экономичности дизеля с газотурбинным надувом на режимах малых нагрузок и холостого хода и разработке технических решений целесообразно использовать перепуск (рециркуляцию) надувочного воздуха в компрессор газотурбоагрегата с выполнением расчетов характеристик сопрягаемых машин.

#### Библиографический список

1. Исследование и доводка тепловозных дизелей / Н. П. Синенко [и др.]. — М. : Машиностроение, 1975. — 184 с.
2. Обеспечение надежности судовых дизелей / М. А. Малиновский [и др.]. — Одесса : Феникс, 2003. — 148 с.
3. Судовые двигатели внутреннего сгорания / Ю. Я. Фомин [и др.]. — Л. : Судостроение, 1989. — 344 с.



4. Хандов, З. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / З. А. Хандов. — М. : Транспорт, 1969. — 304 с.
5. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1974. — 552 с.
6. Камкин, С. В. Эксплуатация судовых дизелей / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М. : Транспорт, 1990. — 344 с.
7. Шароглазов, Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Климентьев. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. — 344 с.
8. Макушев, Ю. П. Агрегаты наддува двигателей / Ю. П. Макушев, С. В. Корнеев, В. В. Рынди́н. — Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. — 58 с.
9. Шквар А. Я. О влиянии рециркуляции воздуха через компрессор на работу судового двигателя 8ЧН25/34 / А. Я. Шквар, В. С. Наливайко, С. Н. Литвин // Судовое энергомашиностроение. Николаевский кораблестроительный институт им. адм. С. О. Макарова. — Николаев, 1985. — С. 11–14.

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

**КРАЙНОВ Василий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: KrainovVV@omgups.ru

**ЛАЗАРЕВ Евгений Сергеевич**, преподаватель, инженер кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: Incoe@yandex.ru

**ЛИТВИНОВ Павел Васильевич**, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: p\_vasilich55@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.10.2016 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Е. С. Лазарев, П. В. Литвинов

УДК 621.318

**В. К. ФЕДОРОВ  
Е. Н. ЛЕОНОВ  
Д. В. ФЕДОРОВ**

Омский государственный  
технический университет

Тюменский индустриальный  
университет

## ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПОТЕРИ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В данной статье представлен качественный анализ влияния источников распределенной генерации (РГ) на работу электрических сетей с большим проникновением РГ. Обсуждается влияние РГ на потери электрической энергии и напряжения, а также на показатели качества электроэнергии. Анализ указанной проблемы позволяет сделать вывод, что влияние РГ в значительной степени зависит от степени проникновения РГ в распределительную сеть и режима работы источников РГ.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, потери напряжения и мощности, качество электроэнергии.

Технические, политические и экологические факторы в последнее время стимулируют относительно быстрый рост числа установок распределенной генерации (РГ) в мире. При этом общая установленная мощность РГ в Российской Федерации остается небольшой, и ее влияние на работу энергосистемы остается незначительной. Однако, по мере того как установленная мощность РГ увеличивается, влияние, которое она оказывает на сеть, будет усиливаться. Характеристика и количественная оценка этого воздействия является достаточно сложной научно-технической задачей, поскольку должны быть проанализированы одновременно аспекты функционирования системы контроля напряжения, координации релейной защиты, потерь и качества электроэнергии, надежности и многие другие. Некоторые из этих аспектов также неразрывно свя-

заны с процессами устойчивости энергосистемы, и, следовательно, они должны быть рассмотрены в исследованиях общей надежности работы энергосистем.

Чтобы произвести оценку влияния РГ на работу энергосистемы, в данной статье выполнен анализ взаимодействия энергосистемы с сетями, имеющими большую долю РГ.

Важность влияния РГ на эксплуатацию, устойчивость и управление энергосистемы признали уже в конце 1970-х годов. Одна из самых интересных публикаций на эту тему [1]. В конце 1990-х годов эта тема вызвала интерес в научных и производственных кругах, что вылилось в большое количество публикаций как за рубежом [2–4], так и в России [5, 6].

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на взаимодействие между РГ и энерго-

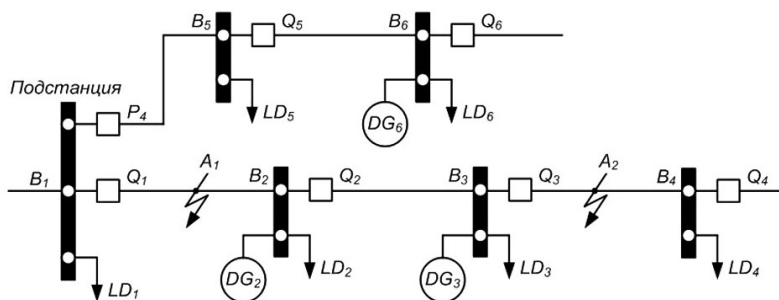


Рис. 1. Распределительная сеть с распределенной генерацией

системой, являются вид технологии, используемой в РГ, а также режим управления и эксплуатации РГ.

Чтобы провести качественную оценку влияния РГ на распределительную сеть, рассмотрим такие аспекты работы энергосистемы, как контроль напряжения, потери мощности, качество электроэнергии.

Сеть состоит из шести узлов — шин ( $B_1, \dots, B_6$ ), с нагрузкой, подключенных к каждой шине ( $LD_1, \dots, LD_6$ ) и трех распределенных генераторов ( $DG_1, \dots, DG_3$ ), подключенных к шинам  $B_2, B_3$  и  $B_6$  (рис. 1).

В энергосистеме при сравнении мощности генераторов с мощностью нагрузки возможны следующие случаи:

*Случай 1:* нагрузка каждого узла всегда больше или равна мощности распределенного генератора в каждом узле, т. е.

$$LD_i \geq DG_i, \forall i.$$

Такой вариант характерен для систем РГ, содержащих фотоэлектрические элементы, двигатели Стирлинга или небольшие ветровые генераторы.

*Случай 2:* мощность РГ генератора хотя бы в одном узле больше нагрузки на том же узле, однако суммарная мощность РГ в распределительной сети будет меньше, чем сумма всех нагрузок в системе, т. е.

$$\exists i \in N : (LD_i < DG_i) \wedge \left( \sum_{k=1}^n LD_k \geq \sum_{k=1}^n DG_k \right),$$

где  $N = \{k\}_{k=1}^6$ .

Этот случай может возникнуть, если один из генераторов РГ получает энергию от ветра.

*Случай 3:* распределенная генерация как минимум в одном узле больше нагрузки в этом же узле и сумма всех генераторов РГ в распределительной сети больше, чем сумма всех нагрузок в системе, т. е.

$$\sum_{k=1}^n LD_k < \sum_{k=1}^n DG_k.$$

Этот случай может возникнуть при подключении мощного ветрогенератора к концу распределительной сети, в то время как центры нагрузки обычно не расположены в районах с высокими скоростями ветра. В этом случае выходная мощность ветропарка часто может превосходить потребляемую мощность.

Следует отметить, что нагрузки в распределительной сети могут меняться с течением времени. Это, например, весьма характерно, если в распределительной сети ветроэлектростанции несут большую часть времени значительный объем нагрузки (случай 2). Однако два других варианта также вероятны, например, случай 1 при небольшой скорости ветра и случай 3 в период с очень высокими скоростями

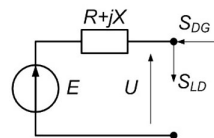


Рис. 2. Упрощенная модель электрической системы с РГ

ветра и низкими нагрузками потребителей (например, ночью).

**Влияние на потери.** Чтобы объяснить влияние РГ на работу сети с учетом различных соотношений  $X/R$ , используется простейшая модель энергосистемы с источниками  $E$  и  $S_{DG}$ , одной линией электропередачи и нагрузкой  $S_{LD}$  (рис. 2).

В модели, представленной на рис. 2,  $E$  представляет собой источник напряжения, а  $U$  является конечным напряжением у потребителя. Если мы предположим, что напряжение у потребителя, а также ток нагрузки известны, то получим уравнения, устанавливающие связь между мощностью РГ и связанное с этим уменьшение потерь в линии.

Предположим, что источник РГ не подключен. Тогда потери мощности:

$$S_{loss} = (E - U) \cdot I' = (E - U) \cdot (I_{LD,a} - jI_{LD,r}),$$

где  $I_{LD,a}$  и  $I_{LD,r}$  обозначают активную и реактивную составляющие тока нагрузки.

Теперь предположим, что подключен РГ, производящий только активную мощность ( $\cos\varphi = 1$ ) и также предположим для простоты, что напряжение на приемном конце поддерживается постоянным. Тогда нетрудно увидеть, что потери мощности:

$$S_{loss}^{DG} = (E - U) \cdot (I_{LD,a} - I_{DG} - jI_{LD,r}).$$

Таким образом, наличие РГ снижает потери мощности на величину

$$S_{loss} - S_{loss}^{DG} = (E - U) \cdot I_{DG}.$$

При этом изменение напряжения на приемном конце не учитывается, поскольку не является существенным для анализа.

Подводя итог, можно сделать вывод, что внедрение распределенной генерации уменьшает ток, протекающий через линию электропередачи, уменьшая, таким образом, активную, а также реактивную потери мощности.

Тогда можно сказать следующее:

*случай 1* — РГ всегда приведет к уменьшению потерь на всех линиях в распределительной сети;

*случай 2* — РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети уменьшатся;

случай 3 — РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети будут снижены, пока общий объем РГ будет меньше общей нагрузки в распределительной сети примерно в два раза.

Если РГ превышает примерно в два раза общую нагрузку в распределительной сети, то потери в распределительной сети будут больше при РГ, чем без нее.

В системе распределения колебания напряжения возникают при изменении тока нагрузки, протекающего через резистивные и реактивные сопротивления линий. Колебания напряжения в распределительных сетях без РГ вызваны изменением во времени активных и реактивных нагрузок в распределительной сети. Колебания, как правило, бывают большими к концу линии из-за высокого сопротивления линии. Кроме того, колебания напряжения более существенны, если нагрузка сконцентрирована в конце системы (радиальные сети). На практике для типовых распределительных сетей расстояние, прежде чем падение напряжения превысит допустимое отклонение от номинального значения, составляет всего несколько километров. Однако линии, как правило, не предназначены для работы при таких уровнях нагрузки. Углубленное аналитическое обсуждение влияния РГ на напряжения в сетях низкого напряжения можно найти, например, в [7, 8].

РГ может влиять на колебания напряжения в двух направлениях:

1. РГ осуществляется в соответствии с требованиями локальной нагрузки. Это означает, что при росте локальных нагрузок в распределительной сети производство энергии РГ также увеличивается и наоборот. В данном случае, РГ способствует сокращению различий между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с ситуацией без РГ. Этот режим работы РГ не создает никаких проблем для традиционного подхода регулирования напряжения.

2. Выходная мощность РГ регулируется независимо от величины локальной нагрузки. Этот режим контроля осуществляется, если РГ управляется при помощи оценки сигналов, которые могут или не могут соответствовать локальным колебаниям нагрузки, или технология РГ зависит от наличия природных ресурсов, таких как солнечная энергия или энергия ветра. В этом случае РГ может негативно повлиять на возможность регулирования напряжения сети за счет увеличения разности между максимальным и минимальным уровнями напряжением по сравнению с ситуацией без РГ. Это происходит вследствие того, что минимальный уровень напряжения может оставаться неизменным, например, при ситуации с повышенной нагрузкой без РГ, а максимальный уровень напряжения может увеличиться, например, при ситуации с низкой нагрузкой и РГ.

РГ может представлять некоторые проблемы для традиционного контроля и регулирования напряжения. Например, во время высокой нагрузки в сети, показанной на рис. 1, регулирующий трансформатор (не показан) на подстанции позволит повысить напряжение источника, чтобы сохранить напряжение в концах линии (узлах  $V_4$  и  $V_6$ ) в необходимом диапазоне напряжения. В случае мощной установки РГ в узле  $V_6$  и отсутствии источника РГ в узле  $V_4$  напряжение узла  $V_6$ , возникающее из-за РГ, может достигать значения, характерного при перенапряжении, а напряжение в узле  $V_4$  достигнуть нижней границы напряжения из-за высокой нагрузки. Традиционный

режим работы регулирующего трансформатора на подстанции для такой ситуации не подходит, так как он предполагает падение напряжения на всех линиях по мере удаления от трансформатора.

Самым простым способом решения этой проблемы будет уменьшение выходной мощности РГ. Это решение будет наиболее экономичным решением для оператора сети, но, наверное, не для владельца РГ.

Другим, более затратным, решением станет установка более умной и гибкой схемы управления напряжением в системе распределения, основанной на автоматизации подстанции и современных коммуникационных технологиях. Эта технология позволит воспринимать уровень напряжения в разных точках сети (обычно в конце линии). В этом случае устройства РПН на подстанции могут динамически регулироваться в соответствии с входными данными измерений. Кроме того, если применяемая РГ имеет возможность динамического изменения коэффициента мощности, то РГ может быть использована для местного регулирования напряжения. Целевой функцией будет сохранение изменения напряжения в распределительной сети в пределах допустимого уровня. Это уже сделано в некоторых ветроэнергетических проектах, где силовой электронный преобразователь используется для динамического регулирования напряжения в системе распределения. Таким образом, РГ с использованием силовых электронных преобразователей или синхронных генераторов могут быть использованы для динамического контроля напряжения.

При обсуждении влияния РГ на качество электрической энергии, как правило, существуют две основные проблемы, а именно, фликер напряжения и гармоники.

Если доля РГ является достаточно большой, а РГ подвержена частым и значительным изменениям, то фликер напряжения может ощущаться некоторыми электроприемниками.

Метод уменьшения фликера напряжения и его эффективность зависят от многих факторов и могут быть довольно сложными задачами. Самым простым способом снижения его влияния в таком случае будет требование к владельцу РГ сократить количество запускаемых источников. Если РГ взаимодействует с сетью через преобразователь, то относительно легко достичь уменьшения пусковых токов. В частности, потенциальными причинами фликера напряжения в ветроэлектростанциях считались изменение скорости ветра или изменение выходной мощности. Однако в конструкции современных ветротурбин внесены изменения, позволяющие эффективно избежать больших колебаний мощности в течение короткого периода времени.

Общепризнано, что наличие нелинейных элементов в системе электроснабжения, например, силовых преобразователей приводит к появлению гармоник. Силовые электронные устройства, используемые РГ, могут вызвать появление гармоник. Амплитуда и порядок гармонических токов, вносимых преобразователями постоянного / переменного напряжения, зависят от режима его работы. Например, принудительно коммутируемый преобразователь с широтно-импульсной модуляцией, работающий в линейном диапазоне, вносит только гармоники в области высоких частот, т.е. кратные несущей частоте. Последние достижения в области полупроводниковых технологий (например, IGBT-транзисторы) позволяют использовать более высокие несущие частоты, которые позволяют генерировать достаточно чистые си-

нусоиды в соответствии со стандартом. Преобразователи, выполненные на IGBT-транзисторах, используются для многих технологий РГ. Поэтому можно сделать вывод, что современные передовые технологии силовой электроники могут быть использованы для решения проблем качества электроэнергии, связанных с наличием РГ.

Теоретически РГ на основе преобразователей энергии могут быть использованы для уменьшения величины отклонений напряжения. В этом случае преобразователь должен выступать в качестве статического компенсатора реактивной мощности и динамического восстановителя напряжения. В принципе может быть разработан силовой электронный преобразователь, работающий в этих режимах, однако в настоящее время большинство преобразователей РГ не способны выполнять эту задачу. Основное условие заключается в том, что РГ должна обладать достаточной мощностью, чтобы компенсировать падения напряжения и поддерживать допустимый уровень напряжения во время резкого изменения нагрузки. Как отмечается в [9], улучшение качества электрической энергии в отношении отклонений напряжения с помощью РГ — «это хорошая функция для рассмотрения в будущем».

В квазистационарном режиме качественное воздействие РГ на величину напряжения практически неотличимо от большой (отрицательной) нагрузки. Действительно, коммутация большой нагрузки приводит к изменению величины напряжения, которая похожа на ту, что происходит при изменении выходной мощности РГ. Выходные колебания мощности большой нагрузки и РГ, использующей возобновляемые источники энергии, например, ветра или солнечной энергии, подчинены суточным и сезонным изменениям.

С другой стороны, во многих отношениях РГ влияет на качество энергии сети очень специфическим образом. Например, владелец РГ, если это позволяет технология РГ, имеет полный контроль за выходной мощностью и величиной напряжения РГ. Это отличается от ситуации с большими нагрузками, которые в большинстве случаев зависят от производственных процессов. Кроме того, подключение новой нагрузки не улучшает качество электроэнергии, в то время как РГ имеет возможность уменьшить гармонические составляющие напряжения, повышая качество энергии. Таким образом, сравнивая влияние РГ и нагрузки, имеющих сопоставимые значения, можно сделать вывод, что в целом влияние РГ на качество электрической энергии должно быть более положительным, чем эквивалентная нагрузка.

Среди наиболее важных факторов, определяющих стабильность напряжения системы питания, — это характеристики нагрузки и оборудование контроля напряжения сети. Чтобы подчеркнуть важность этого фактора, стабильность напряжения иногда называют стабильностью нагрузки. Как правило, реактивная мощность нагрузки и значение потерь реактивной мощности играют важную роль в возникновении проблем со стабильностью напряжения. Из-за побочных эффектов асинхронные двигатели и постоянные нагрузки особенно подвержены проблеме со стабильностью напряжения.

Стабильность напряжения — это динамическое явление, из чего следует, что для полноценного анализа стабильности напряжения может потребоваться полномасштабное моделирование поведения энергетической системы. В некоторых случаях, связанных с медленным изменением стабильности напряжения,

детальный динамический анализ не нужен; стабильность напряжения может быть соответствующим образом оценена по результатам анализа изменения тока нагрузки. Для простоты анализа реакцию на изменение нагрузки будем считать медленной, что позволяет использовать анализ потокораспределения для анализа стабильности напряжения.

Одним из важнейших факторов, влияющих на стабильность напряжения, является способность РГ соответствовать потреблению реактивной мощности (реактивной нагрузке и потерям). Таким образом, основное влияние РГ на стабильность напряжения в сети будет определяться углом мощности распределенного генератора. Рассмотрим теперь источники РГ с точки зрения их влияния на стабильность напряжения сети, т.е. их способность генерировать реактивную мощность.

*Синхронные генераторы* способны как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Таким образом, использование в качестве РГ перевозбужденных синхронных генераторов позволит обеспечить производство реактивной мощности на месте. Местная генерация реактивной мощности снижает ее перетоки от источника, тем самым уменьшая связанные с этим потери и отклонения напряжения. Как следствие, также улучшается стабильность напряжения.

В качестве графического инструмента для изучения стабильности напряжения в электроэнергетических системах традиционно используются  $P-V$  диаграммы. Рис. 3 показывает теоретическое воздействие синхронного генератора на стабильность напряжения гипотетического узла. Как видно на рисунке, установка распределенного генератора  $\Delta P$ , переносит рабочую точку, связанную с кривой  $P-V$ , из точки А в точку В, что приводит к повышению напряжения в узле на величину  $V_{DG} - V_0$  и повышает стабильность напряжения: запас устойчивости увеличивается от  $m_0$  до  $m_{DG}$ . Непосредственный вывод, который следует из этого, состоит в том, что РГ способствуют повышению стабильности напряжения в сети.

*Полупроводниковые коммутируемые преобразователи* линии всегда потребляют реактивную мощность. Величина потребляемой реактивной мощности может достигать 30 % от номинальной мощности преобразователя. Чтобы компенсировать реактивную мощность потребителя, в преобразователе на стороне переменного тока обычно устанавливаются конденсаторные установки. Это делает преобразователь эквивалентным асинхронному генератору с прямым подключением к линии. Таким образом, при определенном стечении обстоятельств, наличие такого преобразователя может негативно повлиять на стабильность напряжения.

Однако необходимо обратить внимание на следующие факты: последние достижения в области силовой электроники, которое вылилось в появление относительно недорогих устройств, обладающих превосходными техническими характеристиками. Кроме того, часто потенциал РГ достаточно мал, что делает экономически выгодным использование современных устройств силовой электроники. Поэтому можно предположить, что в ближайшем будущем большая часть силовой электроники преобразователей будет с самостоятельной коммутацией.

В целом, можно сделать вывод, что присутствие РГ не будет негативно влиять на стабильность напряжения. Доля РГ, сопряженной с преобразователями, постепенно растёт, снижая вероятность возникновения проблемы стабильности напряжения.

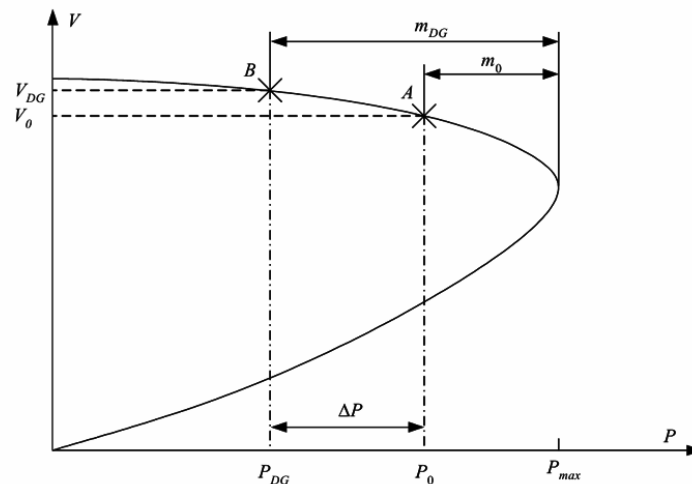


Рис. 3. P–V диаграмма: изменение стабильности напряжения

В заключение можно сделать следующий вывод о том, что максимально допустимое количество РГ, которые могут быть подключены к распределительной сети без ущерба для нормальной работы, является весьма конкретным для каждого случая и зависит от конкретных обстоятельств, связанных с функционированием как РГ, так и сети. Разработки в области РГ российских и зарубежных производителей позволяют говорить о том, что современные технологические установки РГ имеют достаточно высокую эффективность и при оптимальном размещении в распределительной сети не оказывают негативного влияния на нее.

#### Библиографический список

1. R. P. Schultz. Impacts of new technology and generation and storage processes on power system stability and operability. In Proceedings of DOE / ORNL Conference «Research needs for the Effective Integration of New Technologies into the Electric Utility», 1983, p 193–219.
2. Impact of embedded generation on distribution networks. Institution of Electrical Engineers (IEE). Digest №: 1996/191, London, UK, 1996.
3. CIRED. Technical Theme 4: Dispersed Generation, Management and Utilization of Electricity. Proceedings of 16th International conference on Electricity Distribution. Amsterdam, Netherlands, IEE Conference Publication №: 482, Part 1: Contributions, June 2001.
4. Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems / M. Peht [et al.]. — Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. — 356 p.
5. Филипов, С. П. Малая энергетика в России / С. П. Филипов // Теплоэнергетика. — 2009. — № 8. — С. 38–44.

6. А. А. Бубенчиков. Возможности применения систем когенерации на территории России / А. А. Бубенчиков, М. И. Николаев, Г. Ю. Киселев, Н. В. Есипович, М. К. Феофанов, Д. О. Шкандюк [и др.] // Современная наука и практика. — 2015. — № 4 (4). — С. 90–93.

7. S. Conti, S. Raiti, G. Tina, and U. Vagliasindi. Study of the Impact of PV Generation on Voltage Profile in LV Distribution Networks. Proceedings IEEE Porto PowerTech 2001, September 2001.

8. Денисюк, С. П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Електрифікація транспорту. — 2012. — № 4. — С. 23–29.

9. R. Dugan and T. McDermott. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems. Rural Electric Power Conference, pages A3/1 – A3/6, Toronto, 2001.

**ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета.

**ЛЕОНОВ Евгений Николаевич**, старший преподаватель кафедры электроэнергетики филиала Тюменского индустриального университета, г. Тобольск.

**ФЕДОРОВ Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: Rysev\_dmitry@list.ru

Адрес для переписки: leonov@tobii.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.2016 г.

