

**БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕМКОСТИ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА**В. И. Апасов^{1*}, С. Г. Михальченко²¹АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 56в²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 74

*E-mail: vovaap@mail.ru

Важное место в различных областях техносферы занимают импульсные преобразователи, которые являются ключевыми элементами большинства промышленных, энергетических и транспортных установок и устройств. По этой причине их эффективность функционирования связана с эксплуатационными, энергетическими, надежностьвыми характеристиками преобразователей, резервы для повышения эффективности которых закладываются на стадии проектирования. В связи с этим все большую роль приобретает концепция нелинейной динамики, применение которой позволяет в полной мере реализовать все конструктивные возможности преобразователей.

Предметом исследования является комбинированный преобразователь со стабилизацией выходного напряжения. Цель данной работы – определение минимального и максимального значений емкости выходного фильтра преобразователя, при которых выходное напряжение преобразователя будет находиться в одноцикловом режиме. Предложена модель комбинированного преобразователя на основе численно-аналитического метода математического моделирования динамики полупроводниковых преобразователей, способного работать в качестве как понижающего, так и повышающего. Данный преобразователь обеспечивает одинаковую полярность входного и выходного напряжения, с возможностью получения выходного напряжения как больше входного, так и меньше, при меньших потерях на элементах и номиналов токов через транзисторы и диоды, в сравнении с импульсными преобразователями с разделительным конденсатором. Математическая модель дает возможность провести исследование, изучить его нелинейные динамические свойства, позволяет провести бифуркационный анализ, а также аналитически произвести поиск длительности управляющих импульсов коммутационных элементов, при которых работа преобразователя будет находиться в устойчивом режиме. Построены бифуркационные диаграммы выходного напряжения в зависимости от изменения емкости выходного фильтра, определен диапазон работы преобразователя в одноцикловом режиме, а также моменты перехода к многоцикловым режимам работы преобразователя. Определен диапазон изменения емкости выходного фильтра, обеспечивающей устойчивую работу преобразователя в различных режимах. Полученные данные могут быть использованы при проектировании устройств силовой электроники на основе преобразователя данного типа, в частности, при проектировании модулей систем электропитания космических аппаратов, для обеспечения их устойчивой работы с учетом постепенной деградации компонентов схемы.

Ключевые слова: математическое моделирование, комбинированный преобразователь, нелинейная динамика, бифуркационный анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 160–165**BIFURCATION ANALYSIS OF THE COMBINED CONVERTER AT CHANGE
OF CAPACITY OF THE OUTPUT FILTER**V. I. Apasov^{1*}, S. G. Mikhachenko²¹SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
74, Vershinina Str., Tomsk, 634045, Russian Federation

*E-mail: vovaap@mail.ru

The important place in various areas of a technosphere is occupied with pulse converters which are basic of the majority of industrial, power and transport installations and devices. For this reason their efficiency functioning is connected with operational, power, reliability characteristics of converters, reserves for which increase of efficiency are put on a design stage. In this connection the increasing role is got by the concept of the nonlinear dynamics which application allows us to realise all constructive possibilities of converter.

The object of the research is the combined converter with stabilisation of output voltage. The purpose of the given work is to define the minimum and maximum value of capacity of the output filter of the converter at which output voltage of the converter will be in an one-cyclic mode. The model of the combined converter on the basis of a numerically-analytical method of mathematical modeling of dynamics of the semi-conductor converters, capable to work as buck converter, as boost converter is offered. The given converter provides identical polarity of entrance and output voltage, with possibility of reception of output voltage both more entrance, and it is less, at smaller losses on elements and face values of currents through transistor and diodes, in comparison with pulse converters with the dividing condenser. The mathematical model gives the chance to conduct the research, to study its nonlinear dynamic properties, allows to spend bifurcation analysis, and also analytically to prospect duration of operating impulses of switching elements at which converter work will be in a steady mode. Bifurcation diagrammes of output voltage depending on change of capacity of the output filter are constructed, the range of work of the converter in an one-cyclic mode, and also the transition moments to multicyclic operating modes of the converter is defined. The range of change of capacity of the output filter providing steady work of the converter in various modes is defined. The obtained data can be used at designing of devices of power electronics on the basis of the converter of the given type, in particular at designing of modules of systems of power supplies of space vehicles, for maintenance of their steady work taking into account gradual degradation of components of the scheme.

