

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-331-340>

УДК 621.311

Подавление хаотических колебаний в малых энергетических системах

В. Н. Шашихин¹⁾, Ю. М. Горячева¹⁾, С. В. Будник¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье рассмотрено подавление хаотических колебаний в малых энергосистемах, возникающих в аварийных режимах и приводящих к явлению коллапса напряжений, что соответствует процессу падения напряжения в сети, которое может сопровождаться полным отключением области поражения. Представлен разработанный метод, позволяющий изменить спектр характеристических показателей Ляпунова и преобразовать хаотические колебания в малой энергосистеме к регулярным динамическим режимам. Метод синтеза управляющих воздействий основан на теореме о топологической эквивалентности гиперболических нелинейных систем и их линеаризованных моделей и использовании численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение энергосистем, с целью построения фазового портрета и вычисления характеристических показателей Ляпунова. Результаты работы заключаются в синтезе обратной связи, обеспечивающей формирование спектра характеристических показателей Ляпунова с отрицательными значениями. Подавление хаотических режимов происходит путем формирования в замкнутой системе спектра отрицательных характеристических показателей Ляпунова. Параметры регулятора в цепи обратной связи определяются методом модального управления на основе решения матричного алгебраического уравнения Сильвестра. Рассмотрено решение задачи перехода от хаотического режима к регулярному движению в системе малой энергетики. Для проверки работоспособности предлагаемого метода подавления хаоса вычислен спектр характеристических показателей Ляпунова и построены траектории в фазовом пространстве исходной нелинейной системы и системы с управляющим воздействием. В энергосистемах с хаотической динамикой синтезированная обратная связь позволяет подавить хаотические колебания и перейти к регулярным режимам, тем самым предупреждая возникновение аварийных режимов.

Ключевые слова: бифуркация, хаос, стабилизация, малая энергосистема, управление, колебания, параметры, характеристические показатели Ляпунова, метод синтеза

Для цитирования: Шашихин, В. Н. Подавление хаотических колебаний в малых энергетических системах / В. Н. Шашихин, Ю. М. Горячева, С. В. Будник // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 331–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-331-340>

Адрес для переписки

Шашихин Владимир Николаевич
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29,
195251, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация
Тел.: +7 921 893-80-56
shashihin@bk.ru

Address for correspondence

Shashikhin Vladimir N.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University
29, Politechnicheskaya str.,
195251, Saint Petersburg,
Russian Federation
Tel.: +7 921 893-80-56
shashihin@bk.ru

Suppression of Chaotic Oscillations in Small Energy Systems

V. N. Shashikhin¹⁾, J. M. Goryacheva¹⁾, S. V. Budnik¹⁾

¹⁾Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper considers the suppression of chaotic oscillations in small energy systems that occur in emergency modes and lead to the phenomenon of voltage collapse, which corresponds to the process of voltage drop in the network, which can be accompanied by a complete shutdown of the affected area. The paper also presents a method that has been developed and that allows changing the spectrum of Lyapunov's characteristic indicators and converting chaotic oscillations in a small power system to regular dynamic modes. The method of synthesis of control actions is based on the theorem of topological equivalence of hyperbolic nonlinear systems and their linearized models as well as on the use of numerical integration of nonlinear differential equations describing the behavior of power systems in order to construct a phase portrait and calculate Lyapunov's characteristic exponents. The results of the work consist in the synthesis of feedback, which ensures the formation of a spectrum of Lyapunov's characteristic indicators with negative values. The suppression of chaotic regimes occurs by forming a spectrum of negative Lyapunov's characteristic indicators in a closed system. The parameters of the regulator in the feedback circuit are determined using the modal control method based on the solution of the matrix algebraic Sylvester equation. The solution of the problem of transition from a chaotic regime to a regular movement in a small power system is considered. To test the operability of the proposed method of chaos suppression, the spectrum of Lyapunov's characteristic indicators is calculated and trajectories in the phase space of the initial nonlinear system and the system with control action are constructed. For energy systems with chaotic dynamics, synthesized feedback makes it possible to suppress chaotic fluctuations and switch to regular modes, thereby preventing the occurrence of emergency modes.

