

УДК 621.318

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ ДЛЯ ВЕТРО- И ГЕЛИОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Федоров Владимир Кузьмич<sup>1</sup>,  
k13201@rambler.ru

Федянин Виктор Викторович<sup>1</sup>,  
fedviktor2@gmail.com

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

**Актуальность** проводимых исследований определяется необходимостью повышения энергоэффективности преобразовательных устройств для нужд возобновляемой энергетики. К алгоритмам управления преобразователей постоянного напряжения, применяемых в гелио- и ветроэлектростанциях, предъявляются повышенные и зачастую противоречивые требования. Одним из путей решения задачи совершенствования этих алгоритмов может служить теория детерминированного хаоса.

**Цель работы:** исследование и создание системы управления для преобразователей постоянного напряжения, позволяющей работать как в периодическом режиме, так и в режиме детерминированного хаоса; создание физической модели преобразователя постоянного напряжения, включающего в себя систему управления, работающую в режиме детерминированного хаоса, а также разработку контура обратных связей по напряжению для стабилизации выходного напряжения на заданном уровне.

**Метод исследования.** Проведен обзор патентных и литературных источников по данной теме. Использован математический и экспериментальный метод исследования преобразователей постоянного напряжения. Метод математического моделирования основан на составлении решения уравнений электрических систем. Метод экспериментального исследования основан на изучении выходных диаграмм, снятых с физической модели преобразователей постоянного напряжения.

**Результаты.** Создана физическая модель преобразователя постоянного напряжения с системой управления, работающей в режиме детерминированного хаоса. Полученные в ходе исследования результаты, показывают, что способ управления преобразователем постоянного напряжения с помощью детерминированного хаоса уменьшает электромагнитные помехи, а также значительно повышает энергоэффективность. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы как на стадии проектировки источников питания такого класса, так и для проведения дальнейших исследований и разработок новых систем управления, включающих в себя управление с помощью детерминированного хаоса.

### Ключевые слова:

Детерминированный хаос, преобразователь постоянного напряжения, система управления, бифуркация, динамический хаос.

### Введение

В настоящее время в мире бурно развивается альтернативная энергетика, в первую очередь это ветро- и гелиоэлектростанции. Важным отличием процессов преобразования энергии в таких электростанциях является их нестационарный характер. Это в первую очередь связано с такими природными факторами, как изменение скорости ветра, суточные и погодные колебания уровня освещенности поверхности Земли и т. д. Для стабилизации процессов энергопреобразования большое распространение получили DC-DC-конверторы. Нестационарный характер входного напряжения, поступающего на вход DC-DC-конверторов, затрудняет разработку алгоритмов управления преобразователями. По мнению авторов, в этом случае будет вполне естественным обратиться к специальному разделу теории автоматического управления, так называемой теории детерминированного хаоса.

В 1963 году Эдвард Лоренц открыл режимы детерминированного хаоса в атмосферных явлениях. В математическом аспекте детерминированный хаос означает аperiодическое поведение системы, которое очень чувствительно к начальным условиям и долговременное прогнозирование точного решения становится невозможным. В сущности,

математическая модель хаотической электротехнической системы представляет собой детерминированную систему нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой ведет себя непредсказуемым образом в зависимости от заданных начальных условий, – такой тип называется режимом детерминированного хаоса [1–4]. Следовательно, режимы детерминированного хаоса – это новый тип и особая форма поведения нелинейной системы, и для электротехнической системы обнаружение хаотических режимов является актуальной задачей.

Принято считать, что детерминированный хаос – определенно недопустимое явление с точки зрения динамической устойчивости в электротехнической системе. В частности, когда колебания в системе приобретают хаотический характер, система теряет устойчивость и возникает аварийный режим работы.

В преобразовательной технике процессы, изменяющиеся случайным образом, в основном ухудшают работу системы. И основная задача разработчика в таких случаях заключается в исключении возникновения хаотических процессов в системе. Явление перехода к хаотическому поведению происходит из-за нелинейных элементов, входящих в

состав преобразователей. Вопросы, посвященные данному режиму, подробно рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе [5–10].

Система управления (СУ) преобразователями электрической энергии реализуется с помощью аналоговых или цифровых систем управления, причем в аналоговых системах переход к импульсному режиму работы осуществляется с помощью модулятора (например, широтно-импульсного – ШИМ), также применяются смешанные системы управления. Системы управления преобразовательной техники не стоят на месте – появляются различные типы контроллеров, расширяются возможности выходных драйверов для управления силовым ключом, появляются новые источники опорного напряжения и многое другое [11–16].

С учетом вышеизложенного в статье предпринята попытка извлечь определенную выгоду из хаоса и использовать его в силовой электронике.