Keywords: the mathematical modeling, the combined converter, nonlinear dynamics, bifurcation analysis.

Введение. Система электропитания космического аппарата представляет собой совокупность первичных и вторичных источников, электронных и электротехнических устройств, предназначенных для обеспечения бортовых потребителей электрической энергией заданного качества в штатных режимах [1]. Рассматриваемый комбинированный понижающе-повышающий преобразователь служит для построения силового модуля данной системы. Особенность его – получение выходного напряжения как ниже, так и выше напряжения входного источника [2; 3].

Важным аспектом создания любого устройства является его моделирование для дальнейшего исследования поведения в различных режимах работы [4]. Динамика замкнутых систем регулирования ключевого типа, к которым относится данный преобразователь, описывается нелинейными уравнениями кусочно-непрерывного типа для последующего применения бифуркационного подхода в анализе динамических режимов [5; 6]. Бифуркационный анализ позволяет определить теоретические границы изменения параметров системы (будь то индуктивность дросселя, коэффициент обратной связи, частота коммутации [7] и т. п.), при которых она будет находиться в устойчивом состоянии и при внешнем воздействии не изменит свои выходные параметры. В данном случае в качестве рассматриваемого параметра выбрана емкость выходного фильтра, которая может изменяться под влиянием внешних факторов.

На схеме замещения преобразователя (рис. 1) приняты следующие обозначения: $U_{вх}$ – входной источник ЭДС; $R_{вх}$ – сопротивление входного источника; K1, K2 – силовые коммутационные элементы; VD1, VD2 – силовые диоды; R_L – сопротивление обмоток дросселя; L – индуктивность дросселя; C – емкость выходного фильтра; R_n – сопротивление нагрузки; K_U – коэффициент передачи звена обратной связи; U_y – управляющее напряжение; α – коэффициент усиления пропорционального звена; $U_{p1}(t)$, $U_{p2}(t)$ – развертывающее напряжение (пилообразное), формируемое генераторами ГРН1, ГРН2; $\xi_1(U_C, t)$, $\xi_2(U_C, t)$ – коммутационные функции для управления ключами.

Математическая модель преобразователя представляет собой систему дифференциальных уравнений,

построенных в базисе коммутационно-разрывных функций [8], с переменными матрицами состояний **A** и **B** для каждого из возможных состояний схемы, зависящими от коммутационных функций $K_F(\xi)$:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}(K_F(\xi)), \quad (1)$$

где **X** – вектор переменных состояний.

В свою очередь, $\mathbf{X} = \{i_L, U_C\}$, где i_L – ток в дросселе; U_C – напряжение на выходном конденсаторе.

Данная математическая модель была рассмотрена ранее в [7; 9], где показана ее применимость для решения задач по поиску m -цикловых режимов работы преобразователя и описан алгоритм работы системы управления такой схемы. Управляющие импульсы напряжения K_F для каждого из ключей K1, K2 формируются блоком импульсного модулятора по закону, представленному на рис. 2:

$$K_F(\xi) = \frac{1}{2}[1 + \text{sign}(\xi)], \quad (2)$$

где функции обратной связи $\xi_i(\mathbf{X}, t)$, $i = 1, 2$, служащие аргументом коммутационных функций $K_{F1}(\xi_1)$ и $K_{F2}(\xi_2)$ для соответствующего ключа, строятся как разность сигнала ошибки и развертывающего напряжения:

$$\xi_i(U_C, t) = \alpha(U_y - \beta U_C) - U_{pi}(t), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Развертывающее напряжение каждой зоны формируется по закону

$$U_{pi}(t) = U_{pm} \left(\frac{t}{\tau} - E_1 \left(\frac{t}{\tau} \right) \right) + U_{0i}, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где U_{pm} – амплитудное значение развертывающего напряжения; τ – период квантования ШИМ; E_1 – целочисленная функция Антье; U_{0i} – отклонение развертывающего напряжения каждой зоны.

В системе управления применена многозонная модуляция для управления ключами K1, K2 с условием, что ключ повышающего преобразователя может переходить в замкнутое состояние только при условии, что ключ понижающего преобразователя находится

в замкнутом состоянии [10], а также учитывая, что коммутационные функции принимают единичное значение только в начале тактового интервала (рис. 2).