© В. К. Федоров, Е. Н. Леонов, Д. В. Федоров

## Книжная полка

**Кузнецов, И. Н. Основы научных исследований : учеб. пособие для бакалавров / И. Н. Кузнецов. — 2-е изд. - М. : Дашков и К, 2016. — 282 с.**

В учебном пособии излагаются основы методологии, методики и техники научного труда, технология подготовки и написания выпускной квалификационной работы. Особое внимание уделяется методике работы с источниками информации. В удобной для восприятия форме приводятся наиболее важные сведения о порядке и правилах подготовки текста научной работы, оформления текстового и иллюстративного материала, а также рекомендации по подготовке к защите выпускных квалификационных работ. Для студентов бакалавриата и магистратуры, аспирантов.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

Объектом исследования являются действующие участки железных дорог, на которых эксплуатируется различный подвижной состав: грузовые поезда, пассажирские поезда, а также электропоезда (пригородное сообщение). В работе выполнено формирование математических моделей для объектов исследования на основе статистических данных по расходу, а также удельному расходу электрической энергии на тягу поездов и на основе данных по факторам, влияющим на эти величины, — массе состава поезда, среднесуточной температуре воздуха, участковой и технической скорости, нагрузке на ось, времени нагона пассажирских поездов, времени простоя, объема рекуперации и др. Цель работы — осуществить сравнение математических моделей процесса электропотребления на тягу поездов, полученных средствами прикладных программ и основанных на таких математических аппаратах, как метод опорных векторов, множественная регрессия и искусственные нейронные сети. Для каждого объекта выявлена математическая модель, имеющая наименьшие значения оценочных показателей и лучше всего подходящая для прогнозирования исходной выборки. В качестве оценочных показателей приняты средняя абсолютная ошибка в процентах, средняя квадратичная ошибка и коэффициент вариации. В результате получена сравнительная таблица оценочных показателей моделей, основанных на различных математических методах, в числе которых и метод опорных векторов. Полученные результаты позволяют обосновать начало применения математических моделей, основанных на рассмотренных методах, в деятельности предприятий железнодорожного транспорта с целью планирования объема электропотребления на определенный период времени.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, электрическая энергия, удельный расход электрической энергии на тягу поездов, факторы, метод опорных векторов, множественная регрессия, искусственные нейронные сети.

Одним из путей повышения энергетической эффективности электрических железных дорог является совершенствование методов прогнозирования расхода электрической энергии различными железнодорожными потребителями, в том числе тяговыми (расход электрической энергии на тягу поездов). На сегодняшний день известно множество математических моделей, применяемых для целей установления зависимостей одной величины от нескольких других и, соответственно, прогнозирования (в частности — для прогнозирования электропотребления): регрессионные модели; модели, основанные на методах искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети, нечеткие нейронные сети) и другие [1]. Необходимо рассмотрение различных математических моделей для установления зависимостей расхода электрической энергии от влияющих факторов для возможности выбора наилучшей.

В настоящей работе для исследования приняты три выборки исходных данных:

1) данные по удельному расходу электрической энергии на тягу поездов  $w_{уд}$ , среднесуточной температуре воздуха  $t$  и массе состава поезда  $m_c$ , нагрузке на ось  $q$ , участковой скорости  $V_{уч}$ , техниче-

ской скорости  $V_{техн}$ , времени простоя  $T_{прост}$  для локомотивного эксплуатационного депо «Карасук», расположенного на участке с грузовым движением («Карасук груз.»); объем исходной выборки — 4658 наборов значений;

2) данные по удельному расходу электрической энергии на тягу поездов  $w_{уд}$ , среднесуточной температуре воздуха  $t$  и массе состава поезда  $m_c$ , нагрузке на ось  $q$ , участковой скорости  $V_{уч}$ , технической скорости  $V_{техн}$ , времени простоя  $T_{прост}$  и времени нагона пассажирских поездов  $T_{нагон}$  на участке с пассажирским движением Новосибирск — Барабинск («Новосиб. — Бараб. пасс.»); объем исходной выборки — 2305 наборов значений;

3) данные по расходу электрической энергии на тягу поездов  $W$ , среднесуточной температуре воздуха  $t$  и массе состава поезда  $m_c$ , нагрузке на ось  $q$ , участковой скорости  $V_{уч}$ , технической скорости  $V_{техн}$ , доле автоведения  $d_{авт}$ , объеме рекуперации  $W_{рек}$  на участке Омск — Иртышское в пригородном движении («Омск — Иртыш. приг.»); объем исходной выборки — 742 набора значений.

На предварительном этапе осуществлялся отбор факторов для включения в математическую модель.

Фрагменты исходных выборок

Карасук груз.					Новосиб. – Бараб. пасс.					Омск – Ирг. приг.		
$w_{уав}$ кВт·ч/ 10 тыс. ткм брутто	$t$ , °C	$m_c$ , т	$q$ , т	$V_{уч}$ км/ч	$w_{уав}$ кВт·ч/ 10 тыс. ткм брутто	$t$ , °C	$V_{техн}$ км/ч	$V_{уч}$ км/ч	$m_c$ , т	$W$ , тыс. кВт·ч	$t$ , °C	$m_c$ , т
385,00	4,6	104,76	13,10	79,75	61,04	8,5	72	69,43	685,19	172,75	23,9	190,00
382,40	-19,8	2219,05	5,90	72,41	62,71	10,4	87,96	83,08	660,49	176,25	12,1	95,00
382,35	2,3	323,81	3,37	62,69	62,88	19,4	77,14	75,35	740,74	213,25	20	95,00
379,56	-18,6	1933,33	5,97	71,59	65,61	9,4	77,76	75,94	660,49	256,75	12,2	95,00
374,60	-8,7	300,00	12,50	67,38	65,98	19	73,64	68,94	598,77	268,5	-7,9	95,00
367,14	-12,2	1680,95	5,92	57,01	66,57	1,1	82,72	81,34	719,14	271,5	13,1	95,00
366,40	-4,2	1785,71	5,95	70,39	66,76	17,6	75,64	73,64	419,75	282,75	22,3	95,00
365,96	-3,6	223,81	13,99	104,13	67,67	-11	86,02	83,79	780,86	284,5	6	95,00
364,63	-24,5	1561,90	5,83	75	68,11	24,5	81	68,45	719,14	295,5	11,8	95,00
364,14	-0,8	1380,95	5,85	67,74	68,51	21	86,4	83,79	598,77	295,5	16,1	95,00
358,33	7,3	57,14	14,29	83,44	69,49	22,7	69,93	68,94	839,51	305,5	5,1	95,00
355,82	-18,6	2371,43	5,99	69,23	69,71	24,5	74,77	73,64	524,69	306	2,3	95,00
355,56	25,5	300,00	12,50	76,83	72,37	-1,4	75,35	73,64	598,77	309,25	15,3	95,00
353,85	5,4	309,52	19,35	22,83	72,49	16,2	69,43	68,94	780,86	310,25	12,5	95,00
350,00	-22,2	1695,24	5,89	70	72,51	19,2	85,26	83,08	540,12	322,75	15,2	190,00
348,04	10,5	1457,14	3,88	74,12	72,63	-4,6	84,89	83,43	540,12	325	22,8	95,00
344,60	-4,4	2380,95	5,95	70	72,77	19,1	69,43	68,94	901,23	326,5	8,5	95,00
341,90	-2,7	1852,38	5,94	70,39	73,67	12,2	69,43	68,94	1018,52	327	-15,3	95,00
338,97	15,7	1661,90	5,85	65,97	75,85	16,3	69,68	68,94	780,86	327,25	18,8	190,00
338,68	-16,3	1809,52	5,95	77,3	76,03	22,8	69,93	68,94	1018,52	327,5	-7,4	95,00
334,36	-21,8	2314,29	5,84	57,8	77,47	18,7	69,43	68,94	780,86	328,75	3,4	95,00
333,53	-2,8	1647,62	5,80	69,61	77,90	0,3	78,07	75,35	719,14	329	-13,2	95,00
329,94	-4,4	2338,10	5,90	62,69	77,97	12,2	73,92	66,58	1033,95	331,75	5,8	95,00
326,99	-8,1	1676,19	5,90	68,48	78,54	18,5	69,43	68,94	719,14	335,5	23	95,00
326,69	-12,8	1695,24	5,81	67,02	78,55	-8,9	86,02	83,08	660,49	337,75	-3,1	190,00
325,97	6,7	366,67	22,92	0	78,70	20,8	69,43	68,94	780,86	347,5	9,6	95,00
325,82	-12,8	2323,81	5,87	70	78,97	22,5	69,43	68,94	959,88	350	10,5	95,00
324,17	-4	1576,19	5,79	68,48	79,01	13,2	69,43	68,94	901,23	351,25	12,6	95,00
323,63	-1,4	1733,33	5,94	68,85	79,02	19,5	69,93	69,43	910,49	358,5	6,8	95,00
318,98	0,2	1680,95	5,92	68,85	79,16	20	69,93	68,94	660,49	358,75	16,1	95,00
318,40	-15,8	1371,43	5,81	68,85	80,30	22,3	69,43	68,94	719,14	361,25	1,2	95,00
317,56	-16,2	1680,95	5,92	73,68	80,72	20,6	69,43	68,94	901,23	362,25	11,8	95,00
317,42	-16,3	2323,81	5,93	73,68	80,91	14,2	69,43	68,94	780,86	364	15,7	95,00
317,39	2,6	219,05	13,69	37,28	81,67	22,8	69,43	68,94	719,14	364,5	15,3	95,00
315,85	-2,7	1652,38	5,82	74,12	81,71	19,5	69,43	68,94	901,23	371,25	-15,9	95,00
308,58	-2,6	2219,05	5,90	66,32	82,12	9,9	73,08	68,94	481,48	371,75	13,3	95,00
306,84	-3,8	1809,52	5,95	65,28	82,61	20,8	79,35	79,35	780,86	374,5	15,3	95,00
306,24	-6,8	2214,29	5,89	66,32	82,64	22,3	79,35	78,7	1018,52	375	8,4	95,00
305,06	-29,1	1695,24	5,81	71,59	82,99	7,9	84,89	83,43	629,63	379,75	19,3	95,00
304,75	18,9	1904,76	5,88	68,85	83,66	22,3	69,93	68,94	598,77	385,25	19,3	95,00
304,24	-6,2	2247,62	5,91	68,11	84,17	22,8	69,43	68,94	540,12	386,75	11,9	95,00
303,64	13,4	523,81	5,95	63,32	84,29	13,8	84,52	79,35	410,49	389,5	21	95,00
303,63	-21,4	1180,95	3,94	67,38	84,95	14,6	69,43	68,94	598,77	391,25	-17,1	95,00
303,13	-7	2133,33	5,93	66,67	85,18	16,2	69,68	66,58	780,86	392	4,1	95,00
302,98	-16,2	1757,14	5,86	68,48	85,18	19,1	75,06	74,48	780,86	397	20,6	95,00
302,03	-28,9	1642,86	5,87	74,56	85,61	-2,7	86,02	83,79	660,49	405,75	16,1	95,00

С этой целью возможно применение известных методов понижения размерности (экспоненциальные и последовательные алгоритмы поиска, генетические алгоритмы и др.). В настоящей работе применен обратный жадный алгоритм (метод «последовательный с исключением») [2]. По итогам отбора факторов для рассматриваемых выборок сформированы выборки, фрагменты которых представлены в табл. 1.

На следующем этапе осуществляется выбор метода для моделирования. В частности, известно применение так называемого метода опорных векторов

для прогнозирования электропотребления в распределительных сетях энергосистем [3], что побуждает рассмотреть возможность его применения и для прогнозирования электропотребления на тягу поездов.

Метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM) решает задачи классификации и регрессии путем построения оптимальной гиперплоскости, разделяющей решения. Основная идея метода заключается в переводе исходных векторов в пространство более высокой размерности и построении

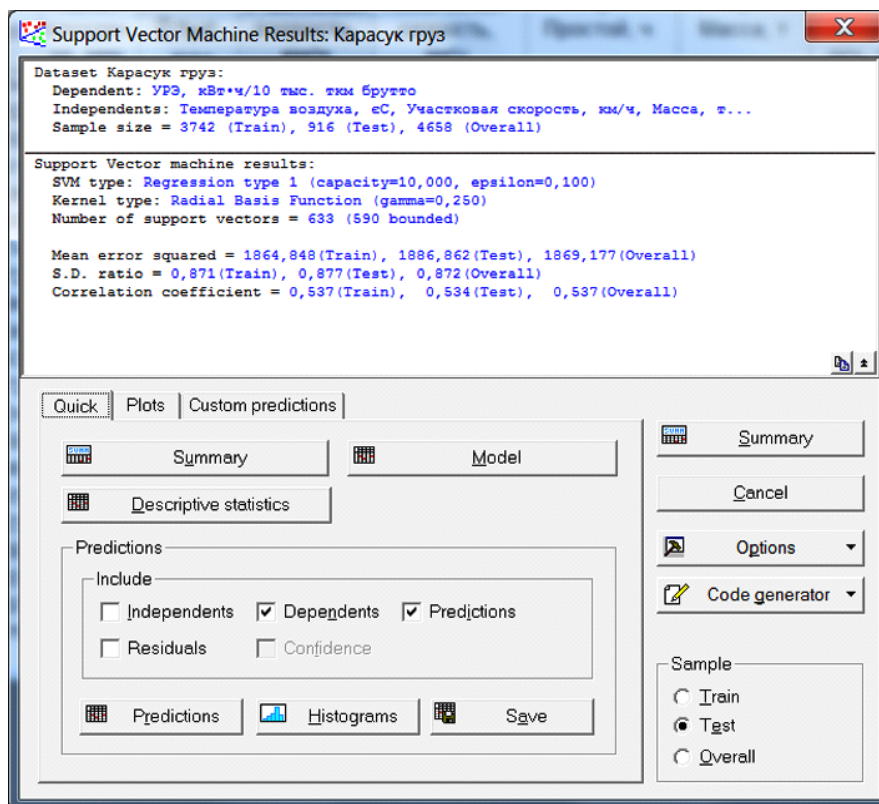


Рис. 1. Вид окна программы STATISTICA после формирования модели для удельного расхода электрической энергии на тягу поездов для выборки «Карасук груз.» на основе метода опорных векторов

разделяющей гиперплоскости [4]. Для построения оптимальной гиперплоскости SVM прибегает к итерационному алгоритму обучения, использующемуся для минимизации функции ошибок.

В случае SVM-регрессии необходимо оценить функциональную зависимость зависимой переменной  $y$  на множестве независимых переменных  $x$ . Это предполагает, что, как и в других задачах регрессии, отношения между независимыми и зависимыми переменными определяются детерминированной функцией  $f$  и добавлением некоторых аддитивных шумов. Задача состоит в том, чтобы найти функциональную форму для  $f$ , которая может правильно предсказать новые значения. Функциональная зависимость ищется путем обучения модели SVM на выборочной совокупности (обучающем множестве); этот процесс включает в себя как классификацию, так и последовательную оптимизацию функции ошибки. В зависимости от определения этой функции ошибок могут быть использованы два типа моделей SVM-регрессии: SVM-регрессия типа 1 ( $\epsilon$ -SVM-регрессия) и SVM-регрессия типа 2 (Nu-SVM-регрессия).

Существует ряд ядер (ядерных функций), которые могут быть использованы в моделях метода опорных векторов. Они включают в себя линейные, полиномиальные, радиальные базисные функции (RBF) и сигмовидные. На сегодняшний день RBF является наиболее популярным типом ядра, используемого в методе опорных векторов. Это происходит, главным образом, из-за его локализованных и конечных откликов по всему спектру действительной оси  $x$  [5, 6].

Чтобы осуществить моделирование в программе STATISTICA с использованием метода опорных векторов, необходимо открыть файл с исходной выбор-

кой и запустить соответствующее приложение командой Data mining – Machine learning – Support Vector Machine (SVM).

В открывающемся диалоговом окне «Support Vector Machines: имя файла выборки» необходимо настроить параметры метода:

1) на вкладке Quick (кнопка Variables) выбирается зависимая переменная (расход электрической энергии либо удельный расход электрической энергии на тягу поездов) в колонке Continuous dependents, а также выбираются все рассматриваемые независимые переменные (факторы) в колонке Continuous predictors;

2) на вкладке Sampling поставлена галочка в графе «Divide data into train and test samples» (по умолчанию), выбирается пункт «Use random sampling», в пункте «Size of training sample» выставляется 80 %, пункт Seed — 1000 (по умолчанию);

3) на вкладке SVM в разделе Regression SVM выбирается Type 1 (Type 2), параметры раздела Training constants — по умолчанию;

4) на вкладке Kernels в разделе Kernel type выбирается тип функции ядра: Linear (линейная), Polynomial (полином), RBF (радиально-базисная) или Sigmoid (сигмовидная), в разделе Kernel parameters — настройки по умолчанию;

5) на вкладке Cross-validation галочка отсутствует по умолчанию (данная настройка не используется);

6) на вкладке Training — параметры по умолчанию;

7) остальные настройки в окне Support Vector Machines — по умолчанию.

После нажатия на кнопку ОК происходит формирование математической модели и открывается диалоговое окно «Support Vector Machine Results:



Результаты моделирования процесса электропотребления на тягу поездов  
на основе метода опорных векторов с использованием программы STATISTICA

Выборка	Зависимая переменная	Независимые переменные (факторы)	Исходный (общий) объем выборки	Параметры метода SVM			MAPE, %	RMSE, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто (тыс. кВт·ч)	CV
				Доля обучающей выборки	Тип SVM-регрессии	Тип функции ядра			
Карасук груз.	$W_{уд}$ , кВт·ч/10 тыс. ткм брутто	$t$ , °C $V_{уч}$ , км/ч $m_c$ , т $q$ , т	4658	80 %	1	Linear	18,29	35,67	0,21
						Polynomial	15,77	33,66	0,20
						RBF	21,05	43,44	0,25
						Sigmoid	272,29	546,80	3,21
					2	Linear	21,33	40,21	0,24
						Polynomial	18,47	35,47	0,21
<b>RBF</b>	<b>14,31</b>	<b>33,43</b>	<b>0,20</b>						
Новосиб. – Бараб. пасс.	$W_{уд}$ , кВт·ч/10 тыс. ткм брутто	$t$ , °C $V_{уч}$ , км/ч $V_{техн}$ , км/ч $m_c$ , т	2305	80 %	1	Linear	10,89	16,86	0,13
						Polynomial	10,17	17,47	0,13
						RBF	10,17	16,01	0,12
						Sigmoid	97,27	186,08	1,43
					2	Linear	11,65	18,42	0,14
						Polynomial	10,62	17,02	0,13
<b>RBF</b>	<b>9,49</b>	<b>15,79</b>	<b>0,12</b>						
Омск – Ирг. приг.	$W$ , тыс. кВт·ч	$t$ , °C $m_c$ , т	742	80 %	1	Linear	21,00	238,16	0,26
						Polynomial	27,15	281,22	0,31
						<b>RBF</b>	<b>19,31</b>	<b>232,62</b>	<b>0,25</b>
						Sigmoid	493,57	8193,24	8,97
					2	<b>Linear</b>	<b>19,85</b>	<b>232,38</b>	<b>0,25</b>
						Polynomial	27,05	297,98	0,33
<b>RBF</b>	<b>19,99</b>	<b>225,76</b>	<b>0,25</b>						
					Sigmoid	554,50	5939,35	6,50	

имя файла выборки», в котором отражена информация о сформированной модели. Вид этого окна для модели, полученной для выборки «Карасук груз.», представлено на рис. 1. Результаты прогнозирования можно увидеть, нажав в этом окне кнопку Predictions, предварительно выбрав объем выборки, с которой будут сравниваться результаты прогнозирования (раздел Sample содержит три настройки — Train (обучающая), Test (тестовая) и Overall (общая)).

Для исследования предполагается формирование математических моделей для трех рассматриваемых выборок на основе метода SVM по указанной последовательности действий с изменением типа SVM-регрессии и функции ядра (остальные параметры остаются без изменения). Для изменения настроек необходимо закрыть окно «Support Vector Machine Results: имя файла выборки», в результате чего произойдет возврат к исходному окну «Support Vector Machines: имя файла выборки». При этом рассматриваются и оцениваются результаты прогнозирования по тестовой выборке, составляющей в данном случае 20 % наборов значений от исходной выборки (в диалоговом окне «Support Vector Machine Results: имя файла выборки» в разделе Sample выбирается пункт Test).

Для оценки качества моделирования рассчитываются следующие показатели:

— MAPE (mean absolute percentage error — средняя абсолютная ошибка в процентах):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|W_{actual} - W_{modeled}|}{W_{actual}}. \quad (1)$$

— RMSE (root mean squared error — средняя квадратичная ошибка):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{actual} - W_{modeled})^2}. \quad (2)$$

— CV (coefficient of variation — коэффициент вариации):

$$CV = \frac{RMSE}{W_{actual}}, \quad (3)$$

где  $n$  — объем тестовой выборки;  
 $W_i$  — фактическое (actual) или смоделированное (modeled) значение расхода электрической энергии;  
 $\bar{W}_i$  — среднее фактическое или смоделированное значение расхода электрической энергии.

Для расчета указанных показателей тестовая выборка и результаты прогнозирования копируются в Microsoft Excel.

Сравнение результатов моделирования процесса электропотребления на тягу поездов различными методами

Выборка	Тип модели	MAPE, %	RMSE, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто (тыс. кВт·ч)	CV
Карасук груз.	Регрессия	15,18	32,97	0,19
	ИНС	15,38	33,61	0,19
	SVM	14,31	33,43	0,19
Новосиб. – Бараб. пасс.	Регрессия	10,22	16,70	0,13
	ИНС	10,69	17,53	0,14
	SVM	9,49	15,79	0,12
Омск – Ирт. приг.	Регрессия	15,75	166,88	0,20
	ИНС	14,73	157,91	0,19
	SVM	19,31	232,62	0,25

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Жирным шрифтом выделены параметры наилучших моделей.

На основании полученных результатов моделирования на основе метода опорных векторов с использованием средств программы STATISTICA можно заключить, что:

— для прогнозирования удельного расхода электрической энергии на тягу поездов на участках с грузовым и пассажирским движением («Карасук груз.» и «Новосиб. – Бараб. пасс.») лучше всего подходит SVM-регрессия тип 2 с радиально-базисной функцией ядра (средняя абсолютная ошибка MAPE в данном случае минимальна, а также RMSE и CV);

— для участка «Омск – Ирт. приг.» подходит SVM-регрессия любого типа с радиально-базисной функцией ядра (аналогично: наименьшие значения всех оценочных показателей — MAPE, RMSE и CV).

Выполнено сравнение полученных результатов с другими методами моделирования процессов электропотребления: множественная регрессия и искусственные нейронные сети (ИНС) [7] (табл. 3). Результаты сравнения показывают, что для двух выборок из трех метод опорных векторов демонстрирует несколько лучшие результаты, чем остальные методы. Это позволяет рекомендовать применение метода SVM для моделирования процесса электропотребления на железнодорожном транспорте.

#### Библиографический список

1. Каштанов, А. Л. Современные подходы к оценке фактической экономии электроэнергии в системе тягового электропитания на основе искусственных нейронных сетей и нечетких нейронных сетей / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Д. О. Силуанов, В. В. Эрбес // Вестник РГУПС. — 2015. — № 2. — С. 63–67.
2. Комяков, А. А. Применение метода главных компонент для формирования математической модели процесса электропотребления на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков // Машиностроение : сетевой электрон. научн. журн. — 2016. — Т. 4, № 3. — С. 27–32.

3. Абдурахманов, А. М. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) / Абдурахманов А. М., Володин М. В., Зыбин Е. Ю., Рябченко В. Н. // Электротехника : сетевой электрон. научн. журн. — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 3–23.

4. Зубков, Е. В. Методы интеллектуального анализа данных и обнаружение вторжений / Е. В. Зубков, В. М. Белов // Вестник СибГУТИ. — 2016. — № 1. — С. 118–133.

5. StatSoft, Inc. (2012). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. — Режим доступа : <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения: 15.09.2016).

6. Федосин, А. С. Модель потребления электроэнергии в многоквартирных жилых домах на основе метода опорных векторов / А. С. Федосин // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах / С.-Петербургский гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). — СПб., 2015. — С. 419–423.

7. Черемисин, В. Т. Планирование расхода электрической энергии с применением ИНС / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, О. А. Коломоец // Железнодорожный транспорт. — 2013. — № 11. — С. 56–58.

**ЧЕРЕМИСИН Василий Титович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог; директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте.

Адрес для переписки: [cheremisinvt@gmail.com](mailto:cheremisinvt@gmail.com)

**КОМЯКОВ Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теоретической электротехники.

Адрес для переписки: [tskom@mail.ru](mailto:tskom@mail.ru)

**ИВАНЧЕНКО Владимир Иванович**, аспирант кафедры подвижного состава электрических железных дорог.

Адрес для переписки: [ivanchenko-v.i@yandex.ru](mailto:ivanchenko-v.i@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 11.10.2016 г.

© В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассмотрена проблема исследования и представлены результаты исследования магнитоэлектрической машины переменного тока из состава вентильного электропривода. Расчет исследуемой машины проводился с использованием последней версии комплекса программ «ELCUT 6.2 Профессиональный». Цель работы — построение адекватной геометрической модели исследуемого объекта, получение распределения силовых линий магнитного поля машины, оценка распределения магнитной индукции в воздушном зазоре, гармонический анализ нормальной компоненты магнитной индукции. Полученные результаты, в пределах погрешности на выбранный метод исследования, являются адекватными. На основе результатов исследования предлагается методика получения картины магнитного поля синхронной машины и проведения гармонического анализа.