#### Система формирования периодического и хаотического режима работы

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) построена на сравнении сигнала рассогласования с модулирующим сигналом пилообразной формы. В результате на выходе формируется сигнал управления прямоугольной формы. Очевидно, для того чтобы исследовать преобразователь, работающий в периодическом и хаотическом режиме, необходимо осуществить хаотическое либо периодическое изменение ширины импульса управления. Принципиально хаотический метод управления можно осуществить несколькими методами: первый заключается в изменении параметров схемы и нахождении бифуркационного режима, который впоследствии приведет к хаосу, а второй заключается в добавлении внешней схемы управления, позволяющей осуществить хаотическую широтно-импульсную модуляцию. И если первый метод труднодостижим на практике, то второй вполне

осуществим и основан на классическом методе сравнения двух сигналов.

На рис. 1 показана схема, на выходе которой возможно сформировать периодический и хаотический ШИМ-сигнал, необходимый для сравнения режимов работы преобразователя.

#### Процесс формирования управляющих импульсов

Рассмотрим процесс формирования периодических и хаотических импульсов. В момент времени, когда на вход (А) элемента U7C поступает логическая единица, на сбрасывающий вход (R) триггера действует логический ноль, следовательно, триггер не находится в режиме сброса. Если в этот момент времени напряжение на инвертирующем входе усилителя ошибки U9 будет ниже опорного V7 (1,25 В), то на выходе усилителя появится логическая единица, которая поступит на вход (B). Это повлечет за собой установку в логическую единицу элемента U7C и вызовет переключение триггера. В результате на выходе системы управления будет действовать логическая единица. Напротив, когда на входе (А) действует логический ноль, на сбрасывающем (R) входе триггера действует логическая единица. Это вызывает сброс триггера и закрытие логического элемента U7C. Можно сказать, что схема в этом состоянии не пропускает сигналы, следующие от усилителя ошибки. Следовательно, на выходе схемы в этом случае будет действовать логический ноль. Необходимо отметить, что в таком исполнении схемы процесс формирования управляющих импульсов будет зависеть от сигнала, поступающего на вход (А) логического элемента. Другими словами, если сигнал, поступающий на вход (А) будет изменяться периодически, то на выходе схемы сформируется периодический ШИМ, и наоборот: если на вход (А) будет подаваться сигнал от источника детерминированного хаоса, то на выходе сформируется ШИМ, изменяющийся хаотическим образом. Диаграммы работы формирователя показаны на рис. 2.

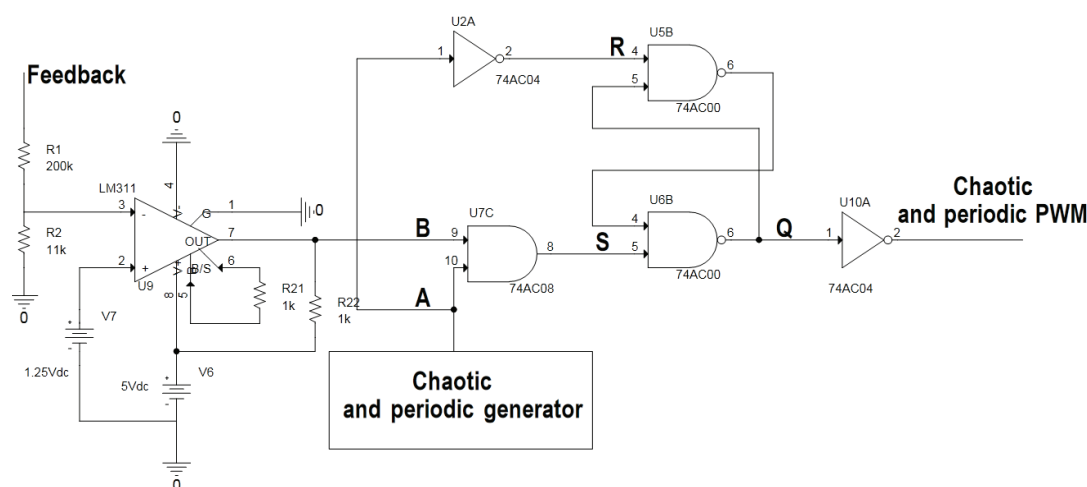
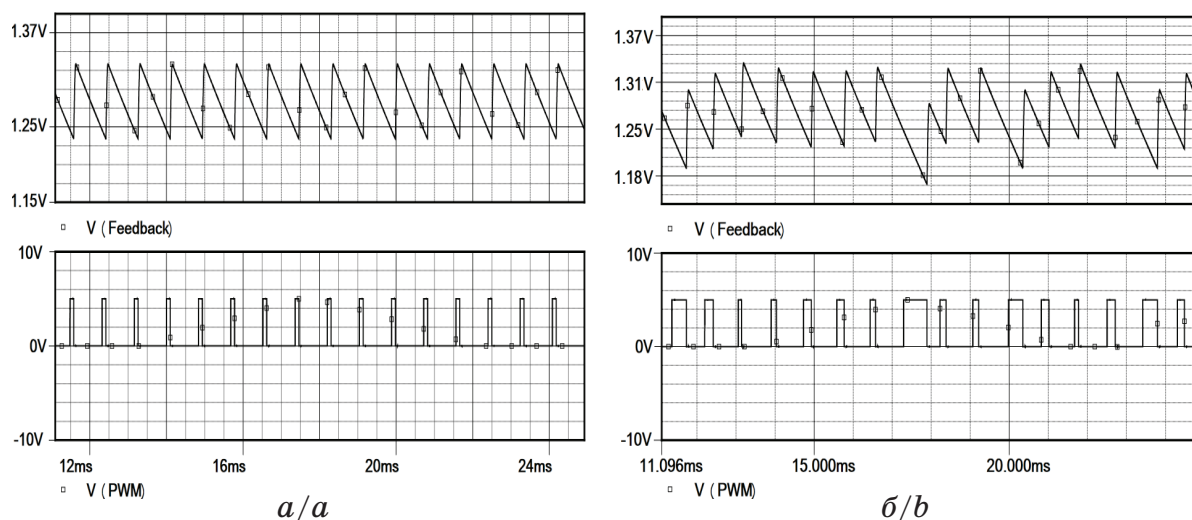


