

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.3.08

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Д. В. Якушов¹, Е. А. Печерская²

¹Промышленно-коммерческая фирма «Полет», Заречный, Пензенская обл., Россия

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹hammer.fate@yandex.ru, ²iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является обратноходовой преобразователь. Предметом исследования является влияние эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) конденсаторов на передаточную характеристику каскада преобразования. Целью является выявление необходимости учета ЭПС конденсаторов на этапе разработки обратноходового преобразователя. *Материалы и методы.* Для определения влияния ЭПС конденсаторов на передаточную характеристику каскада преобразования используется малосигнальная модель Кристофа Бассо. *Результаты.* В результате было выявлено сильное влияние ЭПС конденсаторов на частотах, выше ноля передаточной функции, образованного ЭПС конденсаторов, в особенности в области субгармонических осцилляций. *Выводы.* Установлено, что на этапе проектирования источника питания крайне важно учитывать ЭПС конденсаторов и обеспечить устойчивую работу источника питания при любых возможных его значениях.

Ключевые слова: преобразование, конденсаторы, питание, устойчивость, характеристика, частота

Для цитирования: Якушов Д. В., Печерская Е. А. Влияние эквивалентного последовательного сопротивления выходных конденсаторов на передаточную функцию обратноходового преобразователя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 61–66. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

INFLUENCE OF EQUIVALENT SERIES RESISTANCE OF OUTPUT CAPACITORS ON THE TRANSFER FUNCTION OF FLYBACK CONVERTER

D.V. Yakushov¹, E.A. Pecherskaya²

¹Industrial and commercial company "Polyot", Zarechny, Penza region, Russia

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹hammer.fate@yandex.ru, ²iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of study is a flyback converter. The subject of the study is the influence of the equivalent series resistance (ESR) of capacitors on the transfer characteristic of the conversion stage. The goal is to identify the need to take into account the ESR of capacitors at the stage of development of a flyback converter. *Materials and methods.* To determine the influence of the ESR of capacitors on the transfer characteristic of the conversion stage, the small-signal model of Christophe P. Basso is used. *Results.* As a result, a strong influence of the ESR of capacitors was revealed at frequencies above the zero of the transfer function formed by the ESR of capacitors, especially in the region of subharmonic oscillations.

Conclusions. It has been established that at the design stage of a power supply it is extremely important to take into account the ESR of capacitors and ensure stable operation of the power supply at any possible value.

Keywords: conversion, capacitors, power supply, stability, characteristic, frequency

For citation: Yakushov D.V., Pecherskaya E.A. Influence of equivalent series resistance of output capacitors on the transfer function of flyback converter. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):61–66. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

Введение

Источник питания – важнейший элемент любой системы, предназначенный для преобразования электрической энергии. От качества источника питания зависит работа всей системы. Наиболее распространенным видом преобразователя питания является обратноходовой преобразователь. Обратногоходовой преобразователь обладает рядом преимуществ: малое количество компонентов, а значит, и невысокая стоимость, высокая надежность, компактность, наличие гальванической развязки, нечувствительность к короткому замыканию в нагрузке. Однако основным недостатком является ограниченная мощность – обратноходовые преобразователи рационально применять до мощности 100 Вт. На более высоких мощностях требуются компоненты, позволяющие пропускать через себя значительные токи, и коэффициент полезного действия (КПД) такого преобразователя становится менее 80 %. Таким образом, если требуется гальваническая развязка первичной и вторичной цепей, то до мощности 100 Вт обратноходовой преобразователь – лучшее решение. Широкое распространение обратноходовых преобразователей привело к изготовлению специальных микросхем, на основе которых реализуются обратноходовые преобразователи. Наиболее распространенные из них – TOPSwitch, TINYswitch и т.д. При применении готовых микросхем требуется минимальное количество внешних компонентов – силовой транзистор, генератор, регулирующие элементы уже встроены в саму микросхему. Как и любой источник питания, обратноходовой преобразователь требует точного и правильного расчета контура обратной связи. Устойчивость работы напрямую зависит от корректности данного расчета [1].