При моделировании принято, что преобразователь работает в режиме непрерывных токов и коммутаци-

онные функции формируются для обоих элементов $K1$ и $K2$, состояние же диодов $VD1$, $VD2$ противофазно коммутационным функциям соответствующих ключей.

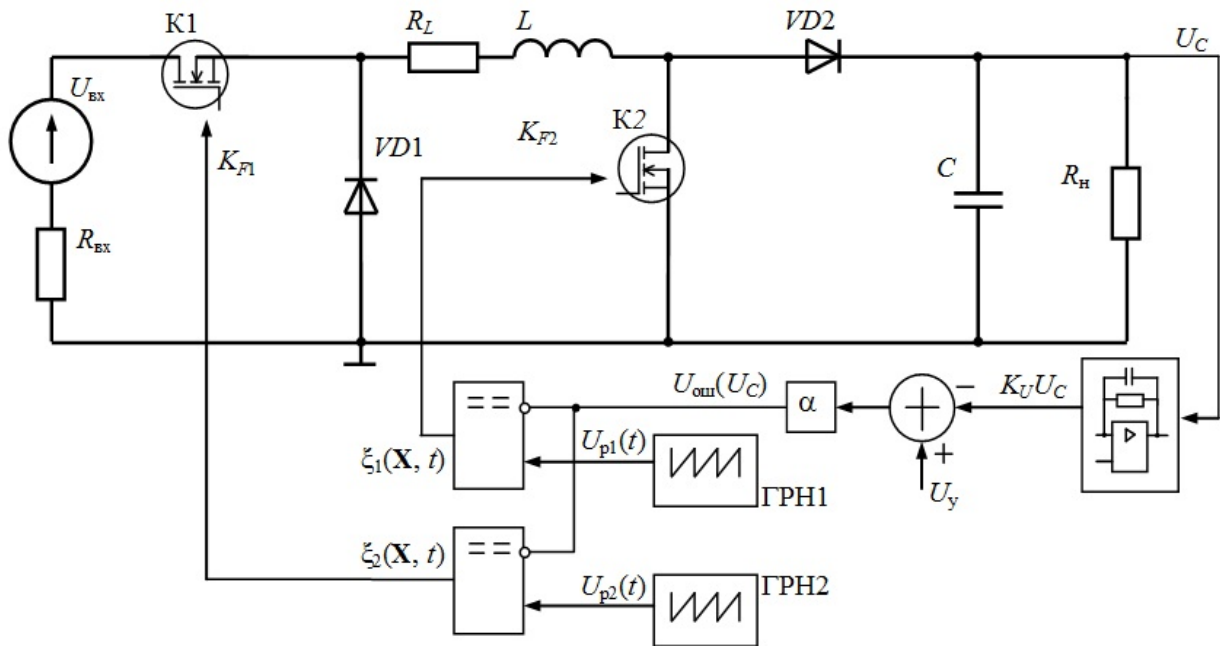


Рис. 1. Схема замещения понижающе-повышающего преобразователя со стабилизацией выходного напряжения

