

Влияние частоты коммутации ключа и амплитуды опорного напряжения импульсного стабилизатора напряжения понижающего типа на его устойчивость

Д.Л. Мясников¹, Р.С. Демидов², Ю.В. Соколова¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

² Самарский филиал Научно-исследовательского института по обеспечению пожарной безопасности
443041, Россия, г. Самара,
ул. Агибалова, 48

Аннотация – На основе классических критериев устойчивости, используя выражения передаточной функции, согласно блок-схеме, произведена оценка устойчивости импульсного регулятора с обратной связью. Анализируется влияние частоты коммутации ключа и амплитуды опорного напряжения на устойчивость импульсного стабилизатора напряжения понижающего типа при детерминированных параметрах системы. В соответствии с критерием Найквиста по передаточной функции разомкнутой системы могут быть оценены как устойчивость, так и запасы устойчивости по фазе для замкнутой системы. При моделировании работы устройства получен запас устойчивости по фазе, по критерию Найквиста, который составляет $\gamma_c = H = 7^\circ$. Увеличение пилообразного напряжения – нежелательное явление, которое пусть и повышает запас устойчивости, однако снижает стабильность. При этом зависимость пульсаций, влияющих на стабильность работы, от амплитуды пилообразного напряжения является непрогнозируемой величиной и принимает случайное значение.

Ключевые слова – импульсный стабилизатор напряжения; запас устойчивости; логарифмические частотные характеристики; широтно-импульсная модуляция.

Введение

Основная отличительная особенность всех импульсных источников электропитания – они являются разновидностью однотактного преобразователя напряжения, охваченного контуром отрицательной обратной связи. Несмотря на совершенствование систем автоматизированного проектирования, все еще остается актуальной задача моделирования работы устройства для расчета запаса устойчивости по амплитуде. Также необходимость увеличения коэффициента стабилизации приводит к выявлению зависимости характеристик устойчивости от точности частоты и формы пилообразного напряжения эталонного сигнала. Метод логарифмических частотных характеристик дает также возможности по определению частоты среза, резонансной частоты и оценке запаса устойчивости по фазе по критерию Найквиста.

1. Расчет выходных параметров

Импульсный стабилизатор характеризуется структурной схемой с представленными на ней динамическими звеньями, характеризующими ИСН как систему автоматического управления

(САУ), и некоторыми выражениями для их передаточных функций.

На рис. 1 изображена структурная схема для ИСН понижающего типа.

На схеме: силовой ключ ИСН представляет собой множительное звено, который есть при изменении коэффициента заполнения $\Delta d = \hat{d}$ [1] (по цепи обратной связи) передаточная функция $K'_{кл} = U_1$ и выполняет операцию

$$U_2 = dU_1, \quad (1)$$

Силовой ключ при изменении входного напряжения U_1 представляется передаточной функцией $K''_{кл} = d$.

Передаточная функция сглаживающего LC-фильтра выглядит следующим образом:

$$K_\phi(s) = \frac{K_\phi}{T_\phi^2 s^2 + 2\xi T_\phi s + 1}, \quad (3)$$

где T_ϕ – постоянная времени; ξ – коэффициент затухания; $K_\phi = \frac{R_n}{R_n + R_3}$ – коэффициент передачи фильтра по постоянному току; R_3 – эквивалентное внутреннее сопротивление ИСН.