Работа обратноходового преобразователя

Основным элементом обратноходового преобразователя является трансформатор. Данный трансформатор также называют многообмоточным дросселем ввиду того, что в отличие от прямоходового преобразователя данный трансформатор передает энергию, запасенную при открытии транзистора, на вторичную сторону. Обмотки гальванически развязаны и любой обратноходовой трансформатор имеет как минимум две обмотки – первичную и вторичную. Также часто применяют обмотку самопитания для обеспечения питания ШИМ-контроллера первичной («горячей») стороны. Если количество формируемых напряжений более одного, то количество обмоток дросселя увеличивается на количество дополнительных выходов напряжения [2]. Название «обратноходовой» означает, что энергия передается на обратном ходу, т.е. когда силовой ключ закрыт. На рис. 1 изображен силовой каскад.

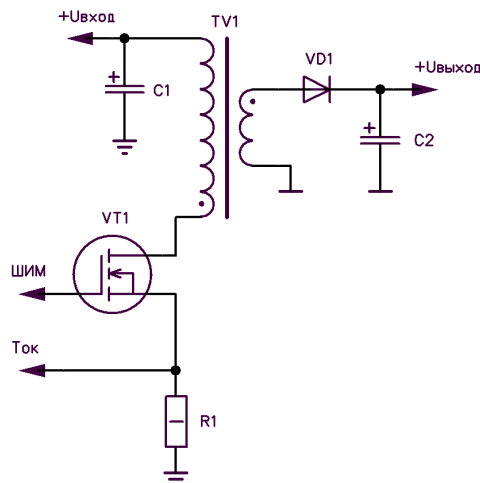


Рис. 1. Силовой каскад обратноходового преобразователя

На прямом ходу транзистор VT1 открыт, ток через первичную обмотку TV1 линейно нарастает, в сердечнике трансформатора TV1 запасается энергия за счет нарастания магнитного потока, диод VD1 находится в обратном смещении, а значит, ток через вторичную обмотку не протекает. На обратном ходу транзистор VT1 закрывается и за счет противофазного включения первичной и вторичной обмоток происходит прямое смещение диода VD1, энергия передается из вторичной обмотки через диод VD1 в конденсатор C2. Из рис. 1 видно, что обратногододовой преобразователь для работы требует один транзистор, один диод, выходной конденсатор и трансформатор, что и является его основным преимуществом (простота реализации). Выходное напряжение регулируется за счет соотношения времени открытия и закрытия транзистора VT1. Из рис. 1 также видно, что конденсатор C2 является важным элементом обратногододового преобразователя, а значит, его характеристики будут влиять на работу всего источника питания в целом [1].

Конденсаторы наряду с их наиболее известными параметрами, такими как емкость и напряжение имеют множество других параметров – эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС или ESR), эквивалентная последовательная индуктивность, импульсный ток (ripple current) и так далее. Все эти параметры оказывают влияние на работу обратногододового преобразователя.

Каскад преобразования обратногододового преобразователя

В основе работы большинства обратногододовых преобразователей лежит управление по пиковому току. В пределах каждого цикла переключения силового транзистора происходит ограничение импульсного тока. Величина токового порога ограничения задается, как правило, усилителем ошибки напряжения (в контуре ОС), напряжение с выхода которого поступает на инвертирующий вход токового компаратора (рис. 2).