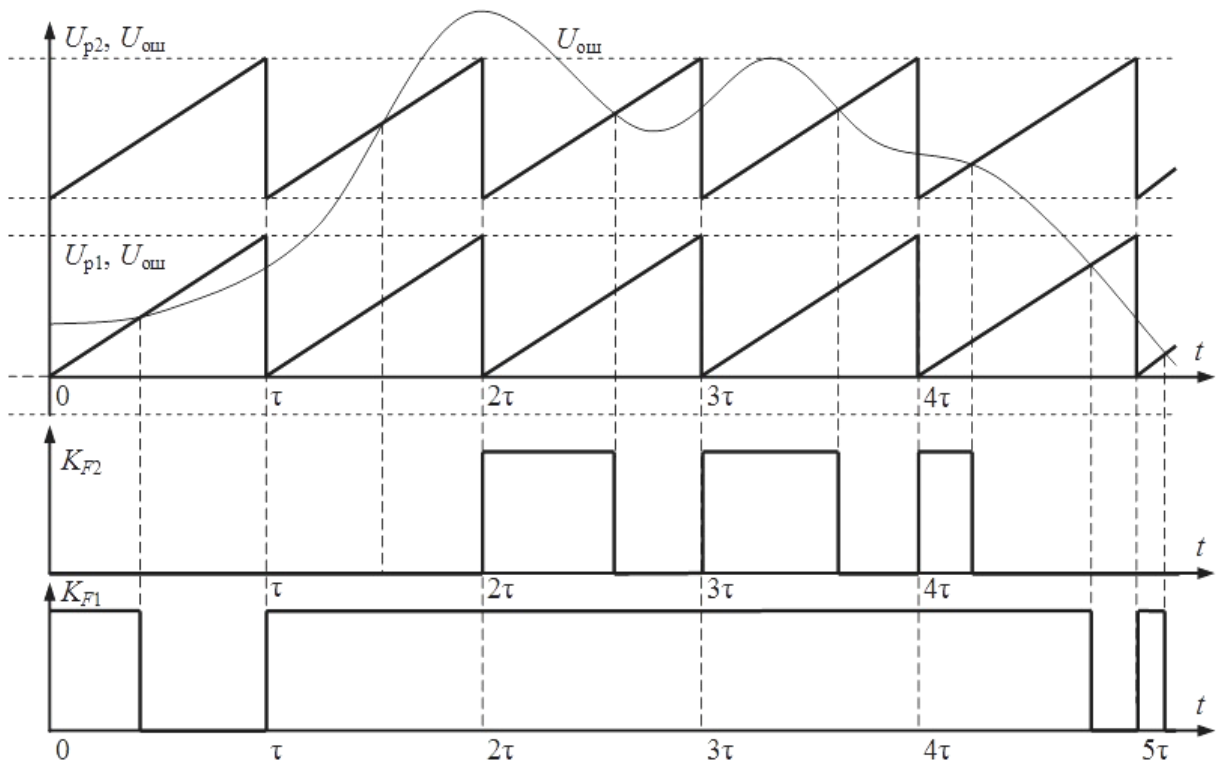


Рис. 2. Формирование коммутационных функций ключей $K1$, $K2$

Состояние ключей K1, K2 в зависимости от коммутационных функций $\xi_i(\mathbf{X}, t)$, $i = 1, 2$, определяется принципами формирования импульсной последовательности (см. таблицу):

1. Если функция обратной связи для ключа K1 положительная (сигнал ошибки выше функции соответствующего развертывающего напряжения), т. е. $\xi_1(\mathbf{X}, t) \geq 0$, и функция обратной связи ключа K2 также больше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) \geq 0$, то состояние коммутационных функций $K_{F1} = 0$; $K_{F2} = 0$.

2. Если функция обратной связи первого ключа меньше нуля, $\xi_1(\mathbf{X}, t) < 0$, а функция обратной связи второго ключа больше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) \geq 0$, то состояние функций $K_{F1} = 1$, $K_{F2} = 0$.

3. Если функция обратной связи для второго ключа становится меньше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) < 0$ (при функции обратной связи для первого ключа тоже меньше нуля, $\xi_1(\mathbf{X}, t) < 0$), то состояние функций $K_{F1} = 1$, $K_{F2} = 1$.

**Матрицы состояний А и В
для различных состояний ключей**

Состояние ключей	Матрица А	Матрица В
$K_{F1} = 0$; $K_{F2} = 0$	$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-(R_L + R_{BX})}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_H C} \end{bmatrix}$	$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{U_{BX}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$
$K_{F1} = 1$; $K_{F2} = 0$	$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_H C} \end{bmatrix}$	$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
$K_{F1} = 1$; $K_{F2} = 1$	$A_3 = \begin{bmatrix} \frac{-(R_L + R_{BX})}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_H C} \end{bmatrix}$	$B_3 = \begin{bmatrix} \frac{U_{BX}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$

Решение общей задачи поиска $\mathbf{X}$ ввиду кусочной линейности матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ может быть найдено аналитически – интегрированием системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) на участках линейности [11; 12]. Это решение на каждом интервале линейности при начальных условиях $\mathbf{X}((k-1)\tau) = \mathbf{X}_{k-1}$, где k – номер тактового периода ШИМ, может быть записано в виде

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}(t-(k-1)\tau)} (\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}) - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}, \quad (5)$$

где $e^{\mathbf{A}(t-(k-1)\tau)}$ – экспоненциальная матрица.