Keywords: bifurcation, chaos, stabilization, small energy system, control, oscillations, parameters, Lyapunov's characteristic exponents, synthesis method

For citation: Shashikhin V. N., Goryacheva J. M., Budnik S. V. (2022) Suppression of Chaotic Oscillations in Small Energy Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (4), 331–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-331-340> (in Russian)

Введение

В настоящее время увеличивается доля малых генерирующих установок, имеющих в своем составе нагрузки с нелинейными характеристиками [1]. При этом возникают проблемы обеспечения синхронной работы таких установок с энергосистемой и поддержания автономной работы [2]. Большое внимание уделяется предотвращению перехода в асинхронный режим, сохранению и восстановлению устойчивости послеаварийных процессов. Для исследования устойчивости регулярных режимов в системах синхронных машин используются различные математические модели [3, 4].

Однако при определенных условиях возникают хаотические режимы, приводящие к аварийным ситуациям, что наблюдается как в зарубежных, так и в отечественных энергосистемах. Аварийные ситуации возникают в том числе из-за явления, называемого коллапсом напряжения, – процесса, при котором последовательность событий, сопровождающих нестабиль-

ность напряжения, приводит к низкому неприемлемому значению напряжения в энергосистеме. Падение напряжения может сопровождаться его восстановлением или отключением линии электропередачи [5, 6].

Коллапс напряжения рассматривается как бифуркация статическая, в частности седло-узловая, либо динамическая. Задачи подавления хаоса решаются с помощью известных методов управления нелинейными динамическими системами: адаптивного управления [7, 8], OGY [9], Пирагаса [10, 11], резонансных возбуждений [12], Магницкого [13].

В статье рассмотрено подавление хаотических колебаний в энергосистеме, где бифуркационный параметр достигает критического значения. Переход к регулярным колебаниям реализуется за счет того, что управление спектром обеспечивается характеристическими показателями Ляпунова [14].

Основная часть

Постановка задачи. Исследуем малую электроэнергетическую систему – синхронный генератор, снабжающий энергией переменную во времени и стационарную нагрузку. Данная электроэнергетическая система описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [5]:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= B \sin(\delta_L - \delta + \alpha) U_L - D\omega + K; \\ \dot{\delta}_L &= C U_L^2 - F \cos(\delta_L - \delta + \alpha) U_L - N \cos(\delta_L - \beta) U_L - H U_L + J Q_{1b} + L; \\ \dot{U}_L &= -M U_L^2 + Y \cos(\delta_L - \delta - \gamma) U_L + V \cos(\delta_L - \tau) U_L + Z U_L + S Q_{1b} - A,\end{aligned}\tag{1}$$

где ω – отклонение угловой частоты от номинального значения; δ – колебание фазового угла на шинах генератора; δ_L – то же в линии электропередачи; U_L – напряжение в конце линии на шинах нагрузки; Q_{1b} – переменное значение реактивной мощности (параметр бифуркации).

Исследование (1) проводится при следующих значениях параметров малой электроэнергетической системы:

$$\begin{aligned}B &= 16,667; D = 3,337; K = 1,881; C = 496,871; F = 166,667; \\ H &= 93,333; N = 666,667; J = 33,333; L = 43,333; M = 78,764; \\ Y &= 26,217; Z = 14,523; V = 104,869; S = 5,229; A = 7,033; \\ \alpha &= 0,087; \beta = 0,209; \gamma = 0,012; \tau = 0,135.\end{aligned}\tag{2}$$

Введя фазовый вектор $x(t) = (x_1(t) = \delta, x_2(t) = \omega, x_3(t) = \delta_L, x_4(t) = U_L)^T \in R^4$, запишем уравнения (1) с параметрами (2) в виде:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2; \\
\dot{x}_2 &= 16,667 \sin(x_3 - x_1 + 0,087)x_4 - 3,337x_2 + 1,881; \\
\dot{x}_3 &= 496,871x_4^2 - 166,667 \cos(x_3 - x_1 + 0,087)x_4 - 666,667 \cos(x_3 - 0,209)x_4 - \\
&\quad - 93,333x_4 + 33,333Q_{1b} + 43,333; \\
\dot{x}_4 &= -78,764x_4^2 + 26,217 \cos(x_3 - x_1 - 0,012)x_4 + 104,869 \cos(x_3 - 0,135)x_4 - \\
&\quad - 14,523x_4 + 5,229Q_{1b} - 7,033
\end{aligned}
\tag{3a}$$

или в векторной форме

$$\dot{x} = F(x(t), Q_{1b}) + Bu(t), \quad x(0) = x_0, \tag{3b}$$

где $t \in \mathbb{R}^1$ – время; $x(t) \in \mathbb{R}^4$ – фазовый вектор; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор управления; $x_0 \in \mathbb{R}^4$ – то же начальных условий.