**Ключевые слова:** постоянные магниты, синхронная машина, ELCUT, магнитные системы, вентильный электропривод, множественная регрессия, искусственные нейронные сети.

Электропривод осуществляет электромеханическое преобразование энергии, используется практически во всех сферах человеческой деятельности, где нужны движение и механическая работа, потребляет более 60 % всей вырабатываемой электроэнергии [1]. Для более эффективного использования электрических машин в составе электроприводов необходимо детальное изучение магнитных систем этих машин. Это позволит правильно подобрать нагрузку машины, отследить изменения картин электромагнитных полей внутри и снаружи исследуемого образца, создать на основе этого задел для проектирования новых, более рациональных конструкций электрических машин.

Анализ продукции ведущих мировых производителей систем привода и материалов опубликованных научных исследований в этой области позволяет отметить следующие ярко выраженные тенденции развития электропривода: неуклонно снижается доля систем привода с двигателями постоянного тока и увеличивается доля таких систем с двигателями переменного тока. Это связано с низкой надежностью механического коллектора и более высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока [2].

Современная преобразовательная техника позволяет осуществить замену механического коммутатора полупроводниковым (вентильным). В таком случае вместо машины постоянного тока возможно применение синхронной машины переменного тока. Совокупность вентильного коммутатора, усилителя, в роли которого используется автономный инвертор напряжения или тока, и синхронной машины представляет собой так называемый вентильный электро-

привод, причем характеристики синхронной машины формируют основные его параметры.

Широкое применение магнитоэлектрических машин во многих отраслях промышленности связано с появлением на рынке доступных постоянных магнитов на основе неодимовых сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой (более 800 кА/м) и остаточной индукцией 0,8–1,4 Тл. В малой энергетике повысился интерес к разработке синхронных генераторов с постоянными магнитами. Электрогенератор с ротором на постоянных магнитах может быть построен по двум основным конструктивным схемам: аксиального типа с торцевым расположением постоянных магнитов и коаксиального типа с радиальным расположением магнитов и фазных обмоток статора. Одним из технических решений аксиального типа является разработка электрогенераторов на базе асинхронных электрических машин, у которых короткозамкнутый ротор заменен на индуктор, имеющий в своем составе постоянные магниты [3].

Для исследования картин поля в последнее время может быть использовано множество различных программных продуктов, например Finite Element Method Magnetics (FEMM) [4], ANSYS Maxwell, FlexPDE и многие другие. Особенное внимание предлагается уделить программному продукту ELCUT российской организации «ООО «ТОР». ELCUT — это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи различных типов. С помощью ELCUT можно решать сложные задачи расчета полей и теории упругости на персональных компьютерах, не прибегая к помощи больших ЭВМ или рабочих станций

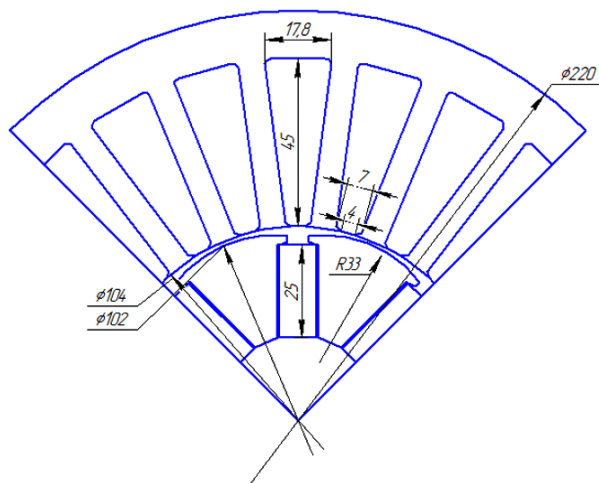


Рис. 1. Фрагмент поперечного сечения магнитоэлектрической синхронной машины

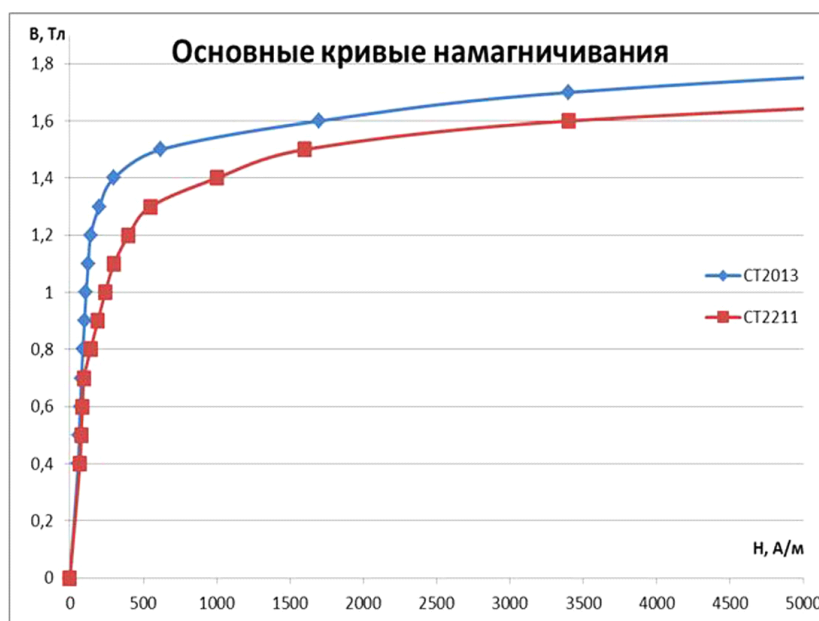


Рис. 2. Основные кривые намагничивания

[5]. Основным методом решения задач в ELCUT является метод конечных элементов (МКЭ).

Рассмотрим задачу комплексного исследования магнитоэлектрической синхронной машины в среде ELCUT.

Исследуемая машина состоит из статора и ротора. Статор идентичен статору асинхронной машины АИР132М8 мощностью 5,5 кВт. Число пазов статора  $Z_1 = 24$ . Ротор представляет систему, состоящую из восьми редкоземельных магнитов  $NdFeB$  и восьми ферромагнитных концентраторов. Величина воздушного зазора между статором и ферромагнитными концентраторами  $\delta = 1$  мм. Фрагмент поперечного сечения машины представлен на рис. 1.

Особенностью работы синхронной машины является то, что в установившемся режиме работы (после входа ротора в синхронизм) положение ротора относительно поля статора не меняется, поскольку ротор вращается с такой же частотой, что и поле. Поэтому целей исследования можно достичь решением задачи магнитостатики.

Исходные данные для моделирования:

— магнитопрод статора — сталь СТ2211 (с учетом нелинейности (рис. 2) кривой намагничивания стали) [6];

— ферромагнитные концентраторы — конструкционная сталь СТ2013 (с учетом нелинейности (рис. 2) кривой намагничивания стали);

— постоянные магниты на основе  $NdFeB$  — коэрцитивная сила магнита  $H_c = 1000$  кА/м, остаточная индукция  $B_r = 1,32$  Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной  $\mu_{пм} = 1,03$  [6];

— вал ротора выполнен из немагнитного материала с магнитной проницаемостью  $\mu_0 = 1$  [6];

— магнитная проницаемость ротора принята равной  $\mu_b = 1$ ;

— обмотка статора размещена таким образом, что создает восемь полюсов. Материал обмотки — медь, магнитная проницаемость  $\mu_{cu} = 1$ ;

— магнитная проницаемость изоляции магнитов принята равной  $\mu_m = 1$ ;

Для расчета плотности тока в обмотках статора, в соответствии с графиками электромагнитных нагрузок двигателей (рис. 3) и средних значений произведения  $AJ$  (рис. 4) по наружному диаметру статора ( $D_a = 0,22$  м), выбираем соответствующие значения [7]:

— электромагнитная нагрузка двигателя  $A = 27$  А/м $\cdot 10^3$ ;

— произведение  $AJ = 189$  А $^2$ /м $^3 \cdot 10^9$ ;

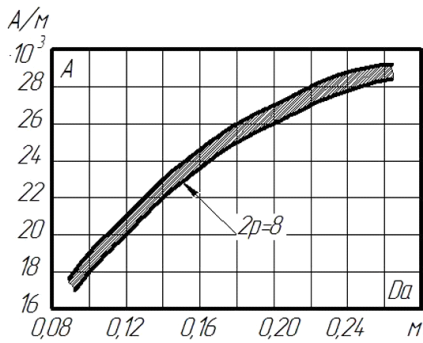


Рис. 3. Электромагнитные нагрузки двигателей

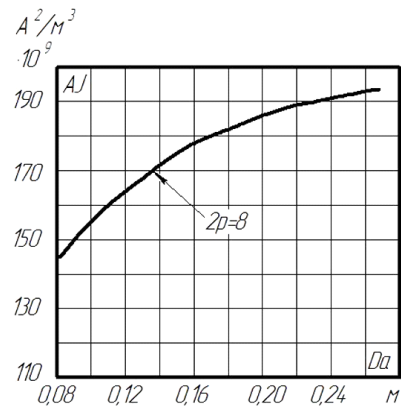
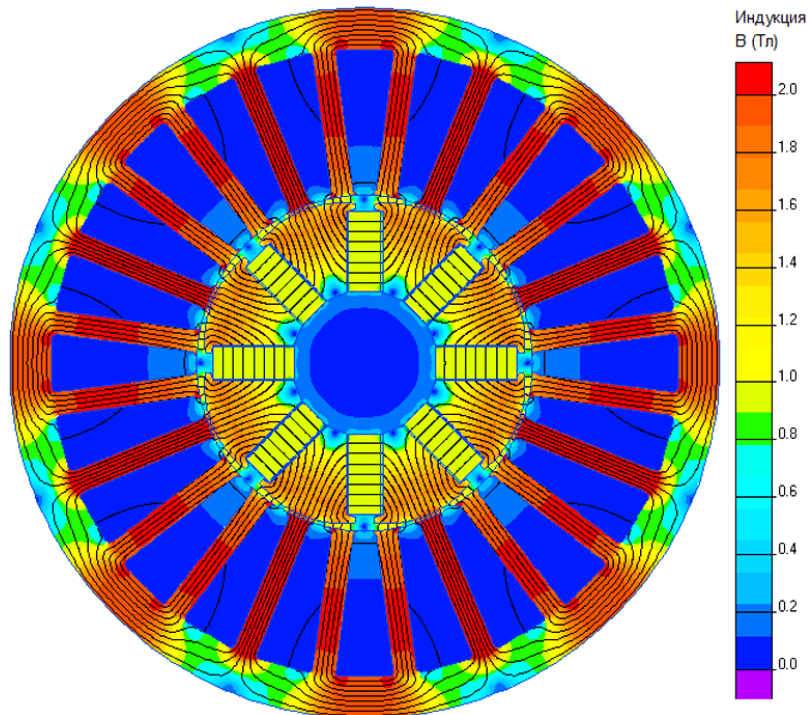
Рис. 4. Средние значения произведения ( $AJ$ )

Рис. 5. Распределение магнитной индукции и напряженности магнитного поля в сечении магнитоэлектрической синхронной машины

— плотность тока в данном случае можно определить, разделив произведение  $AJ$  на электромагнитную нагрузку  $A$ :  $J=AJ/A=189 \cdot 10^9/27 \cdot 10^3=7106 \text{ A/м}^2$ .

Для имитации переменного тока в обмотках статора задаем плотность тока в фазах:

$$J(A+) = 7 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2; J(A-) = -7 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2.$$

В фазах В и С, в соответствии с трехфазной синусоидой, уменьшаем плотность тока на половину и меняем направления токов:

$$J(B+) = -3,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2; J(B-) = 3,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2;$$

$$J(C+) = -3,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2; J(C-) = 3,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2.$$

Поскольку в данном исследовании интерес представляет картина поля внутри машины, границей расчета выбираем внешний контур машины. Определяем для этого контура магнитный потенциал равным нулю, в ходе расчета поле за пределы машины не выходит.

После построения сетки конечных элементов программа приступает к расчету созданной модели. Результаты расчета представлены в виде цветной картины поля с силовыми линиями и векторами напряженности магнитного поля (рис. 5).

Картина поля симметричная, а значит, грубых ошибок при проектировании допущено не было. По полученной картине можно определить распределение индукции по объему исследуемой машины, увидеть векторы и силовые линии, определить задействованные и незадействованные части магнитопроводов ротора и статора.

При исследовании синхронной электрической машины интерес представляют распределение индукции в воздушном зазоре и гармонический анализ нормальной компоненты магнитной индукции.

Для определения индукции в воздушном зазоре был проведен контур, охватывающий два полюсных деления. График индукции через этот контур представлен на рис. 6.

На графике наблюдаем негладкую синусоидальную кривую. Форма кривой обусловлена конструкцией статора, а именно наличием зубцов и пазов. Максимумам индукции соответствуют зубцы статора, а минимумам — пазы статора. Переходу графика через ось абсцисс соответствует смена полюсного деления. На рис. 6 также представлена аппроксимация

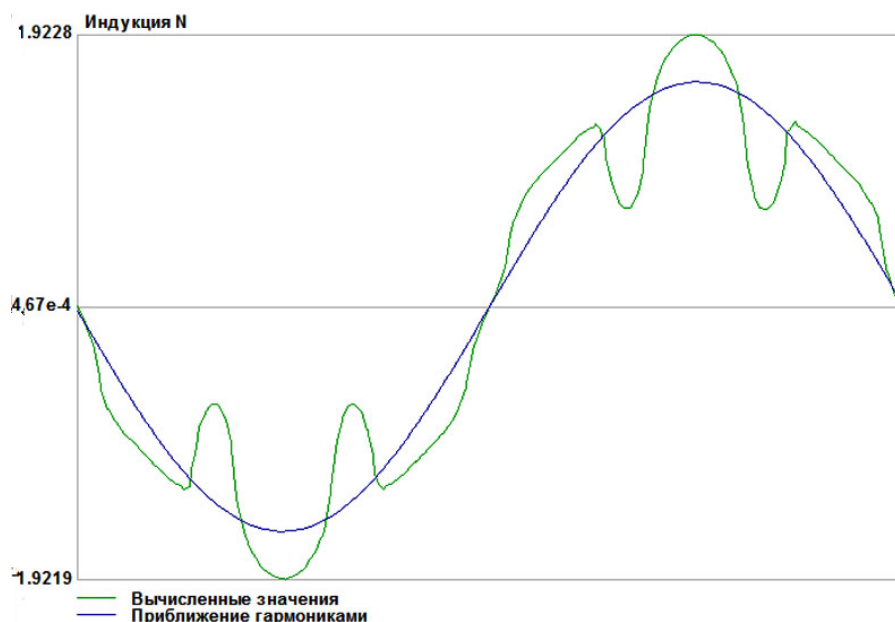


Рис. 6. Распределение нормальной компоненты индукции в воздушном зазоре в пределах двух полюсных делений

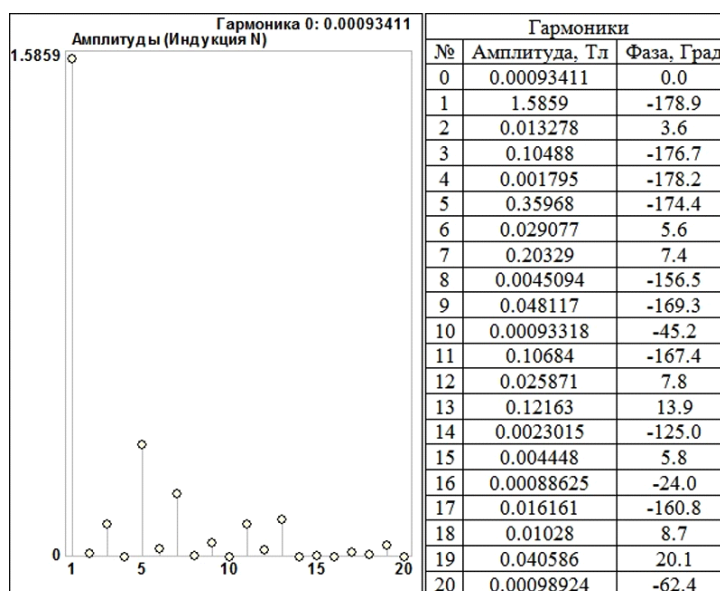


Рис. 7. Гармонический анализ нормальной компоненты магнитной индукции в воздушном зазоре в пределах двух полюсных делений

графика распределения индукции гармоникой 1-го порядка, имеющей наибольшую амплитуду.

Для оценки гармонического состава нормальной компоненты магнитной индукции воспользуемся встроенным в ELCUT гармоническим анализатором. Результаты анализа представлены графически и численно (рис. 7). График амплитуд гармоник показывает, что имеют место гармоники нечетного порядка, среди которых первая гармоника имеет наибольшее значение.

**Заключение.** В ходе проведенного исследования была построена геометрическая модель магнитоэлектрической синхронной машины переменного тока в среде ELCUT. Симметрия картины поля позволяет сделать вывод, что построение модели осуществлено верно. Негладкая синусоидальная форма полученного графика распределения магнитной индукции в воздушном зазоре свидетельствует о нали-

чии зубцовых колебаний магнитной индукции. Также был проведен гармонический анализ нормальной компоненты магнитной индукции с получением графических результатов и численных значений амплитуды и фазы гармоник до 20-й включительно и проведена аппроксимация кривой распределения магнитной индукции гармоникой первого порядка, имеющей максимальную амплитуду. Наиболее существенными являются 5-я и 7-я гармоники, составляющие соответственно 22,7 % и 12,8 % от первой гармоники. Полученные результаты соответствуют теоретическим представлениям о процессах, протекающих в магнитных системах синхронных машин. В соответствии с результатами исследования представлена методика получения карты поля магнитной системы и проведения гармонического анализа нормальной компоненты магнитной индукции в воздушном зазоре синхронной машины.

## Библиографический список

1. Ильинский, Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. — М.: Академия, 2008. — 208 с.
2. Гребеников, В. В. Анализ характеристик вентильных электродвигателей с зубцово-пазовой и явнополюсной конфигурацией статора / В. В. Гребеников, М. В. Прыймак. — Режим доступа: [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/natural/Vsntu/mechan/2012\\_132/2012\\_132/132\\_38.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Vsntu/mechan/2012_132/2012_132/132_38.pdf) (дата обращения: 10.09.2016).
3. Татевосян, А. А. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами / А. А. Татевосян, В. С. Мищенко. — Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — № 4 (148). — С. 90–93.
4. Зубков, Ю. В. Идентификация параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов методом численного моделирования магнитного поля / Ю. В. Зубков, Э. Г. Чеботков // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. — 2015. — № 3. — С. 136–141.

5. Руководство пользователя ELCUT. — СПб.: ПК TOP, 2016. — 292 с.

6. Гребеников, В. В. Электродвигатели с постоянными магнитами для ветроустановок и микро-ГЭС / В. В. Гребеников // Гідроенергетика України. — 2011. — № 1. — С. 43–48.

7. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов [и др.]. — М.: Юрайт, 2011. — 767 с.

**ЛЫСЕНКО Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: [deolas@mail.ru](mailto:deolas@mail.ru)

**СИМАКОВ Александр Владимирович**, магистрант гр. ЭЭМ-162 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: [a\\_v\\_simakov@rambler.ru](mailto:a_v_simakov@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 11.10.2016 г.

© О. А. Лысенко, А. В. Симаков

УДК 621.318.3

**А. С. ТАТЕВОСЯН  
А. В. РАДЧЕНКО**

Омский государственный  
технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ И ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ В ПАКЕТЕ ELCUT

В статье проводится исследование нестационарного магнитного поля при подключении обмотки электромагнита (ЭМ) с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками к источнику постоянного напряжения с целью исследования переходного процесса в цепи при заданной геометрии магнитной системы ЭМ, физических свойств используемых материалов, обмоточных данных и влияния вихревых токов в нештатных стальных магнитопроводах. Специфические особенности конструкции таких ЭМ связаны с их использованием в качестве подвесных электромагнитных сепараторов, предназначенных для извлечения ферромагнитных предметов из сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами. Необходимость исследования переходного процесса в цепи обмотки ЭМ связана с определением его динамических характеристик как сложного объекта управления.

**Ключевые слова:** электромагнит постоянного тока, межполюсный зазор, полюсные наконечники, расщепленные полюса, нестационарное магнитное поле, пондеромоторные силы.

Широкое применение на практике во многих отраслях промышленности получили подвесные электромагнитные железоотделители (ЭЖ) постоянного тока, для конструкции которых характерно применение электромагнитов (ЭМ) постоянного тока с наборными полюсами и полюсными наконечниками, отличающиеся от обычных электрических аппаратов автоматки отсутствием подвижного элемента — якоря и предназначенные для извлечения

ферромагнитных предметов из различных сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами. В таких ЭМ значительные пондеромоторные силы, действующие на ферромагнитные предметы, возникают вследствие резкой неоднородности магнитного поля в межполюсном зазоре, затухающего по мере удаления исследуемой точки от плоскости полюсных наконечников по закону, который отличается от экспоненциального [1].

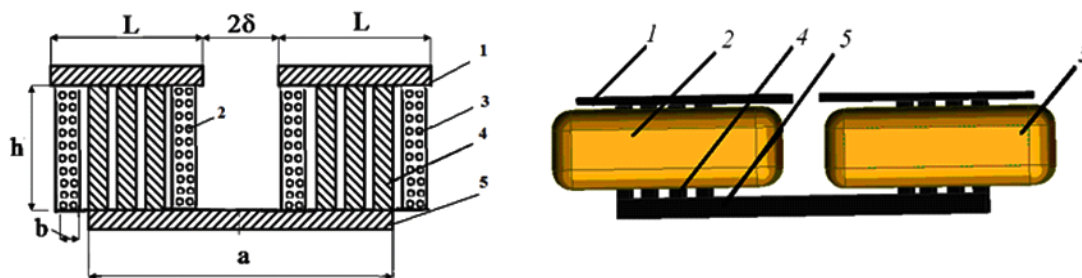


Рис. 1. Эскиз магнитной системы (слева) и внешний вид ЭМ (справа):  
1 — полюсные наконечники; 2, 3 — обмотка, состоящая из двух идентичных последовательно соединенных катушек; 4 — наборные полюса; 5 — ярмо;  
2δ — межполюсный зазор, L — ширина полюсного наконечника

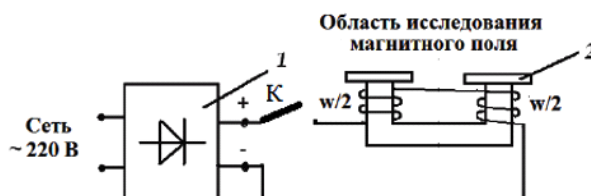


Рис. 2. Схема установки для исследования переходного процесса в электрической цепи:  
1 — выпрямитель; 2 — электромагнит; К — ключ

Особенности питания намагничивающих обмоток электромагнитных железоотделителей постоянным током исключают необходимость использования шихтованного магнитопровода. Составные части магнитопровода (наборные полюса, ярмо и полюсные наконечники) изготавливаются в виде цельно-металлических стальных плит, закрепленных между собой болтовыми соединениями.

Сложная конфигурация элементов магнитной системы и большие массогабаритные параметры намагничивающих обмоток, существенно превосходящие параметры электромагнитных катушек аппаратов электроавтоматики, ставят перед разработчиками сложные задачи, связанные с расчетами магнитного и теплового полей. Результатом расчета магнитного поля является определение напряженности магнитного поля и пондеромоторных сил во всех точках межполюсного зазора и за его пределами, а теплового поля — распределение температуры в объемах, занятых током.

При экспериментальном исследовании и расчете магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT 6.0 [1] удалось установить максимальное значение магнитной силы, которая не зависит от формы, размеров и природы извлекаемого тела, а характеризует только свойства магнитного поля и критерий качества разрабатываемой конструкции электромагнитного железоотделителя.

Результаты расчета теплового поля железоотделителя позволяют установить среднюю температуру перегрева намагничивающих обмоток. Однако математическая сложность решения этой задачи ведет к упрощенным подходам с использованием эмпирических формул [2, 3].

Наряду с исследованием рабочего режима, в котором по обмоткам электромагнитного железоотделителя проходит постоянный ток, значительный научный и практический интерес у разработчиков вызывает задача исследования динамических характе-

ристик электромагнитного железоотделителя, то есть работа ЭМ как объекта управления в переходных режимах.

В данной статье проводится исследование нестационарного магнитного поля при подключении обмотки электромагнита (ЭМ) с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками к источнику постоянного напряжения с целью исследования переходного процесса в цепи при заданной геометрии магнитной системы ЭМ, физических свойств используемых материалов, обмоточных данных и влияния вихревых токов в нешихтованных стальных магнитопроводах. Конструкция ЭМ соответствует конструкции электромагнитного железоотделителя [4, 5].

