

## ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В работе показана возможность возникновения хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией. Хаотические колебания являются аварийным режимом функционирования электросистем. При этом, с точки зрения распределенной генерации, вопрос возникновения хаотического режима работы представляется проработанным недостаточно. Поэтому целью данной работы является рассмотрение возможности возникновения хаотических колебаний в системе с распределенной генерацией. Цель достигается описанием видов установившихся режимов работы системы с распределенной генерацией, причин возникновения и методов стабилизации хаотических колебаний.

**Ключевые слова:** электротехническая система с распределенной генерацией, хаотические колебания, детерминированная нелинейная цепь, показатели Ляпунова, хаотический аттрактор, бифуркационный параметр.

**Введение.** Внедрение и организация электропитания потребителей по принципу распределенной генерации является одним из перспективных направлений развития российской энергетики [1, 2]. Распределенная генерация — это производство электрической энергии в непосредственной близости от потребителя. Ввиду небольших расстояний потери на передачу электроэнергии, затраты на строительство и эксплуатацию распределительных сетей значительно меньше, чем при централизованном электроснабжении [3, 4]. При этом тепло от работы энергоустановок может использоваться для организации системы отопления. В связи с этим распределенная генерация особенно эффективна в системах электроснабжения жилых помещений [5].

Жилые помещения, как правило, имеют в своем составе нелинейную нагрузку, например, импульсные вторичные источники питания электроприборов [6]. При нелинейности существует возможность возникновения в электросистеме колебаний хаотического характера. Условиями возникновения хаотических колебаний является размерность фазового пространства системы больше трех и экспоненциальная неустойчивость траектории, возникающая при некоторых значениях параметров [7].

В условиях развитых информационных коммуникаций распределенная генерация предполагает возможность интеграции источников питания в систему «умный город» [8, 9]. Объединение источников в общую сеть эффективно, с ценологической точки зрения, ввиду изменяющегося характера нагрузки и вероятности ремонтно-профилактических

работ систем и аварийных режимов работы [10, 11]. Объединенные источники питания и нагрузка нелинейного характера образуют многопараметрическую нелинейную электрическую цепь с размерностью фазового пространства большей трех. Такая цепь содержит широкие области параметров, в которых возможно возникновение хаотических колебаний.

Хаотические колебания в электротехнической системе с распределенной генерацией (ЭТС с РГ) представляют собой непредсказуемое изменение значений токов и напряжений, которое приводит к порче электрооборудования, ускоренному старению изоляции проводов питающих и распределительных линий, появлению дополнительных потерь при передаче и трансформации энергии. В связи с этим вопрос возникновения хаотических колебаний в ЭТС с РГ является актуальным. При этом требуются ввиду наличия большого числа разноплановых работ по данной тематике обобщение и систематизация полученных ранее результатов, с точки зрения ЭТС с РГ. Поэтому целью данной работы является рассмотрение возможности возникновения хаотических колебаний в ЭТС с РГ. Цель достигается описанием видов установившихся режимов работы ЭТС с РГ, причин возникновения и методов стабилизации хаотических колебаний в ЭТС с РГ.

**Виды установившихся режимов работы ЭТС с РГ.** Режимы работы ЭТС с РГ можно разделить на установившиеся и переходные процессы. В классическом понимании любой переходный процесс электротехнической системы должен закончиться установившимися периодическими колебаниями

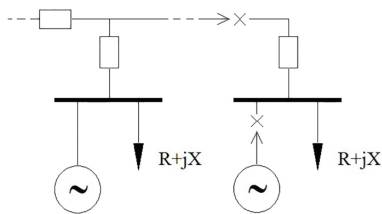
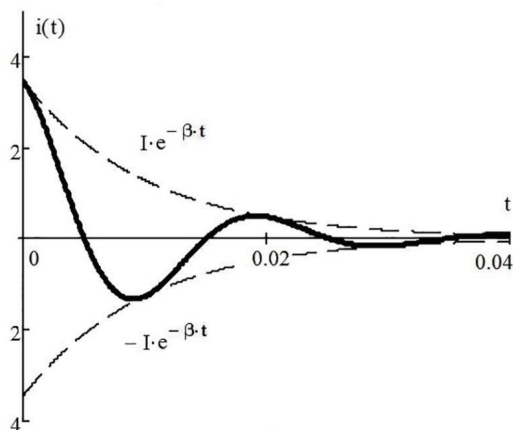
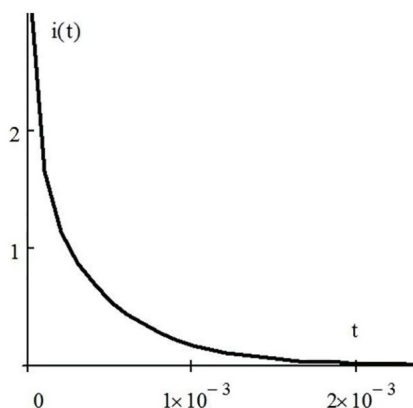


