

УСТРАНЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ, ПОДАВЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В статье предложен алгоритм устранения отклонений напряжения и частоты, подавления хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией. Показана работа алгоритма путем моделирования в программном пакете SymPowerSystems (MatLab).

Хаотический и предхаотический режимы работы детектируются алгоритмом одинаково. При невозможности подавить предхаотический и хаотический режимы однотипным управляющим воздействием предлагается дополнить алгоритм расчетом и оценкой показателей устойчивости.

Существующие алгоритмы детектирования и подавления хаоса не учитывают требования к показателям качества электрической энергии, для их реализации необходимо дорогостоящее измерительное оборудование. Поэтому целью работы является разработка алгоритма детектирования и подавления хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией, учитывающего требования к показателям качества электрической энергии и реализуемого простыми схемотехническими решениями.

Ключевые слова: распределенная генерация, хаотические колебания, показатели качества электрической энергии, установившееся отклонение напряжения, установившееся отклонение частоты, s-модель.

Введение. Электротехническая система с распределенной генерацией ввиду наличия нелинейной нагрузки является нелинейной электрической цепью. В нелинейных электрических цепях возможно возникновение хаотических колебаний, которые могут привести к порче оборудования, уменьшению срока службы изоляции проводов и другим негативным последствиям [1]. В связи с этим существует необходимость детектирования и подавления хаотических колебаний.

В [2–5] исследована устойчивость режимов работы и живучесть электротехнических систем при возникновении хаотических колебаний. Методы детектирования и подавления хаотических колебаний в данных работах не рассмотрены.

В [6, 7] приводится алгоритм Вольфа и алгоритм Бенеттина, которые позволяют рассчитывать показатели Ляпунова для нелинейных динамических систем. Появление положительного показателя Ляпунова говорит о возникновении хаотических колебаний в системе. Однако алгоритмы Вольфа и Бенеттина не учитывают особенности функционирования электроэнергетических систем.

В [8] рассмотрена возможность оценки функциональной устойчивости электроэнергетической системы при помощи второй вариации энтропии.

Увеличение энтропии говорит о нарастании флуктуаций показателей качества функционирования (ПКФ) системы, в том числе о возможности превышения флуктуациями предельно допустимых значений и возникновении хаотических колебаний. Алгоритм операций по детектированию и устранению отклонений ПКФ от предельно допустимых значений в работе не рассматривается.

В [9] предложен способ детектирования хаотического режима работы электроэнергетической системы с несколькими генераторами.

Хаотический режим определяется при помощи векторных синхронизированных измерений значений угла и частоты генераторов. Полученные данные обрабатываются в режиме реального времени центром управления. При появлении положительного характеристического показателя Ляпунова, который вычисляется согласно предложенному математическому аппарату, в системе детектируется возникновение хаотических колебаний. К недостаткам работы следует отнести отсутствие в модели электроэнергетической системы нагрузки и потерь в линиях электропередачи. Нагрузка и потери при передаче электроэнергии являются частью баланса генерируемой и потребляемой мощности, который задает величину частоты и напряжения в узлах

электросистемы. Также введение потерь в модель электроэнергетической системы должно привести к невозможности возникновения хаотических колебаний малой амплитуды. В предложенном алгоритме отсутствуют операции, учитывающие возможность превышения показателями качества электрической энергии предельно допустимых значений.

Таким образом, вопрос детектирования и подавления хаотических колебаний в ЭТС с РГ представляется проработанным недостаточно. Алгоритм должен включать возможность оценки и устранения отклонений напряжения и частоты и выполняться на базе недорогого измерительно-аналитического оборудования.

Поэтому целью работы является разработка алгоритма детектирования и подавления хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией, учитывающего требования к показателям качества электрической энергии и реализуемого простыми схемотехническими решениями.

Алгоритм детектирования и подавления хаотических режимов работы. Предлагаемый алгоритм детектирования и подавления хаотических режимов работы ЭТС с РГ состоит из следующих операций:

1. Задание параметров эталонной синусоиды напряжения (U_m — амплитуда, f — частота).

2. Формирование массива значений эталонной синусоиды:

2.1. Вычисление периода эталонной синусоиды $T = \frac{1}{f}$.

2.2. Разбиение периода T на n равных отрезков (n — целое число). Длина отрезка (шага) ΔT составляет $\frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n}$.

