

Куреной Альберт Викторович,
аспирант

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДЕЛЯХ БАЗОВЫХ СХЕМ КЛЮЧЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, globatech@yandex.ru

Аннотация. Проведён анализ моделей основных схем ключевых преобразователей постоянного тока: понижающей (buck), повышающей (boost) и инвертирующей (buck-boost). Указаны наиболее значимые источники нестационарности и их влияние на поведение системы. Выполнено моделирование схемы повышающего преобразователя с учетом нестационарности индуктивного элемента. Сформулированы уточняющие элементы моделей, позволяющие строить управляющие контроллеры повышенной точности и ускоренной сходимости расчётных значений и реального поведения системы.

Ключевые слова: ключевой преобразователь электроэнергии постоянного тока, повышающий преобразователь, понижающий преобразователь, инвертирующий преобразователь, нестационарность, MATLAB Simulink, усреднённая модель в пространстве состояний.

Albert V. Kurenoi,
Postgraduate Student

ANALYSIS OF NON-STATIONARY ELEMENTS IN MODELS OF BASIC CIRCUITS OF DC/DC POWER CONVERTERS

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
globatech@yandex.ru

Abstract. The analysis of the average state-space models of the main circuits of the DC/DC converters (buck, boost and buck-boost) is conducted. The most significant sources of non-stationarity and their influence on the behavior of the system are indicated. The simulation of the boost converter circuit is performed taking into account the non-stationarity of the inductive element. The clarifying elements of the models are formulated, which make it possible to build controllers with increased accuracy and accelerated convergence of calculated values and the real behavior of the system.

Keywords: DC/DC power converter, boost converter, buck converter, buck-boost converter, non-stationarity, MATLAB Simulink, average state-space model.

Введение

В основе разработки методов управления базовыми схемами ключевых преобразователей электроэнергии, таких как понижающий (BUCK) [6], повышающий (BOOST) [12], инвертирующий или понижающий-повышающий (BUCK-BOOST) [15], преобразователь Чука (CUC) [11], SEPIC [12], ZETA [2, 14] лежат электрические схемы. Степень упрощения этих схем в процессе моделирования определяет баланс между простотой математического описания системы и точностью воспроизведения реальных процессов.

Для математического описания преобразователей в большинстве случаев применяют усреднённые модели в пространстве состояний [9], с идеализацией и линеаризацией параметров электронных компонентов, что позволяет воссоздать характер поведения системы, достаточный для разработки закона управления, но ограничивает точность описания переходных процессов. Обратной стороной упрощения модели является длительное время выхода системы управления в заданную точку регулирования и необходимость существенного запаса устойчивости. С целью повышения точности моделей вводятся замещающие схемы элементов, призванные учитывать паразитные параметры электронных компонентов [5, 7, 8, 10, 13]. Однако уделяется недостаточно внимания нестационарности параметров накопителей энергии – емкостных и индуктивных элементов.

Для целей настоящей статьи используются идеальные ключи (диоды, транзисторы); конденсаторы и индуктивности не обладают паразитными параметрами, но оценивается влияние свойств материалов реактивных компонентов на поведение системы.

Под ключевым преобразователем понимается метод преобразования электроэнергии посредством коммутации силовых ключей (диодов, транзисторов) между состояниями «полностью включен» – «полностью выключен», что отличает данный тип преобразователей от линейных и не связан с ключевыми (имитационными) моделями, определёнными в [1]. В литературе также встречается наименование описываемых преобразователей «импульсные», которое является смысловым синонимом «ключевые».

Рассмотрим некоторые модели ключевых преобразователей.

Понижающий преобразователь (BUCK). Схема понижающего преобразователя представлена на рисунке 1.