При $u(t) = 0$ и значении бифуркационного параметра $Q_{1b} > 10,943$ [15] любое решение $x(t)$ системы (3) с начальными условиями из множества $\Omega: x(0) = x_0 \in \Omega$ является хаотическим.

В рамках данной статьи задача подавления хаотической динамики (стабилизации) решается с помощью введения обратной связи и сводится к преобразованию хаотических колебаний к регулярным либо к стационарной точке. Для этого необходимо найти управление $u(t)$, обеспечивающее выполнение равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - \tilde{x}(t)) = 0,$$

где $x(t)$ – любое решение системы (3) с начальными условиями их множества $\Omega: x(0) = x_0 \in \Omega$, $\tilde{x}(t)$.

Решение задачи стабилизации хаотического движения находится на основе введения обратной связи и изменения характеристических показателей Ляпунова таким образом, чтобы нелинейная система не имела положительных характеристических показателей Ляпунова.

Синтез обратной связи. Введение обратной связи по фазовому вектору изменяет Ляпуновский спектр с целью подавления хаотических колебаний в нелинейной системе (3). В соответствии с теоремой Гробмана – Хартмана [16] имеет место топологическая эквивалентность нелинейной системы и ее линеаризованной модели при отсутствии у Якобиана системы чисто мнимых собственных чисел. Кроме того, вещественные части собственных чисел Якобиана являются характеристическими показателями линеаризованной системы и влияют на Ляпуновский спектр нелинейной системы. Поэтому при определении характеристических показателей Ляпунова нелинейной системы используются собственные значения матрицы Якоби, вычисленные в особых точках исходной системы. Для формирования же-

лаемых собственных чисел матрицы Якоби применяется методика синтеза модального управления с использованием матричного линейного уравнения Сильвестра [17].

Линеаризованная система исходной нелинейной системы (3) имеет вид:

$$\dot{y}(t) = Jy(t) + Bu(t); \quad x(0) = x_0, \quad (4)$$

где $J = \left\{ \frac{\partial F(x(t), Q)_i}{\partial x(t)_j} \right\}$ – матрица Якоби; $y(t) \in \mathbb{R}^{n=4}$ – фазовый вектор

линеаризованной системы.

Пусть в особой точке нелинейной системы при отсутствии управления определены матрица Якоби и спектр ее собственных чисел. Желаемый спектр собственных значений матрицы Якоби системы с управлением выбирается по формуле

$$\bar{\nu}^* = \alpha \nu, \quad (5)$$

где α – коэффициент, близкий к 1.

Введем управление в систему (4), чтобы Якобиан имел желаемые собственные значения (5):

$$u(t) = Kx(t). \quad (6)$$

В этом случае система с управлением будет иметь Якобиан

$$\bar{J}^* = J + BK,$$

где $K \in \mathbb{R}^{m \times 4}$ – коэффициент обратной связи.

Для нахождения коэффициента обратной связи необходимо решить уравнение Сильвестра относительно матрицы S

$$JS + SF + BG = 0 \quad (7)$$

и матричное уравнение

$$K = GS^{-1}, \quad (8)$$

где $G \in \mathbb{R}^{m \times 4}$ – произвольная матрица, задаваемая в процессе синтеза.

Для разрешимости уравнения Сильвестра должны выполняться следующие условия [18]:

- 1) произвольная матрица G – матрица полного ранга;
- 2) $\text{rank} S_u = n$, где матрица $S_u = (B | J^* B | J^{*2} B | \dots | J^{*n-1} B)$;
- 3) $\text{rank} S_n = n$, где матрица $S_n = (G^T | F^T G^T | (F^T)^2 G^T | \dots | (F^T)^{n-1} G^T)$;
- 4) спектры матриц J^* и $-F$ не пересекаются;
- 5) собственные числа матрицы F попарно различны.

Матрицу G следует выбирать таким образом, чтобы были выполнены условия 1–3, собственные числа матрицы Якоби – чтобы выполнялись условия 4–5.