Согласно [10, п. 4.2.1], предельно допустимое отклонение частоты составляет 0,4 % от номинального значения 50 Гц. Тогда предельно допустимое отклонение значения периода T составляет $1/6300$ с. Поэтому в алгоритме выбрано значение шага $\Delta T \geq \frac{2}{6300}$ с.

2.3. Вычисление значений эталонной синусоиды $u(t) = U_m \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ на интервале $\left(\frac{1}{4f}; \frac{1}{4f} + 3000 \cdot T\right)$ с шагом ΔT .

Для сетей 380 В/220 В выбирают установившееся отклонение напряжения среднее за 1 минуту [10, п. 4.2.2], поэтому в алгоритме рассматриваются значения напряжения на интервале длительностью $3000 \cdot T$ (количество точек $3000 \cdot (n + 1)$).

3. Определение максимального и минимального значений фазного напряжения $U_{\phi_{max}}$ и $U_{\phi_{min}}$ в течение времени $T + \frac{1}{6300}$ (учтена возможность увеличения периода T за счет предельно допустимого отклонения частоты от номинального значения).

Для сетей 380 В/220 В предельно допустимое установившееся отклонение напряжения составляет 10 % от номинального [10, п. 4.2.2]. Поэтому при $U_{\phi_{max}} \in U_m \pm 0,1U_m$ и $|U_{\phi_{min}}| \in U_m \pm 0,1U_m$ следует пункт 4, иначе в блок управления поступает сигнал прерывания электроснабжения или перевода потребителей на резервное питание.

4. Для значений фазного напряжения $U_{\phi}^i = U_{\phi_{max}}$, $U_{\phi}^{i+1} = U_{\phi_{max}}$, $U_{\phi}^{i+2} = U_{\phi_{max}}$ принять соответственно моменты времени $t = 0$, $t = \Delta T_1$, $t = \Delta T_1 + \Delta T_2$. Если $\left|\frac{1}{\Delta T_1} - \frac{1}{\Delta T_2}\right| \leq 0,4$ Гц, то перейти к пункту

5, иначе в блок управления системой поступает сигнал подавления хаотического режима работы.

5. Операция формирования массива значений фазного напряжения заключается в следующем. При значении фазного напряжения $U_{\phi} = U_{\phi_{max}}$ принять момент времени $t = 0$ и запоминать значения фазного напряжения через каждые ΔT с до момента времени $3000 \cdot T$ с (количество точек $3000 \cdot (n + 1)$).

6. Сравнение массивов значений эталонного и фазного напряжения (U_{ϕ} и U_{ϕ}^i) осуществляется следующим образом. Если $\frac{|U_{\phi}^i - U_{\phi}|}{U_{\phi}} \leq 0,1$ для $i \in [1, 2 \dots 3000(n + 1)]$, то перейти к пункту 3. При невыполнении условия в блок управления системой поступает сигнал подавления хаотического режима работы.

Фазное напряжение анализируется на выходе фильтрокомпенсирующего устройства, например, фильтра гармоник (ФГ). ФГ обеспечивает незначительный суммарный коэффициент гармонических искажений (ТНД), что является необходимым условием в процедурах сравнения синусоид эталонного и фазного напряжений рассмотренного выше алгоритма.

Результаты моделирования. Приведенный алгоритм может быть реализован на языке программирования C++, Python и использован для детектирования и подавления хаотических сигналов в ЭТС с РГ на базе микроконтроллеров типа AVR со встроенным АЦП [11].

В данной статье работа алгоритма показана путем моделирования ЭТС с РГ в программном пакете SysPowerSystems (MatLab).

S-модель (модель электросистемы, выполненная в программном пакете MatLab Simulink) состоит из двух потребителей и двух источников питания, связанных через коммутирующие устройства линиями электропередачи, блоков измерения и управления. Путем изменения значений параметров элементов электросистемы моделируются различные режимы работы. Блоки измерения и управления определяют режим работы согласно приведенному выше алгоритму. После определения режима работы на электросистему оказывается соответствующее управляющее воздействие.

Целью исследования не является определение вида управляющего воздействия в зависимости от режима работы электросистемы. Поэтому управляющее воздействие заключается в отключении элементов, параметры которых превышают допустимые значения, и включений элементов с номинальными значениями параметров. Таким образом, структура s-модели ЭТС с РГ в зависимости от моделируемого режима работы и управляющего воздействия будет различной.