Рис. 1. Базовая схема СУ формирователя ШИМ-сигнала

Fig. 1. Basic scheme of the control system of a pulse width modulation (PWM) signal



**Рис. 2.** Формирование управляющих импульсов при периодическом сигнале задающего генератора (а) и при хаотическом сигнале задающего генератора (б)

**Fig. 2.** Formation of control pulses at periodic signal of driving generator (a) and chaotic signal of the master oscillator (b)

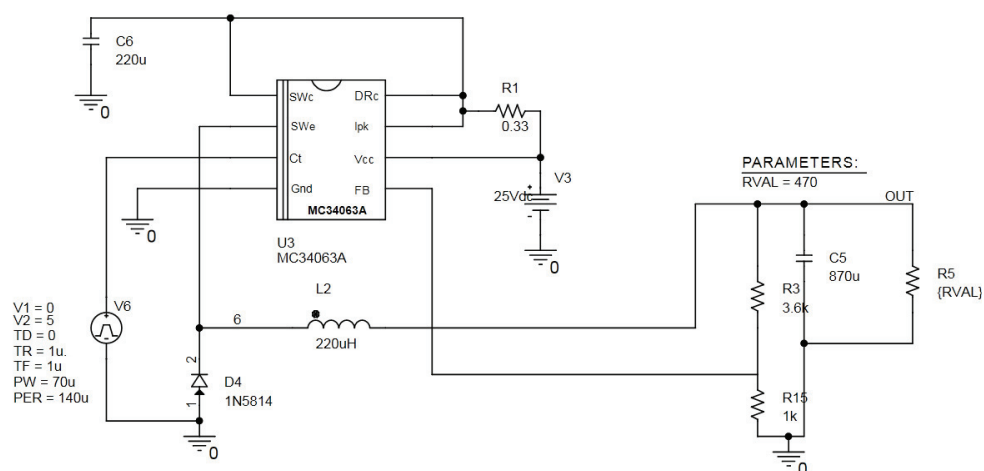
На данном рисунке можно рассмотреть, как формируется ШИМ-последовательность периодического и хаотического сигнала. пилообразный сигнал, поступающий на инвертирующий вход усилителя ошибки, сравнивается с опорным напряжением, в результате при пересечении пилообразного сигнала и постоянного опорного напряжения происходит формирование длительности управляющего импульса.

#### Разработанные схемы для исследования периодического и хаотического режима работы преобразователя

Исследования режимов хаотической и периодической работы понижающих преобразователей проводились с использованием микросхемы MC34063A. Микросхема имеет в своем составе

транзисторный ключ VT, который соединен со схемой управления, также в нее включен усилитель ошибки, на который через делитель напряжения подается сигнал обратной связи и ограничитель входного тока. Данная микросхема была выбрана из-за того, что ее система формирования управляющего сигнала схожа с системой, показанной на рис. 1. Основным изменением стандартной схемы включения, показанной на рис. 3, является то, что вместо времязадающего конденсатора, подключенного к выводу 3, подключается генератор с периодическими или хаотическими тактовыми импульсами. Таким образом, появилась возможность исследовать работу преобразователя, не прибегая к сложным схематическим изменениям.