Исследование системы без управления. Особая точка исходной системы (3) $O(0,1773; 0; 0,2263; 0,7533)$.

Якобиан в особой точке

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -12,4723 & -0,1667 & 12,4723 & 2,2597 \\ 4,7824 & 0 & 8,45 & -17,8214 \\ 0,7426 & 0 & -7,9777 & 9,824 \end{bmatrix}.$$

Характеристические показатели Ляпунова системы (3):

$$\{\lambda_1 = 153,8872; \lambda_2 = -0,8551; \lambda_3 = -16,87; \lambda_4 = -85,8071\}.$$

Спектр характеристических показателей содержит положительное значение, что свидетельствует о наличии хаотического режима в системе без управления.

На рис. 1 представлен фазовый портрет неуправляемой системы в соответствующих системах координат. В качестве начальных условий выбраны значения $[0,3; 1,5; 0,2; 0,97]$.

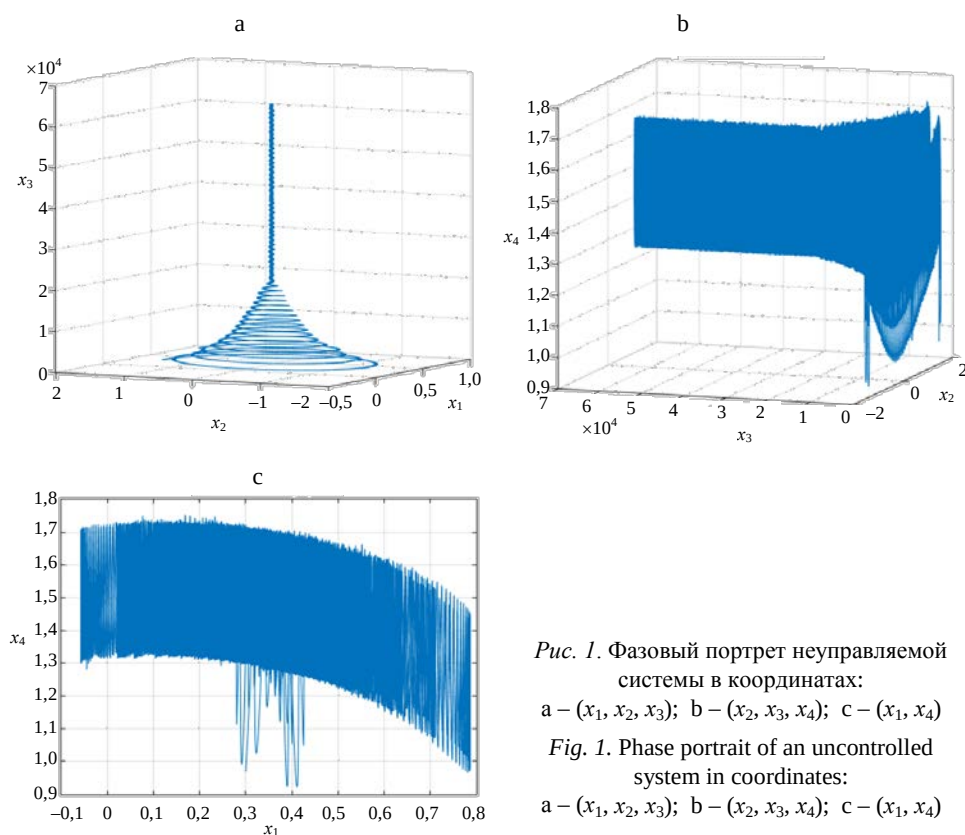


Рис. 1. Фазовый портрет неуправляемой системы в координатах:

a – (x_1, x_2, x_3) ; b – (x_2, x_3, x_4) ; c – (x_1, x_4)

Fig. 1. Phase portrait of an uncontrolled system in coordinates:

a – (x_1, x_2, x_3) ; b – (x_2, x_3, x_4) ; c – (x_1, x_4)

Характер фазового портрета подтверждает, что в неуправляемой системе (3) наблюдается хаотическая динамика, так как движение представлено в виде сложного непериодического процесса.

Исследование системы с управлением. При введении обратной связи (6) старший характеристический показатель Ляпунова нелинейной системы для подавления хаотического поведения должен быть меньше 0.