Ниже приводится пример решения задачи с использованием профессиональной версии комплекса программ ELCUT 6.0 [6].

Эскиз магнитной системы и внешний вид ЭМ приведен на рис. 1. Электрическая схема подключения обмотки ЭМ к источнику постоянного напряжения показана на рис. 2.

Исходными данными для решения задачи являются геометрия магнитной системы электромагнита с полным числом витков обмотки  $w = 1100$ , активным сопротивлением катушек, расположенных на полюсах,  $R_1 = R_2 = 7,6$  Ом. Напряжение источника питания равно  $U = 28$  В. Магнитопровод, изготовленный из горячекатаной стали марки Ст. 20, имеет ярмо сердечника размерами  $376 \times 140 \times 20$  мм, шесть наборных полюсов размерами  $20 \times 140 \times 140$  мм, два полюсных наконечника размерами  $160 \times 140 \times 20$  мм. Толщина катушки 20 мм, высота катушки 140 мм, зазор между наборными полюсами 20 мм, толщина стенок каркаса катушек 5 мм.

Физические свойства используемых сред: относительные магнитные проницаемости стали  $\mu'_c = 2000$  и воздуха  $\mu'_в = 1$ , электропроводность стали  $\gamma_c = 8 \cdot 10^6$  Ом $\cdot$ м, электропроводность медного обмоточного провода  $\gamma_M = 56 \cdot 10^6$  Ом $\cdot$ м.

Нестационарное магнитное поле ЭМ с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками



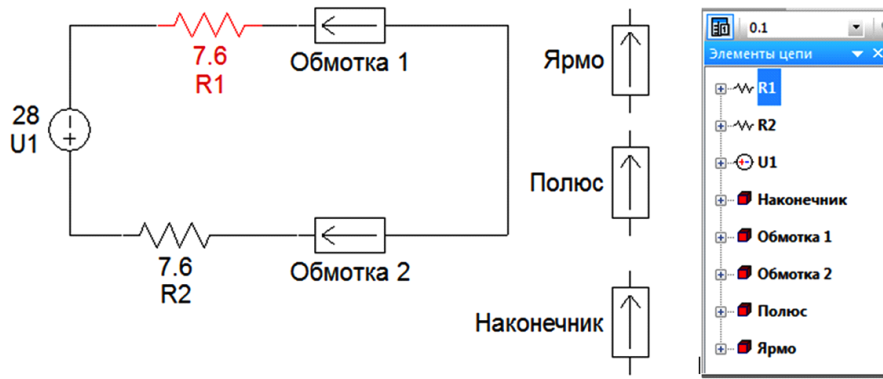


Рис. 3. Присоединенная электрическая цепь, содержащая пассивные элементы, источник постоянного напряжения и массивные стальные проводники, находящиеся в магнитном поле

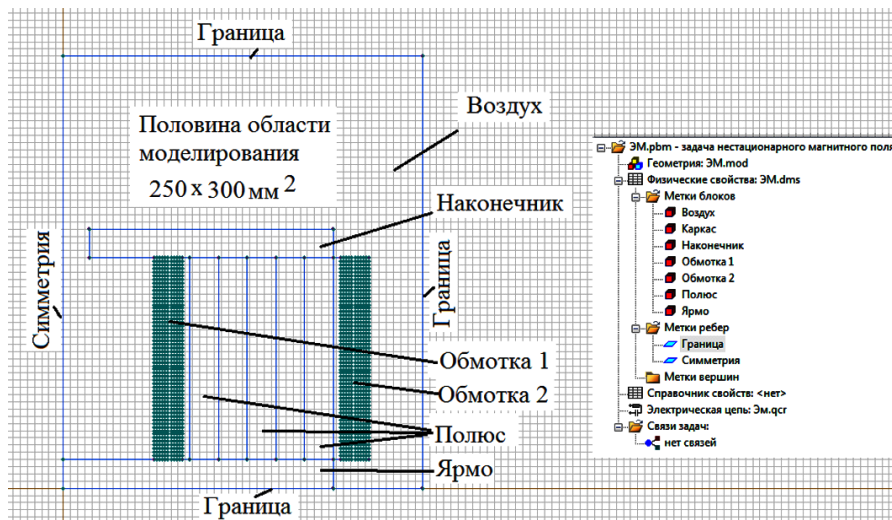


Рис. 4. Окно программы на этапе построения геометрии модели

моделируется в пакете ELCUT совместно с присоединенной электрической цепью, показанной на рис. 3.

Прямоугольная форма элементов магнитопровода и катушек позволяет принять допущение о плоскопараллельном характере поля ЭМ. В окне описания решаемой задачи заданы параметры, такие как свойства материалов, источники поля и граничные условия. Определен тип задачи — нестационарное магнитное поле. Класс модели — плоскопараллельная модель магнитного поля. Единицы длины — миллиметры. Координаты — декартовы. Расчет — обычный. Симметрия магнитной системы позволяет выполнить моделирование нестационарного магнитного поля ЭМ на половине расчетной области. Этап построения геометрии модели с присвоением меток блокам в контекстном меню пакета ELCUT показан на рис. 4. За пределами расчетной области магнитное поле отсутствует, поэтому на метке ребра «Граница» в модели значение векторного магнитного потенциала принимается равным нулю. На метке ребра «Симметрия» касательная составляющая напряженности магнитного поля равна нулю. Метки блоков «Обмотка 1» и «Обмотка 2» моделируют одну катушку ЭМ, представленную из 550 витков, соединенных последовательно (рис. 5).

В контекстном меню настройки временных параметров задачи (рис. 5) период времени интегрирования (переходного процесса) определен 0,1 с, шаг

интегрирования 0,001 с, расчет переходного процесса начинается с момента времени ноль.

Перед решением задачи область моделирования покрывается сеткой конечных элементов. При использовании автоматического шага дискретизации (разбиения) расчетной области сетка конечных элементов состоит из 4437 узлов. Машинное время решения задачи нестационарного магнитного поля в профессиональной версии пакета ELCUT 6.0 составило 11505 с.

Результаты расчета нестационарного магнитного поля ЭМ с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками с учетом влияния вихревых токов в стали показаны на рис. 6 и 7.

Тепловыделение в обмотке с током по результатам расчета нестационарного магнитного поля ЭМ в конце времени интегрирования, определенное с помощью интегрального калькулятора пакета ELCUT, составляет 2190 Вт/м<sup>3</sup>.

На рис. 6 (справа) приведена временная зависимость тока в обмотке ЭМ, рассчитанная в профессиональной версии пакета ELCUT 6.0, но без учета влияния вихревых токов в стальных деталях магнитопровода (ядро, наборные полюса, полюсные наконечники).

Сравнительный анализ полученных в ходе расчета в пакете ELCUT временных зависимостей тока в обмотке ЭМ с учетом и без учета влияния вихревых токов в стали (рис. 6) показывает, что вихревые

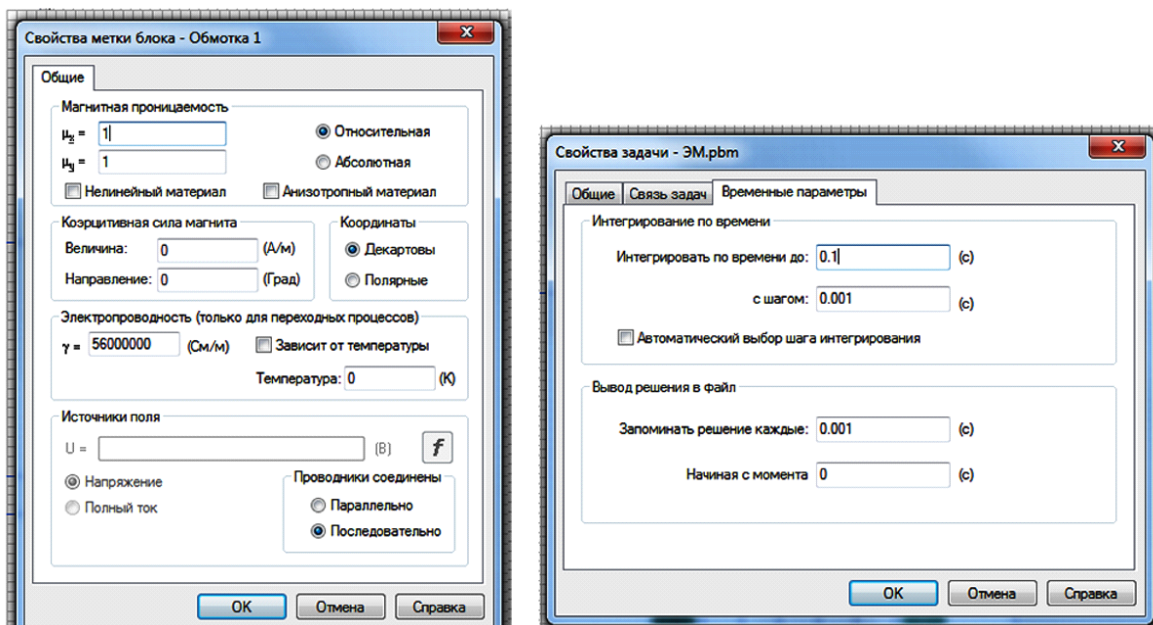


Рис. 5. Контекстное меню пакета ELCUT для задания свойств метки блока — обмотки 1 (слева) и временных параметров задачи (справа)

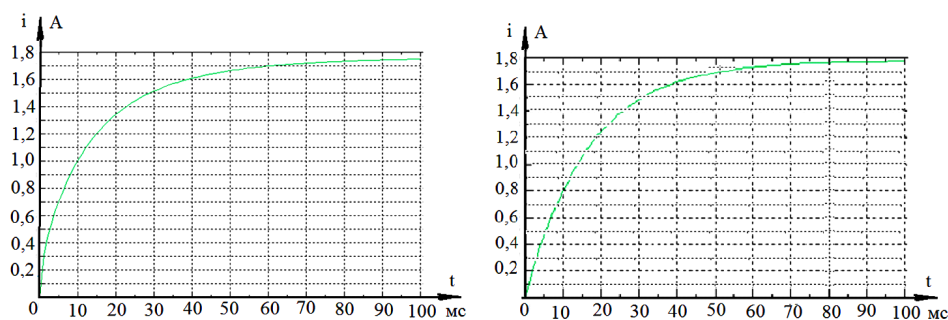


Рис. 6. Временные зависимости тока в обмотке ЭМ при переходном процессе с учетом влияния вихревых токов в стали (слева) и без учета вихревых токов (справа)

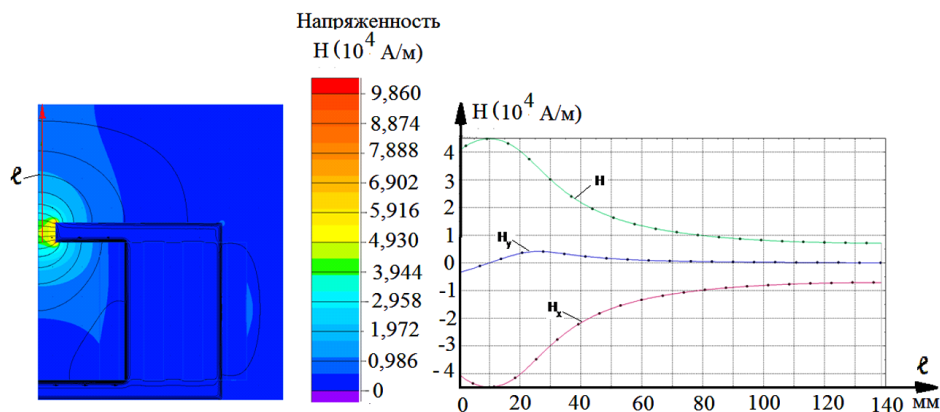


Рис. 7. Цветная картина магнитного поля ЭМ, полученная по окончании времени интегрирования (слева), цветная шкала модуля напряженности магнитного поля (центр), график распределения модуля и составляющих вектора напряженности магнитного поля на середине межполюсного зазора в направлении контура (справа)

токи оказывают существенное влияние на динамические характеристики ЭМ.

#### Выводы.

1. Установлено существенное влияние вихревых токов в стали магнитопроводов на характер переходного процесса в цепи обмотки ЭМ при подключении ее к источнику постоянного напряжения.

2. Анализ временных зависимостей тока в обмотке ЭМ показывает, что при переходном процессе влияние вихревых токов в стали заметно сказывается на пандеромоторной силе в межполюсном зазоре в сторону их увеличения вследствие снижения индуктивности обмотки и уменьшения, соответственно, постоянной времени переходного процесса.

3. Численная модель нестационарного магнитного поля, построенная в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия), соответствует физической картине проявления вихревых токов в стали на полученную временную зависимость тока в обмотке ЭМ.

#### Библиографический список

1. Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT / А. С. Татевосян [и др.] // Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 2. – С. 133–140.
2. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов / М. В. Загирняк [и др.] // Вісник Кременчужського національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 3. – С. 9–14.
3. Приближенная формула напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного желез-

отделителя / М. В. Загирняк [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 1992. – № 3. – С. 62–65.

4. Сумцов, В. Ф. Электромагнитные железоотделители / В. Ф. Сумцов. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
5. Магнитные сепараторы – многообразие конструкций / А. С. Мищенко, А. М. Тишин. – Режим доступа : <http://www.amtc.ru/publications/articles/2053> (дата обращения: 10.05.2016).
6. Программа ELCUT. Руководство пользователя. – СПб. : ООО «Тор», 2012. – 356 с. – Режим доступа : [http://www.elcut.ru/free\\_doc\\_r.htm](http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm) (дата обращения: 12.01.2016).

**ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

**РАДЧЕНКО Анна Викторовна**, ассистент кафедры теоретической и общей электротехники.  
Адрес для переписки: mechta7102@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2016 г.

© А. С. Татевосян, А. В. Радченко

## Книжная полка

**Важов, В. Техника высоких напряжений : учеб. / В. Важов, В. Лавринович. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 264 с. – ISBN 978-5-16-010565-9.**

Изложены основы техники высоких напряжений применительно к электроэнергетике. Освещены физические аспекты электроразрядных процессов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках. Описаны конструкции внешней изоляции линий электропередачи и подстанций; рассмотрены основные принципы построения изоляции оборудования высокого напряжения (силовых трансформаторов, высоковольтных конденсаторов, кабелей, электрических машин, коммутационных аппаратов); кратко освещены вопросы назначения и построения высоковольтных испытательных установок, испытания и измерения, а также описаны внутренние и атмосферные перенапряжения в электрических системах, меры и средства защиты от них. Предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика», также может быть полезен инженерно-техническим работникам предприятий, энергосистем и проектных институтов.

**Борисевич, А. В. Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями: обзор состояния и новые результаты : моногр. / А. В. Борисевич. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 102 с.**

Монография посвящена методам повышения энергоэффективности векторного управления асинхронными электродвигателями. Рассмотрена модель асинхронного электродвигателя и описан принцип векторного управления. Дан краткий обзор существующих методов минимизации мощности потерь при векторном управлении. Приведены новые методы минимизации мощности потерь на основе численного поиска, а также на основе модели электродвигателя. Отдельно рассмотрен вопрос минимизации энергии потерь при ступенчатом изменении механической нагрузки. Все разработанные методы проверены с помощью моделирования и в результате экспериментов. Для инженеров, научных работников, аспирантов и студентов высших учебных заведений, интересующихся вопросами энергосбережения и электропривода.

**Кудинов, А. А. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения : моногр. / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 319 с.**

Рассмотрены вопросы энергосбережения в теплоэнергетических установках. Представлены результаты экспериментальных исследований, математические модели тепло- и массообменных процессов, методики теплотехнических расчетов теплообменников различного назначения. Обобщены данные экспериментально-теоретических разработок в области создания новых тепловых схем котельных установок, конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей и вакуумных деаэраторов, совершенствования тепломеханического оборудования паротурбинных ТЭС. Предназначена для преподавателей, аспирантов и студентов теплоэнергетических специальностей вузов, будет полезна инженерно-техническим работникам энергетической промышленности.

## СИНТЕЗ МНОГОКОНТУРНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАССИВНЫМ ЯКОРЕМ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ELCUT

В статье дается решение цепно-полевой задачи расчета нестационарного магнитного поля в линейном электромагнитном двигателе с массивным якорем, возникающего вследствие переходного процесса при подключении его обмотки к источнику постоянного напряжения при фиксированной величине рабочего зазора, изменяющейся в пределах хода якоря. Линейные электромагнитные двигатели с массивным якорем являются неотъемлемой частью силовых электромагнитных импульсных систем, получивших широкое применение во многих областях техники, где существует необходимость генерации силовых ударных нагрузок заданной частоты, воздействующих на исполнительные органы технологических машин или обрабатываемую среду. При расчете нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT 6.0 (профессиональная версия) учитывается осевая симметрия магнитной системы электромагнитного двигателя, вихревые токи в стали, возникающие в массивном якорю. Исследование переходного процесса в электрической цепи обмотки на основе численного расчета нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT направлено на получение временной зависимости тока обмотки, выделения из нее свободной составляющей и разложения затухающей кривой в экспоненциальный ряд. По операторному сопротивлению цепи устанавливаются уравнения связи между амплитудными значениями и коэффициентами затухания экспонент, участвующих в разложении кривой тока обмотки. По ним определяются параметры многоконтурной схемы замещения электромагнитного двигателя с массивным якорем.

**Ключевые слова:** электромагнитный двигатель, массивный якорь, переходный процесс, многоконтурная схема замещения, рабочий зазор, ход якоря.

Линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) являются составной частью силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС), генерирующих импульсы силы определенной частоты и интенсивности, воздействующей на исполнительный орган машины или на обрабатываемую среду. Совпадение параметров движения исполнительного и рабочего органов обеспечило широкое применение СЭМИС в различных областях техники [1–4]. Якорь в ЛЭМД может быть одновременно рабочим органом машины: бойком в молотах, поршнем в компрессорах и насосах, пуансоном в прессах, вытеснителем в газовых криогенных машинах. Создание силовых, зачастую ударных нагрузок исполнительных органов технологических машин ведет к необходимости использования в конструкциях ЛЭМД массивного якоря, изготовленного из нешихтованного магнитопровода, предотвращающего его разрушение в процессе эксплуатации [5–8].

Особенности импульсного питания обмотки ЛЭМД, сложная геометрия элементов магнитной системы при наличии в ней переменной величины рабочего зазора, обусловленной движением якоря под действием электромагнитных сил и упругих сил сжимаемой пружины, вихревые токи в массивном якорю создают большие математические трудности для определения его динамических характеристик [4, 6, 7, 9].

Несмотря на то что работы по созданию оптимальных СЭМИС и развитию их теории ведутся давно [1–5], проблема поиска решения задачи динамики ЛЭМД с массивным якорем остается до сих пор актуальной. Появление на потребительском рынке новых пакетов прикладных программ исследования динамики сложных систем (пакеты ELCUT, Matlab/Simulink и др.) позволяет надеяться, что построенная полная математическая модель динамики ЛЭМД с массивным якорем будет успешно

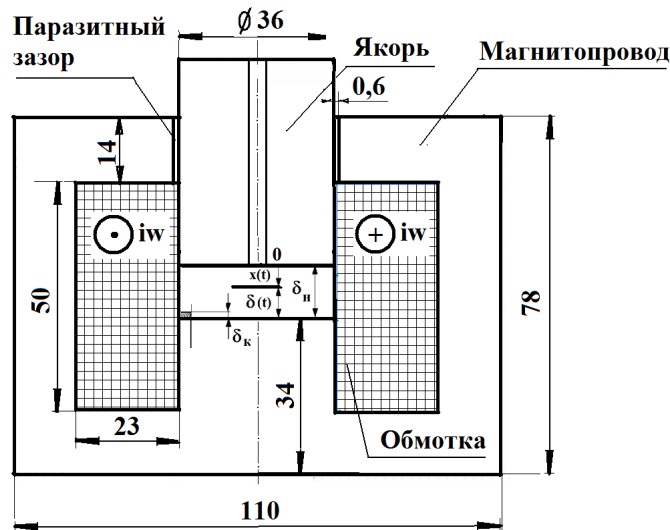


Рис. 1. Геометрия магнитной системы ЛЭМД втяжного типа: прямоугольный магнитопровод собран из тонких листов электротехнической стали; яркость — цельнометаллический изготовлен из стали той же марки;  $\delta_n \leq x(t) \leq \delta_k$  — ход яркости,  $\delta_n$  и  $\delta_k$  — соответственно начальный и конечный рабочий зазор;  $\delta_0$  — паразитный зазор

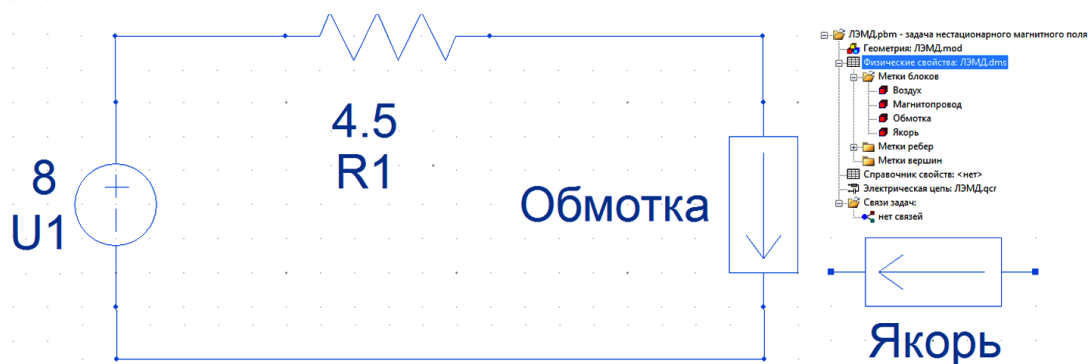


Рис. 2. Присоединенная электрическая цепь, содержащая пассивные элементы, источник постоянного напряжения и массивный яркость

решена. Однако в настоящее время при построении модели приходится использовать упрощающие задачу допущения, при которых ее решение распадается на несколько этапов [6–8].

Вариант синтеза многоконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным яркостью с последующим составлением на ее основе системы уравнений динамики СЭМИС и применения численных методов анализа для определения ее динамических характеристик представляется целесообразным [10–13].

В данной статье предлагается методика определения параметров многоконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным яркостью, основанная на решении задачи нестационарного магнитного поля в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) [14] при фиксированной величине рабочего зазора, изменяющегося в пределах хода яркости.

Решение задачи рассмотрим на примере магнитной системы ЛЭМД с массивным яркостью, эскиз которой показан на рис. 1.

Расчет нестационарного магнитного поля ЛЭМД с массивным яркостью в комплексе программ ELCUT связан с необходимостью определения временной зависимости тока переходного процесса при подклю-

чении обмотки к источнику постоянного напряжения с заданием фиксированной величины рабочего зазора, изменяющейся в пределах хода яркости.

Наличие в конструкции магнитной системы ЛЭМД обмотки и яркости, выполненных в форме цилиндров, позволяет в классе модели ELCut задать магнитное поле осесимметричным. Насыщение стали при расчете нестационарного магнитного поля не учитывается.

В данной конструкции магнитной системы ЛЭМД (рис. 1) число витков обмотки  $w = 500$ . Активное сопротивление обмотки  $R = 4,5$  Ом. Напряжение источника питания  $U = 8$  В. Физические свойства используемых сред относительные магнитные проницаемости стали  $\mu'_c = 2000$  и воздуха  $\mu'_b = 1$ , электропроводность стали яркости  $\gamma_c = 8 \cdot 10^6$  Ом·м, электропроводность медного обмоточного провода  $\gamma_m = 57 \cdot 10^6$  Ом·м. Паразитный зазор  $\delta_0 = 1$  мм. Фиксированная величина рабочего зазора  $\delta$  в модели изменяется в пределах хода яркости  $0 \leq x(t) \leq 12$  мм. Значения рабочего зазора  $\delta$  в расчете заданы 2, 6 и 12 мм.

Нестационарное магнитное поле ЛЭМД моделируется в пакете ELCUT совместно с присоединенной электрической цепью, показанной на рис. 2.