Рис. 1. Прерывание электроснабжения одного из потребителей в ЭТС с РГ



а)



б)

Рис. 2 Переходный процесс при прерывании электроснабжения:  
а) затухающие гармонические колебания;  
б) затухание по экспоненте

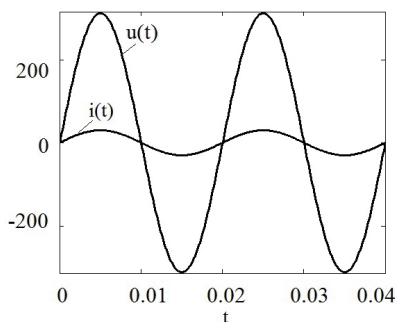


Рис. 3. Периодические колебания напряжения и тока в ЭТС с РГ (активная нагрузка)

или положением равновесия. Однако ввиду наличия нелинейных элементов системы, таких как мостовые выпрямители, инверторные преобразователи, ЭТС с РГ является нелинейной электрической цепью (НЭЦ). Согласно современной теории и методов анализа колебательных НЭЦ, в ЭТС с РГ возможны следующие установившиеся режимы работы: положение равновесия, периодические колебания, квазипериодические и хаотические колебания.

Положение равновесия наступает ЭТС с РГ при аварийном или плановом прерывании электроснабжения потребителей (рис. 1).

При прерывании электроснабжения в системе возникает переходный процесс из-за наличия реактивных элементов электрической цепи. В зависимости от соотношения активной и реактивной составляющих переходный процесс протекает в виде затухающих гармонических колебаний (1) или величины токов и напряжений затухают экспоненциально (2) и (3).

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $I_0$  — начальное значение тока;  $\beta$  — коэффициент затухания;  $\omega$  — угловая частота;  $\varphi_0$  — угол сдвига фазы.

$$i(t) = A \cdot e^{-\beta_1 t} + B \cdot e^{-\beta_2 t} \quad (2)$$

$$\beta_{1,2} = \beta \pm \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{L \cdot C}}, \quad (3)$$

где  $A, B$  — константы;  $L$  — индуктивность;  $C$  — емкость.

На рис. 2 приведены соответствующие графики переходных процессов для тока нагрузки ЭТС с РГ.

Периодические синусоидальные колебания напряжения и тока являются номинальным режимом работы ЭТС с РГ (рис. 3).

Частота периодических колебаний и напряжение задаются источником питания и зависят от баланса потребляемых и генерируемых активных мощностей:

$$\Delta P_{и} = \frac{\partial \sum P_{н}}{\partial f} \cdot \Delta f + \frac{\partial \sum P_{п}}{\partial U} \cdot \Delta U,$$

где  $\Delta P_{и}$  — изменение генерируемой активной мощности;  $\sum P_{н}$  — сумма активных мощностей нагрузки;  $\Delta f$  — отклонение частоты колебаний;  $\sum P_{п}$  — сумма потерь активной мощности;  $\Delta U$  — отклонение напряжения.

При увеличении (уменьшении) генерируемой мощности частота колебаний и напряжение во всех узлах сети увеличивается (уменьшается). При увеличении (уменьшении) величины потребления активной мощности частота колебаний и напряжение уменьшается (увеличивается).

Рассмотрим возможность возникновения квазипериодических и хаотических режимов работы системы электроснабжения потребителя, отключенной от внешней сети с распределенной генерации (отсутствует необходимость выдачи энергии во внешнюю сеть). При этом размерность динамической модели системы электроснабжения окажется минимальной и область значений параметров, при которых возможны квазипериодические и хаотические колебания, будет максимально сужена.