На рис. 2 представлен график зависимости старшего характеристического показателя Ляпунова $\lambda_1(\alpha)$.

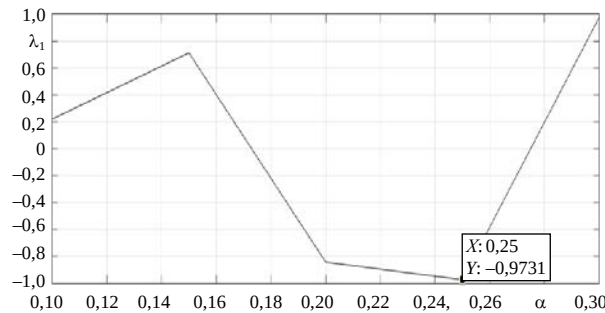


Рис. 2. Зависимость старшего характеристического показателя Ляпунова

Fig. 2. Dependence of the senior Lyapunov's characteristic exponent

Чтобы стабилизировать систему, необходимо взять значения α^* , удовлетворяющие условию $\lambda_1(\alpha) \leq 0$. Выберем $\alpha^* = 0,25$, тогда $\lambda_1(\alpha) = -0,9731$.

На рис. 3 представлен график зависимости нормы вектора управления $\|K\|$ от коэффициента α , позволяющий определить затраты на управление.

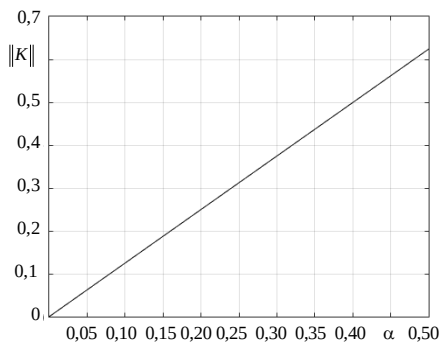


Рис. 3. Зависимость нормы вектора управления

Fig. 3. Dependence of the norm of the control vector

При $\alpha^* = 0,25$ коэффициент обратной связи, рассчитанный по (7), (8): $K = [-0,0937; -0,0948; -0,0977; -0,0991]$. Спектр характеристических показателей Ляпунова системы с управлением имеет вид

$$\{\lambda_1 = -0,97; \lambda_2 = -12,43; \lambda_3 = -48,67; \lambda_4 = -48,67\}.$$

Фазовый портрет управляемой системы представлен на рис. 4.