Коэффициент передачи сравнивающего делителя ИСН выражается как

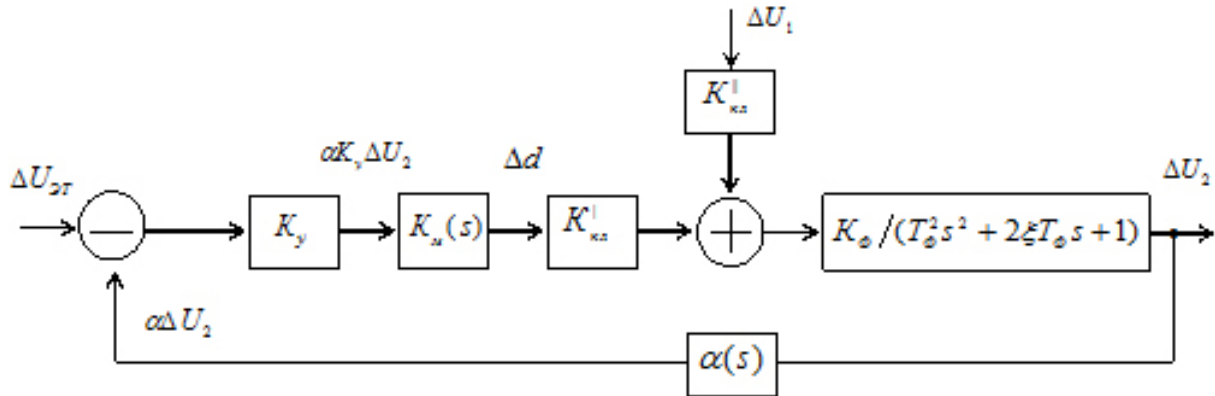


Рис. 1. Блок-схема ИСН

Fig. 1. Block diagram of the pulse voltage regulator

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4)$$

Передаточная функция усилителя постоянного тока (УПТ) – K_y . УПТ в ИСН является практически безынерционным звеном, так как постоянная времени УПТ много меньше постоянной времени фильтра.

Передаточная функция модулятора ШИМ (K_m) рассчитывается по следующей формуле:

$$K_m = \frac{\Delta d}{\alpha K_y \Delta U_2} = \frac{1}{V_p} \left[\frac{1}{B} \right]. \quad (5)$$

Представление ШИМ в качестве линейного звена с коэффициентом передачи K_m возможно при малом уровне пульсации на входе ШИМ, т. е. при достаточно хорошем сглаживающем фильтре, что обычно всегда имеет место, и при соблюдении условий, когда ИСН является непрерывной системой.

Постоянную запаздывания τ_3 следует ввести в цепь прямой связи структурной схемы (рис. 1), например в коэффициент передачи ШИМ. В связи с этим формула преобразуется:

$$K_m(s) = K_m e^{-s\tau_3} = \frac{1}{V_p} e^{-s\tau_3}, \quad (6)$$

где V_p – амплитуда пилообразного напряжения синхронизации ИСН.

На основании линейной структурной схемы рис. 1 передаточная функция разомкнутой системы ИСН получается при размыкании цепи обратной связи, т. е. звена α , и равна произведению передаточных функций всех последовательно соединенных звеньев в ИСН:

$$W(s) = \frac{\alpha K_y K_m K_{кл} K_\phi}{T_\phi^2 s^2 + 2\xi T_\phi s + 1} = \frac{K e^{-s\tau_3}}{T_\phi^2 s^2 + 2\xi T_\phi s + 1}, \quad (7)$$

где

$$K \approx \frac{\alpha K_y U_1}{V_p}$$

– коэффициент передачи разомкнутой системы ИСН, численно равный его коэффициенту стабилизации (обычно $K_\phi \cong 1$).

Оценка устойчивости импульсного регулятора с обратной связью производится при помощи классических критериев устойчивости с использованием выражения его передаточной функции.

Как известно, передаточная функция замкнутой системы $\Phi(s)$ выражается через передаточную функцию разомкнутой системы:

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}. \quad (8)$$

Функция $W(s)$ записывается отношением двух полиномов $(M(s)/N(s))$ комплексной частоты $s = \alpha \pm j\omega$.

$$\Phi(s) = M(s)/(N(s) + M(s)). \quad (9)$$

Корни числителя являются нулями этой функции, корни знаменателя – ее полюсами или собственными частотами системы при $N(s) \neq 0$ [2].