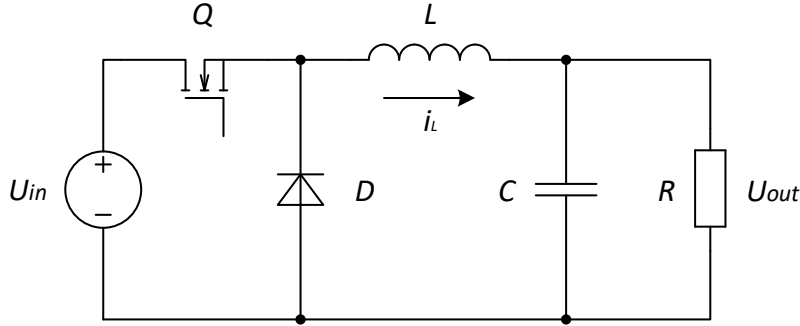


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема ключевого понижающего преобразователя (BUCK): U_{in} – входное напряжение, Q – управляемый ключ, D – диод, L – индуктор со средним током i_L , C – накопительная емкость, R – сопротивление нагрузки, U_{out} – выходное напряжение

Учитывая равенство напряжений на конденсаторе U_C и в нагрузке U_{out} , используя правила Кирхгофа и усредняя состояния системы в моменты включенного $u \cdot T$ и отключенного $(1-u) \cdot T$ ключа Q , где T – период цикла, а u – доля времени, в течение которого ключ Q находится в открытом состоянии, определяется следующая система уравнений усреднённого состояния понижающего преобразователя [6]:

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_L}{dt} = -U_C + U_{in} \cdot u, \\ C \cdot \frac{dU_{out}}{dt} = i_L - \frac{U_{out}}{R}. \end{cases} \quad (1)$$

Повышающий преобразователь (BOOST). Схема повышающего преобразователя представлена на рисунке 2.

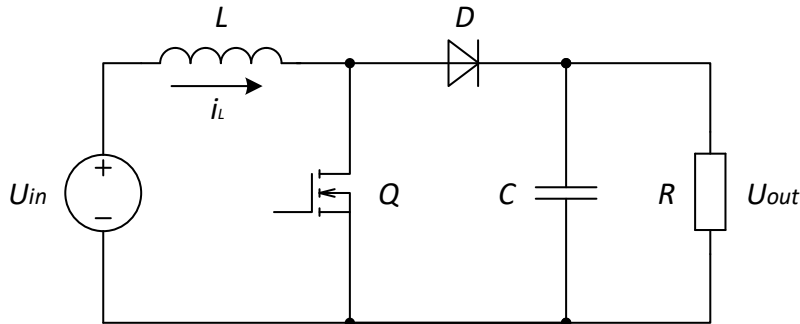


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема ключевого повышающего преобразователя (BOOST)

По методике аналогичной понижающему преобразователю, записывается система уравнений (2) усреднённого состояния повышающего преобразователя [13].

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -U_{out} \cdot (1 - u) + U_{in}, \\ C \frac{dU_{out}}{dt} = i_L \cdot (1 - u) - \frac{U_{out}}{R}. \end{cases} \quad (2)$$

В данной модели ключи Q и D также считаются идеальными, а параметры L и C постоянными.

Инвертирующий преобразователь (BUCK-BOOST). Схема инвертирующего преобразователя представлена на рисунке 3.

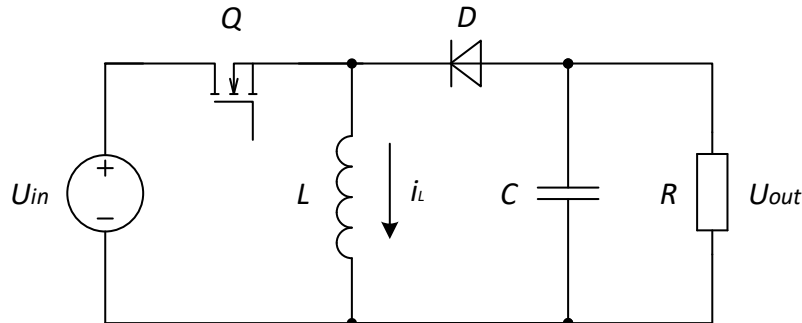


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема ключевого инвертирующего преобразователя (BUCK-BOOST)