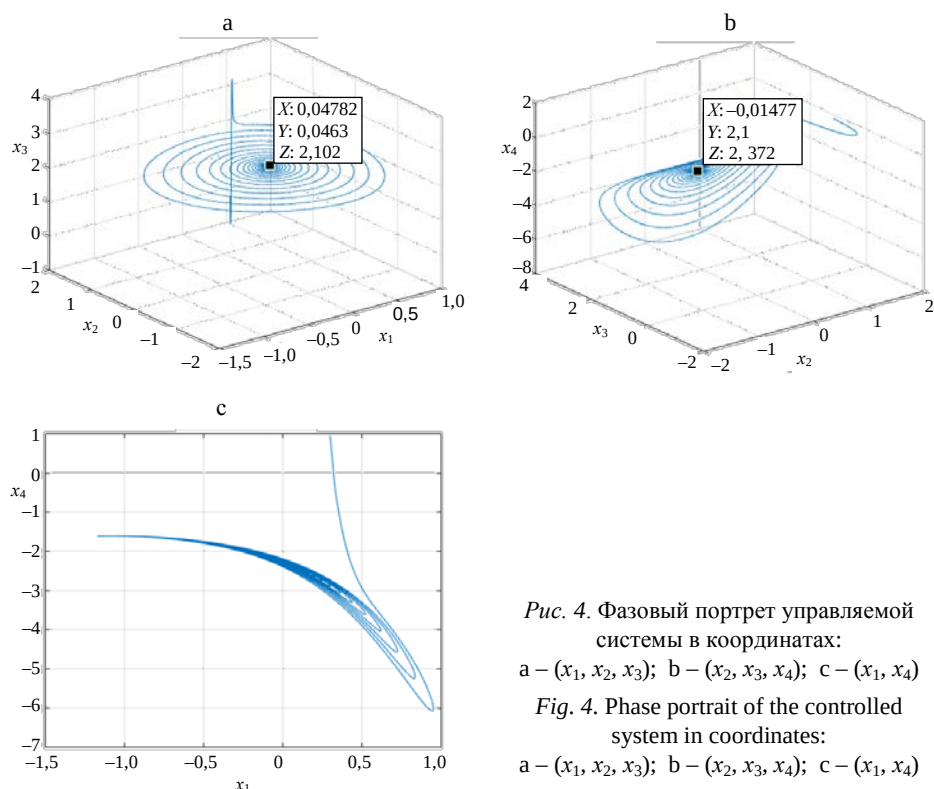


Рис. 4. Фазовый портрет управляемой системы в координатах:

а – (x_1, x_2, x_3) ; б – (x_2, x_3, x_4) ; в – (x_1, x_4)

Fig. 4. Phase portrait of the controlled system in coordinates:

а – (x_1, x_2, x_3) ; б – (x_2, x_3, x_4) ; в – (x_1, x_4)

Спектр характеристических показателей и вид фазового портрета указывают на то, что в системе с обратной связью хаотические колебания стабилизированы и нелинейная система перешла из хаотического режима к регулярному движению. Таким образом, работоспособность предлагаемого метода подавления хаоса при действии параметрических возмущений проверена в малой энергосистеме.

ВЫВОД

Решена задача подавления в малой энергетической системе хаотической динамики, возникающей при действии параметрического возмущения. Преобразование хаотической динамики нелинейной системы в регулярную основано на изменении спектра характеристических показателей Ляпунова. Последнее достигается введением в систему обратной связи по фазовым координатам. Параметры регулятора в цепи обратной связи вычисляются с использованием метода модального управления на основе решения линейного матричного уравнения Сильвестра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бялобржеский, А. В. Искажающая электрическая мощность переменного тока в простейшей цепи с диодом / А. В. Бялобржеский, Д. Й. Родькин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444>.

2. Фурсанов, М. И. О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 207–219. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-207-219>.
 3. Сафарян, В. С. Исследование режимов автономного синхронного генератора / В. С. Сафарян // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 433–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-433-445>.
 4. Сафарян, В.С. Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы / В. С. Сафарян // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 228–236. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236>.
 5. Chaos in a Simple Power System / H. D. Chiang [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. Vol. 8, Iss. 4. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1109/59.260940>.
 6. Harb, A. M. Controlling Hopf Bifurcation and Chaos in a Small Power System / A. M. Harb, N. Abdel-Jabbar // Chaos, Solitons & Fractals. 2003. Vol. 18, Iss. 5. P. 1055–1063. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00073-0).
 7. Дружинина, М. В. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу / М. В. Дружинина, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 3–33.
 8. Мирошник, И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
 9. Ott, E. Controlling Chaos / E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke // Physical Review Letters. 1990. Vol. 64, Iss. 11. P. 1196–1199. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1196>.
 10. Pyragas, K. Continuous Control of Chaos by Self-Controlling Feedback / K. Pyragas // Physics Letters A. 1992. Vol. 170, Iss. 6. P. 421–428. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90745-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90745-8).
 11. Pyragas, K. Control of Chaos Via Extended Delay Feedback / K. Pyragas // Physics Letters A. 1995. Vol. 206, Iss. 5–6. P. 323–330. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(95\)00654-L](https://doi.org/10.1016/0375-9601(95)00654-L).
 12. Владимирский, Э. И. Синергетические методы управления хаотическими системами / Э. И. Владимирский, Б. И. Исмаилов. Баку: ELM, 2011. 240 с.
 13. Магницкий, Н. А. Новые методы хаотической динамики / Н. А. Магницкий, С. В. Сидоров. М.: Едиториал, УРСС, 2004. 320 с.
 14. Budnik, S. V. Stabilization of Nonlinear Systems with Dynamic Chaos / S. V. Budnik, V. N. Shashikhin // Automatic Control and Computer Sciences. 2021. Vol. 55. 213–221. <https://doi.org/10.3103/S0146411621030032>.
 15. Hirata, Y. Statistical Tests for Serial Dependence and Laminarity on Recurrence Plots / Y. Hirata, K. Aihara // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2011. Vol. 21, Iss. 4. P. 1077–1084. <https://doi.org/10.1142/S0218127411028908>.
 16. Гробман, Д. Гомеоморфизм систем дифференциальных уравнений / Д. Гробман // ДАН СССР. 1959. Т. 128, № 5. С. 880–881.
 17. Шашихин, В. Н. Управление крупномасштабными динамическими системами / В. Н. Шашихин, С. В. Будник. СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС, 2020. 308 с.
 18. Будник, С. В. Управление хаотической динамикой нелинейных систем / С. В. Будник, В. Н. Шашихин // Системный анализ в проектировании и управлении: XXIV Междунар. науч. и учеб.-практ. конф. (SAEC–2019), 13–14 окт. 2020. СПб., 2020. С. 14–21.
- Поступила 17.09.2021 Подписана в печать 07.12.2021 Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Bialobrzeskiy O. V., Rod'kin D. Y. (2019) Distorting Electrical Power of the Alternating Current in the Simplest Circuit with a Diode. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444> (in Russian).