Вычислительные эксперименты проводились в программном пакете MathLab R2012 с возможностью математического программирования. Для этого с использованием полученной математической модели была написана специальная программа. При проведении вычислительных экспериментов приняты следующие параметры модели: $R_{BX} = 0,1$ Ом; $L = 1$ мГн; $R_L = 10$ мОм; $U_{оп} = 6,3$ В; $U_{pm} = 1,5$ В; $\alpha = 1,5$; $f = 50$ кГц. Параметры U_{BX} , R_{BX} и C являются варьируемыми величинами. В результате исследований получены бифуркационные диаграммы выходного

напряжения преобразователя с активной нагрузкой (рис. 3–6).

Переход выходного напряжения из одноциклового режима в десятицикловый без изменения входных параметров и элементов схемы (рис. 7) свидетельствует о возможности перехода преобразователя в неустойчивое рабочее состояние под влиянием внешнего воздействия [13]. Поиск устойчивых стационарных режимов следует искать из аналитического решения уравнений (2)–(5) [14; 15].

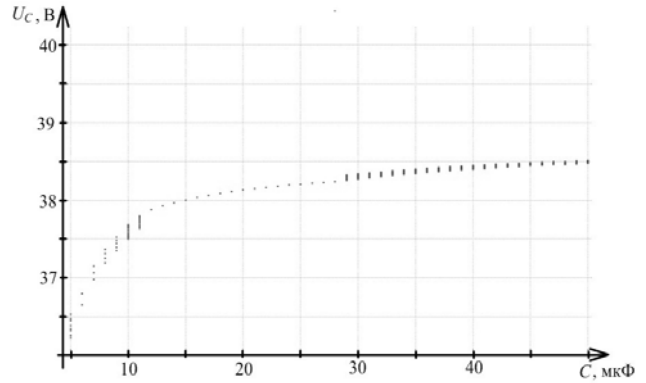


Рис. 3. Бифуркация напряжения на конденсаторе комбинированного преобразователя в зависимости от емкости выходного фильтра в режиме понижения ($U_{BX} = 60$ В)

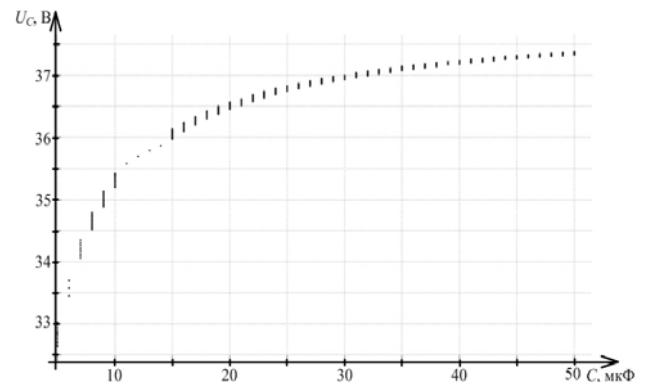


Рис. 4. Бифуркация напряжения на конденсаторе комбинированного преобразователя в зависимости от емкости выходного фильтра в режиме повышения ($U_{BX} = 30$ В)