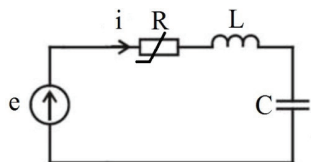


Рис. 4. Схема замещения системы электроснабжения потребителя

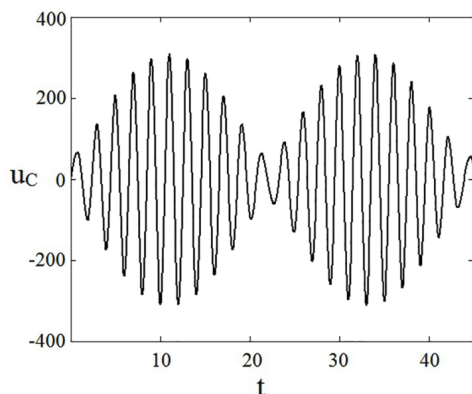


Рис. 5. Квазипериодические колебания напряжения на емкости

Поэтому возникновение квазипериодического и хаотического режимов работы при данных условиях подтвердит возможность их появления в динамических системах большей размерности (если источник питания и потребитель объединены в общую сеть).

На рис. 4 приведена схема замещения отключенной от общей сети системы электроснабжения потребителя.

Нагрузка представлена последовательно соединенными емкостью  $C$ , индуктивностью  $L$  и резистором  $R$ .

Как правило, нагрузка содержит нелинейные элементы. Пусть резистор  $R$  имеет нелинейную вольт-амперную характеристику:

$$u_R = R \cdot (i^3 + i), \quad (4)$$

где  $u_R$  — падение напряжения на резисторе;  $i$  — ток в резисторе;  $R$  — коэффициент.

Для оценки режима работы ЭТС с РГ найдем зависимость напряжения на емкости  $C$  от времени. Составим по второму закону Кирхгофа уравнение для контура источник питания — нагрузка:

$$u_R + u_L + u_C = e, \quad (5)$$

где  $u_R$ ,  $u_L$ ,  $u_C$  — соответственно падение напряжения на резисторе, индуктивности и емкости;  $e$  — синусоидальная ЭДС.

Выразим слагаемые в левой части выражения (5) через  $u_C$ , используя (4) и выражения  $i = C \cdot \frac{du_C}{dt}$ ,  $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ :

$$C \cdot L \cdot \frac{d^2 u_C}{dt^2} + R \cdot C \cdot \left( C^2 \cdot \left( \frac{du_C}{dt} \right)^3 + \frac{du_C}{dt} \right) + u_C = E \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (6)$$

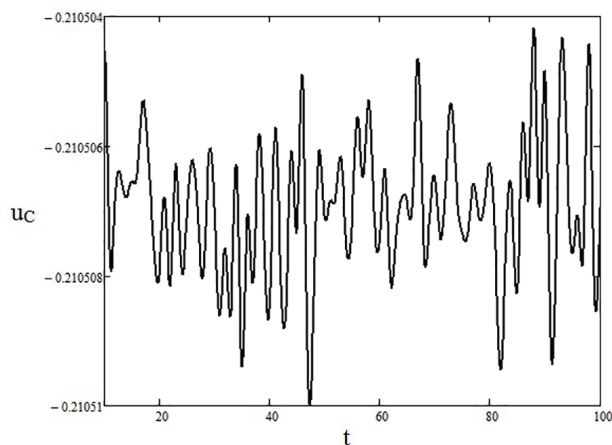


Рис. 6. Хаотические колебания напряжения на емкости

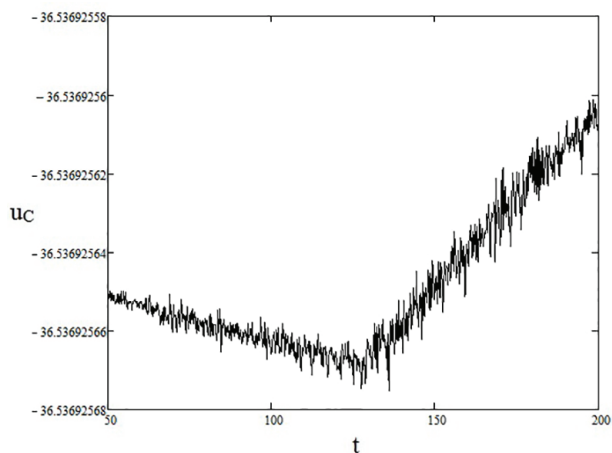


Рис. 7. Потеря устойчивости хаотического режима работы системы

Введем в дифференциальное уравнение (6) коэффициенты  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  для удобства отображения набора параметров, соответствующих рассматриваемому режиму работы системы:

$$A_1 \cdot \frac{d^2 u_C}{dt^2} + A_2 \cdot \left( A_3 \cdot \left( \frac{du_C}{dt} \right)^3 + \frac{du_C}{dt} \right) + u_C = A_4 \cdot \sin(A_5 \cdot t).$$

Для численного решения дифференциального уравнения будем использовать метод Рунге — Кутты.