2. Fursanov M. I., Zolotoy A. A. (2018) On the Choice of the Optimal Points of Opening in City Power Grids in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 207–219. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-207-219> (in Russian).
3. Safaryan V. S. (2017) The Study of the Autonomous Synchronous Generator Modes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 433–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-433-445> (in Russian).
4. Safaryan V. S. (2017) Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 228–236. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236> (in Russian).
5. Chiang H. D., Liu C. W., Varaiya P., Wu F. F., Lauby M. G. (1993) Chaos in a Simple Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8 (4), 1407–1417. <https://doi.org/10.1109/59.260940>.
6. Harb A. M., Abdel-Jabbar N. (2003) Controlling Hopf Bifurcation and Chaos in a Small Power System. *Chaos, Solitons & Fractals*, 18 (5), 1055–1063. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00073-0).
7. Druzhinina M.V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. (1996) Methods of Adaptive Control of Nonlinear Objects by Output. *Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control*, (2), 3–33 (in Russian).
8. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. (2000) Nonlinear and Adaptive Control of Complex Dynamic Systems. Saint-Petersburg, Nauka Publ. 549 (in Russian).
9. Ott E., Grebogi C., Yorke J. A. (1990) Controlling Chaos. *Physical Review Letters*, 64 (11), 1196–1199. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1196>.
10. Pyragas K. (1992) Continuous Control of Chaos by Self-Controlling Feedback. *Physics Letters A*, 170 (6), 421–428. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90745-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90745-8).
11. Pyragas K. (1995) Control of Chaos Via Extended Delay Feedback. *Physics Letters A*, 206 (5–6), 323–330. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(95\)00654-L](https://doi.org/10.1016/0375-9601(95)00654-L).
12. Vladimirkii E. I., Ismailov B. I. (2011) *Synergetic Methods of Chaotic Systems Control*. Baku, ELM Publ. 240 (in Russian).
13. Magnitskii N. A., Sidorov S. V. (2004) *New Methods of Chaotic Dynamics*. Moscow, Editorial, URSS. 320 (in Russian).
14. Budnik S. V., Shashikhin V. N. (2021) Stabilization of Nonlinear Systems with Dynamic Chaos. *Automatic Control and Computer Sciences*, 55, 213–221. <https://doi.org/10.3103/S0146411621030032>.
15. Hirata Y., Aihara K. (2011) Statistical Tests for Serial Dependence and Laminarity on Recurrence Plots. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21 (4), 1077–1084. <https://doi.org/10.1142/S0218127411028908>.
16. Grobman D. (1959) Homeomorphism of Differential Equations Systems. *Doklady Akademii Nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 128 (5), 880–881 (in Russian).
17. Shashikhin V. N., Budnik S. V. (2020) *Control of Large-Scale Dynamic Systems*. Saint-Petersburg, POLITEKhpRESS Publ. 308 (in Russian).
18. Budnik S. V., Shashikhin V. N. (2020) Control of Chaotic Dynamics of Nonlinear Systems. *Sistemnyi Analiz v Proektirovanii i Upravlenii: XXIV Mezhdunar. Nauch. i Ucheb.-Prakt. Konf. (SAEC–2019), 13–14 Okt. 2020 [System Analysis in Design and Management: XXIV International Scientific and Educational-Practical Conference (SAEC–2019), October 13–14, 2020]*. Saint-Petersburg, 14–21 (in Russian).