2. Определение устойчивости по критерию Найквиста

Система будет устойчивой, если ни одна из собственных частот не имеет положительной вещественной части или ни один из полюсов системы не лежит в правой полуплоскости величины s , то есть для устойчивости системы необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения передаточной функции замкнутой системы имели отрицательную вещественную часть [3].

На практике большее распространение получили частотные критерии, прежде всего критерий Найквиста, с помощью которого и будет проводиться дальнейшее исследование.

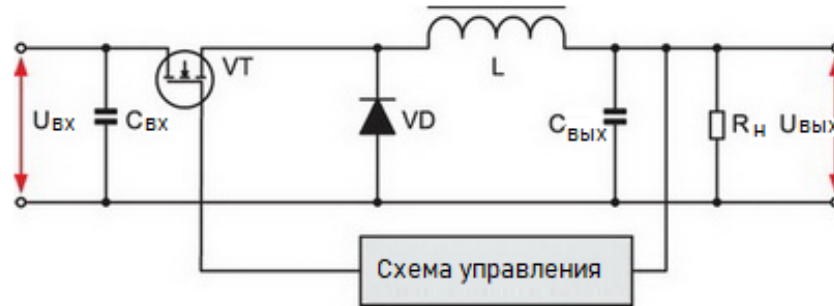


Рис. 2. Структурная схема исследуемого ИСН понижающего типа
 Fig. 2. Block diagram of the investigated lower-type pulse voltage regulator

$$\begin{aligned}
 V1 &:= 27 & V2 &:= 12 & Rn &:= 4 & C_{\text{вх}} &:= 400 \cdot 10^{-6} & L_{\text{м}} &:= 0.25 \cdot 10^{-3} \\
 Rq &:= 0.5 & fk &:= 20 \cdot 10^3 & Vp &:= 3.4 & a &:= 0.5 & Ku &:= 10 \\
 D &:= \frac{V2}{V1} = 0.444444 & Lk &:= \frac{Rn \cdot (1 - D)}{2 \cdot fk} & b &:= \frac{L}{Lk} \\
 & & b &:= 4.5 & & b > 1 & & & &
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Листинг из программы Mathcad
 Fig. 3. Listing from the Mathcad program

$$\begin{aligned}
 K &:= \frac{U2 \cdot D1 \cdot K4}{U} = 27 & \pi &= 3.142 \\
 fn &:= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C1}} = 503.292 \quad \text{резонансная частота} \\
 m &:= 1..4 & n &:= 1, 1.1..10 & j &:= \sqrt{-1} & \text{ORIGIN} &:= 1 \\
 f(m,n) &:= n \cdot 10^m & K(m,n) &:= K \\
 A_{11} &:= \frac{-R1}{L1} & A_{12} &:= \frac{-1}{L1} & A_{21} &:= \frac{1}{C1} & A_{22} &:= \frac{-1}{R3 \cdot C1} \\
 E_1 &:= \frac{U2}{L1} & E_2 &:= 0 & F_1 &:= 0 & F_2 &:= \frac{-(D1 \cdot K4)}{U} \\
 A &:= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.8 \times 10^3 & -4 \times 10^3 \\ 2.5 \times 10^3 & -208.333 \end{pmatrix} & F &:= (F_1 \ F_2) & I &:= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 E &:= \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} & E &:= \begin{pmatrix} 1.08 \times 10^5 \\ 0 \end{pmatrix} & F &:= (0 \ -1) & I &:= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 W_{xu}(m,n) &:= (j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f(m,n) \cdot I - A)^{-1} \cdot E \cdot F \\
 W_{22}(m,n) &:= -W_{xu}(m,n)_{2,2}
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Листинг из программы Mathcad
 Fig. 4. Listing from the Mathcad program

В соответствии с критерием Найквиста по передаточной функции разомкнутой системы могут быть оценены как устойчивость, так и запасы устойчивости по фазе для замкнутой системы.