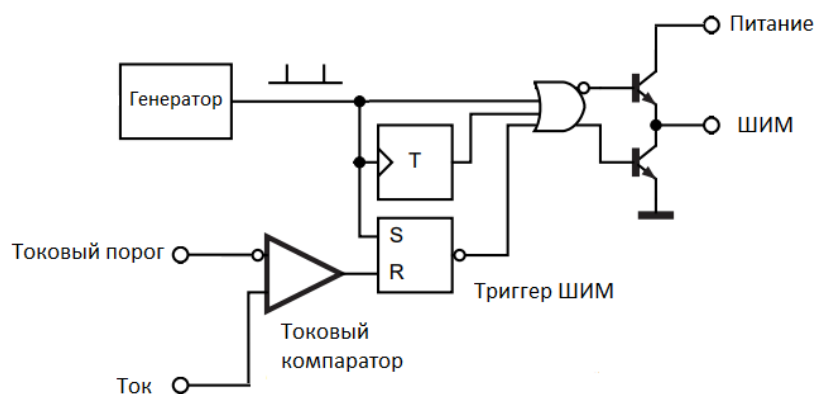


Рис. 2. Структура цепей управления обратногододового преобразователя

На рис. 2 показано, как сигнал «ШИМ» поступает непосредственно на затвор силового полевого транзистора VT1 (рис. 1). Сигнал «Ток» поступает на вход токового компаратора непосредственно с шунта, стоящего в истоке силового полевого транзистора (рис. 1). Совокупность токового компаратора, генератора, триггера ШИМ, силового транзистора, трансформатора, диода, выходного конденсатора образует каскад преобразования, обладающего передаточной характеристикой. Каскад преобразования рассматривается как четырехполюсник, вход которого – сигнал токового порога, а выход – напряжение выхода обратногододового преобразователя [3]. Цепи коррекции контура обратной связи, оптрона и т.д. в каскад преобразования не входят.

Передаточная характеристика каскада преобразования

Передаточная характеристика каскада преобразования описывается следующей формулой:

$$H(s) = A_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 - \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{\left(1 - \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_n Q_p} + \frac{s^2}{\omega_n^2}\right)}, \quad (1)$$

где A_C – усиление по постоянному току, ω_{z1} – циклическая частота нуля передаточной функции, образованного ЭПС конденсаторов, ω_{z2} – циклическая частота нуля правой полуплоскости, ω_{p1} – циклическая частота главного полюса, ω_n – циклическая частота субгармонических осцилляций, Q_p – добротность преобразователя на частоте субгармонических осцилляций [3].

Усиление по постоянному току A_C в формуле (1) не имеет частотной зависимости, а значит, выходные конденсаторы не оказывают влияние на эту величину. Составляющие ω_{p1} и Q_p зависят только от характера работы преобразователя, скважности и скоростей нарастания токового сигнала и сигнала коррекции его наклона. Ноль правой полуплоскости ω_{z2} также не имеет зависимости от выходных конденсаторов. Главный полюс образован работой источника тока (управление по пиковому току) на емкостную нагрузку и зависит от величины емкости выходных конденсаторов, скважности и т.д.. Зависимость от величины ЭПС конденсаторов имеет только величина ω_{z1} , что описывает выражение (1):

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_{ESR} C_{out}}, \quad (2)$$

где R_{ESR} – эквивалентное последовательное сопротивление выходных конденсаторов; C_{out} – емкость выходных конденсаторов [4].

АЧХ каскада преобразования

Для примера будет рассмотрен обратноходовой преобразователь, имеющий следующие параметры: выходное напряжение – 3,3 В, выходной ток – 10 А, входное напряжение – 24 В, индуктивность первичной обмотки трансформатора – 82 мкГн, соотношение витков трансформатора – 26:5, сопротивление токового шунта – 180 мОм, емкость выходных конденсаторов – 4700 мкФ, частота преобразования – 100 кГц. В условиях, что эквивалентное последовательное сопротивление выходных конденсаторов равно 10 мОм, передаточная функция примет вид, изображенный на рис. 3.