В таком исполнении схемы можно получить выходное напряжение качественно ниже входно-

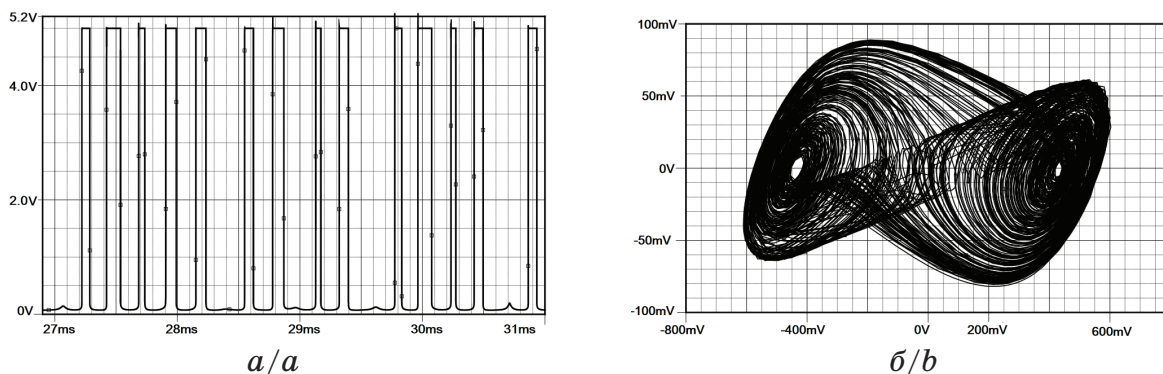


**Рис. 3.** Понижающий преобразователь постоянного напряжения с внешним периодическим генератором тактовых импульсов

**Fig. 3.** Step-down DC-DC converter with external periodic clock generator

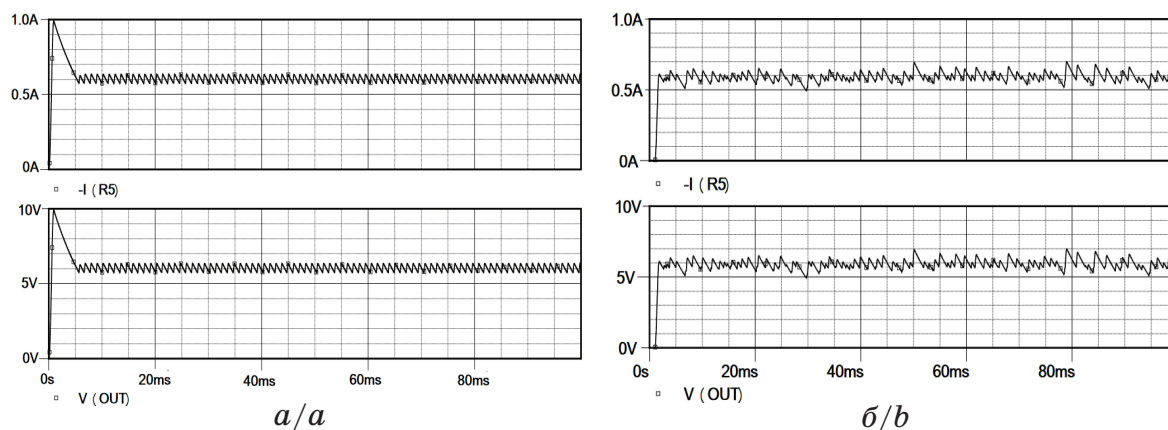






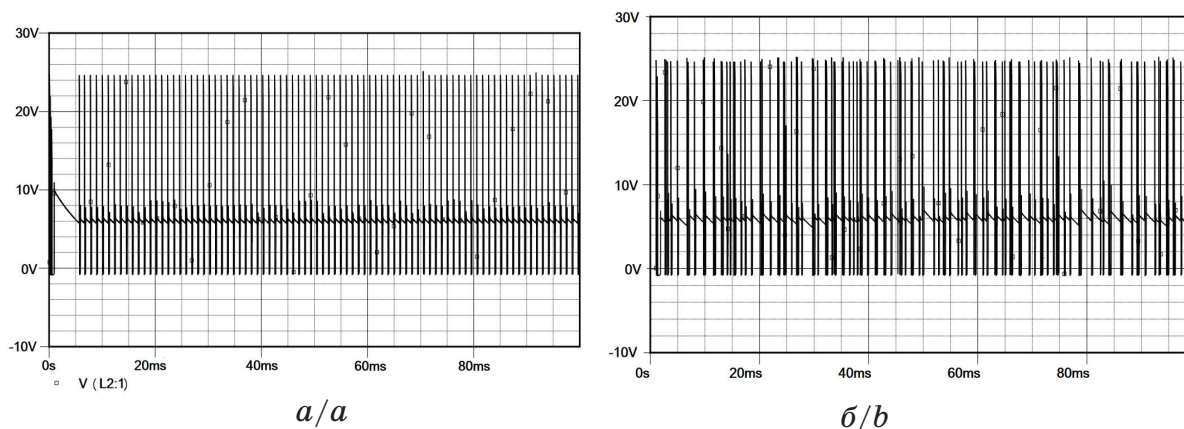
**Рис. 5.** Хаотическая последовательность импульсов на выходе компаратора U4 (а) и фазовый портрет генератора Чуа, снятый с емкости C1 и C2 (б)