Напомним, что по частотному критерию Найквиста амплитудно-фазовая характеристика

передаточной функции ($W(j\omega) = V(\omega) + jV(\omega)$) для устойчивой системы не должна охватывать точку с координатами $(-1; j_0)$, а по логарифмическому частотному критерию Найквиста для устойчивости системы необходимо, чтобы во всей области частот, где ЛАЧХ положительна, т. е. до частоты

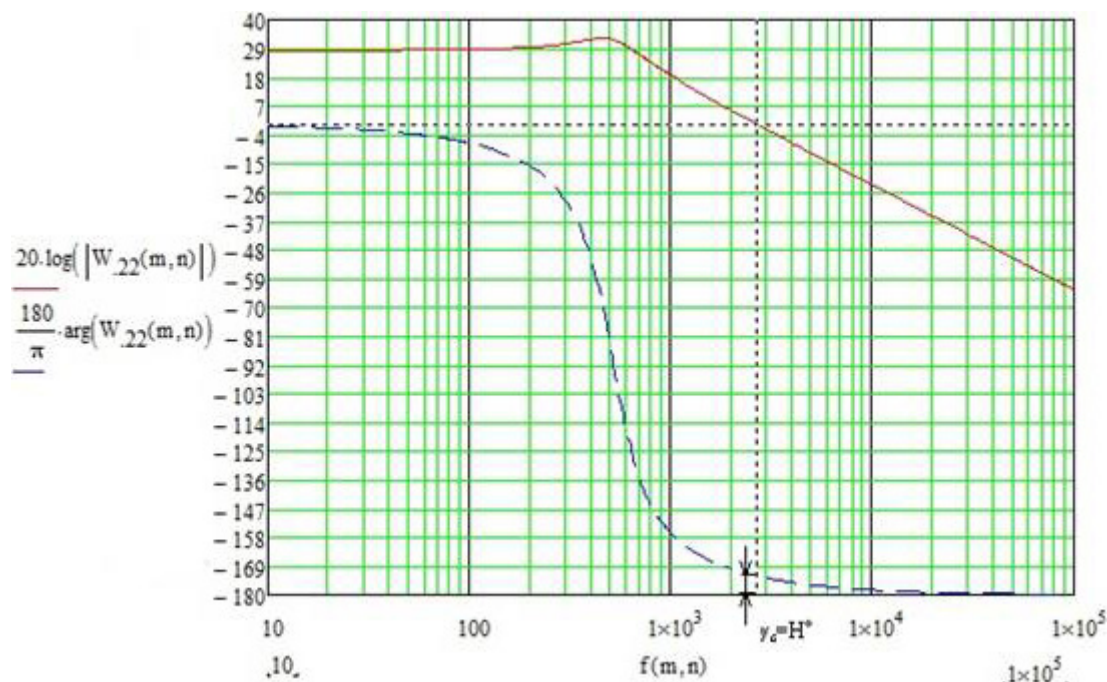


Рис. 5. ЛАЧХ ИСН, полученная в результате моделирования
Fig. 5. LCNN of the pulse voltage regulator, obtained as a result of modeling

среза (f_{cp}), фазовая характеристика (ФЧХ) прошла выше уровня $-\pi$ (-180°). При этом запас устойчивости по фазе ($\gamma_c = H^\circ$) показывает, насколько фазовый угол ФЧХ $\varphi(f_{cp})$ отличается от $-\pi = -180^\circ$ на частоте среза f_{cp} .

Проведем расчет оценки устойчивости нашего ИСН-1, структурная схема которого изображена на рис. 2, на вышеприведенные параметры. Рассчитаем динамические параметры ИСН без цепей коррекции [4; 5].

На рис. 3 и 4 изображен листинг программы для моделирования работы вышеупомянутого стабилизатора, благодаря чему можно наглядно, по графикам, определить запас устойчивости по фазе [6].