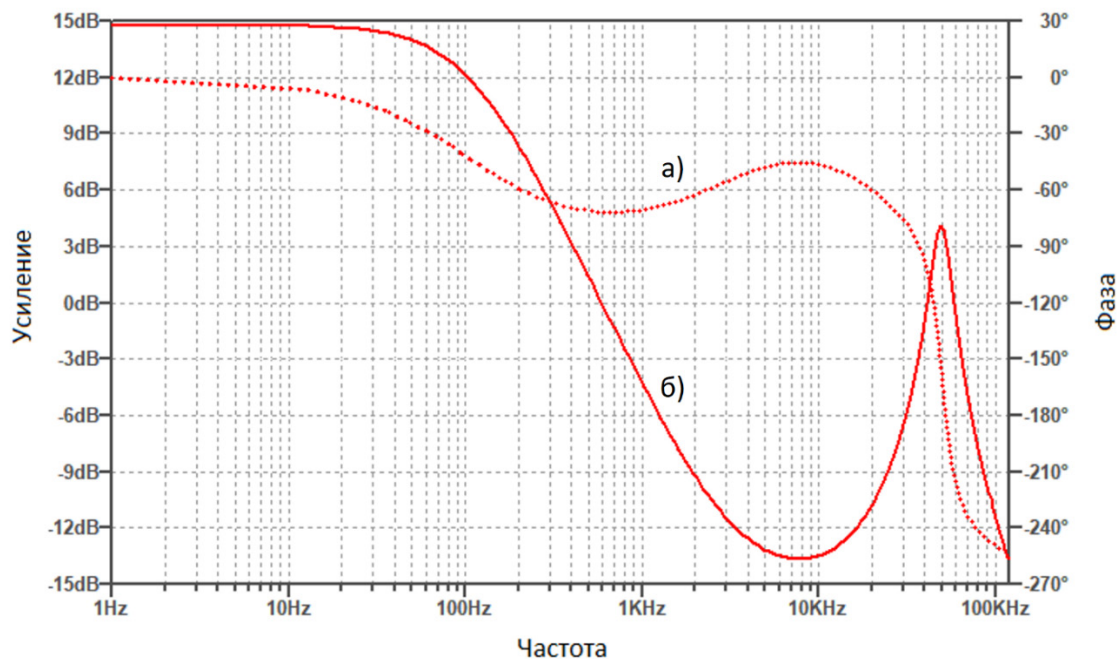


Рис. 3. Передаточная функция с ЭПС 10 мОм:
а – ФЧХ; б – АЧХ

На рис. 3 хорошо виден пик субгармонических осцилляций, в данном примере подразумевается, что коррекции наклона токовой пилы нет. При увеличении величины ЭПС в 5 раз до 50 мОм передаточная функция примет вид, изображенный на рис. 4.