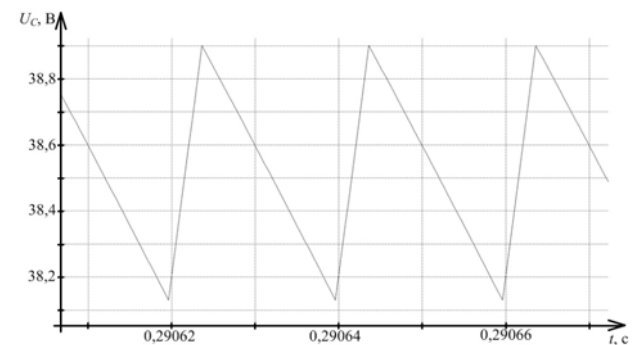


Рис. 5. Напряжение на выходном фильтре, одноцикловый режим

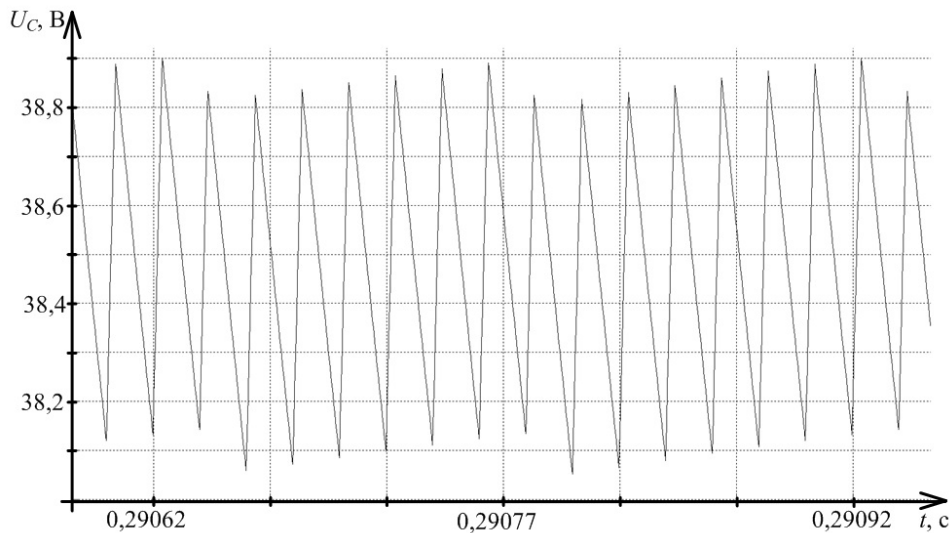


Рис. 6. Напряжение на выходном фильтре, пятнадцатикольный режим

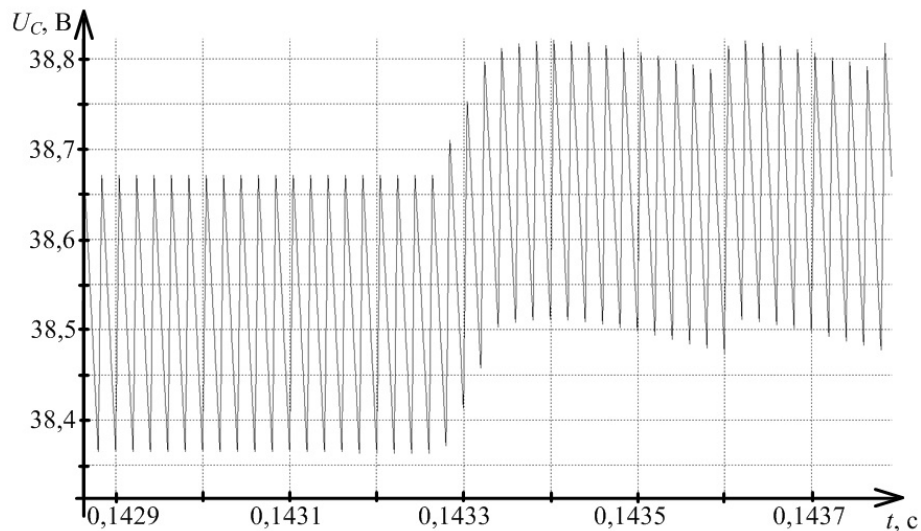


Рис. 7. Напряжение на выходном фильтре, момент перехода из одноциклового режима в десятицикловый

Таким образом, в состоянии повышения комбинированный преобразователь работает в одноцикловом режиме при изменении емкости выходного фильтра от 10 до 15 мкФ. В состоянии понижения он имеет одноцикловый режим работы при изменении емкости фильтра от 12 до 28 мкФ.

Закключение. Исследование показывает, что при проектировании импульсного преобразователя необходимо проводить глубокий анализ влияния изменения внутренних параметров на его выходные характеристики. Также показано, что с помощью предложенной математической модели возможно проведение анализа комбинированного преобразователя со стабилизацией выходного напряжения при исследовании устойчивости его работы. Так, для комбинированного преобразователя с параметрами, приведенными выше, следует выбирать емкость выходного фильтра в диапазоне от 12 до 15 мкФ с целью обеспечения его работы в устойчивом режиме.

Библиографические ссылки

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма, 1994. 318 с.
2. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2006. 632 с.
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. 664 с.
4. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1986. 376 с.
5. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 59–68.
6. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т., Михальченко С. Г. Стохастичность в динамике стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1996. № 3. С. 69–75.

7. Апасов В. И. Выбор частоты коммутации широтно-импульсной модуляции системы управления понижающе-повышающего преобразователя напряжения // Научная сессия ТУСУР-2014 : материалы докладов. 2014. С. 161–164.

8. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А. В. Кобзев [и др.]. Томск : Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. 224 с.