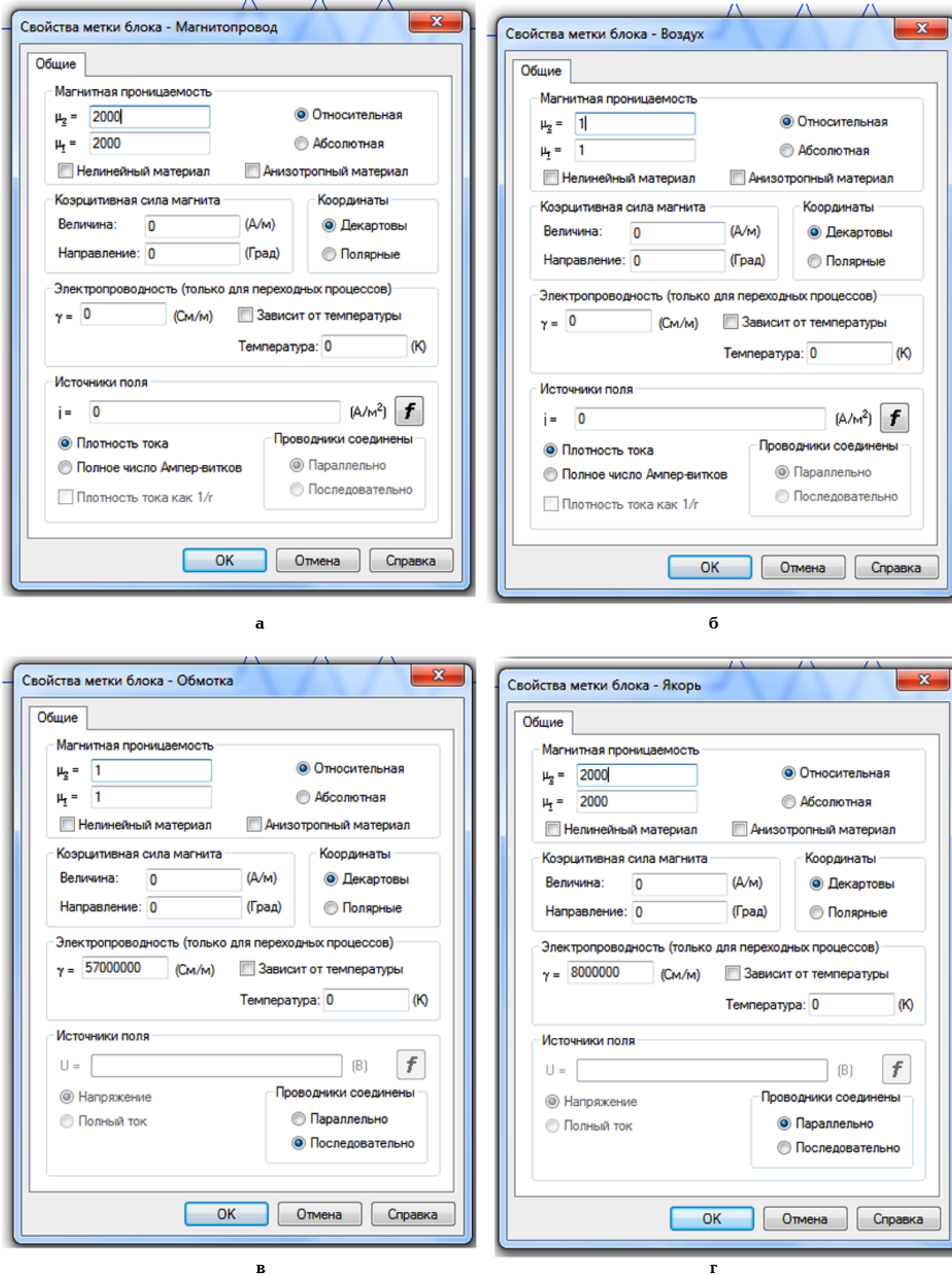


Рис. 3. Физические свойства выделенных блоков в модели ЛЭМД  
а — магнитопровод, б — воздух, в — обмотка, г — якорь

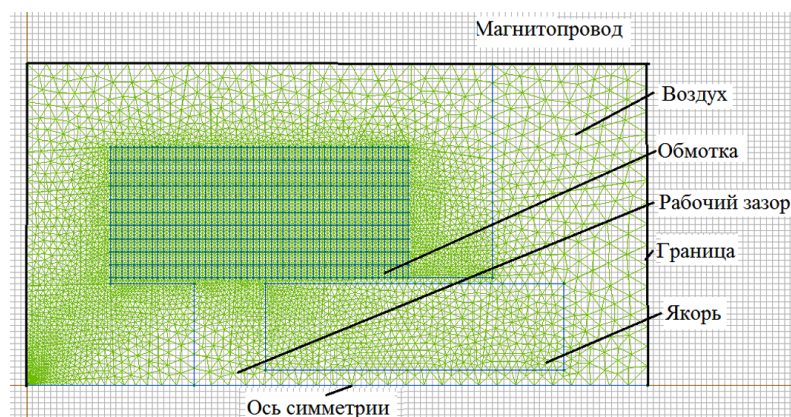


Рис. 4. Расчетная область с сеткой конечных элементов в пакете ELCUT

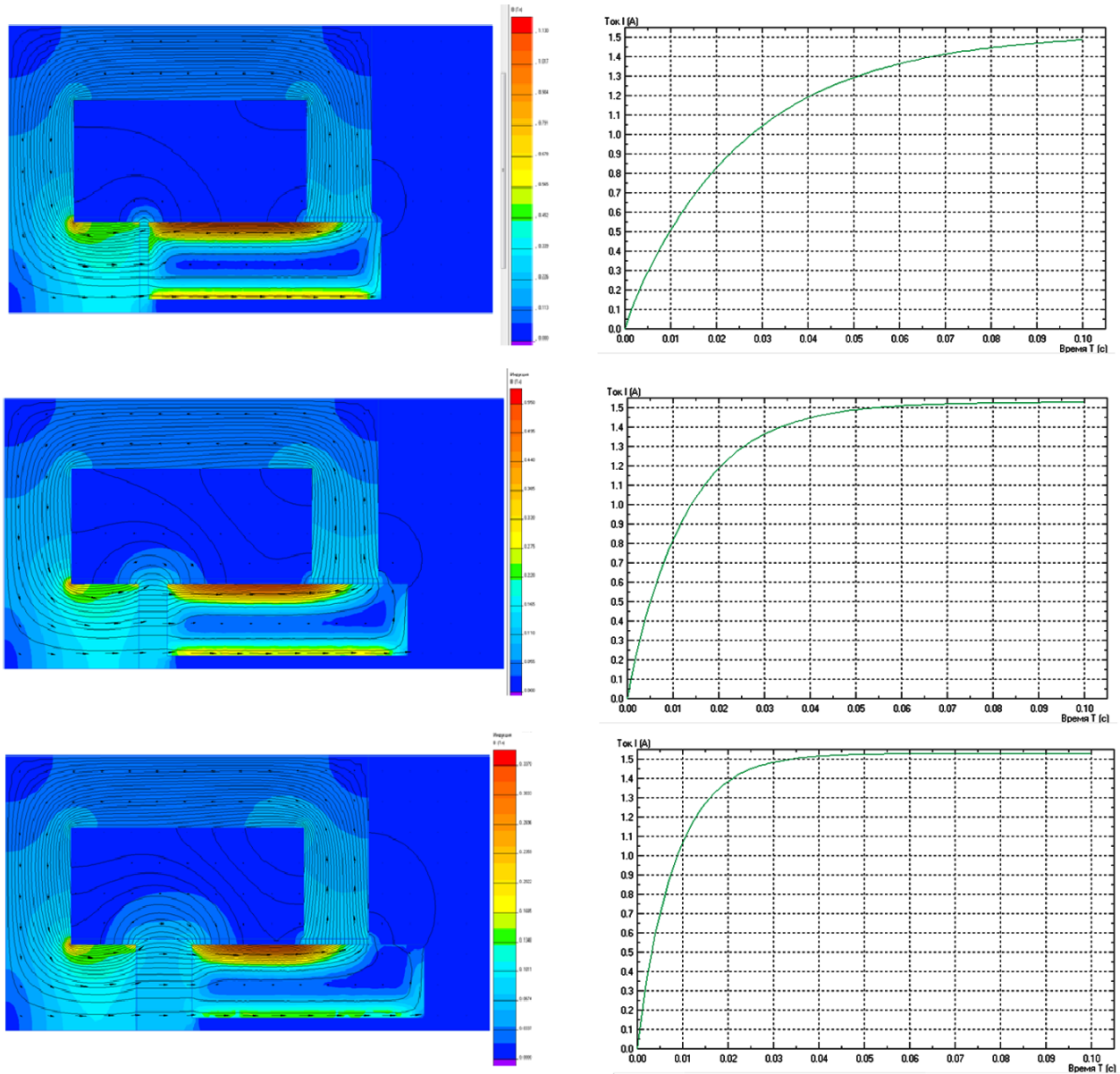


Рис. 5. Цветные картины нестационарного магнитного поля ЛЭМД распределения магнитной индукции по окончании времени интегрирования (слева) и временных зависимостей тока в обмотке ЛЭМД (справа) при переходном процессе для различных фиксированных значений рабочего зазора (сверху вниз) соответственно 2, 4 и 6 мм

Обмотка ЛЭМД моделируется в пакете ELCUT, состоящая из 500 соединенных последовательно проводников (рис. 3).

Расчетная область модели ЛЭМД в задаче ELCUT ограничена прямоугольником площадью  $104 \times 54 \text{ мм}^2$  и покрывается автоматически сеткой конечных элементов, содержащей 8886 узлов (рис. 4).

На границе расчетной области принимается условие, что функция магнитного потока  $\psi = r \cdot A_0 = 0 \text{ Вб}$ .

Временные параметры модели в задаче ELCUT заданы при условии, что максимальное время интегрирования составляет 0,1 с, шаг интегрирования 0,001 с, запоминание решения задачи каждые 0,001 с.

Результаты расчета нестационарного магнитного поля ЛЭМД при переходном процессе включения обмотки ЛЭМД на постоянное напряжение при рабочих зазорах 2, 6 и 12 мм показаны на рис. 5.

Обработка текстовых файлов временных зависимостей тока в обмотке при переходном процессе для различных значений рабочего зазора позволила

выделить из общего решения свободную составляющую тока, которую в общем виде можно представить в виде экспоненциального ряда

$$i_{CB}(t) \approx \sum_{k=1}^n I_k e^{-\lambda_k t},$$

где  $I_k, \lambda_k, k=1; 2, \dots, n$  определяются последовательным выделением из исходной временной зависимости свободной составляющей тока обмотки экспоненты с большим значением  $\lambda_k$  на основе выполнения операции логарифмирования и аппроксимации функции на участке уравнением прямой линии по методу наименьших квадратов, так что функционал

$$F = \sum_{j=1}^N \left[ i(t_j) - \sum_{k=1}^n I_k e^{-\lambda_k t_j} \right]^2 \leq \varepsilon$$

принимает наименьшее значение, лежащее в пределах допустимой ошибки  $\varepsilon$ .

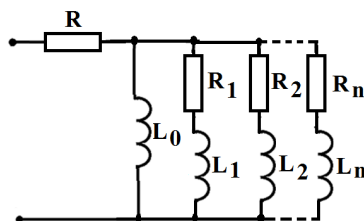


Рис. 6. Многоконтурная схема замещения ЛЭМД с массивным якорем

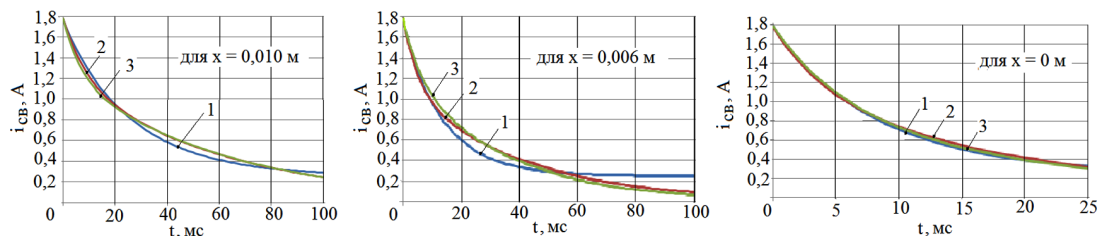


Рис. 7. Временные зависимости свободной составляющей тока в обмотке:

- 1 — кривая, полученная расчетом нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT;
- 2 — кривая, полученная разложением исходной кривой на сумму двух экспонент;
- 3 — кривая, построенная на основе аналитического расчета переходного процесса в цепи с использованием вычисленных параметров многоконтурной схемы замещения ЛЭМД

Разложение временной зависимости свободной составляющей тока обмотки на сумму экспонент позволяет записать операторное сопротивление схемы замещения

$$z(p) = \frac{R[A_1 p^n + A_2 p^{n-1} + \dots + A_n p]}{(I_0 B_1 - A_2) p^{n-1} + (I_0 B_2 - A_3) p^{n-2} + \dots + I_0 B_n},$$

где  $R$  — активное сопротивление обмотки;  $I_0$  — начальное значение свободной составляющей тока обмотки, соответствующее моменту времени  $t=0$ ;  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  и  $B_1, B_2, \dots, B_n$  — коэффициенты, определяемые по найденным значениям амплитуд  $I_k$  и показателей степени  $\lambda_k$  разложения свободной составляющей тока в экспоненциальный ряд.

По операторному сопротивлению синтезируется многоконтурная схема замещения ЛЭМД с массивным якорем (рис. 6).

По результатам расчета нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT для различных фиксированных значений рабочего зазора операция разложения свободной составляющей тока обмотки в экспоненциальный ряд позволяет представить ее в виде суммы двух экспонент (рис. 7):

$$i_{cb}(t) \approx 0,9 \cdot e^{-45,6t} + 0,877 \cdot e^{-170t} \quad \text{при } \delta = 0,012 \text{ м,}$$

то есть  $x = 0$  м.

$$i_{cb}(t) \approx 1,24 \cdot e^{-29,4t} + 0,530 \cdot e^{-158t} \quad \text{при } \delta = 0,006 \text{ м,}$$

то есть  $x = 0,006$  м.

$$i_{cb}(t) \approx 1,22 \cdot e^{-16,2t} + 0,537 \cdot e^{-152t} \quad \text{при } \delta = 0,002 \text{ м,}$$

то есть  $x = 0,010$  м.

Полученные временные зависимости  $i_{cb}(t)$  позволяют по операторному сопротивлению  $Z(p)$  определить параметры двухконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным якорем.

Результатами расчета являются (рис. 6):

— активные сопротивления ветвей  $R = 4,5$  Ом,  $R_1 = 14,5$  Ом;

— индуктивность участка цепи  $L_1 = 0,13$  Гн;

— зависимость инверсной индуктивности участка цепи от хода якоря

$$\Gamma_0(x) = L_0^{-1}(x) = 15,9 - 1100x \text{ [Гн}^{-1}\text{]},$$

где  $x$  — перемещение якоря (задается в метрах).

#### Выводы.

1. Использование цепно-полевого подхода и возможности комплекса программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) расчета нестационарного магнитного поля позволяют синтезировать многоконтурную схему замещения ЛЭМД с массивным якорем, в которой инверсная индуктивность одного из участков цепи в зависимости от перемещения якоря может быть аппроксимирована уравнением прямой линии, другие параметры цепи являются константами.

2. При разложении свободной составляющей тока обмотки ЛЭМД с массивным якорем в экспоненциальный ряд для инженерных расчетов достаточной точностью является представление кривой тока в виде суммы двух (как в рассмотренном примере) или трех экспонент, причем с ростом степени  $\lambda_k$  при экспоненте ее амплитуда  $I_k$  уменьшается.

#### Библиографический список

1. Ряшенцев, Н. П. Динамика электромагнитных импульсных систем / Н. П. Ряшенцев, Ю. З. Ковалев. — Новосибирск : Наука, 1974. — 186 с.
2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н. П. Ряшенцев [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1981. — 150 с.
3. Манжесов, В. К. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов / В. К. Манжесов, Н. О. Лукутина, Т. О. Невенчанная. — Фрунзе : Илим, 1985. — 185 с.
4. Смелягин, А. И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом / А. И. Смелягин. — Новосибирск : Изд-во Новосибирского ун-та, 1991. — 248 с.
5. Угаров, Г. Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г. Г. Угаров, В. Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1996. — № 2. — С. 72–80.



6. Нейман, В. Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с аккумуляцией магнитной энергии в динамических режимах / В. Ю. Нейман // Электротехника. — 2002. — № 2. — С. 30–36.

7. Ковалев, Ю. З. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума к.п.д. / Ю. З. Ковалев, А. С. Татевосян, А. А. Татевосян // Омский научный вестник. — 2002. — Вып. 18. — С. 78–83.

8. Ивашин, В. В. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий / В. В. Ивашин, А. К. Кудинов, В. П. Певчев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2012. — № 1. — С. 72–75.

9. Татевосян, А. А. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения / А. А. Татевосян, А. С. Татевосян // Известия ТПУ. — 2014. — Т. 325, № 4. — С. 121–132.

10. Татевосян, А. С. Анализ процессов энергопреобразования в электромагнитных механизмах с массивным сердечником при заданном законе движения / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова // Динамика систем механизмов и машин : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2002. — С. 205–207.

11. Татевосян, А. С. Математическое моделирование электромагнитных двигателей с массивными сердечниками / А. С. Татевосян, Ю. З. Ковалев, В. А. Ощепков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 1992. — № 2. — С. 38–44.

12. Татевосян, А. С. Синтез многоконтурной схемы замещения электромагнитных двигателей / А. С. Татевосян, В. А. Ощепков // Динамика электрических машин : сб. науч. тр. — Омск : Изд-во ОмПИ, 1985. — С. 136–140.

13. Татевосян, А. С. Программное обеспечение по исследованию моделей электромагнитных устройств / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян // Омский научный вестник. — 2001. — Вып. 14. — С. 133–135.

14. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. — М., СПб. : ПК TOP, 2013. — 293 с.

**ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрической техники, декан энергетического института.

**ЗАХАРОВА Наталья Васильевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры машиноведения.

Адрес для переписки: ast\_51@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2016 г.

© А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова

УДК 621.311

**Т. Д. ГЛАДКИХ**

Тюменский индустриальный университет,  
филиал, г. Нижневартовск

## ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Предложен способ корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта оборудования электрических сетей нефтепромысловых потребителей на основе качественной оценки риска. Риск определяется вероятностной составляющей отказов и тяжестью их последствий. Вероятность отказа электрооборудования определяется с использованием теории нечетких множеств через оценку статистической вероятности отказа, технического состояния и условий работы электрооборудования. Тяжесть последствий отказов оборудования электрических сетей связана с недоотпуском продукции (нефти, жидкости). Предложенный подход позволяет облегчить организационную работу эксплуатирующих организаций по уменьшению или устранению последствий отказов в нефтепромысловых электрических сетях.

**Ключевые слова:** риск, техническое состояние, вероятность отказа, нефтепромысловые электрические сети.

Одним из важных направлений повышения эффективности и безопасности работы нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) является бесперебойное снабжение электрической энергией нефтепромысловых потребителей.

Основные потребители электроэнергии нефтяных месторождений относятся к первой категории по

надежности электроснабжения. Одним из способов поддержания требуемой надежности электрических сетей является выполнение графиков ППР электросетевого оборудования (ЭСО). Нормативы периодичности технического обслуживания (ТО) и ремонта ЭСО приведены в [1] и не учитывают условия эксплуатации (климатические, неравномерность износа,

P						
5	B	A	A	A	A	
4	B	B	B	A	A	
3	C	C	C	B	A	
2	D	D	C	C	B	
1	D	D	D	D	C	
	I	II	III	IV	V	Q

Рис. 1. Матрица «Вероятность отказа – недоотпуск продукции»

необходимость привязки к срокам вывода в ремонт технологического оборудования и др.). В связи с этим возникает задача корректировки сроков проведения ТО и ремонта ЭСО.

Целью данной работы является разработка подхода к принятию решения по корректировке срока вывода в ремонт нефтепромыслового электросетевого оборудования на основе качественной оценки риска.

Риск, в нашем случае, обусловлен вероятностью возникновения отказов оборудования электрических сетей нефтепромысловых потребителей, приводящих к различным по тяжести последствиям в технологии добычи нефти и попутного нефтяного газа [2, 3].

Вероятность отказа ЭСО  $P$  определяется типом оборудования, его техническим состоянием (ТС) и условиями эксплуатации.

Тяжесть последствий зависит от ряда факторов: длительности простоев, технологических характеристик процесса добычи (дебита, производительности насосов, обводнённости добываемой жидкости и др.), степени резервирования в технологии (временного, функционального) и оценивается вероятным недоотпуском продукции  $Q$  (нефти, попутного нефтяного газа, недозакачкой воды в нефтяной пласт и т.д.).

В [4] со ссылкой на ГОСТ Р27.310-95 [5] качественная оценка риска проводится с помощью матрицы «Вероятность отказа – тяжесть последствий», в которой для качественной оценки риска предлагается использовать матрицу размерностью  $4 \times 4$ , где выделялись 4 класса дефектов по тяжести последствий и 4 группы вероятностей отказов.

Предлагается рассмотреть вариант матрицы рисков «Вероятность отказа – недоотпуск продукции» размерностью  $5 \times 5$  (рис. 1), где по оси абсцисс расположены 5 классов вероятного недоотпуска продукции  $Q$ , по оси ординат располагаются 5 групп вероятностей отказа  $P$  нефтепромыслового ЭСО.

В матрице (рис. 1) выделены 4 группы риска, которые позволяют принять решение о корректировке сроков проведения технического обслуживания (ТО) и ремонта ЭСО. В табл. 1 приведены группы рисков с их описанием.

Вероятности отказов ЭСО разделены по группам (табл. 2). На основе опыта эксплуатации выделены интервалы и дано лингвистическое описание вероятности отказа оборудования электрических сетей нефтепромысловых потребителей. Исходными данными для определения вероятности отказов  $P$  являются статистическая вероятность отказа  $P_c$  для типового оборудования и множество данных о техническом состоянии (ТС) конкретного оборудования (значения диагностических параметров, получаемых, неразрушающими методами контроля без отключения оборудования; экспертная оценка состояния оборудования, полученная по результатам визуального осмотра) и условия работы ЭСО.

Статистическая вероятность отказа  $P_c = [0, 1]$  определяется по средним значениям параметров потока отказов и восстановления типового оборудования при установленном в НТД значении периодичности ТО и ремонта. В нашем случае для определения этой величины предлагается использовать марковскую модель надежности с аварийными и предупредительными ремонтами [6], при этом величина  $P_c$  определяется решением системы уравнений Колмо-

Таблица 1

Группа риска	Описание риска
A	Риск высокий, необходим вывод ЭСО в ремонт.
B	Риск выше среднего, необходимо скорректировать график вывода ЭСО в ремонт. Время вывода в ремонт определяется техническим состоянием ЭСО, по возможности совмещается с ремонтом технологического оборудования.
C	Риск средний, необходимо скорректировать график осмотра и/или диагностирования ЭСО. Время ТО, осмотра или диагностирования определяется техническим состоянием ЭСО. Периодичность ремонта согласно графику ППР.
D	Риск малый, можно продолжать эксплуатацию оборудования. ТО и ремонт проводить согласно графику ППР.

Таблица 2

Группа вероятности отказов / нечеткое множество	Интервалы вероятности отказов, отн. ед.	Лингвистическое описание вероятности (качественный показатель) возникновения отказа ЭСО при данном ТС
5 / $P_5$	Более 0,45	Высокая вероятность отказов.
4 / $P_4$	0,21–0,45	Средняя вероятность отказов.
3 / $P_3$	0,11–0,20	Низкая вероятность отказа.
2 / $P_2$	0,06–0,10	Маловероятное возникновение отказа.
1 / $P_1$	Менее 0,05	Практически невероятно возникновение отказа ЭСО.

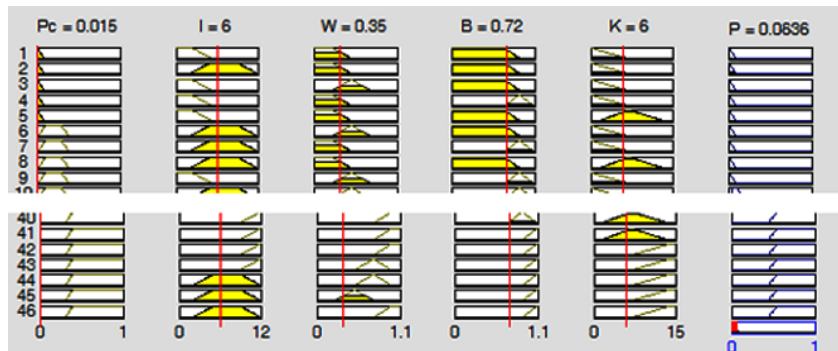


Рис. 2. Нечеткий вывод вероятности отказа ЭСО

горова. Удобство использования такой модели заключается в возможности учета условий функционирования оборудования [7].