В качестве примера рассмотрим s-модель ЭТС с РГ, в которой организовано управляющее воздействие для подавления режима биений или устранения установившегося отклонения напряжения, превышающего допустимое значение.

Структурная схема s-модели ЭТС с РГ приведена на рис. 1.

S-модель состоит из блока измерений, блока управления, потребителей 1 [12], источников питания 2, 3, 4. Источники питания 2 и 3 подключаются к системе через управляемые ключи 6.

Перед расчетом s-модели задаются значения параметров источника 2, при которых возникает режим биений или установившееся отклонение на-

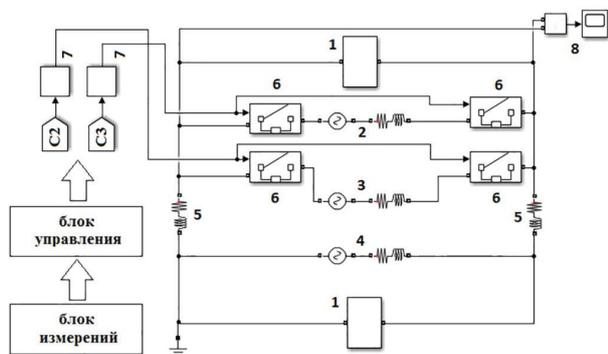


Рис. 1. Структурная схема s-модели ЭТС с РГ:
1 — потребитель; 2, 3, 4 — источники питания;
5 — линия электропередачи; 6 — управляемый ключ;
7 — блок задержки сигнала; 8 — осциллограф

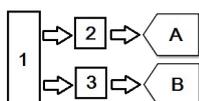


Рис. 2. Структурная схема блока измерений:
1 — дублированная s-модель ЭТС с РГ;
2 — блок вольтметра; 3 — блок частотомера;
А и В — значения напряжения и частоты

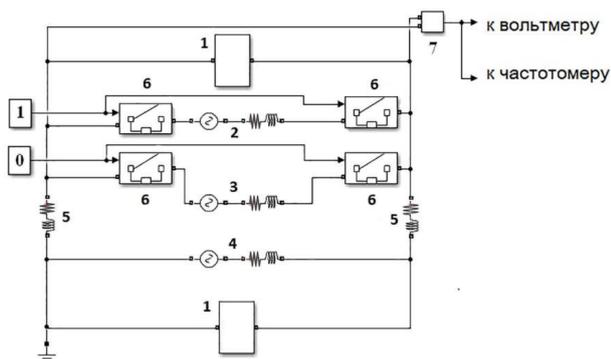


Рис. 3. Структурная схема дублированной s-модели ЭТС с РГ:
1 — потребитель; 2, 3, 4 — источники питания;
5 — линия электропередачи; 6 — управляемый ключ;
7 — блок Voltage Measurement

пряжения превышает допустимое значение. Во время расчета блок измерений определяет значения напряжения и частоты, при помощи которых блок управления детектирует режим работы, формирует управляющее воздействие (сигналы С2, С3). Управляющее воздействие отключает источник питания 2, включает идеальный источник питания 3. При помощи осциллографа 8 формируются осциллограммы напряжения. На осциллограммах виден переход от ненормального режима работы к нормальному. Время задержки управляющего воздействия задается блоком 7.

Рассмотрим подробно структурную схему и работу блока измерения (рис. 2).

Измерения напряжения и частоты осуществляются дублированием s-модели ЭТС с РГ (рис. 3).

В дублированной модели константы «0» и «1» посредством ключей 6 отключают идеальный источник питания 3 и включают источник питания 2 с отклонением выходных параметров от предель-

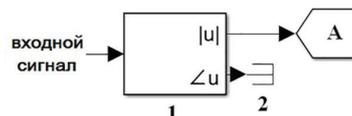


Рис. 4. Блок вольтметра:
1 — блок Voltage Measurement;
2 — блок вычисления модуля и фазы напряжения;
3 — terminator

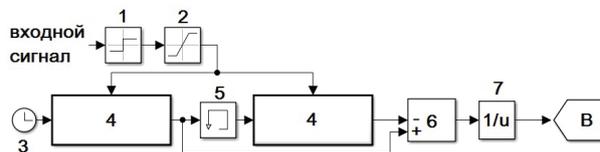


Рис. 5. Блок частотомера:
1 — математический оператор Sign;
2 — ограничение уровня входного сигнала;
3 — блок задания локального времени Clock;
4 — блок Triggered Subsystem;
5 — блок Memory (задержка сигнала);
6 — блок вычитания;
7 — блок вычисления обратной величины



Рис. 6. Структурная схема блока управления

но допустимых значений. Блок 7 приводит сигнал к логическому и направляет на блоки вольтметра и частотомера.