**Fig. 5.** Chaotic sequence of pulses at the output of the comparator U4 (a) and phase portrait of the Chua generator taken from capacity C1 and C2 (b)



**Рис. 6.** Выходной ток и напряжение на нагрузке R5 при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

**Fig. 6.** Output current and voltage on the load R5 at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

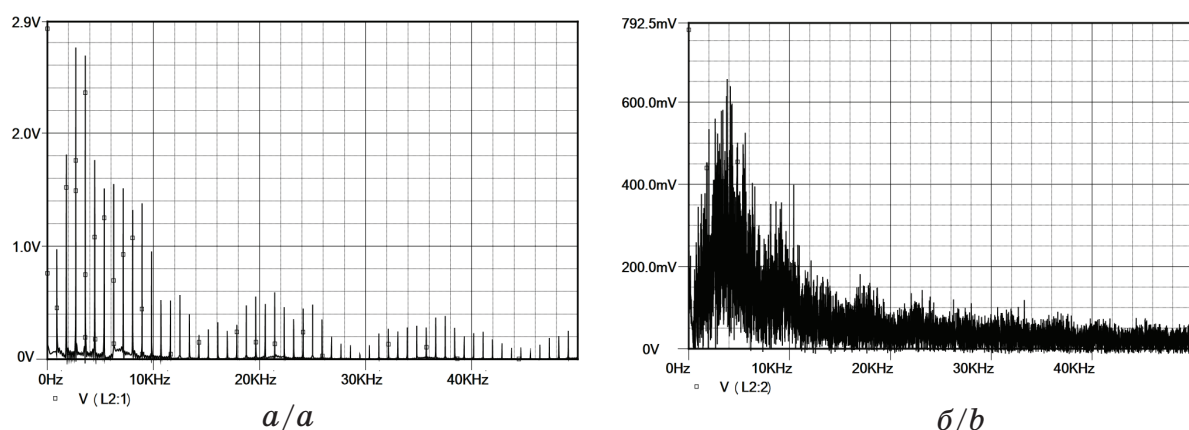


**Рис. 7.** Временная диаграмма напряжения, действующего на входе LC-фильтра при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

**Fig. 7.** Timing diagram of voltage of the LC-filter operating on the input at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

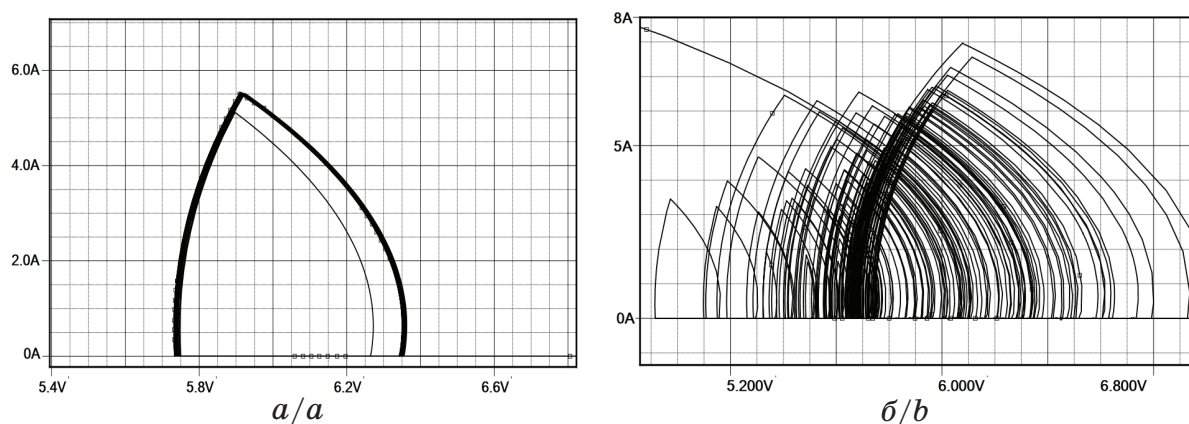
спектр будет состоять исключительно из дискретных частотных составляющих. И это будет неотъемлемой частью системы находящейся в устойчивом равновесии [17–19]. Периодический режим представлен рядом Фурье, содержащим некоторую

составляющую с циклической частотой  $f=1/T$  и гармоники, которые расположены равномерно с частотами  $kf$ , где  $k=2,3,\dots$ . При этом ненулевую амплитуду могут иметь не все указанные спектральные составляющие. Частотный спектр для напря-



**Рис. 8.** Частотный спектр напряжения, действующего на входе LC-фильтра, при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

**Fig. 8.** Voltage frequency spectrum of the LC-filter operating at the input at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation



**Рис. 9.** Фазовые портреты входного тока и выходного напряжения при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

**Fig. 9.** Phase portraits of the input current and output voltage under PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

жения, показанного на (рис. 7, б), в отличие от периодического сигнала, будет широкополосным и непрерывным [20]. Спектральный анализ колебаний напряжения на входе LC-фильтра представлен на рис. 8.