Множества данных о техническом состоянии оборудования количественно характеризуются индексом состояния ИС, отражают степень соответствия диагностических параметров его номиналу или нормальному значению (значению, указанному в технических условиях) [8]. При ТС, соответствующем всем нормам, этот индекс равен 0. Увеличение индекса состояния характеризует ухудшение ТС и, следовательно, увеличение вероятности отказа оборудования. Индекс состояния определяется согласно [9].

Для учета условий работы ЭСО учитываются нагрузка оборудования и качество передаваемой электрической энергии.

Определим вероятность отказов на примере силового масляного трансформатора напряжением 6/0,4 кВ, предназначенного для питания кустов скважин. Множества исходных данных описаны лингвистическими переменными: «статистическая вероятность отказов»  $P_c$  — вероятность отказа оборудования на момент оценки риска; «индекс теплового состояния»  $I$  — под которым понимается оценка ТС по данным ИК-диагностирования; «оценка осмотра»  $W$  — характеризует результат экспертного осмотра ЭСО, зафиксированный в листах осмотра, определяется максимальным весом дефекта из выявленных, количеством дефектов и сроком эксплуатации оборудования, определяется согласно [9]; «коэффициент нагрузки»  $B$  — характеризует нагрузку трансформатора в нормальном режиме [10]; «несинусоидальность напряжения»  $K$  — характеризует отклонение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения относительно нормы 5% [11].

Для обозначенных лингвистических переменных выбраны термы: для «статистической вероятности отказов»  $P_c$  — низкая  $P_{c1}$  (до 10%), средняя  $P_{c2}$  (11–30%), высокая  $P_{c3}$  (более 31%); для «индекса теплового состояния»  $I$  — нормальный  $I_1$  (дефектов не обнаружено), высокий  $I_2$  (наличие очагов превышения температуры на 5–9°), очень высокий  $I_3$  (наличие очагов превышения температуры более чем на 10°); для «оценки осмотра»  $W$  — отлично  $W_1$ , хорошо  $W_2$ , удовлетворительно  $W_3$ , плохо  $W_4$ ; для «коэффициента нагрузки»  $B$  — пониженная нагрузка ( $\beta < 0,8$ ), нормальная нагрузка  $B_2$  ( $0,8 \leq \beta < 1$ ), перегрузка  $B_3$  ( $\beta \geq 1$ ); для «несинусоидальности напряжения»  $K$  — допустимая  $K_1$  (коэффициент гармонических составляющих напряжения менее 5%), повышенная  $K_2$  (5–7%), очень высокая  $K_3$  (более 7%).

Для формализации качественных высказываний использованы LR- (трапециевидная и треугольная),

L- и R- функции принадлежности [12]. Сформирована база правил нечеткого вывода вида:

$$\text{Если } P_c = P_{c1} \text{ и } I = I_1 \text{ и } W = W_1 \text{ и } B = B_1 \\ \text{и } K = K_1, \text{ то } P = P_1.$$

В качестве алгоритмического базиса для вычисления вероятности отказа трансформатора использовалась система нечеткого вывода Мамдани [13], при котором используется min-активизация на этапе нечеткой композиции; на этапе аккумуляции заключений нечетких правил продукций осуществляется объединение входных нечетких множеств, относящихся к одной выходной лингвистической переменной, функция принадлежности к которой определяется по формуле:

$$\mu_{p_i}(p) = \max\{\mu_{p_c}(p), \mu_I(p), \mu_W(p), \mu_B(p), \mu_K(p)\}, (\forall p \in P_i),$$

где  $\mu_j$  — функция принадлежности множества  $j$  выходному множеству  $P_i$ ,  $i = 1..5$  — группа вероятности отказа. На этапе дефазификации используется метод центра тяжести.

Например, известно, что через 9 месяцев после ТО трансформатора напряжением 6/0,4 кВ статистическая вероятность отказа составляет  $P_c = 0,015$ ; в нем наблюдается превышение температуры верхних слоев масла на 6° («индекс теплового состояния» — высокий  $I_2$ ), при осмотре обнаружено 4% дефектов от обозначенных в листе осмотра с весом дефектов не более 0,35 («оценка осмотра»  $W = 0,35$  — хорошо  $W_2$ ), нагрузка трансформатора в нормальном режиме составляет 68–72% (пониженная нагрузка  $B_1$ ), коэффициент гармонических составляющих передаваемого напряжения 6% («несинусоидальность напряжения» — повышенная  $K_2$ ).

На этапе композиции подзаключений в нечетких правилах продукций с использованием программы MathLab получили величину вероятности отказа ЭСО  $P$ , равной 0,064 (рис. 2). Результатом дефазификации является четкий вывод номера группы вероятности отказа трансформатора, и при указанных данных это 2-я группа — маловероятное возникновение отказа.

Величина недоотпуска продукции может определяться на основе технологических данных о производительности оборудования потребителя или статистических данных о потерях при отказах электрооборудования.

Нами использованы данные о потерях в виде объемов не добытой жидкости при отказах электрооборудования по Самотлорскому месторождению за 2012–2014 гг. (табл. 3). Анализ данных показывает, что тяжесть последствий зависит от типа оборуду-

Таблица 3

Вид ЭСО	Доля поврежденных, %	Доля потерь, %	Удельные потери, т/час	Средние удельные потери, т/час
ВЛ 6кВ	55,4	21,2	0,43–29,57	7,19
ВЛ 35кВ	16,7	32,63	3,9–656,4	101,86
Трансформатор напряжением 6/0,4 кВ	7	4,5	0,4–9,1	0,93
Трансформатор напряжением 35/6 кВ	5,1	3,5	9,8–230,7	85,90
Другое оборудование напряжением 6 кВ	7,3	6,36	–	–
Другое оборудование напряжением 35 кВ	4	8,45	–	–
Оборудование напряжением 110 кВ и выше	4,5	23,3	–	–

Таблица 4

Класс недоотпуска продукции	Удельные значения недоотпуска продукции, т/час	Лингвистическое описание тяжести последствий
V	Более 80	Значительный недоотпуск продукции, обусловленный остановом нескольких кустов скважин и длительным восстановлением технологического процесса.
IV	21–79	Большой недоотпуск продукции, обусловленный остановом технологического оборудования одного или нескольких кустов скважин и восстановлением технологического процесса.
III	6–20	Средняя величина недоотпуска продукции, обусловленная остановом технологического оборудования одного куста скважин и/или восстановлением технологического процесса.
II	1–5	Низкая величина недоотпуска продукции, обусловленная остановом одной или нескольких скважин или восстановлением технологического процесса.
I	Менее 1	Незначительный недоотпуск продукции, обусловленный остановом технологического оборудования добывающей скважины.

дования класса его напряжения. Например, наименее надежным элементом является ВЛ напряжением 6 кВ, так как их отказы составляют более 55 % от общего числа отказов, но отказы ВЛ напряжением 35 кВ имеют большую тяжесть последствий — на них приходится более 32 % потерь в добыче. На основе данных получены средние удельные значения недоотпуска продукции с учетом восстановления технологического процесса для некоторого типа ЭСО, на основе которых выделены классы недоотпуска продукции, как тяжести последствий от перерывов электроснабжения добывающих скважин (табл. 4).

Например, при отказе рассматриваемого силового масляного трансформатора напряжением 6/0,4 кВ, предназначенного для питания 12 высокодебитных скважин, и неуспешном включении резерва недоотпуск продукции составит 5,1 т/час жидкости, что соответствует III классу. Тогда, согласно матрице «Вероятность отказа — недоотпуск продукции», при III классе недоотпуска продукции и 2-й группе вероятности отказа ЭСО определяется группа риска С. То есть для указанного трансформатора периодичность ремонта останется без изменений, а периодичность ТО необходимо сократить с  $Tr=12$  мес. [14] на  $Tr'=Tr \cdot (1-P)=12 \cdot (1-0,064)=11,2$  мес.

Таким образом, предложен подход к принятию решений о необходимости корректировки срока вывода в ремонт нефтепромыслового электро-

сетевого оборудования с помощью матрицы «Вероятность отказа — недоотпуск продукции», основанный на определении вероятности отказов с учетом технического состояния и условий работы электро-сетевого оборудования и связанной с ней тяжестью последствий.

#### Библиографический список

1. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник / А. И. Ящура. — М. : НЦ ЭНАС, 2005.
2. Brear, J. M. Managing the pay-off between risk, reliability and remaining life — weighting the consequences / J. M. Brear, P. Jarvis, C. J. Middleton // Stress Engineering Services (Europe) Ltd. OMMI (Vol. 1, Issue 3) Dec. 2002. — Режим доступа : <http://www.ommi.co.uk/PDF/Articles/63.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).
3. Summers, A. Consistent Consequence Severity Estimation / A. Summers, W. Vogtmann, S. Smolen. — Режим доступа : [http://sis-tech.com/wp-content/uploads/2011/05/Consistent\\_Consequence\\_Severity\\_Estimation.pdf](http://sis-tech.com/wp-content/uploads/2011/05/Consistent_Consequence_Severity_Estimation.pdf) (дата обращения: 16.02.2016).
4. Антоненко, И. Н. Анализ рисков и электронный журнал дефектов / И. Н. Антоненко, Б. А. Кац // Молодая промышленность. — 2013. — № 5. — С. 30–33.
5. ГОСТ Р 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. — Введ. 1997–01–01. — Минск : Изд-во стандартов, 1996. — 14 с.

6. Гладких, Т. Д. Влияние качества ремонта и диагностирования на надежность нефтепромысловых электрических сетей / Т. Д. Гладких // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов ; отв. ред. А. Л. Портнягин. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. — 280 с.

7. Валянский, А. В. Оценка надежности электроснабжения с учетом качества электроэнергии / А. В. Валянский, И. И. Карташев, Ю. В. Шаров // Электротехника. — 2014. — № 5. — С. 20–27.

8. Кубрин, С. С. Комплексная оценка технического состояния оборудования на предприятии подземной добычи угля / С. С. Кубрин, А. И. Сукманов // MEGATECH: Новые технологии в промышленной диагностике. — 2012. — № 3. — С. 24–28.

9. Гладких, Т. Д. Подход к оценке технического состояния нефтепромыслового электросетевого оборудования / Т. Д. Гладких // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2016. — № 3. — С. 34–38.

10. ГОСТ 14209-85. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы силовые масляные общего назначения допустимые нагрузки. — Введ. 1985–07–01. — М. : Стандартинформ, 2009. — 36 с.

11. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014–07–01. — М. : Стандартинформ, 2009. — 16 с.

12. Zimmermann, H.-J. Fuzzy set theory. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. Vol. 2, Issue 3, Article first published online: 16 APR 2010. — Режим доступа : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wics.82/pdf> (дата обращения: 25.01.2016).

13. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.

14. Положение о системе технического обслуживания и ремонта электроустановок магистральных нефтепроводов: РД 153-39ТН-009-96 : в 2 ч. — Уфа, 1997. — 325 с.

**ГЛАДКИХ Татьяна Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры гуманитарно-экономических и естественнонаучных дисциплин. Адрес для переписки: txgl@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2016 г.

© Т. Д. Гладких

УДК 621.313.282.2

**Л. А. НЕЙМАН  
Н. И. ЩУРОВ  
К. А. ОБУХОВ**

Новосибирский государственный  
технический университет

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПРУЖИННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА**

Создана математическая модель динамики электромагнитного ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с пружинным реверсом бойка, обеспечивающая широкие возможности всестороннего анализа электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Предложен алгоритм расчета и пример численной реализации математической модели электромагнитного ударного узла, содержащего много-массовую колебательную систему с упругими связями и получающего питание от источника напряжения промышленной частоты.

**Ключевые слова:** ударный узел, синхронная электромагнитная машина, математическая модель, механическая колебательная система, упругие связи, уравнения Лагранжа второго рода.

Электромеханические колебательные ударные системы, основным структурным звеном которых является электромагнитный привод, применяются в различных областях промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств [1].

Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин

и механизмов с повышенной энергией удара на базе электромагнитного привода колебательного движения, работающего в окolorезонансных и резонансных режимах с частотой до 100 Гц. Повышение эффективности работы подобных электроприводов возможно только при условии рационального выбора взаимосвязанных параметров электрической, магнитной и механической подсистем, для анализа ра-

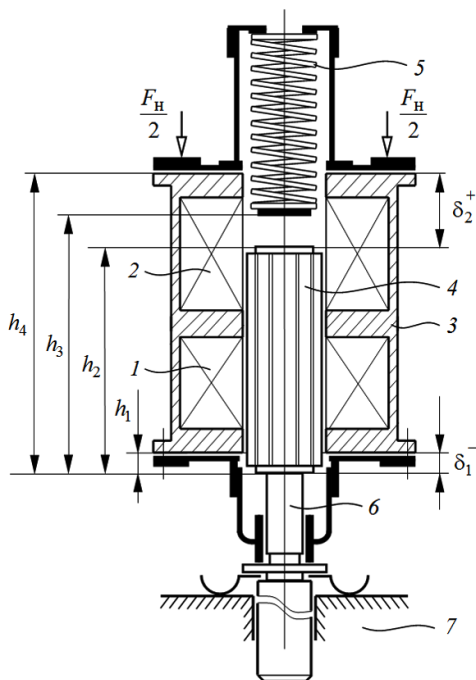


Рис. 1. Электромагнитный ударный узел

боты которых еще на стадии проектирования возникает необходимость в проведении динамического расчета.

Существующие в настоящее время рекомендации и методики для проектирования подобных систем основаны в своем большинстве на статических подходах, что ограничивает возможности анализа рабочих процессов электромеханических колебательных систем, работающих в переходных и квазиустановившихся режимах [2].

Целью работы является разработка математической модели динамического состояния двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка, обеспечивающей возможность в проведении всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах работы.

В качестве объекта исследований рассматривается конструкция электромагнитного ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия (рис. 1), содержащая независимые катушки прямого 1 и обратного хода 2, размещенные внутри магнитопровода 3 и обеспечивающие поочередно разгон ударной массы бойка 4 электромагнитными силами в прямом и обратном направлении. Боек 4, совершая возвратно-поступательные движения, поочередно взаимодействует с буферной пружиной 5, осуществляющей его остановку и реверс, и рабочим инструментом 6, взаимодействующим с деформируемой средой 7. Устойчивая связь электромагнитного ударного узла с рабочим инструментом и с деформируемой средой обеспечивается усилием нажатия  $F_H$ . Реализация рабочего цикла осуществляется при постоянном воздействии электромагнитных сил катушек, получающих питание от однофазного источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления.

Полный рабочий цикл электромагнитного ударного узла осуществляется за время одного периода напряжения питающего источника, что при частоте  $f = 50$  Гц обеспечивает синхронную частоту ударов

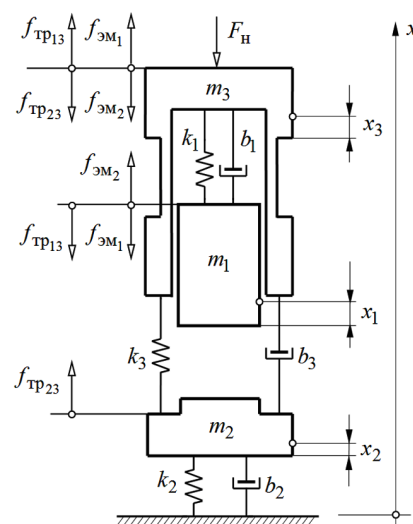


Рис. 2. Расчетная динамическая схема механической системы

бойка  $n_{yA}$  и длительность времени рабочего цикла  $t_{ц}$ :

$$n_{yA} = \frac{60f}{2p} = 3000 \text{ уд./мин}; t_{ц} = \frac{2p}{f} = 0,02 \text{ с}, \text{ где } 2p = 1 -$$

число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

Работа ударного узла осуществляется при условии полной синхронизации работы механической подсистемы с импульсами напряжения, поочередно подаваемыми на обмотки катушек.

На начальном этапе расчета процесс движения механической системы рассматриваем как результат наложения вынужденных и свободных колебаний, возбуждаемых внешней периодической силой. Механическая и магнитная подсистемы связаны функциональной зависимостью электромагнитного усилия  $f_{ЭМ1} = f(i_1, x_1)$  и  $f_{ЭМ2} = f(i_2, x_1)$  от величины протекающего по обмотке тока  $i_1, i_2$  и координаты положения бойка  $x_1$ , а электрическая и магнитная подсистемы — функциональной зависимостью величины потокоцепления  $\psi_1 = f(i_1, x_1)$  и  $\psi_2 = f(i_2, x_1)$ .

Связь электрической и магнитной подсистем описывается уравнением электрического равновесия

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \quad (2)$$

где  $u_1(t), u_2(t)$  — напряжение на обмотке первой и второй катушки;  $r_1, r_2$  — активное сопротивление обмотки первой и второй катушки.

В соответствии с установленными связями в конструкции ударного узла (рис. 1) и действующими в системе обобщенными силами на рис. 2 представлена расчетная динамическая схема механической колебательной системы. В качестве обобщенных координат, определяющих положение механической системы в пространстве, принимаем линейные перемещения центра масс бойка  $x_1$  массой  $m_1$ , рабочего инструмента  $x_2$  массой  $m_2$ , электропривода  $x_3$  массой  $m_3$ .

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (3)$$

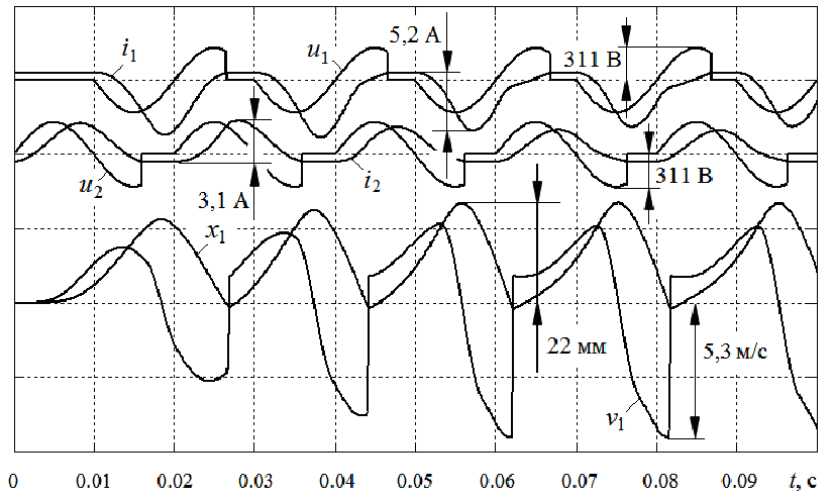


Рис. 3. Временные диаграммы процесса включения ударного узла

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $\Pi$  — потенциальная энергия системы;  $\Phi$  — диссипативная функция системы (функция Релея);  $Q_i$  — обобщенные силы внешних воздействий, соответствующие  $i$ -й обобщенной координате.

Принимая положение устойчивого статического равновесия колебательной механической системы за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии.

Рассматривая поступательные движения масс и используя выражения частных производных и производных по времени, а также выражения обобщенных сил внешних воздействий, входящих в (3), с учетом зависимостей (1) и (2) математическая модель динамического состояния колебательной электромеханической системы без учета ударного взаимодействия будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x_1)}{dt}, \quad (4)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \quad (5)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1(x_1 - x_3) + b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) = -f_{эм1}(i_1, x_1) + f_{эм2}(i_2, x_1) - f_{тр13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}; \quad (6)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 x_2 - k_3(x_3 - x_2) + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) = f_{тр23} \text{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (7)$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - k_1(x_1 - x_3) + k_3(x_3 - x_2) - b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) = f_{эм1}(i_1, x_1) - f_{эм2}(i_2, x_1) + (f_{тр13} - f_{тр23}) \text{sign} \frac{dx_3}{dt} - F_H; \quad (8)$$

где  $k_1 \dots k_3$  — статические коэффициенты жесткости упругих связей;  $b_1 \dots b_3$  — коэффициенты вязкого трения упругих связей;  $f_{эм1} = f(i_1, x_1)$ ,  $f_{эм2} = f(i_2, x_1)$  —

вынуждающая электромагнитная сила первой и второй катушки соответственно;  $f_{тр13}$ ,  $f_{тр23}$  — силы сухого трения скольжения;  $F_H$  — постоянная величина усилия нажатия.

Под действием внешних периодических сил  $f_{эм1} = f(i_1, x_1)$ ,  $f_{эм2} = f(i_2, x_1)$ , в механической системе возникают сложные механические колебания. Реальный же процесс движения следует рассматривать как результат совместного действия сложных колебаний механической системы и периодических ударных импульсов сил.

Остановку и реверс бойка можно описать независимой системой равенств относительно полюсной системы, например, катушки обратного хода:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \delta_2^+ = h_4 - h_2; \\ h_4 - h_2 - \delta_2^+, & \text{при } 0 \leq x_1 \leq h_4 - h_2; \\ h_4 - h_2 + |\delta_2^-|, & \text{при } x_1 > h_4 - h_2, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\delta_2^+$ ,  $\delta_2^-$  — рабочий воздушный зазор, образованный положением бойка относительно верхней полюсной системы катушки обратного хода;  $h_2$  и  $h_4$  — фиксированные координаты относительно ударного сечения рабочего инструмента (рис. 1).

В момент удара бойка по рабочему инструменту часть его кинетической энергии  $T_1$  в виде ударного импульса сил передается рабочему инструменту и далее в деформируемую среду, а другая часть кинетической энергии  $T_2$  при отскоке бойка от рабочего инструмента возвращается в механическую систему

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} (1 - k_{от}^2); \quad T_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{от}^2,$$

где  $k_{от} = \frac{\bar{v}_1}{v_1}$  — коэффициент отскока бойка;  $\bar{v}_1$  — скорость центра массы бойка в конце удара при отскоке от рабочего инструмента;  $v_1$  — скорость центра массы бойка в начале удара.

Составляющие силы упругости буферной пружины, линейно зависящая от координаты положения бойка, и составляющие силы сопротивления движения бойка, пропорциональные скорости его движения, могут быть описаны кусочно-линейными функциями:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ k_1(x_1 - x_3), & \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2, \end{cases} \quad (10)$$

Значения показателя	$A_{\text{уа}}$ , Дж	$I$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	к.п.д., %	$\cos\varphi$
Расчет	5,6	4,42	737	280	0,38	0,44
Эксперимент	5,8	4,68	783	290	0,37	0,42

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\dot{x}_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right), & \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2, \end{cases} \quad (11)$$

Основываясь на условии (11), учитываем, что процесс рассеяния энергии в условиях вязкого трения, вызванного диссипативными силами упругих связей, может возникнуть только при работе сил этих связей. В процессе расчета также полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению инструмента, зависят от свойств введенных упругих связей.

Таким образом, рассматривая реальный процесс движения, как результат совместного действия вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обобщенная модель динамического состояния электромеханической системы (рис. 1), описываемая уравнениями (4) – (8) при установленных условиях ограничений (9) – (11), приводится к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu 1}, x_1)}{dt}; \\ u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu 2}, x_1)}{dt}; \\ i_1 = i_{n1} + i_{\mu 1}; \quad i_2 = i_{n2} + i_{\mu 2}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}} - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - \\ - f_{\text{тр}13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{тр}13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2; \\ -f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{тр}13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{\text{и}}} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 + f_{\text{тр}23} \text{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) + \\ + (f_{\text{тр}13} - f_{\text{тр}23}) \text{sign} \frac{dx_3}{dt} - F_{\text{н}}, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - \\ - (f_{\text{тр}13} - f_{\text{тр}23}) \text{sign} \frac{dx_3}{dt}, \\ \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2; \end{cases} \end{cases}$$

где  $\tilde{\lambda}_1 = k_1(x_1 - x_3) + b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right)$ ;  $\tilde{\lambda}_2 = k_2 x_2 + b_2 \frac{dx_2}{dt}$ ;

$$\tilde{\lambda}_3 = k_3(x_3 - x_2) + b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right); \quad i_{\mu 1}, i_{\mu 2} \text{ — составляющие}$$

тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй катушке;  $i_{\mu 1}, i_{\mu 2}$  — составляющие намагничивающего тока в первой и во второй катушке;  $m_1 \bar{v}_1, m_2 \bar{v}_2$  — импульсы сил в конце удара;  $\tau_{\text{и}}$  — время действия этих импульсов силы.

Полученная система дифференциальных уравнений динамики электромагнитного ударного узла (рис. 1) позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах работы с учетом нелинейности в магнитной системе, степени подвижности инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, сопровождаемые различного рода потерями энергии.

Построение структурной модели динамики ударного узла и разработка алгоритма расчета производились в соответствии с имеющимися рекомендациями [3]. Решение полевой части задачи выполнялось при использовании стандартной программы конечно-элементного моделирования магнитного поля [4], с помощью которой определялся массив значений опорных точек статических параметров потокоцепления  $\psi_1 = f(i_1, x_1)$ ,  $\psi_2 = f(i_2, x_1)$  и электромагнитного усилия  $f_{\text{эм}1} = f(i_1, x_1)$ ,  $f_{\text{эм}2} = f(i_2, x_1)$ .