9. Апасов В. И., Михальченко С. Г., Коцубинский В. П. Математическое моделирование комбинированного преобразователя напряжения со стабилизацией выходного напряжения // Докл. ТУСУР. 2013. № 4(30). С. 96–102.

10. Кобзев А. В., Михальченко Г. Я., Музыченко Н. М. Модуляционные источники питания РЭА. Томск : Радио и связь, 1990. 336 с. ISBN 5-253-00515-4.

11. Михальченко С. Г. Автоматизация анализа и синтез импульсных преобразователей энергии с двухполярной реверсивной модуляцией : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2001. 200 с.

12. Эрроусмит Д., Плейс Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями : пер. с англ. М. : Мир, 1986. 243 с.

13. Теория автоматического управления. Ч. 1, 2. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А. А. Воронова. М. : Высш. шк., 1986.

14. Оценка нелинейных динамических свойств полупроводниковых преобразователей с дозированием энергии по коэффициентам пульсаций тока и напряжения / К. В. Бородин [и др.]. // Научный вестник НГТУ. 2012. № 2(47). С. 79–90.

15. Михальченко С. Г. Функционирование импульсно-модуляционных преобразователей в зонах мультистабильности // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1(25), ч. 1. С. 259–268.

References

1. Souctin B. P. et al. *Systemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Systems of power supplies of space vehicles]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 318 p.

2. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [The transistor converting mechanics]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2006, 632 p.

3. Zinovyev G. S. *Osnovy silovoy elektroniki: uchebnoe posobie* [Bases of power electronics: the manual]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2003, 664 p.

4. Moin V. S. *Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli* [The stabilised transistor converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 376 p.

5. Baushev V. S. [About not determined modes of functioning of a voltage stabilizer with pulse-width regulation]. Moscow, *Electrichestvo*. 1992, vol. 8, p. 59–68 (In Russ.).

6. Baushev V. S., Gusubaliev G. T., Mihalchenko S. G. [Stochasticity in dynamics of a voltage stabilizer with pulse-width regulation]. Moscow, *Electrichestvo*. 1996, vol. 3, p. 69–75 (In Russ.).

7. Apasov V. I. [Choice of frequency of switching of pulse-width modulation of a control system of the buck-boost converter of voltage] *Nauchnaya sessiya TUSUR*. 2014, vol. 3, p. 161–164 (In Russ.).

8. Kobzev A. V., Mihalchenko G. Y., Andriyanov A. I., Mihalchenko S. G. *Nelineynaya dinamika poluprovodnikovyykh preobrazovateley* [Nonlinear dynamics of semiconductor converters]. Tomsk, Tomsk state university of control systems and radioelectronics Publ., 2007, 224 p.

9. Apasov V. I., Mihalchenko S. G., Kotsubinsky V. P. [Mathematical modeling of the combined converter of pressure with stabilisation of output voltage]. *Sbornik TUSUR*. 2013, vol. 30, no. 4, p. 96–102 (In Russ.).

10. Kobzev A. V., Mihalchenko G. Y., Muzychenko N. M. *Modulatsionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies REA]. Tomsk, Radio i svyaz' Publ., 1990, 150 p.

11. Mihalchenko S. G. *Avtomatizatsiya analiza i sintez impulsnykh preobrazovateley energii s dvukhpolyarnoy reversivnoy modulatsiey. Dis. kand. tekhn. nauk* [Automation of the analysis and synthesis of pulse converters of energy with two-polar reversible modulation. The diss. of Cand. Tech. Sci.]. Bryansk, 2001, 200 p.

12. Errousmith D. *Obyknovennye differentsialnye uravneniya. Kachestvennaya teoriya s prilogeniyami* [Ordinary differential the equations. The qualitative theory with appendices]. Moscow, Mir Publ., 1986, 243 p.

13. Voronov A. A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The automatic control theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986.

14. Borodin K. V., Mihalchenko G. Y., Mihalchenko S. G., Obrusnik V. P. [Estimation of nonlinear dynamic properties of semi-conductor converters with energy dispensing on factors of pulsations of a current and voltage]. *Nauchnyy vestnik NGTU*. 2012, vol. 47, no. 2, p. 79–90 (In Russ.).

15. Mihalchenko S. G. [Functioning of impulsive and modulation converters in multistability zones]. *Sbornik TUSUR*. 2012, vol. 25, no. 1, p. 259–268 (In Russ.).