Амплитуды гармоник (рис. 8) системы, работающей в хаотическом режиме, значительно ниже по сравнению с классической системой. Следовательно, хаотическая система будет иметь меньшую величину электромагнитной составляющей.

Основным и наиболее наглядным инструментом для исследования хаоса является графическое представление системы на фазовой плоскости. Изображения фазовых портретов для периодического и хаотического режима показаны на рис. 9.

В ходе работы было установлено, что эффективность преобразователя, работающего в режиме детерминированного хаоса, выше исследуемого классического.

Графические представления входной и выходной мощности, а также выходного напряжения для двух режимов работы представлены на рис. 10.

Также было проведено исследование эффективности при разных величинах нагрузки. Результаты занесены в таблицу.

**Таблица.** Результаты исследования входной и выходной мощности при разной величине нагрузки

**Table.** The results of studying the input and output power under different load

$R_{н}, \text{ Ом}$	Периодический режим Periodic mode			Хаотический режим Chaotic mode		
	$P_{вх}, \text{ Вт}$	$P_{вых}, \text{ Вт}$	КПД, %	$P_{вх}, \text{ Вт}$	$P_{вых}, \text{ Вт}$	КПД, %
5	9,17	7,27	79,28	8,35	6,64	79,52
10	5,10	3,84	75,29	4,39	3,42	77,90
15	3,75	2,64	70,40	3,02	2,28	75,50
20	3,02	2,03	67,22	2,46	1,78	72,36
25	2,60	1,67	64,23	1,99	1,43	71,86

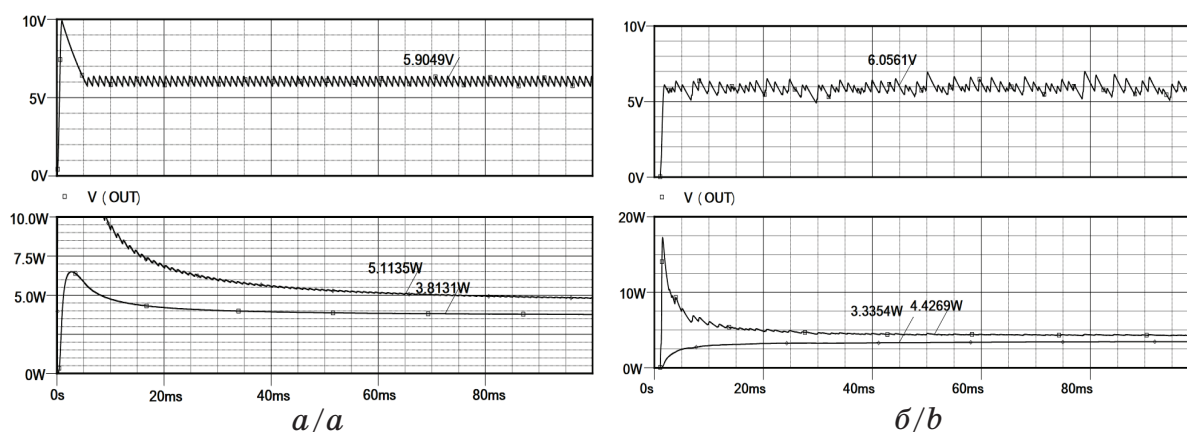


Рис. 10. Диаграммы выходных напряжений и входной и выходной мощности при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 10. Charts of output voltages and input and output power at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

### Заключение

Разработанная и исследованная система управления, работающая в режиме детерминированного хаоса, дает возможность управления функциональной неустойчивостью и позволяет использовать детерминированный хаос в преобразовательной технике. Сравнивая диаграммы, показанные на рис. 6, отметим, что выходное напряжение  $V(OUT)$  при периодическом и хаотическом сигнале управления одинаково и находится на уровне 6 В.

Однако величина пульсаций у системы, работающей в хаосе, немного выше.