Составляющие тока потерь  $i_{\mu 1}$  и  $i_{\mu 2}$  учтены в соответствии с рекомендациями [5].

Реализация математической модели выполнялась методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения модернизированного варианта электромагнитного ударного узла СЦ-2 представлены на рис. 3 [6].

В качестве исходных данных модели использовались следующие параметры ударного узла:  $m_1 = 0,394$  кг;  $m_2 = 0,32$  кг;  $m_3 = 0,39$  кг;  $k_1 = 120 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_1 = 8$  Н·с/м;  $k_2 = 12 \cdot 10^6$  Н/м;  $b_2 = 0$ ;  $k_3 = 16 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_3 = 35$  Н·с/м;  $f_{\text{тр}13} = 3$  Н;  $f_{\text{тр}23} = 8$  Н;  $F_{\text{н}} = 350$  Н.

Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойствам к стали марки 1212. Боек — цельнометаллический из конструкционной стали 40 ХН. Количество витков катушки рабочего хода  $w_1 = 1290$ , активное сопротивление  $r_1 = 12,9$  Ом. Количество витков катушки обратного хода  $w_2 = 1540$ , активное сопротивление  $r_2 = 23,2$  Ом.

Действующее значение напряжения однофазного источника  $U = 220$  В.

Диаграммы, представленные на рис. 3, отражают процесс включения двухкатушечного ударного узла с пружинным реверсом бойка.

Для оценки адекватности созданной модели выполнено сравнение расчетных значений показателей энергии удара —  $A_{\text{уа}}$ , действующего значения тока —  $I$ , потребляемой —  $P_1$  и полезной —  $P_2$  мощности, к.п.д. и  $\cos\varphi$  с показателями, полученными на физической модели (табл. 1).

Относительно небольшое расхождение между количественными результатами расчетов и экспери-



ментальными данными, которое составляет 4...6 %, позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Следует заметить, что относительно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных показателей во многом зависит от точности учета аналогов механических характеристики модели в особенности демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения скольжения, которыми большинство разработчиков пренебрегают с целью упрощения модели.

**Выводы.** Разработана математическая модель динамического состояния двухкатушечной синхронной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка, обеспечивающая широкие возможности для всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействия с деформируемой средой.

Особенностью модели является возможность учета большого числа взаимосвязанных факторов, обусловленных скоростью движения бойка и частотой ударных импульсов сил, степенью подвижности инерционных масс и свойствами упругих связей механической системы, а также нелинейностью характеристик магнитных материалов, сопровождаемых различной рода потерями энергии.

Выполнена верификация математической модели сравнением расчетных значений выходных показателей с результатами, полученными на физической модели. Разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 4...6 %, что общепринято для инженерной практики.

#### Библиографический список

1. Нейман, Л. А. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Актуальные проблемы в машиностроении. — 2014. — № 1. — С. 256 — 259.

2. Саттаров, Р. Р. Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях / Р. Р. Сатаров, Ф. Р. Исмагилов // Вестник Уфимского гос. авиацион. техн. ун-та. — 2010. — Т. 14. — № 1 (36). — С. 50 — 55.

3. Нейман, Л. А. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода / Л. А. Нейман, А. С. Шабанов, В. Ю. Нейман // Теория и практика современной науки : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. / НИИЦ «Институт стратегических исследований». — М., 2015. — С. 58 — 63.

4. Нейман, Л. А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2015. — № 3 (28). — С. 75 — 87.

5. Нейман, Л. А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиозлектроники. — 2016. — Т. 19, № 1. — С. 73 — 78.

6. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н. П. Ряшенцев [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1981. — С. 151.

**НЕЙМАН Людмила Андреевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электротехнических комплексов, докторант кафедры электротехнических комплексов.

**ЩУРОВ Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электротехнических комплексов.

**ОБУХОВ Константин Андреевич**, студент гр. ЭМ-36 факультета мехатроники и автоматизации. Адрес для переписки: neyman@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2016 г.

© Л. А. Нейман, Н. И. Щуров, К. А. Обухов

## Книжная полка

**Красовский, А. Б. Основы электропривода : учеб. пособие для вузов по машиностроит. направлениям подгот. / А. Б. Красовский. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 405 с.**

Кратко изложены основы теории современного автоматизированного электропривода. Рассмотрены принципы построения и составные части электроприводов, их характеристики в статических и динамических режимах работы с двигателями постоянного и переменного тока, а также основные принципы управления и проектирования. Учебное пособие ориентировано прежде всего на студентов вузов неэлектротехнических специальностей, поэтому, в отличие от большинства книг по основам электропривода, содержит дополнительные разделы по общим вопросам электромеханического преобразования энергии, принципам работы и особенностям конструкции основных типов электрических машин, силовой электронике. Учебное пособие будет также полезно и студентам электротехнических специальностей, начинающим изучать электропривод, а также практикующим инженерно-техническим работникам смежных областей.

**Огорелков, Б. И. Расчетные зависимости механических элементов электрических устройств : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / Б. И. Огорелков, Н. И. Огорелкова, Н. В. Захарова. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Представлены расчетные зависимости механических элементов электрических устройств. Приведены справочные таблицы и данные на основе нормативных документов, принятых в практике конструирования. Включены материалы по расчету с помощью программного продукта. Учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры очной, заочной и дистанционной форм обучения по направлению 130302 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и «Электрические и электронные аппараты»).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПОРЯДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЯХ С НЕСКОЛЬКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Рассмотрены теоретические аспекты и экспериментальные данные контролируемых переходов в нелинейной электронной цепи (НЭЦ). Предложены методы управления системным образующим центром перехода от беспорядочных колебаний к постоянным колебаниям с помощью небольших возмущений на НЭЦ. Предложенные решения дают возможность сбалансировать седловые циклы, вмонтированные в странный аттрактор НЭЦ.

**Ключевые слова:** цепь Чуа, беспорядочный режим, синфазные изменения, поддержание беспорядочных изменений.

Установлено, что связь схожих нелинейных электронных цепей (НЭЦ), показывающих характерные переходы к хаосу (в дальнейшем глобальная неопределенность), приводит к возникновению новых колебательных режимов и значительно сложной картине изменения переходов, по сравнению с действием одиночной НЭЦ. Набор изучаемых колебательных режимов и разновидности бифуркационных переходов в значительной степени обуславливаются видом взаимосвязи среди подсистем.

В качестве таких подсистем могут использоваться НЭЦ, состоящие из одинаковых самостоятельных нелинейных генераторов Чуа. На рис. 1 представлена схема для моделирования нелинейной электрической цепи генераторов Чуа с резистивной взаимосвязью [1, с. 132], которая формируется в программе Micro-Cap.

Динамика процессов, совершающихся в такой системе, представляется следующими дифференциальными уравнениями [1, с. 131]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha(y_1 - x_1 - h(x_1)), \\ \frac{dy_1}{dt} = x_1 - y_1 + z_1 + \gamma((x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) + (z_2 - z_1)), \\ \frac{dz_1}{dt} = -\beta y_1, \\ \frac{dx_2}{dt} = \alpha(y_1 - x_1 - h(x_2)), \\ \frac{dy_2}{dt} = x_2 - y_2 + z_2 + \gamma((x_1 - x_2) - (y_1 - y_2) + (z_1 - z_2)), \\ \frac{dz_2}{dt} = -\beta y_2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{где } h(x) = \begin{cases} bx - a + b, & \text{если } x < -1, \\ ax, & \text{если } |x| \leq 1, \\ bx + a - b, & \text{если } x > 1. \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{C2}{C1}, \quad \beta = \frac{C2}{LG^2}, \quad \gamma = \frac{R17}{\beta LG^2}, \quad a = \frac{m_1}{G}, \quad b = \frac{m_0}{G}, \\ x_{1,2} = \frac{(U_{c1})_{1,2}}{B_p}, \quad y_{1,2} = \frac{(U_{c2})_{1,2}}{B_p}, \quad z_{1,2} = \frac{(i_L)_{1,2}}{GB_p}, \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}, \quad \tau = \frac{tG}{C2}.$$

Подчеркнем, то, что концепция уравнений (1) считается инвариантной согласно взаимоотношению к смене переменных  $x_1 = (x_1, y_1, z_1) \Leftrightarrow x_2 = (x_2, y_2, z_2)$ ,  $x_1 = (x_1, y_1, z_1) \Leftrightarrow x_2 = (-x_2, -y_2, -z_2)$ .

Оценка этой нелинейной электрической системы была выполнена при помощи программы Micro-Cap [2, с. 229–234]. Во время прогнозирования были получены изменения напряжений и токов в элементах нелинейной электрической цепи.

Из этих колебаний стало видно, что в случае резистивной взаимосвязи среди генераторов будет появляться глобальная неопределенность пульсаций напряжений и токов. Помимо этого, глобальная неопределенность пульсаций на одинаковых составляющих генераторов Чуа станет совпадать по фазе (т. е. станет синфазной) (рис. 2). Фазовый сдвиг ( $\varphi$ ) между качаниями на одинаковых составляющих недоступен, так как ток вследствие соединения генератора Чуа в фиксированном режиме станет равен нулю.

Создание способов управления глобальной неопределенностью в нелинейной электрической цепи разной природы считается одной из значимых практических проблем сегодняшней концепции детерминированной глобальной неопределенности. Способы, разрешающие сбалансировать седловые циклы, которые встраиваются в точку притяжения глобальной неопределенности НЭЦ. Они предполагают довольно непростую операцию, которая связана с поиском нестабильных и стабильных разнообразностей седлового цикла и установления типа возмущений параметра, регулирующего этот нестабильный цикл [1, с. 133–134; 3, с. 66–69]. На сегодня предложено довольно большое количество методов управления,

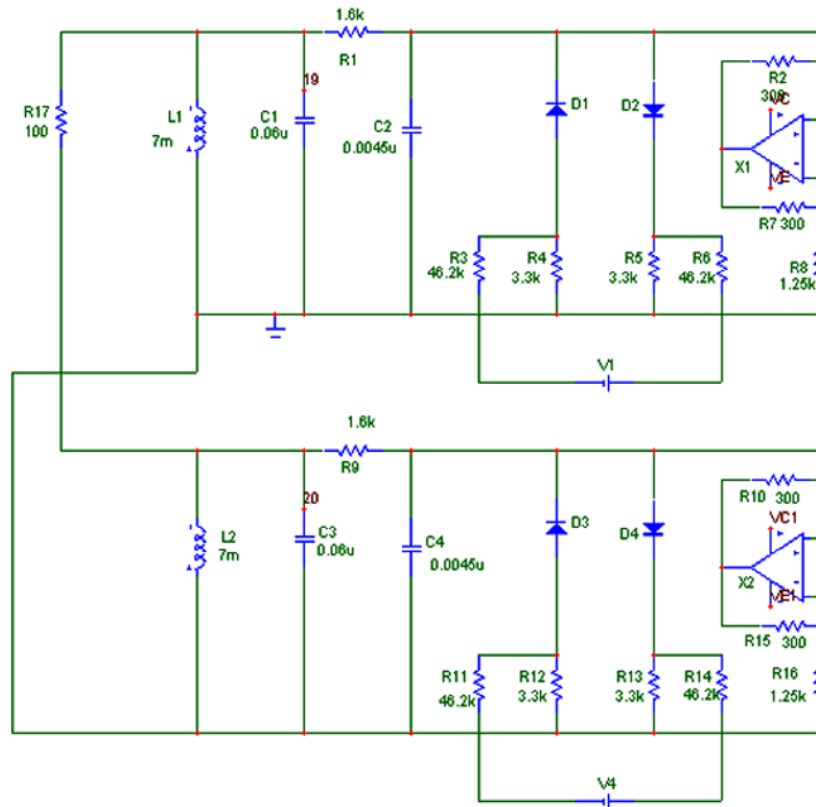


Рис. 1. Схема для моделирования процессов в системе двух идентичных генераторов Чуа с резистивной связью

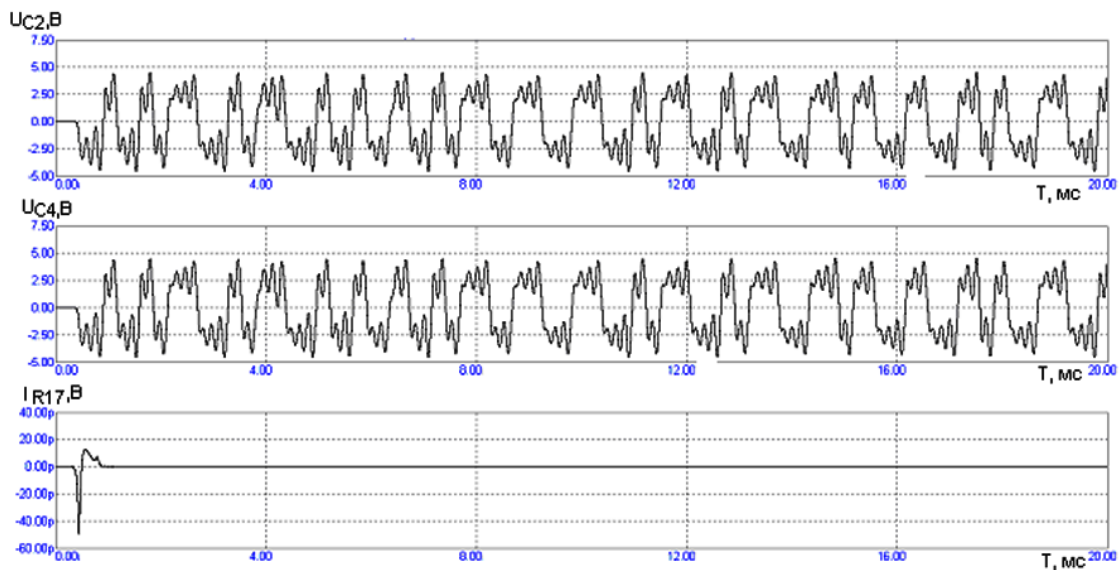


Рис. 2. Графики напряжений и токов на элементах системы при резистивной связии

задача которых состоит в реализации продуктивного перехода от колебаний глобальной неопределенности к регулярным качаниям с помощью небольших влияний на НЭЦ. Процесс стабилизации конкретного подмножества седловых циклов, возможно, значительно упростит для НЭЦ для двух взаимодействующих генераторов Чуа.

Образцом такого рода концепции имеют все шансы быть два сопряженных посредством емкости одинаковых генераторов Чуа с 1,5 степенями свободы, показывающие при вариации значений руководящих параметров характерные переходы к глобальной неопределенности. В случае присутствия окончатель-

ной взаимосвязи глобальная неопределенность получается при  $\alpha = 9 \dots 10$ . В единичной НЭЦ Чуа глобальная неопределенность получается при  $\alpha = 11,5 \dots 12,5$ . Если во взаимодействующих генераторах ранее прослеживались режимы улучшенных изменений глобальной неопределенности, то в отдельной НЭЦ без исключения всё еще имеются постоянные периоды. Это значит, что постоянные циклы имеются и в НЭЦ обоюднo сопряженных генераторов, но уже в неуравновешенном варианте. При этом располагаются данные периоды в инвариантном подпространстве  $x_1 = x_2$  ( $x$  — векторы динамических неустойчивых 1-й и 2-й подсистем) фазового

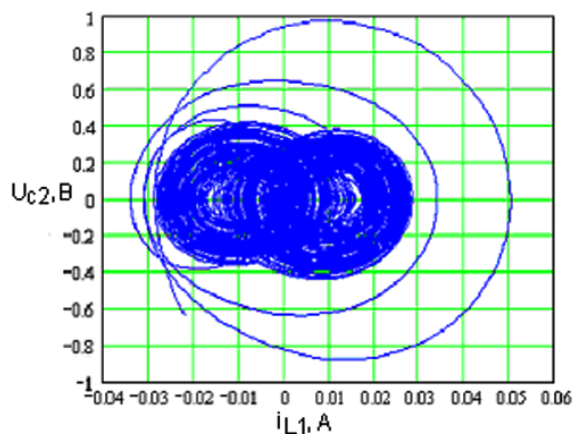


Рис. 3. Фазовый портрет тока в индуктивности  $L_1$  при отсутствии управляющего воздействия

пространства НЭЦ, представляя собой нестабильные к несимметричным и стабильные к симметричным возмущения. В случае присутствия окончательной взаимосвязи в НЭЦ сформировалась точка притяжения глобальной неопределенности, в котором встроены эти седловые инвариантные циклы. В таком случае фазовую траекторию, возможно, станет свободно сделать стабильной в их округе. Для этого довольно с помощью небольших влияний на любой из генераторов сделать устойчивой фазовую траекторию в инвариантном подпространстве  $x_1=x_2$ . Так как интересный для нас седловой цикл устойчив к инвариантным возмущениям, вследствие определенного периода фазовая траектория непременно приблизится к нему и станет меняться в данном цикле, покуда имеются руководящие возмущения. Установить тип возмущений, сделать стабильной фазовую траекторию в инвариантном подпространстве, значительно легче, нежели тип возмущений, регулирующих её в округе седлового цикла. В случае если отсутствует этот или другой вид взаимосвязи, НЭЦ показывают колебания глобальной неопределенности, в таком случае регулировка фазовой траектории в этом инвариантном подпространстве сопряженных НЭЦ приведет к режиму синхронизации глобальной неопределенности.

Необходимо подчеркнуть, что в НЭЦ, аналогичных сопряженным одним и тем же генераторам Чуа, обладающих рядом типов симметрии, траекторию глобальной неопределенности возможно отрегулировать в разных инвариантных подпространствах. К примеру, не только лишь в подпространстве  $x_1=x_2$ , но и в  $x_1=-x_2$ . Станут ли постоянные перемещения с отмеченными особенностями симметрии стабилизированными или хаотическими, будет зависеть от того, существуют ли в таком подпространстве седловые циклы, постоянные к инвариантным возмущениям, либо их нет.

Необходимо выделить то, что при этом тенденция НЭЦ сопряженных генераторов Чуа отображается системой дифференциальных уравнений (1).

В системе уравнений (1) в порядке сформированной глобальной неопределенности возможно реализовать регулировку фазовой траектории в инвариантном подпространстве  $x_1=x_2$ ,  $x_1=-x_2$  с помощью небольшого вспомогательного воздействия на одну из подсистем, подчиняющегося координатам и  $x_1$  и  $x_2$ .

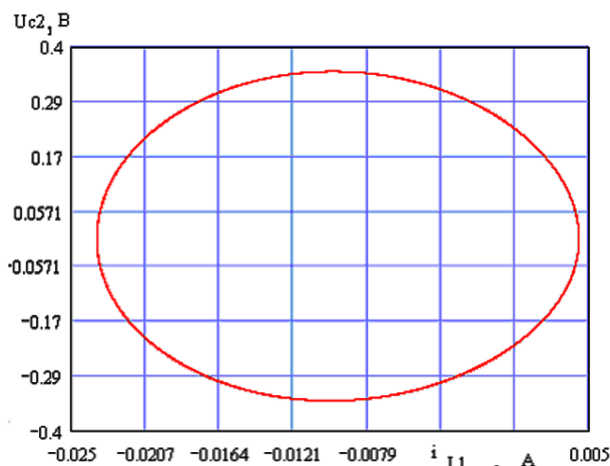


Рис. 4. Фазовый портрет тока в индуктивности  $L_1$  в присутствии управляющего воздействия в симметричном подпространстве  $x_1=x_2$

С этой целью переделаем систему (1) согласно последним переменным [1, с. 134].

$$u=(x_1-x_2)/2, v=(y_1-y_2)/2, w=(z_1-z_2)/2, \\ u^*=(x_1+x_2)/2, v^*=(y_1+y_2)/2, w^*=(z_1+z_2)/2;$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt}=\alpha[v-u-c(u)], & (2a) \\ \frac{dv}{dt}=u-v+w-2\gamma[u-v+w], & (2b) \\ \frac{dw}{dt}=-\beta v, & (2c) \\ \frac{du^*}{dt}=\alpha[v^*-u^*-c(u^*)], & (2d) \\ \frac{dv^*}{dt}=u^*-v^*+w^*, & (2e) \\ \frac{dw^*}{dt}=-\beta v^*, & (2f) \end{cases} \quad (2)$$

где  $c(u)=(h(x_1)-h(x_2))/2$ ,  $c(u^*)=(h(x_1)+h(x_2))/2$ .

Развитие инвариантных колебаний  $x_1=x_2$  ( $x_1=-x_2$ ) обуславливается уравнениями  $2d-2f$ , а их стабильность — уравнениями  $2a-2c$ .

В НЭЦ обоюдно сопряженных генераторов Чуа в режиме сформированной глобальной неопределенности фазовая траектория от периода к периоду проникает в небольшую округу не только лишь инвариантного подпространства  $x_1=x_2$ , но и в  $x_1=-x_2$ . С целью сделать устойчивой её в данном подпространстве к основному уравнению системы (1) прибавлялось небольшое руководящее влияние  $F_1=r_1u^*$ . На рис. 3–5 и 6а, б показан контролируемый переход из режима сформированной глобальной неопределенности в режим инвариантных беспорядочных изменений. В отличие от прошлого случая, контролируемых переходов от беспорядочных изменений к непрерывным изменениям не отмечалось. Вследствие управления постоянно появлялись инвариантные беспорядочные изменения.

При значениях  $\alpha$  и  $\gamma$ , подходящих режимам глобальной неопределенности в НЭЦ сопряженных генераторов, в подпространстве  $x_1=-x_2$  отсутствуют седловые циклы, постоянные к инвариантным возмущениям. Тут ранее сформировалось беспорядоч-

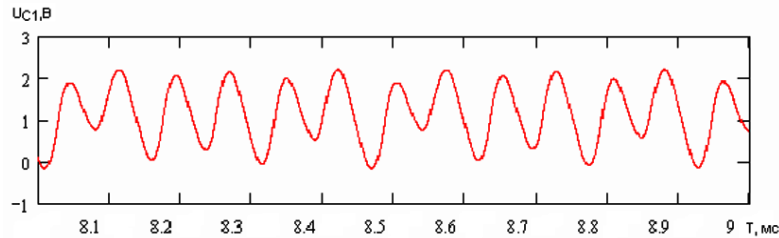


Рис. 5. График зависимости напряжения на конденсаторе  $C_1$  от времени в присутствии управляющего воздействия в симметричном подпространстве  $x_1 = -x_2$

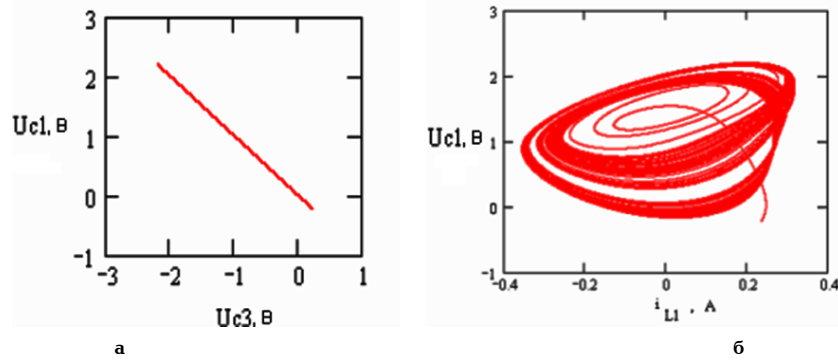


Рис. 6. а) зависимость напряжения на емкости  $C_1$  от напряжения на емкости  $C_3$ , наглядно демонстрирующая режим синхронизации; б) фазовый портрет тока в индуктивности при воздействии управляющего воздействия в симметричном подпространстве  $x_1 = -x_2$

ное множество, притягивающее фазовые траектории этого подпространства, на какое и отправляется НЭЦ при «включении» регулирования. Развитие этого беспорядочного множества совершается посредством бифуркаций удвоения этапа седловых циклов, стабильных к отмеченным инвариантным возмущениям. Изучение бифуркационных переходов для неуравновешенных колебаний выполнялось следующим образом: были заданы первоначальные требования в округе изучаемого подпространства и передавалось регулирующее воздействие  $F_1$ . В результате в НЭЦ возможно отметить только лишь эти колебательные режимы, какие считаются стойкими к противофазным возмущениям. Внедрение в систему уравнений (2) небольшого аддитивного (прибавляющего) гула никак не сказалось на полученных итогах.