Аналогично вышеприведённым преобразователям, может быть записана система уравнений усредненного состояния инвертирующего преобразователя [10, 15]:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_{out} \cdot (1 - u) + U_{in} \cdot u, \\ C \frac{dU_{out}}{dt} = i_L \cdot (1 - u) - \frac{U_{out}}{R}. \end{cases} \quad (3)$$

Как видно из представленных моделей (1)–(3) базовых схем ключевых преобразователей, параметры L и C считаются постоянными.

1. Постановка задачи

На практике известно, что элементы схем ключевых преобразователей электроэнергии могут обладают нелинейностью и нестационарностью. В частности, при использовании керамических конденсаторов с диэлектриком $X7R$, обладающим отличными диэлектрическими свойствами, следует учитывать зависимость их ёмкости C от приложенного напряжения [3].

$$C = f(U_C). \quad (4)$$

На рисунке 4 представлена зависимость ёмкости керамического чип-конденсатора в корпусе 1812, с номинальной ёмкостью 2,2 мкФ и максимальным рабочим напряжением 100 В от приложенного напряжения.

Также нестационарность и нелинейность параметров может проявлять индуктивный элемент L . В частности, в порошковых магнитопроводах системы (Al-Si-Fe) наблюдается зависимость индуктивности от протекающего тока [4].

$$L = f(i_L) \quad (5)$$

На рисунке 5 представлено изменение начальной относительной магнитной проницаемости $\mu = 125$ материала Kool M μ магнитопровода в зависимости от напряжённости магнитного поля. Значение относительной магнитной проницаемости оказывает непосредственное влияние на индуктивность.

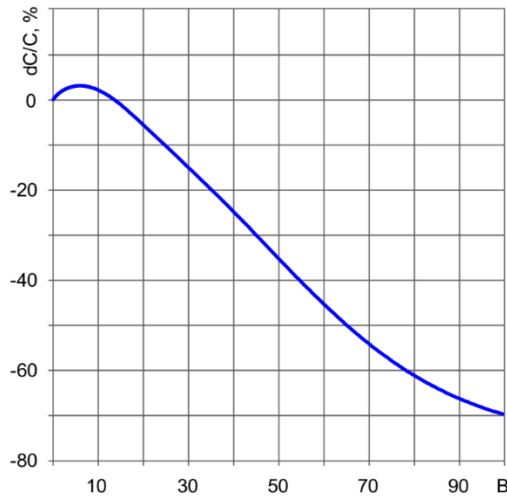


Рис. 4. Зависимость удельной ёмкости dC/C керамического чип-конденсатора от приложенного напряжения

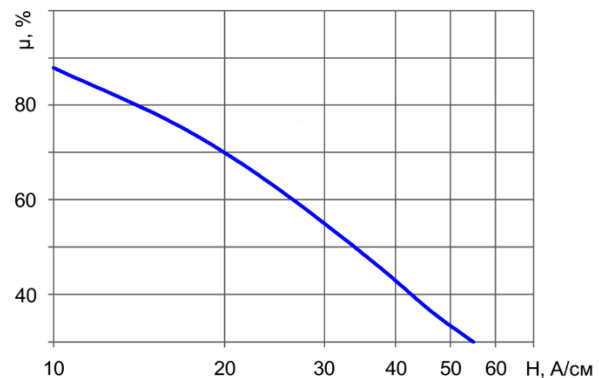


Рис. 5. Зависимость начальной магнитной проницаемости материала Kool M μ от напряжённости магнитного поля H

Рассмотрим модель повышающего преобразователя с учётом нестационарности параметров L и C накопителей энергии.