При наборе параметров  $[5 \cdot 10^{-6}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 3]$  возникают квазипериодические колебания, а именно режим периодической амплитудной модуляции напряжения на емкости в виде биений (рис. 5).

При значениях параметров  $[5 \cdot 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$  в системе возникают колебания случайного характера (рис. 6).

Высокая чувствительность решений дифференциального уравнения (6) к изменению начальных условий указывает на хаотический режим работы системы.

При наборе параметров  $[5 \cdot 10^{-5}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$  хаотические колебания теряют устойчивость (рис. 7).

**Причины возникновения хаотических колебаний в ЭТС с РГ.** В теории хаотических режимов де-

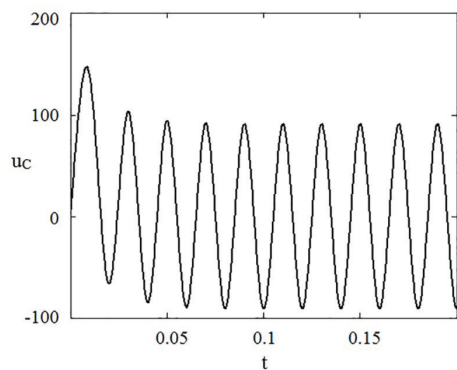


Рис. 8. Периодические колебания напряжения на емкости

терминированных нелинейных цепей хаос — один из видов установившегося состояния электротехнической системы. Динамическая модель ЭТС с РГ при хаотическом режиме работы обладает непредсказуемой траекторией решения и экспоненциальной зависимостью от точности задания начальных условий. В фазовом пространстве хаотические траектории решения группируются в области (подпространства), называемые хаотическими аттракторами. Локализация траекторий объясняется диссипацией энергии на элементах электротехнической системы и присутствием нелинейности [12].

Хаотический режим работы возникает при определенных значениях бифуркационных параметров при условии, что траектория системы экспоненциально неустойчива [13]. В рассмотренных выше хаотических колебаниях бифуркационным параметром оказался коэффициент  $A_1$ , а неустойчивость режима работы системы заключалась в наличии нелинейного сопротивления и определенном сочетании значений  $R, L, C$ .

**Методы стабилизации хаотических колебаний в ЭТС с РГ.** Для предотвращения возникновения хаотических колебаний необходима их идентификация, а затем стабилизация [14]. Идентификацию хаотических колебаний можно выполнить через характеристические показатели Ляпунова (наличие хотя бы одного положительного показателя), построением фазового портрета траекторий движения системы (хаотические аттракторы), построением спектров частот (спектр частот хаотических колебаний непрерывный ниже частоты внешнего воздействия).

Устранение хаотических колебаний в системе с распределенной генерацией осуществляется воздействием на параметры системы. Например, стабилизация хаотических колебаний может быть выполнена воздействием на режимы работы отдельных источников питания системы [15]. При этом стабилизирующее воздействие определяется по критерию Рауса — Гурвица [16].

Динамическая модель, описываемая дифференциальным уравнением (6), переходит от хаотических колебаний к периодическим (рис. 8) при значениях параметров  $[5 \cdot 10^{-6}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$ .

**Выводы.** В работе показана возможность возникновения хаотических колебаний в ЭТС с РГ. Для этого были рассмотрены основные виды установившихся режимов работы ЭТС с РГ: положение равновесия, периодические колебания, квазипериодические и хаотические колебания.

Положение равновесия наступает ЭТС с РГ при аварийном или плановом прерывании электроснабжения потребителей после окончания переходных процессов. В зависимости от соотношения активного и реактивного сопротивлений переходные процессы протекают по экспоненциальному или гармоническому закону.

Периодические колебания являются номинальным режимом работы электротехнической системы. При этом напряжение и частота в узлах системы определяются балансом мощностей.

Квазипериодические и хаотические колебания рассмотрены на примере системы электроснабжения потребителя, изолированной от общей сети распределенной генерации. Для системы составлена динамическая модель на основе 2 закона Кирхгофа.

При значениях параметров модели  $[5 \cdot 10^{-6}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 3]$  траектория системы квазипериодическая (биения).

При наборе параметров  $[5 \cdot 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$  возникают устойчивые хаотические колебания. Замечена потеря устойчивости хаотического режима при  $[5 \cdot 10^{-5}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$ .

Причина возникновения хаотического режима работы системы — принятие ее параметрами значений, называемых бифуркационными. Условие возникновения хаотического режима работы системы — экспоненциальная неустойчивость ее траектории.