Из рис. 5 видно, что стабилизатор находится на грани устойчивости, так как имеет на частоте среза $f_{cp} = 2700$ Гц значение фазового угла:

$$\varphi_{нс} = \frac{180}{y} \arccos(W(n)) = 173^\circ.$$

Таким образом, запас устойчивости по фазе $\gamma_c = H = 7^\circ$ (запас устойчивости по фазе $\gamma_c = H^\circ$ показывает, насколько фазовый угол ФЧХ $\varphi(f_{cp})$ отличается от $-\pi$ (-180°) на частоте среза f_{cp}) [7].

Собственная (резонансная) частота фильтра f_0 составляет:

$$f_0 = \frac{\omega_\phi}{2\pi} = \frac{4100}{2\pi} = 653 \text{ Гц.}$$

Заключение

1. С ростом амплитуды пилообразного напряжения – запас устойчивости по фазе увеличивается.
2. Частота коммутации ключа не оказывает влияния на устойчивость ИСН.
3. Зависимость пульсаций, влияющих на стабильность работы, от амплитуды пилообразного напряжения является непрогнозируемой величиной и принимает случайное значение.

Увеличение пилообразного напряжения – нежелательное явление, так как снижает стабильность.

Список литературы

1. Мясников Д.Л. Вороной А.А. Частотные характеристики импульсного стабилизатора понижающего типа // Теория и практика современной науки. 2020. С. 81–84.
2. Вороной А.А., Мясников Д.Л., Кузьменко А.А. Математические модели бифуркационных процессов в ИСН // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. 2019. С. 302–310.
3. Myasnikov D.L., Voronoy A.A. Evaluation of switching voltage regulator (SWR) stability when changing the switching frequency of the switch and the amplitude of the reference voltage // VIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation»: proceedings of the conference. Shawnee, USA. 2020. P. 16–20.
4. Коржавин О.А. Динамические характеристики импульсных источников электропитания постоянного напряжения с входными фильтрами. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 219 с.

5. Дмитриков В.Ф., Коржавин О.А., Шушпанов Д.В. Устойчивость распределенной системы электропитания с учетом промежуточных фильтров // Практическая силовая электроника. 2010. № 4 (40). С. 28–35.
6. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
7. Шушпанов Д.В. Высокоэффективные импульсные преобразователи напряжения с ШИМ и распределенные системы электропитания на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб. 2005. 244 с.

References

1. Mjasnikov D.L., Voronoy A.A. Frequency response of a buck-down switching stabilizer. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki*, 2020, pp. 81–84. (In Russ.)
2. Voronoy A.A., Mjasnikov D.L., Kuz'menko A.A. Mathematical models of bifurcation processes in ISN. *Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvjaschennoj 160-letiju so dnja rozhdenija A.S. Popova*, 2019, pp. 302–310. (In Russ.)
3. Myasnikov D.L., Voronoy A.A. Evaluation of switching voltage regulator (SVR) stability when changing the switching frequency of the switch and the amplitude of the reference voltage. *VIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation»: proceedings of the conference*. Shawnee, USA, 2020, pp. 16–20.
4. Korzhavin O.A. *Dynamic Characteristics of DC Voltage Switching Power Supplies with Input Filters*. Moscow: Gorjachaja linija – Telekom, 2010, 219 p. (In Russ.)
5. Dmitrikov V.F., Korzhavin O.A., Shushpanov D.V. Stability of a distributed power supply system taking into account intermediate filters. *Prakticheskaja silovaja elektronika*, 2010, no. 4 (40), pp. 28–35. (In Russ.)
6. Dmitrikov V.F., Sergeev V.V., Samylin I.N. *Improving the Efficiency of Converting and Radio Engineering Devices*. Moscow: Radio i svjaz', 2005, 424 p. (In Russ.)
7. Shushpanov D.V. Highly Efficient Switching Voltage Converters with PWM and Distributed Power Supply Systems Based on Them. Diss. ... Cand. Tech. Sciences: 05.12.04 – «Radio engineering, including television systems and devices». Saint Petersburg, 2005, 244 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2021, vol. 24, no. 2, pp. 103–108