2. Моделирование нестационарной системы

Учитывая нестационарности элементов L и C рассматриваемых преобразователей, систему уравнений состояний для повышающего преобразователя можно записать в виде:

$$\begin{cases} L(i_L) \cdot \frac{di_L}{dt} = -U_{out} \cdot (1 - u) + U_{in}, \\ C(U_{out}) \cdot \frac{dU_{out}}{dt} = i_L \cdot (1 - u) - \frac{U_{out}}{R}. \end{cases} \quad (6)$$

Проведём моделирование повышающего преобразователя в программной среде MATLAB Simulink на рабочей частоте 125 кГц, с коэффициентом заполнения $u = 0,73$, входным напряжением $U_{in} = 10,8$ В, постоянной выходной ёмкостью $C = 2,6$ мкФ. После 5 мс ток нагрузки R уменьшается с 5 до 0,5 А (сброс нагрузки), а после 8 мс обратно увеличивается с 0,5 до 5 А. В ходе моделирования рассматриваются два случая. Первый – индуктивность является константой $L = 130$ мкГн, второй – под воздействием протекающего тока в 5 А индуктивность падает в два раза по сравнению со случаем протекания тока 0,5 А. Графики выходного напряжения U_{out} , характеризующие реакцию системы без обратной связи, представлены на рисунке 6.

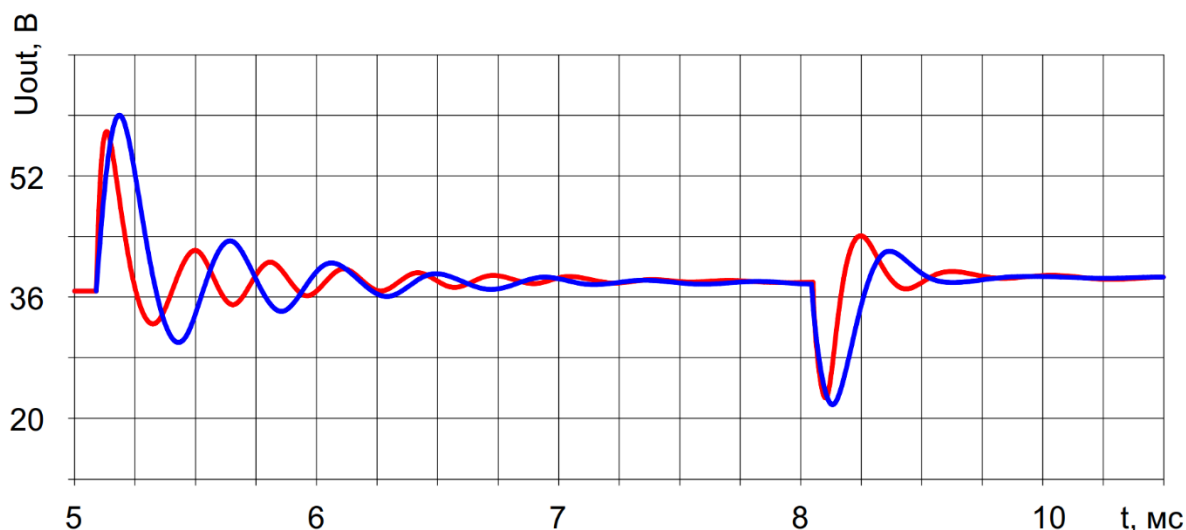


Рис.6. Влияние изменения индуктивности L от протекающего тока i_L на выходное напряжение U_{out} при сбросе/набросе нагрузки: синий – $L = const$, красный – $L = f(i_L)$

3. Анализ полученных результатов

Данные, представленные на рисунке 6, указывают на существенное изменение динамики системы при учёте нестационарности L . Частота переходного процесса изменилась на 30 %, а амплитуда – на 10 %. Подобным способом можно продемонстрировать и влияние нестационарности C . Таким образом, построение оптимальной системы управления преобразователями требует учёта нестационарности параметров, которые оказывают существенное влияние на реакцию системы на возмущения.

Заключение

Введение нестационарных элементов в модели систем заметно усложняет их анализ и разработку управляющего контроллера. Однако решение этой задачи позволяет повысить качество оптимального управления ключевыми преобразователями электроэнергии.