Рассмотрим блок вольтметра (рис. 4). Блок 1 вычисляет амплитуду напряжения (сигнал А). В данном блоке необходимо корректировать значение графы fundamental frequency по данным частотомера. Элемент 2 (terminator) используется для исключения сообщений о неиспользуемых портах в процессе компиляции и расчета s-модели ЭТС с РГ.

Измерение частоты дублированной s-модели ЭТС с РГ выполнено блоком частотомера (рис. 5).

В блоке частотомера при помощи логических операторов Triggered Subsystem (4), Memory (5) входной сигнал разделяется на исходный и задержанный. По разности исходного и задержанного сигналов (блок 6) определяется период колебаний [13]. Затем математический оператор деления (7) вычисляет частоту колебаний (сигнал В).

Таким образом, блок измерений формирует сигнал амплитуды напряжения А и сигнал частоты напряжения В. Затем сигналы А и В поступают в блок управления.

Рассмотрим подробно структурную схему и работу блока управления.

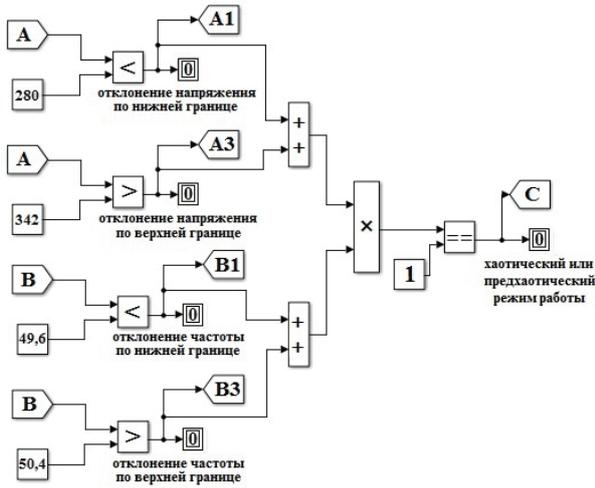


Рис. 7. Структурная схема блока определения отклонений от номинального режима работы

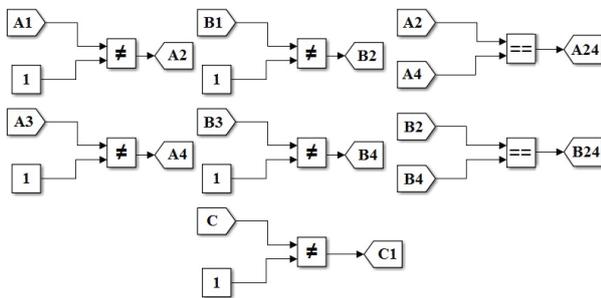


Рис. 8. Структурная схема блока управления ключом



Рис. 9. Структурные схемы блоков размыкания и замыкания ключа

Блок управления разделен на четыре группы логических операторов (рис. 6), которые оценивают сигналы напряжения и частоты (сигналы А и В) и преобразуют их в сигнал размыкания или замыкания ключа.

Структурная схема блока определения отклонений от номинального режима работы приведена на рис. 7

Структура блока отражает алгоритм устранения отклонений напряжения и частоты, подавления хаотических режимов работы ЭТС с РГ.