Устранение хаотических колебаний в системе с распределенной генерацией осуществляется воздействием на ее параметры.

В рассмотренной системе электроснабжения потребителя режим периодических колебаний достигнут при значениях параметров  $[5 \cdot 10^{-6}; 5 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-9}; 220\sqrt{2}; 314,2]$ .

#### Библиографический список

1. Леонов Е. Н. Системы децентрализованного электроснабжения на основе технологий микрогенерации и их перспективы // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: сб. тр. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. С. 91–93. ISBN 978-5-9613-0289-9.
2. Guan T., Lin H., Sun Q. [et al.]. Optimal configuration and operation of multi-energy complementary distributed energy systems // Energy Procedia. 2018. Vol. 152. P. 77–82. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.062.
3. Aman M. A., Abbasi M. Z., Ali M. [et al.]. To Negate the influences of Un-deterministic Dispersed Generation on Interconnection to the Distributed System considering Power Losses of the system // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. 2018. Vol. 13, no. 3. P. 117–132.
4. Косарев Б. А., Коцук Г. А., Федоров В. К., Полинцев А. Г. Динамическое перераспределение источников питания в электротехнической системе с распределенной генерацией // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 50–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-50-55.
5. Slingerland S. Energy conservation and electricity sector liberalization in the Netherlands and UK: case studies on the development of cogeneration of heat and power, wind energy and demand-side management as energy conversation options // International Journal of Global Energy Issues. 2003. Vol. 19, no. 1. P. 95–114. DOI: 10.1504/IJGEI.2003.002384.
6. Sandels C., Broden D., Widen J. [et al.]. Modeling office building consumer load with a combined physical and behavioral approach: Simulation and validation // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 472–485. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.141.

7. Федоров В. К., Грунин В. К., Рысев П. В., Свешникова Е. Ю. Детерминированный хаос в нелинейных электрических цепях и системах / под общ. ред. В. К. Федорова. Омск: Омский научный вестник, 2006. 130 с. ISBN 5-8149-0207-8.

8. Kakran S., Chanana S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81, Part 1. P. 524–535. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.045.

9. Sha A., Aiello M. Topological Considerations on Decentralised Energy Exchange in the Smart Grid // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 130. P. 720–727. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.126.

10. Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J.-L. [et al.]. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. P. 193–214. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.107.

11. Marah R., Hibaoui A. E. Algorithms for Smart Grid management // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 38. P. 627–635. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.041.

12. Максимова А. В., Рысев П. В., Захаров И. Л. Исследование хаотических процессов в нелинейных электрических системах // *Инновации. Интеллект. Культура: сб. тр. конф.* 2016. С. 84–87.

13. Федоров В. К., Рысев П. В., Рысев Д. В., Прусс С. Ю., Федоров Д. В., Федянин В. В. Вторая вариация энтропии как аналог функции Ляпунова в статистическом анализе функциональной устойчивости электроэнергетических систем // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017. Т. 5, № 3. С. 123–127. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-123-127.

14. Рысев П. В., Рысев Д. В., Федоров В. К., Шульга К. С., Прусс С. Ю. Идентификация и моделирование хаотических режимов в электроэнергетических системах // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017. Т. 5, № 3. С. 101–107. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-101-107

15. Рысев Д. В., Рысев П. В. Моделирование процессов в нелинейной диссипативной системе двух автономных генера-

торов с различными типами связи // *Омский научный вестник*. 2006. № 9 (46). С. 112–116.

16. Рысев П. В., Свешникова Е. Ю., Никишкин А. С., Федоров Д. В. Управление режимами детерминированного хаоса в нелинейных электроэнергетических системах // *Омский научный вестник*. 2009. № 1 (77). С. 113–117.

**КОЩУК Галина Андреевна**, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: galina\_koshuk@mail.ru

**КОСАРЕВ Борис Андреевич**, инженер по специальности «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: BorisK\_88@mail.ru

**ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

SPIN-код: 2389-6978

AuthorID (РИНЦ): 512746

Адрес для переписки: el.tech.omgtu@gmail.com

**ОХОТНИКОВ Александр Анатольевич**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: alex.okhotnikoff@yandex.ru

#### Для цитирования

Кошук Г. А., Косарев Б. А., Федоров В. К., Охотников А. А. Возможность возникновения хаотических режимов работы электротехнической системы с распределенной генерацией // *Омский научный вестник*. 2019. № 6 (168). С. 58–62. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-58-62.

Статья поступила в редакцию 14.10.2019 г.

© Г. А. Кошук, Б. А. Косарев, В. К. Федоров, А. А. Охотников