Натурная проверка и аналитический анализ влияния нестационарных параметров понижающего, повышающего и инвертирующего преобразователей будут проведены в будущих исследованиях.

Список литературы

1. Амелина М. А., Амелин С. А. Построение непрерывных моделей импульсных преобразователей постоянного напряжения // Практическая силовая электроника. – 2019. – № 3(75).
2. Битюков В. К., Лавренов А. И., Малицкий Д. А. Математическая модель DC/DC преобразователя, построенного по ZETA топологии (часть 1) // Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – № 4. – С. 53–57.
3. Каталог чип-конденсаторов компании Tayo Yuden [Электронный ресурс]. – URL: <https://ds.yuden.co.jp/TYCOMPAS/eu/specificationSearcher?SR2=MP%2CLM&cid=C&u=M> (дата обращения: 10.06.2024).

4. Каталог порошковых магнитопроводов компании Magnetics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mag-inc.com/Media/Magnetics/File-Library/Product%20Literature/Powder%20Core%20Literature/Magnetics-Powder-Core-Catalog-2024.pdf> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Филина А. В., Журавков К. В. Конструирование и анализ моделирования нелинейных процессов DC-DC преобразователя // В сборнике: Молодежь и XXI век – 2024. Сборник научных статей 13-й Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. – Курск, 2024. – С. 448–452.
6. Gupta M., Phulambrikar S. P. Design and analysis of buck converter // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – Vol. 3. – Issue 3 (March, 2014).
7. Haibo Du, Yingying Cheng, Yigang He, Ruting Jia. Finite-time output feedback control for a class of second-order nonlinear systems with application to DC–DC buck converters // Nonlinear Dyn. – 2014. – Vol. 78. – Pp. 2021–2030. – DOI:10.1007/s11071-014-1593-9.
8. Mantzanas P., Bayrakdar E., Kübrich D., Dürbaum T. A novel detailed analysis of the boost converter utilizing nonlinear inductance and capacitance // PCIM Europe 2018, Nuremberg, Germany, 5–7 June 2018. – 2018.
9. Middlebrook R. D., Cuk S. A general unified approach to modeling switching-converter power stages // International Journal of Electronics. – 1977. – Vol. 42 (June 1977). – Pp. 521–550.
10. Nwosu C. A. State-space averaged modeling of a nonideal boost converter // Pacific Journal of Science and Technology. – 2008. – Vol. 9(2). – Pp. 302–308.
11. Ćuk S. A new zero-ripple switching DC-to-DC converter and integrated magnetics // In: IEEE Transactions on Magnetics. – 1983. – Vol. 19. – No. 2 (March 1983). – Pp. 57–75. – DOI:10.1109/TMAG.1983.1062238.
12. Vorpérian V. Analysis of the Sepic converter [Electronic resource] / Ridley Engineering Inc., www.switchingpowermagazine.com, 2006. – URL: https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/234/Sepic-Analysis.pdf (access date: 10.06.2024).
13. Vratislav M., Cottin D., Arno P. Boost DC/DC converter nonlinearity and RHP-zero: survey of the control-to-output transfer function linearization methods // International Conference on Applied Electronics (AE 2016), University of West Bohemia, Plzen, Czech Republic, 2016. – ISBN 978-80-261-0602-9. – DOI:10.1109/AE.2016.7577229.
14. Vuthchhay E., Bunlaksananusorn C. Modeling and control of a Zeta converter // The 2010 International Power Electronics Conference – ECCE ASIA, Sapporo, Japan, 2010. – IEEE, 2010. – Pp. 612–619. – DOI:10.1109/IPEC.2010.5543332.
15. Zhou Xuelian, He Qiang. Modeling and simulation of buck-boost converter with voltage feedback control // MATEC Web of Conferences. – Vol. 31 (January 2015). – P. 10006. – DOI:10.1051/mateconf/20153110006.