При сравнении сигналов напряжения А и частоты В с их предельно допустимыми значениями определяется режим работы системы, формиру-

Таблица 1

	A	B	A1	A2	A3	A4	A24	A4	A3	A2	A1	B	A	1	C	C1	C2	C3
1	311	50	0	1	0	1	1	1	0	1	0	50	311	1	0	1	1	0
2	350	50	0	1	1	0	0	0	1	1	0	50	350	1	0	1	1	0
3	262	50	1	0	0	1	0	1	0	0	1	50	262	1	1	0	1	1
4	311	20	0	1	0	1	1	1	0	1	1	20	311	0	1	0	1	1
5	311	90	0	1	0	1	1	1	0	1	0	90	311	0	1	0	1	1
6	186	$1,8 \times 10^5$	1	0	0	1	0	1	0	0	1	$1,8 \times 10^5$	186	1	1	0	1	1
7	83	592	1	0	0	1	0	1	0	0	1	592	83	1	1	0	1	1

Таблица истинности

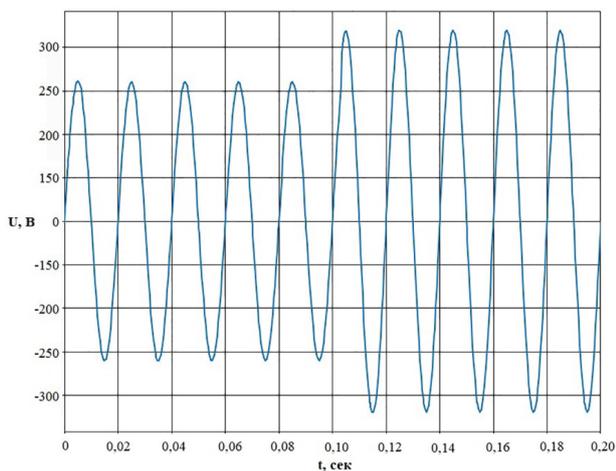


Рис. 10. Корректирование значения фазного напряжения

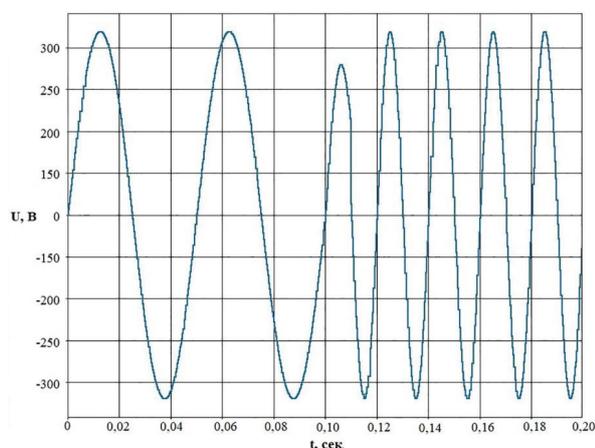


Рис. 11. Корректирование частоты фазного напряжения

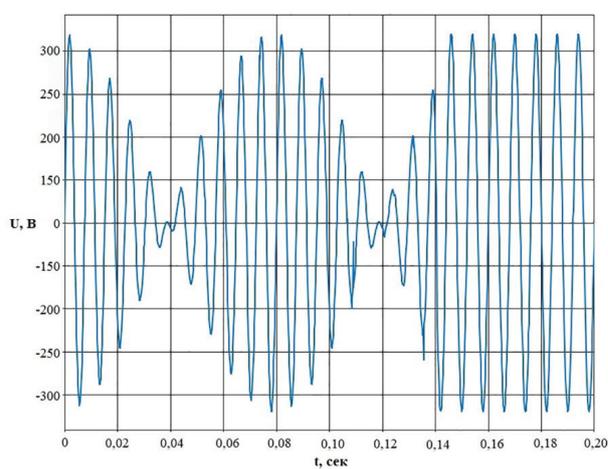


Рис. 12. Детектирование и подавление режима биений

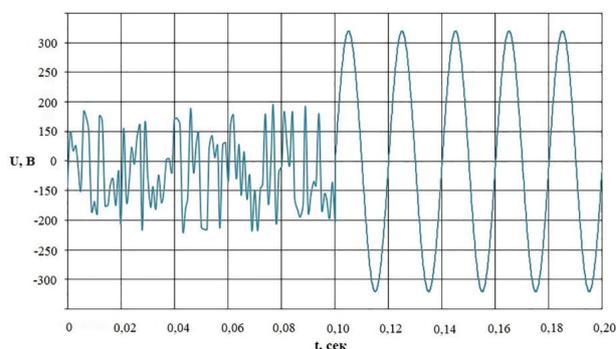


Рис. 13. Детектирование и подавление хаотического режима работы

ются сигналы A1, A3, B1, B3, C. Для данных сигналов 0 — номинальный режим работы системы, 1 — отклонение режима работы системы от номинального.

Сигналы A1, A3, B1, B3, C поступают на блок управления ключом (рис. 8).