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.2.103-108

Received 23 May 2021
Accepted 24 June 2021

Influence of the switching frequency of the switch and the amplitude of the reference voltage of a pulsed voltage regulator of the lowering type on its stability

Danil L. Myasnikov¹, Roman S. Demidov², Yulia V. Sokolova¹

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

² Samara branch of the Research Institute for Fire Safety
48, Agibalova Street,
Samara, 443041, Russia

Abstract – On the basis of classical stability criteria, using the expressions of the transfer function, according to the block diagram, the stability of the impulse controller with feedback is estimated. The influence of the switching frequency of the switch and the amplitude of the reference voltage on the stability of a pulsed voltage regulator of a lowering type with deterministic parameters of the system is analyzed. In accordance with the Nyquist criterion for the transfer function of an open-loop system, both stability and phase stability margins for a closed-loop system can be estimated. When simulating the operation of the device, the phase stability margin was obtained, according to the Nyquist criterion, which is $\gamma_c = H = 7^\circ$. An increase in the sawtooth voltage is not a desirable phenomenon, which, although it increases the margin of stability, however, reduces stability. Moreover, the dependence of the ripple, affecting the stability of operation, on the amplitude of the sawtooth voltage is not a predictable value and takes on a random value.

Keywords – switching voltage regulator; stability margin; logarithmic frequency characteristics; pulse-width modulation.

Информация об авторах

Мясников Данил Львович, 1997 г. р., магистрант Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара, Россия. В 2019 г. окончил ПГУТИ по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», в том же году поступил в магистратуру ПГУТИ на специальность «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Область научных интересов: электропитание узлов связи, колориметрия, экология.

E-mail: danil1232011@mail.ru

Демидов Роман Сергеевич, 1982 г. р., руководитель Самарского филиала Научно-исследовательского института по обеспечению пожарной безопасности, г. Самара, Россия. Окончил Самарский государственный технический университет по специальности «Электроэнергетика. Электротехника. Профессиональное обучение» в 2004 г.

Область научных интересов: огнестойкость материалов, математическое моделирование, электропитание систем противопожарной защиты, оценка рисков.

E-mail: demidovr@mail.ru

Соколова Юлия Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: линейная макроскопическая электродинамика, устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов, антенно-фидерные устройства.

E-mail: ula.81.81@mail.ru

Information about the Author

Danil L. Myasnikov, born in 1997, master's student, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. In 2019, he graduated from the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics with a degree in Infocommunication Technologies and Communication Systems. In the same year, he entered the magistracy of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics with a degree in Infocommunication Technologies and Communication Systems.

Research interests: power supply of communication centers, colorimetry, ecology.

E-mail: danil1232011@mail.ru

Roman S. Demidov, born in 1982, head of the Samara branch of the Research Institute for Fire Safety, Samara, Russia. He graduated from Samara State Technical University with a specialty in «Electric power. Electrical engineering. Professional training» in 2004.

Research interests: fire resistance of materials, mathematical modeling, power supply of fire protection systems, risk assessment.

E-mail: demidovr@mail.ru

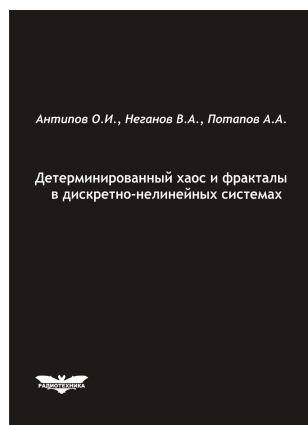
Yulia V. Sokolova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: linear macroscopic electrodynamics, microwave and EHF devices, antenna-feeder devices.

E-mail: ula.81.81@mail.ru

Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.



ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396
ББК 32.96

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.