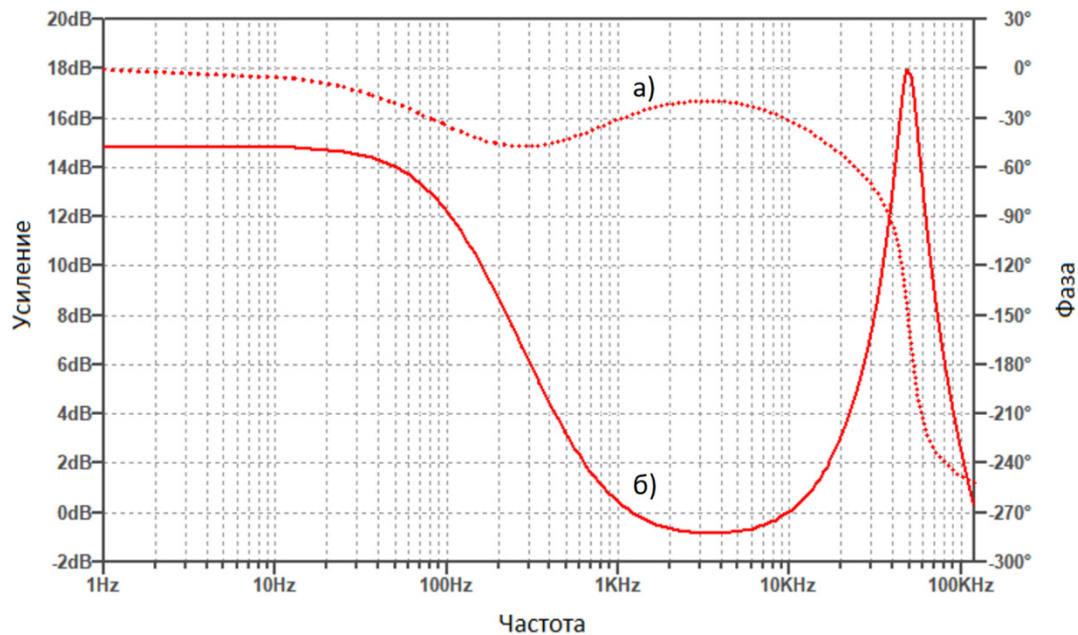


Рис. 4. Передаточная функция с ЭПС 50 мОм:
a – ФЧХ; *б* – АЧХ

Из рис. 4 видно, что характеристика сильно изменила свою форму, пик субгармонических осцилляций достигает 18 дБ, вместо 4 дБ в случае с ЭПС, равным 10 мОм. Также сильно изменилось усиление на частотах выше нуля ω_{z1} . В данном примере для наглядности показано сильное изменение ЭПС (в 5 раз), однако даже незначительное изменение ЭПС может оказать влияние на устойчивость работы всего обратноходового преобразователя.

Проектирование цепей коррекции АЧХ должно производиться таким образом, чтобы источник питания оставался устойчивым во всем возможном диапазоне ЭПС конденсаторов из-за изменения температуры, технологического разброса, старения. Разработчику необходимо оценить пределы изменения ЭПС конденсаторов и обеспечить минимальный запас по фазе 45° на частоте единичного усиления и минимальный запас по усилению 10 дБ в месте, где характеристика достигает 180° во всем возможном диапазоне ЭПС выходных конденсаторов [5].

Заключение

Величина ЭПС конденсаторов способна оказывать значительное влияние на устойчивость работы обратноходового преобразователя. На этапе проектирования необходимо оценить пределы изменения ЭПС и обеспечить выполнения критериев устойчивости во всем его диапазоне. ЭПС может значительно изменяться в ходе температурных отклонений. Также немаловажным является увеличение ЭПС в ходе старения конденсаторов. Игнорирование этих факторов может вызывать самовозбуждение преобразователя, а значит, снижение качества формируемого напряжения, повышение помех и, возможно, выход из строя всего устройства.

Список литературы

1. Brown M. Power Supply Cookbook (EDN Series for Design Engineers). London : George Newnes Ltd, 2001. 280 p.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М. : Мир, 1982. 512 с.
3. Basso C. Transfer functions of switching converters. Apache Junction : Stairway Press, 2021. 704 p.
4. Basso C. Switch-mode power supplies. SPICE Simulations and Practical Designs. New York : McGraw-Hill Professional, 2008. 889 p.
5. Rozenblat L. Switching Power Supply Design: A Concise Practical Handbook. North Charleston : Independently Published, 2021. 110 p.

References

1. Brown M. *Power Supply Cookbook (EDN Series for Design Engineers)*. London: George Newnes Ltd, 2001:280.

2. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika = Semiconductor circuit engineering*. Moscow: Mir, 1982:512. (In Russ.)
3. Basso C. *Transfer functions of switching converters*. Apache Junction : Stairway Press, 2021:704.
4. Basso C. *Switch-mode power supplies. SPICE Simulations and Practical Designs*. New York: McGraw-Hill Professional, 2008:889.
5. Rozenblat L. *Switching Power Supply Design: A Concise Practical Handbook*. North Charleston: Independently Published, 2021:110.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Викторович Якушов

ведущий инженер-схемотехник,
конструкторское бюро,
Промышленно-коммерческая фирма «Полет»
(Россия, Пензенская область, г. Заречный,
пр-д Индустриальный, б);
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: hammer.fate@yandex.ru

Dmitry V. Yakushov

Leading circuit engineer,
design bureau,
Industrial and Commercial Company "Polyot"
(6 Industrialny passage, Zarechny,
Penza region, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 19.03.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2024

Принята к публикации / Accepted 17.05.2024