Блок управления ключом формирует сигналы A24, B24, C1. При отклонении электросистемы от номинального режима работы блок размыкания ключа формирует сигнал C2, соответствующий логическому нулю, а блок замыкания ключа — сигнал C3, соответствующий логической единице (рис. 9).

При помощи табл. 1 можно проследить работу блоков измерения и управления при детектировании режима и формировании управляющего воздействия.

Здесь: 1 — номинальный режим работы; 2 — отклонение напряжения по верхней границе; 3 — отклонение напряжения по нижней границе; 4 — отклонение частоты по нижней границе; 5 — отклонение частоты по верхней границе; 6 — превышение частотой и напряжением предельных значений (предхаотический режим биений); 7 — превышение частотой и напряжением предельных значений (режим хаотических колебаний).

Из табл. 1 следует, что хаотический и предхаотический режимы работы детектируются алгоритмом одинаково. Данный вопрос требует дальнейших исследований, направленных на изучение способов

подавления хаотических колебаний. При невозможности подавлять предхаотический и хаотический режимы однотипным управляющим воздействием алгоритм необходимо дополнить расчетом и оценкой показателей устойчивости.

Ниже приведены осциллограммы напряжения для основных случаев отклонения режима работы ЭТС с РГ от номинального (рис. 10–13).

Из осциллограмм напряжения следует, что время детектирования отклонения режима работы электросистемы от номинального составляет 0,1–0,14 сек. Данное время детектирования задано в s-модели электросистемы при помощи блоков задержки сигналов C2, C3 (рис. 1) для демонстрации работы алгоритма.

Выводы. Разработан алгоритм детектирования и подавления хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией, учитывающий требования к показателям качества электрической энергии и реализуемый простыми схемотехническими решениями на базе микроконтроллеров типа AVR.

Работа алгоритма показана на примере s-модели ЭТС с РГ в программном пакете SymPowerSystems для следующих случаев: отклонение значения фазного напряжения от предельно допустимого; отклонение частоты фазного напряжения от предельно допустимой; предхаотический режим биений; хаотический режим.

Хаотический и предхаотический режимы работы детектируются алгоритмом одинаково. При невозможности подавлять предхаотический и хаотический режимы однотипным управляющим воздействием предлагается дополнить алгоритм расчетом и оценкой показателей устойчивости.

Библиографический список

1. 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.
2. Vahdati P. M., Kazemi A. Bifurcations and chaos in nonlinear dynamics of power systems // 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). 2016. P. 1706–1711. DOI: 10.1109/IranianCEE.2016.7585796.
3. Ma M., Huang W., Min F. [et al.]. Dynamic analysis and controlling chaos of the electrical power system with the disturbance of electromagnetic power // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. 2014. P. 1994–1998. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896936.
4. Yibei W., Yanting X., Luo M. [et. al.]. Research on chaos phenomena in power system // IEEE Power Engineering and Automation Conference. 2011. Vol. 2. P. 453–456. DOI: 10.1109/PEAM.2011.6135097.
5. Wei D.-Q., Qin Y.-H. Controlling Chaos in Single-Machine-Infinite Bus Power System by Adaptive Passive Method // Fourth International Workshop on Chaos – Fractals Theories and Applications. 2011. P. 295–297. DOI: 10.1109/IWCFTA.2011.8
6. Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L. [et. al.]. Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica D Nonlinear Phenomena. 1985. Vol. 16 (3). P. 285–317.
7. Benettin G., Galgani L., Strelcyn J. M. Kolmogorov entropy and numerical experiments // Physical Review A. 1976. Vol. 14. P. 2338–2345. DOI: 10.1103/PhysRevA.14.2338.
8. 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.
9. 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.
10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
11. Кривальцевич С. В., Шкуркин В. В. Микропроцессорные системы. 8-битные микроконтроллеры AVR. Омск: ОНИ-ИП, 2018. 243 с. ISBN 978-5-9909318-6-2.
12. Косарев Б. А., Федоров В. К. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-64-71.
13. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

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» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 2389-6978,

AuthorID (РИНЦ): 512746

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

Для цитирования

Косарев Б. А., Федоров В. К. Устранение отклонений напряжения и частоты, подавление хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-52-57.

Статья поступила в редакцию 04.11.2019 г.

© Б. А. Косарев, В. К. Федоров