Проведенные теоретические и экспериментальные опыты контролируемых переходов в НЭЦ двух сопряженных посредством емкости схожих генераторов Чуа из режима сформированной глобальной неопределенности к разным постоянным и беспорядочным инвариантным изменениям с помощью небольших влияний на любой из генераторов выявили, что:

— беспорядочную траекторию возможно делать устойчивой в разных инвариантных подпространствах ( $x_1 = x_2$  и  $x_1 = -x_2$ ) абсолютного фазового пространства НЭЦ, исполняя этим порядок синхронизации глобальной неопределенности, равно как в варианте синфазных, так и противофазных беспорядочных изменений подсистем;

— регулирование беспорядочной траектории в инвариантном подпространстве способно переключить НЭЦ в режим постоянных колебаний, и возможно работать облегченным способом управления беспорядком.

#### Библиографический список

1. Рысев, П. В. Особенности диссипации энергии в нелинейных электрических цепях / П. В. Рысев, В. К. Федоров, Е. Ю. Свешникова // Омский научный вестник. — 2005. — № 1 (30). — С. 131–135.
2. Управление и синхронизация хаоса в системе связанных генераторов / П. В. Рысев [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2004. — С. 229–234.
3. Рысев, П. В. Энтропийный анализ режимов нелинейных электроэнергетических систем / П. В. Рысев, В. К. Федоров, В. И. Суриков // Омский научный вестник. — 2003. — № 1 (22). — С. 66–69.
4. Анищенко, В. С. Сложные колебания в простых системах: механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах / В. С. Анищенко. — М. : Наука, 1990. — 312 с.
5. Бланк, М. Л. Устойчивость и локализация в хаотической динамике / М. Л. Бланк. — М. : МЦНМО, 2001. — 351 с.
6. Разевиг, В. Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6 / В. Д. Разевиг. — М. : Горячая линия — Телеком, 2001. — 344 с.
7. Мун, Ф. Введение в хаотическую динамику / Ф. Мун. — М. : Наука, 1990. — 140 с.

**АНОШЕНКОВА Екатерина Викторовна**, ассистент кафедры теоретической и общей электротехники.  
**ЗАХАРОВ Игорь Леонидович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

**ПЕСТРИКОВА Ирина Евгеньевна**, магистр техники и технологии по направлению «Электроника и наноэлектроника», ведущий документовед ученого совета. Адрес для переписки: OrmanEV@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22.09.2016 г.

© Е. В. Аношенкова, И. А. Захаров, И. Е. Пестрикова

## МЕТОДИКА ЭФФЕКТИВНОГО РАСЧЕТА УТЕПЛЕНИЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕН ЗДАНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА

Разработана методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта, учитывающая определение оптимальной толщины тепловой изоляции. Научная разработка учитывает нормативные документы по тепловой защите зданий и обоснование применяемых экономических решений. Обоснована целесообразность применения предложенной методики, позволяющей снизить приведенные затраты при капитальном ремонте зданий.

**Ключевые слова:** эффективность, затраты, тепловая энергия, теплопередача, ограждающие конструкции, оптимальная толщина.

Одним из требований, поставленных перед жилищным фондом, является сбережение тепловых энергетических ресурсов в жилых и общественных зданиях. Такие требования отвечают Федеральному закону РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 года и № 399 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...» от 28 декабря 2013 года. Результатом такой политики будет снижение единовременных затрат на капитальный ремонт зданий, а также потребляемых ими в будущем энергетических ресурсов.

Эксплуатацию зданий в настоящее время невозможно представить без применения современных сберегающих тепловую энергию процессов, отвечающих определенным стандартам качества. К таким процессам относят использование теплоизолирующих современных строительных материалов, регулирующего оборудования, а также замену устаревших систем.

Термографическое обследование и исследования работы теплового режима зданий показывают [1], что наибольшие изменения в области повышения эффективности утепления тепловой изоляцией ограждений в последнем десятилетии обусловлены ужесточением норм к их теплозащитным свойствам.

В настоящее время к тепловой защите зданий, согласно методике СП 50.13330.2012 [2, с. 3], предъявляют комплекс требований: приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений; температура на внутренних поверхностях

ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений; удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемой. Решающим показателем тепловой защиты зданий и его энергетической эффективности выбран класс энергосбережения и удельный годовой расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Такое решение продиктовано постановлением Правительства РФ № 18 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и ...» от 25.01.2011 года.

Одним из основных мероприятий повышения класса энергосбережения и снижения расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий является утепление тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций его стен, так как потери тепловой энергии через стены в общем балансе достигают 30 % и более [1, с. 32].

На основании [2, с. 23] введем выражение для определения класса энергосбережения здания «КЭ», %:

$$КЭ = ((q_p - q_{от}^{тп}) / q_p) \cdot 100, \quad (1)$$

где  $q_{от}^{тп}$  — нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания (выбирается согласно табл. 13, 14 [2, с. 23]), Вт/(м<sup>3</sup>·°C);  $q_p$  — расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, Вт/(м<sup>3</sup>·°C) (определяется согласно приложению Г [2, с. 32 – 37]).

С другой стороны, согласно нормативным требованиям [2, с. 24 – 25], при оценке здания с КЭ больше

+ 15 % необходимо проводить реконструкцию, соответствующую экономическому обоснованию. При условии  $-15\% \leq КЭ \leq +15\%$  — мероприятия по энергосбережению не разрабатываются, а при КЭ ниже  $-15\%$  — экономически стимулируются. Такой подход к соблюдению норм и возможность снизить капитальные затраты на ремонт зданий требуют поиска оптимального решения.

Авторами данной работы для капитального ремонта зданий разработан алгоритм расчета (2) – (12) и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания» [3]:

$$\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \Pi_{\text{т}} \cdot \lambda_{\text{ут}} \cdot (\sum F_{i,\text{ст}} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{н}}) \cdot n)}{r_0 \cdot \eta \cdot (E_{\text{ст}} + H_{\text{ст}}) \cdot \Pi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ут}} - R_{\text{уст}} \cdot \lambda_{\text{ут}}}} \quad (2)$$

$$r_0 = \frac{1}{1 + (R_{\text{уст}} + (\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} / \lambda_{\text{ут}})) (\sum l_j \cdot \delta_j + \sum n_k \cdot \chi_k)} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\sum F_{i,\text{ст}}}{\sum (F_{i,\text{ст}} / R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{усл}}) ((R_{\text{уст}} + (\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} / \lambda_{\text{ут}}))} \quad (4)$$

$$R_{\text{уст}} = \frac{1}{\alpha_1} + ((\sum F_{i,\text{ст}}) / (\sum (F_{i,\text{ст}} / (\sum (\delta_i^{\text{уст}} / \lambda_i^{\text{уст}})))) + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5)$$

$$R_{\text{о},i}^{\text{усл}} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i^{\text{уст}}}{\lambda_i^{\text{уст}}} + \frac{\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}}{\lambda_{\text{ут}}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (6)$$

$$R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{пр}} = 1 / ((1 / R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{усл}}) + \sum l_j^{\text{уст}} \cdot \psi_j^{\text{уст}} + \sum n_k^{\text{уст}} \cdot \chi_k^{\text{уст}}) \quad (7)$$

$$R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{усл}} = (\sum F_i) / \left( \sum \left( F_i / \left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i^{\text{уст}}}{\lambda_i^{\text{уст}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right) \right) \quad (8)$$

$$E_{\text{ст}} = r / (1 - \exp(-r \cdot T_{\text{ок}})) \quad (9)$$

$$T_{\text{ок}} = (\ln(1 + T_0 \cdot r)) / (\ln(1 + r)) \quad (10)$$

$$T_0 = \frac{(\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} + \Pi_{\text{раб}}) \cdot F_{\text{ут}} \cdot (R_{\text{уст}})}{\Pi_{\text{т}} \cdot 86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot (\sum F_{i,\text{ст}} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{н}}) \cdot n)} \rightarrow \frac{+(\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} / \lambda_{\text{ут}}) \cdot \eta \cdot r_0 \cdot R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{пр}}}{[(R_{\text{уст}} + (\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} / \lambda_{\text{ут}})) \cdot \eta \cdot r_0 - R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{пр}}]} \quad (11)$$

$$\Pi_{\text{ут}} = \frac{86400 \cdot z_{\text{от}} \cdot \Pi_{\text{т}} \cdot (\sum F_{i,\text{ст}} \cdot (t_{\text{в},i} - t_{\text{н}}) \cdot n)}{r_0 \cdot (R_{\text{уст}} + (\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} / \lambda_{\text{ут}}))} + (\Pi_{\text{ут}} \cdot \delta_{\text{ут}}^{\text{опт}} + \Pi_{\text{раб}}) \cdot (E_{\text{ст}} + H_{\text{ст}}) \cdot F_{\text{ут}} \quad (12)$$

где  $\delta_{\text{ут}}^{\text{опт}}$  — оптимальная толщина утепляющего слоя тепловой изоляции ограждающих конструкций стен здания, м;

$r_0$  — коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции после утепления, учитывающей влияние стыков, откосов проемов, обрамляющих ребер, гибких связей и других теплопроводных включений;

$\eta$  — коэффициент расхождения осредненности по площади условного сопротивления теплопередаче

фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом;

$\Pi_{\text{ут}}$  — стоимость 1 м<sup>3</sup> утепляющего материала, р./м<sup>3</sup>;

$E_{\text{ст}}$  — коэффициент эффективности инвестиций в утепление наружных ограждающих конструкций стен здания, 1/год;

$H_{\text{ст}}$  — норма отчислений на амортизацию и ежегодное обслуживание ограждающих конструкций стен здания, 1/год;

$R_{\text{уст}}$  — установленное сопротивление теплопередаче однородной ограждающей конструкции стен здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$\lambda_{\text{ут}}$  — теплопроводность утепляющего слоя ограждающей конструкции стен здания, Вт/(м·°С);

$\Pi_{\text{т}}$  — тариф на тепловую энергию, р./Дж;

$l_j$  — протяженность линейной неоднородности j-го вида после утепления, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> фрагмента теплозащитной оболочки стен здания [2, с. 43], м/м<sup>2</sup>;

$\psi_j$  — удельные потери тепловой энергии через линейную неоднородность j-го вида после утепления [2, с. 44], Вт/м<sup>2</sup>·°С;

$n_k$  — количество точечных неоднородностей k-го вида после утепления, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> фрагмента теплозащитной оболочки стен здания [2, с. 43], шт./м<sup>2</sup>;

$\chi_k$  — удельные потери тепловой энергии через точечную неоднородность k-го вида после утепления [2, с. 45], Вт/°С;

$F_{i,\text{ст}}$  — площадь i-й части фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{ут}}$  — общая площадь утепляющей теплозащитной оболочки стен здания, м<sup>2</sup>;

$R_{\text{о},i}^{\text{усл}}$  — условное сопротивление теплопередаче однородной части фрагмента теплозащитной оболочки стен здания i-го вида, после утепления его тепловой изоляцией, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$r$  — норма дисконта [4];

$T_{\text{ок}}$  — срок окупаемости, лет;

$\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи внутренней и внешней поверхности ограждающих конструкций [2, с. 6–8], Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\delta_i^{\text{уст}}$  — толщина i-го слоя установленной ограждающей конструкции, м;

$\lambda_i^{\text{уст}}$  — теплопроводность i-го слоя установленной ограждающей конструкции, Вт/(м·°С);

$t_{\text{в},i}$  — расчетная температура внутреннего воздуха i-го помещения в здании [2, с. 4], °С;

$t_{\text{н}}, z_{\text{от}}$  — расчетная температура наружного воздуха в холодный период года и продолжительность отопительного периода [5], °С, сут/год;

$\eta$  — коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху [6];

$T_0$  — бездисконтный срок окупаемости инвестиций за счет номинальной величины дохода, лет;

$\Pi_{\text{раб}}$  — стоимость 1 м<sup>2</sup> работ по утеплению ограждающих конструкций стен здания с учетом прочих расходов, р./м<sup>2</sup>;

$R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{пр}}$  — установленное приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$R_{\text{о},\text{уст}}^{\text{усл}}$  — осредненное по площади установленное условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$l_j^{\text{уст}}$  — протяженность линейной неоднородности j-го вида до утепления, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, м/м<sup>2</sup>;

$\psi_j^{\text{уст}}$  — удельные потери тепловой энергии через линейную неоднородность j-го вида до утепления, Вт/м<sup>2</sup>·°С;

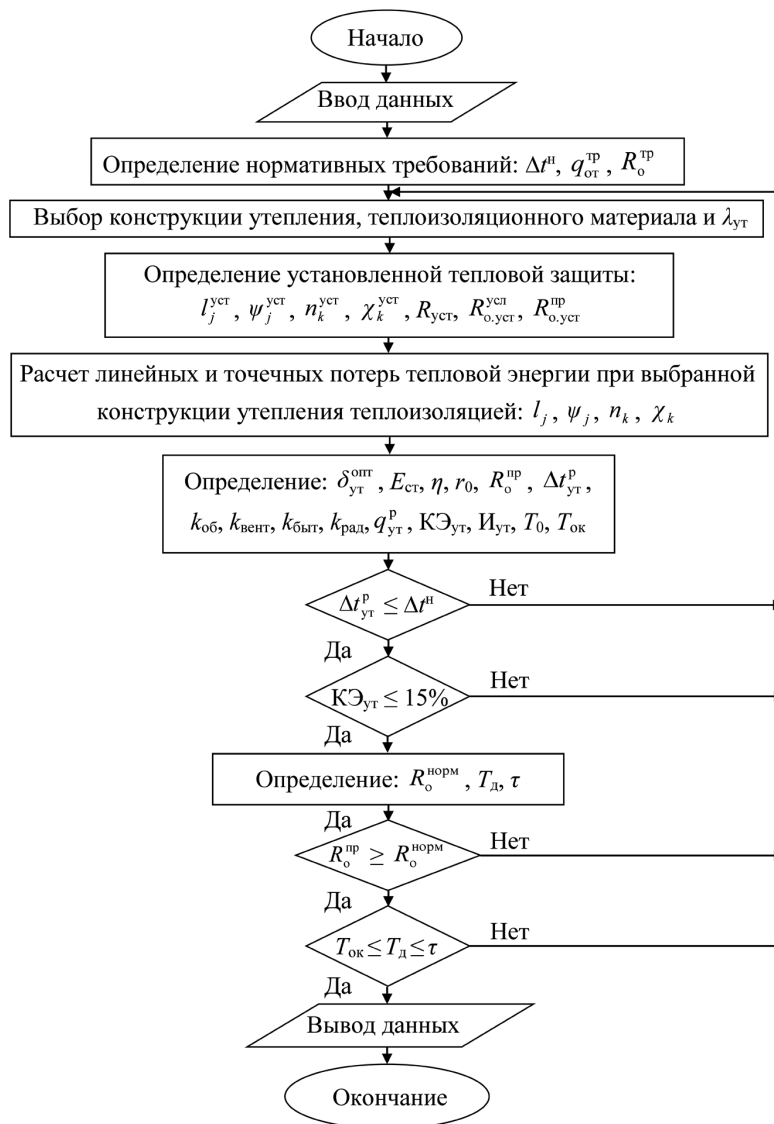


Рис. 1. Структурная схема методики эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта

$n_k^{уст}$  — количество точечных неоднородностей  $k$ -го вида до утепления, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки стен здания, шт./ $\text{м}^2$ ;

$\chi_k^{уст}$  — удельные потери тепловой энергии через точечную неоднородность  $k$ -го вида до утепления,  $\text{Вт}/^\circ\text{C}$ ;

$I_{ут}$  — приведенные дисконтированные затраты по утеплению ограждающих конструкций стен здания, р./год;

$C_{раб}$  — стоимость  $1 \text{ м}^2$  работ по утеплению ограждающих конструкций стен здания, р./ $\text{м}^2$ .

Помимо выполнения нормативных требований тепловой защиты зданий, выбора материала и расчета толщины утеплителя, необходимо учитывать степень долговечности ограждающей конструкции.

Степень долговечности выбранной ограждающей конструкции стен здания сводится к определению его прогнозируемого срока службы и допустимого к эксплуатации.

Учитывая вышесказанное, предлагается методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен здания при проведении капитального ремонта. Структурная схема методики представлена на рис. 1, где:

$\Delta t^н$  — нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции [2, с. 7],  $^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t_{ут}^п$  — расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции после утепления [7],  $^\circ\text{C}$ ;

$R_о^{нп}$  — базовое значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции [2, с. 3],  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;

$R_о^{нп}$  — приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания [2, с. 43],  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;

$k_{об}$  — удельная теплозащитная характеристика здания [2, с. 48],  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$k_{вент}$  — удельная вентиляционная характеристика здания [2, с. 33],  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$k_{быт}$  — удельная характеристика бытовых тепловыделений здания [2, с. 35],  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$k_{рад}$  — удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации [2, с. 35],  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$q_{ут}^п$  — расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания после утепления,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;



Сравнительные результаты расчета разработанной методики, применительно к ограждающим конструкциям стен и условиям эксплуатации жилого пятиэтажного панельного здания в г. Омске

Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Значение
1	3	4	5
Экономические	$r$	—	0,15
	$E_{ст}$	1/ГОД	0,186
	$H_{ст}$	1/ГОД	0,011
	$\Pi_{ут}$	р./м <sup>3</sup>	2200
	$\Pi_{раб}$	р./м <sup>2</sup>	2800
	$\Pi_{т}$	р./Дж	$3,583 \cdot 10^{-7}$
Теплотехнические	$\lambda_{ут}$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	0,04
	$R_{уст}$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	1,077
	$r_0$	—	0,878
	$R_0^{норм}$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	3,5
	$q_{от}^{пр}$	Вт/м <sup>3</sup> ·C	0,359
	$\Delta t^{пр}$	°C	4
Предлагаемые при проектировании	$\delta_{ут}$	м	0,05/0,1/0,15
	$I_{ут}$	10 <sup>5</sup> ·р./ГОД	9,12/9,04/8,96
	$q_p$	Вт/м <sup>3</sup> ·C	0,38/0,34/0,28
	$KЭ_{ут}$	%	+5,5/−5,6/−28,2
	$\Delta t_{ут}^p$	°C	0,45/0,32/0,22
	$R_0^{пр}$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	2,04/3,14/4,24
	$T_{ок}$	лет	12,8/11,6/10,6
	$T_A$	лет	18/26,2/39,2
Определенные по предложенной методике	$\delta_{ут}^{пр}$	м	0,12
	$I_{ут}$	10 <sup>5</sup> ·р./ГОД	8,84
	$q_p$	Вт/м <sup>3</sup> ·C	0,293
	$KЭ_{ут}$	%	−22,5
	$\Delta t_{ут}^p$	°C	0,257
	$R_0^{пр}$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	3,62
	$T_{ок}$	лет	10,8
	$T_A$	лет	31,4
$\tau$	лет	39,6	

$KЭ_{ут}$  — класс энергосбережения здания после утепления, %;

$R_0^{норм}$  — нормируемое приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции [2, с. 3], (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;

$T_A$  — допустимый срок эксплуатации утепляющего материала [8], год;

$\tau$  — время до выхода из строя теплоизоляционного слоя (прогнозируемый срок службы) по критерию потери теплозащитных свойств [9], год.

Сравнительные результаты расчета использования предложенной разработки, применительно к утеплению стен и условиям эксплуатации жилого пятиэтажного панельного здания 1970 года постройки в городе Омске (отапливаемый объем 8200 м<sup>3</sup>, отапливаемая площадь 2545 м<sup>2</sup>, существующий класс энергосбережения +16,1 % «D» пониженный, площади наружных стен: жилой части — 1182 м<sup>2</sup>; общественной части — 208 м<sup>2</sup>; общей утепляющей теплозащитной оболочки — 1390 м<sup>2</sup>), представлены в табл. 1.

Анализ данных (табл. 1) показывает, что применение предложенной методики, учитывающей расчет оптимальной толщины тепловой изоляции, способствует определению наименьших приведенных дисконтированных затрат ( $I_{ут} = 884000$  р./год) при соблюдении нормативных требований (класс энерго-

сбережения  $KЭ_{ут} = -22,5$  %, «B» высокий) и степени долговечности ограждающей конструкции.

#### Выводы.

1. Разработана методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен здания при проведении капитального ремонта, с учетом нормативных документов по тепловой защите зданий и оптимальному обоснованию применяемых экономических решений.

2. Результаты исследования подтверждают целесообразность использования предложенной методики при проведении капитального ремонта.

#### Библиографический список

1. Основные направления совершенствования тепловой работы зданий и сооружений при капитальном ремонте / П. В. Петров [и др.] // Энергетика и ЖКХ. — 2015. — № 3 (34). — С. 30–33.
2. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003). — Введ. 2013-07-01. — М.: ФАУ «ФЦС», 2012. — 96 с.
3. Свидетельство № 2016616691 Российская Федерация. Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания : свидетельство

о гос. рег. программы для ЭВМ / Петров П. В. — № 2016614064 ; заявл. 20.04.2016 ; опубл. 20.07.2016.

4. Ковалев, И. Н. Рациональные решения при экономическом обосновании теплозащиты зданий / И. Н. Ковалев // Энергосбережение. — 2014. — № 8. — С. 14–19.

5. СП 131.13330.2012. Строительная климатология (Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*). — Введ. 2013-01-01. — М. : НИИСФ РААСН, 2012. — 109 с.

6. Сибикин, Ю. Д. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : учеб. пособие / Ю. Д. Сибикин. — М. : Академия, 2016. — 336 с.

7. Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте / П. В. Петров [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 254–258.

8. Захарьин, Е. Н. Долговечность экструзионного пенополистирола. Оценка и прогнозирование теплопроводности : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Е. Н. Захарьин. — Красноярск : СФУ, 2011. — 156 с.

9. Иванцов, А. И. Прогнозирование срока службы наружных стен жилых зданий по потере требуемой теплозащиты :

дис. ... канд. техн. наук. : 05.23.01 / А. И. Иванцов. — Казань : КГАСУ, 2014. — 159 с.

**ПЕТРОВ Павел Владимирович**, аспирант кафедры теплоэнергетики Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), заместитель директора ООО «Сибирская проектная компания», г. Омск.

**ШЕРСТОБИТОВ Михаил Сергеевич**, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики ОмГУПС.

**РЕЗАНОВ Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики ОмГУПС.

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики ОмГУПС.

Адрес для переписки: rezanove1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.10.2016 г.

© П. В. Петров, М. С. Шерстобитов, Е. М. Резанов, В. Р. Ведрученко

## Книжная полка

**Кузнецов, Е. М. Электрооборудование насосных установок для нефтедобычи и перекачки жидкостей : учеб. пособие / Е. М. Кузнецов, О. А. Лысенко, Д. В. Рысев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 150 с.**

Рассматриваются электропогружные и наземные установки с центробежными насосами и преобразователями частоты, применяемые в современных электротехнических комплексах для добычи нефти из глубинных скважин и перекачки жидкостей по трубопроводам. Для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», и магистрантов, проходящих подготовку по профилю «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

**Михеев, Г. М. Электротехника и энергетика. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г. М. Михеев. — М. : ДМК Пресс, 2015. — 100 с. — ISBN 978-5-97060-268-3.**

В книге приводятся традиционные и новые ресурсосберегающие методы и устройства диагностики подстанционного оборудования электростанций и электрических сетей энергосистем, такого как силовые трансформаторы на классы напряжения 35...750 кВ и установленные на них регуляторы под нагрузкой, а также высоковольтные выключатели 6...500 кВ и разрядники 35...500 кВ. Рассчитана на инженерно-технический персонал предприятий, электростанций и электросетей, выполняющий работы по ремонту, эксплуатации и диагностике высоковольтного электрооборудования, а также на научных работников, студентов и аспирантов, занимающихся вопросами диагностики и контроля мощных силовых трансформаторов, коммутационных аппаратов, средств защиты от перенапряжения.

**Иванов, С. Пошаговая инструкция по разработке проекта внутреннего электроснабжения (+ CD-ROM) / С. Иванов, А. Васильев. — СПб. : Заневская площадь, 2015. — 78 с. — ISBN 978-5-99054451-8-2.**

Настоящее пособие представляет собой пошаговую инструкцию по разработке проекта внутреннего электроснабжения. В форме таблиц, иллюстраций и текстовых пояснений представлены практические рекомендации по проектированию. Особенностью данного издания является сочетание теоретических основ, практических рекомендаций и определений основных понятий, относящихся к разработке проекта внутреннего электроснабжения. Книга написана на основе практического опыта авторов в области проектирования систем электроснабжения промышленных, жилых и общественных зданий, а также преподавательской деятельности. Предлагаемая книга рассматривает вопросы оформления рабочей документации и в основном предназначена служить практическим пособием для тех, кто только начал осваивать профессию инженера-проектировщика систем электроснабжения. Данное пособие адресовано инженерно-техническим работникам, проектировщикам, производителям электромонтажных работ, студентам технических вузов.