Таким образом, детерминированный хаос практически не влияет на характеристики преобразователя. Анализ спектров напряжения, действующих на входе LC-фильтра, показывает, что пики гармоник напряжения значительно ниже у системы, работающей в хаосе, хотя энергия в первом и во втором случае одинакова. Поэтому данная система может быть использована для снижения электромагнитных помех.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальянов Э.В. Хаотические колебания в связанной системе би-стабильных генераторов // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 1–6.
2. Прокопенко В.Г. Построение составного хаотического мульти-аттрактора на основе асимметричных хаотических аттракторов // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 5. – С. 6–9.
3. Мезин Н.И., Глуценко А.А., Кузовлев Ю.Е. Генераторы хаоса на базе пленок железо-иттриевого граната для систем связи с хаотическим синхронным откликом // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – № 19. – С. 14–22.
4. Элияшвили О.М. Безындуктивные генераторы хаотических колебаний по схеме Чуа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 2. – С. 12–15.
5. Бородин К.В. Определение области устойчивости проектного режима инвертирующего DC-DC-преобразователя напряжения // Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2013. – С. 129–131.
6. Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах // О.А. Алейников, В.С. Баушев, А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 16–21.
7. Сухотерин Е.В., Николаенков Ю.К. Шумовые параметры и устойчивость низковольтных стабилизаторов напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 32. – С. 40–44.
8. Chen Y., Zheng Y. Non linear behavior of a Z source DC/DC converter based on dual loop control // Journal of Vibroengineering. – 2015. – V. 17. – № 1. – P. 544–553.
9. Harb A.M., Harb S.M., Batarseh I.E. Bifurcation and chaos of DC-DC converter as applied to micro-inverter with multi control parameters // Renewable Energy Congress (IREC). – Orlando, 2015. – P. 1–6.
10. Hamza R. et al. Controller Design and Analysis for a Two-Cell Dc-Dc Converter in the Presence of Saturation // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2011. – V. 21. – № 01. – P. 341–361.
11. Скурятин Ю.В., Фомин А.И. Управление импульсным преобразователем на скользящих режимах в базисе энергий // Техническая электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 87–89.
12. Комбинированный метод стабилизации выходного напряжения в многоуровневых инверторах / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, Е.Е. Миргородская, Р.А. Билюков, В.П. Глазков // Вестник СГТУ. – 2014. – № 4. – С. 77.
13. Межаков О.Г. Математическая модель понижающего преобразователя напряжения // Молодой ученый. – 2015. – № 5. – С. 171–176.
14. Федоров С.В., Бондарев А.В. Анализ влияния структуры системы управления матричными преобразователями частоты на основе широтно-импульсной модуляции на качество выходного напряжения // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. – 2014. – № 12. – С. 138–145.
15. Аржанухина Д.С., Кузнецов С.П. Система трех неавтономных осцилляторов с гиперболическим хаосом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 20. – № 6. – С. 56.
16. Квазипериодическая динамика системы управления с широтно-импульсной модуляцией / Ж.Т. Жусубалиев, А.И. Андриянов, А.А. Михалев, В.В. Шеин // Известия вузов. Сер. «Приборостроение». – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 75–81/.

17. Симонов А.В., Иванов Ю.М., Мелентьев В.С. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения ортогональных составляющих гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2. – С. 59–62.
18. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198–201.
19. Круглов В.П., Кузнецов А.С., Кузнецов С.П. Гиперболический хаос в системах с параметрическим возбуждением паттернов стоячих волн // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 265–277.
20. Колесов В.В., Полубехин А.И., Чигин Е.П. Дискретные кодирующие алгоритмы на основе динамического хаоса для широкополосных информационных технологий // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 21.

*Поступила 08.12.2015 г.*

#### **Информация об авторах**

**Федоров В.К.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета.

**Федянин В.В.**, аспирант, ассистент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.



UDC 621.318

## FEATURES OF THE DETERMINED CHAOS MODES OF DC VOLTAGE CONVERTERS FOR WIND AND SOLAR POWER STATIONS

Vladimir K. Fedorov<sup>1</sup>,

k13201@rambler.ru

Viktor V. Fedyanin<sup>1</sup>,

fedviktor2@gmail.com

<sup>1</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

*Relevance of the research is defined by the necessity to increase the efficiency of converters for the needs of renewable energy. The strict and conflicting requirements are often imposed to the control algorithms of DC voltage converters used in solar and wind power. The theory of deterministic chaos may be one of the ways of solving the problem of improving the algorithms.*

**The aim** of the research is to study and develop the control systems for DC-DC converters which allows working both in periodic mode and in deterministic chaos mode; to develop a physical model of DC-DC converter including the control system operating in deterministic chaos mode; make the voltage feedback circuit for stabilizing the output voltage at the given level.

**Research method:** a review of patent and literature on the topic. The mathematical and experimental methods of investigation of the DC-DC converters were used. The method of mathematical modeling is based on preparation of electrical systems equations solution. The method of experimental research is based on the study of the output graphs, taken from the physical model of the DC-DC converters.

**Results.** The authors have developed the physical model of the DC-DC converter with the control system operating in the deterministic chaos mode. The results show that the method of controlling the DC-DC converters with the help of deterministic chaos reduces electromagnetic interference, and improves significantly energy efficiency. The results obtained in the study can be used both at the stage of designing the power supplies in this class, and for further research and development of new control systems, including the control by deterministic chaos.

### Key words:

Deterministic chaos, DC-DC converters, control system, bifurcation, dynamic chaos.

### REFERENCES

1. Kalyanov E.V. Chaotic oscillations in the coupled system of bi-stable oscillators. *Technical Physics*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 1–6. In Rus.
2. Prokopenko V.G. Building a composite multi chaotic attractor based on asymmetric chaotic attractors. *Technical Physics*, 2013, vol. 83, no. 5, pp. 6–9. In Rus.
3. Mezin N.I., Glushchenko A.A., Kuzovlev Yu.E. Chaos generators on the basis of yttrium-iron garnet films for communication with chaotic synchronous response. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 19, pp. 14–22. In Rus.
4. Eliyashiv O.M. Bezynduktivnye generatory khaoticheskikh kolebaniy po skheme Chua [Non-inductive generator of chaotic oscillations of Chua circuit]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2012, no. 2, pp. 12–15.
5. Borodin K.V. Opredelenie oblasti ustoychivosti proektnogo rezhima invertiruyushchego DC-DC-preobrazovatela napryazheniya [Determination of the region of stability of the project mode inverting DC/DC converter voltage]. *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Nauchnaya sessiya TUSUR* [All-Russian scientific conference of students, postgraduates and young researchers. Scientific session of TUSUR University]. Tomsk, 2013. pp. 129–131.
6. Aleynikov O.A., Baushev V.S., Kobzev A.V., Mikhalechenko G.Ya. Study of local stability of periodic regimes in nonlinear pulse systems. *Electricity*, 2013, no. 4, pp. 16–21. In Rus.
7. Sukhoterlin E.V., Nikolaenko Yu.K. Shumovye parametry i ustoychivost nizkovoltnykh stabilizatorov napryazheniya [Noise parameters and stability of low-voltage stress stabilizers]. *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*, 2013, no. 32, pp. 40–44.
8. Chen Y., Zheng Y. Non linear behavior of a Z source DC/DC converter based on dual loop control. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 544–553.
9. Harb A.M., Harb S.M., Batarseh I.E. Bifurcation and chaos of DC-DC converter as applied to micro-inverter with multi control parameters. *Renewable Energy Congress (IREC), 6<sup>th</sup> International IEEE*. Orlando, 2015. pp. 1–6.
10. Hamza R. Controller Design and Analysis for a Two-Cell DC-DC converter in the Presence of Saturation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 341–361.
11. Skuryatin Yu.V., Fomin A.I. Pulse converter control on the basis of sliding modes in energy. *Technical electrodynamics*, 2014, no. 4, pp. 87–89. In Ukr.
12. Mityashin N.P. Combined method of stabilizing the output voltage in multi-level inverters. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2014, no. 4, p. 77. In Rus.
13. Mezhaikov O.G. Matematicheskaya model ponizhayushchego preobrazovatela napryazheniya [Mathematical model of the buck voltage converter]. *Molodoy ucheny*, 2015, no. 5, pp. 171–176.
14. Fedorov S.V., Bondarev A.V. Analiz vliyaniya struktury sistemy upravleniya matrichnymi preobrazovatelyami chastoty na osnove shirotno-impulsnoy modulyatsii na kachestvo vykhodnogo napryazheniya [Analysis of the influence of a control system structure of a matrix frequency converter based on pulse width modulation on the quality of the output voltage]. *Novoe slovo v nauke i praktike: gipotezy i aprobatsiya rezultatov*, 2014, no. 12, pp. 138–145.
15. Arzhanukhina D.S., Kuznetsov S.P. System of three non-autonomous oscillators with hyperbolic chaos. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2012, vol. 20, no. 6, p. 56. In Rus.

16. Zhusubaliyev Zh.T., Andriyanov A.I., Mikhalev A.A., Shein V.V. Quasiperiodic dynamics of a control system with PWM. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 75–81. In Rus.
17. Simonov A.V., Ivanov Yu.M., Melentev V.S. The measuring technique for integral characteristics based on comparison of orthogonal components of harmonic signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol*, 2013, no. 2, pp. 59–62. In Rus.
18. Melentev V.S., Ivanov Yu.M., Mironov A.A. The research of measuring technique for harmonic signal frequency. *Polzunovsky Gazette*, 2013, no. 2, pp. 198–201. In Rus.
19. Kruglov V.P., Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.P. Hyperbolic chaos in systems with parametric excitation of standing wave patterns. *Nelineynaya dinamika*, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 265–277. In Rus.
20. Kolesov V.V., Polubekhin A.I., Chigin E.P. Digital coding algorithms based on dynamic chaos for broadband information technologies. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 2, p. 21. In Rus.

*Received: 8 December 2015.*

#### **Information about the authors**

**Vladimir K. Fedorov**, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University.

**Viktor V. Fedyanin**, graduate student, assistant, Omsk State Technical University.