

В.Ф. Зотин

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)
V.F. Zotin (Bryansk, Bryansk State Technical University)**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСХЕМ
ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ****DETERMINATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MICROCIRCUITS
OF PULSED VOLTAGE CONVERTERS**

Предложен способ определения частотных характеристик микросхем импульсных преобразователей постоянного напряжения. С помощью компьютерного моделирования обоснована возможность технической реализации предложенного способа в виде контрольно-измерительного устройства.

A method for determining the frequency characteristics of microcircuits of pulsed DC-DC converters is proposed. Using computer modeling, the feasibility of the technical implementation of the proposed method in the form of a control and measuring device is substantiated.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователи, частотные характеристики, запас устойчивости, LTSpice, контур управления.

Keywords: DC / DC converters, frequency characteristics, stability margin, LTSpice, control loop.

В источниках питания различных электронных устройств и систем широко применяются импульсные преобразователи постоянного напряжения (DC/DC-преобразователи). Для определённого диапазона мощности популярным является «однокристальное» решение в виде микросхемы с включением в её состав силовых элементов – ключевых транзисторов и диодов. Базовыми для применения указанных микросхем являются схемы понижающего или повышающего DC/DC-преобразователей.

На рис.1 приведена схема понижающего DC/DC-преобразователя. Основными элементами микросхемы являются источник опорного напряжения V_{REF} , усилитель сигнала ошибки (регулятор) EA и широтно-импульсный модулятор M, управляющий переключателем входного напряжения преобразователя.

Дополнительно в схему

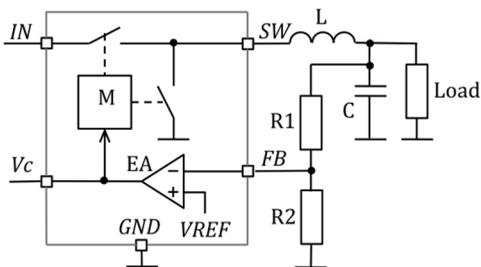


Рис. 1. Схема понижающего DC/DC- преобразователя

преобразователя входят LC-фильтр подавления пульсаций выходного напряжения и цепь обратной связи R1, R2. Микросхемы, предназначенные для преобразователей с фиксированным выходным напряжением, имеют встроенную цепь обратной связи.

Микросхемы как понижающих, так и повышающих DC/DC-преобразователей могут содержать также дополнительные узлы различного функционального назначения.

Приведённая на рис. 1 структура представляет собой одноконтурную замкнутую систему стабилизации напряжения на нагрузке. Она может также содержать простейший внутренний контур управления током силового ключа. Синтез такой системы предполагает решение задачи обеспечения устойчивости и требуемого качества процессов, связанных с возмущениями как со стороны источника питания, так и со стороны нагрузки преобразователя. Задача синтеза является достаточно сложной, что обусловлено зависимостью параметров регулятора EA и модулятора M в составе микросхемы, а также параметров LC-фильтра (рис. 1) от внешних возмущений. Поэтому обычно предусматривается подключение внешних корректирующих элементов (вывод V_c на рис. 1) с возможностью варьирования их параметров.

Перечисленные факторы указывают на преимущественный способ синтеза контура управления DC/DC-преобразователем на основе экспериментальных данных [1, 2]. Однако на начальном этапе проектирования целесообразно использование программных инструментов (например LTpowerCAD) и симуляторов (LTSpice, OrCAD и др.).

Широкое распространение получили частотные методы исследования динамики DC/DC-преобразователей, поскольку они позволяют определять такие показатели, как запасы устойчивости по фазе и амплитуде, колебательность, полосу пропускания системы. Эти динамические показатели определяются амплитудной и фазовой частотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ) разомкнутого контура управления, полученными суммированием характеристик всех компонентов, образующих контур. Контур включает компоненты в составе микросхемы: регулятор с встроенной или внешней цепью коррекции, модулятор и переключатель. Он содержит также внешние компоненты: фильтр подавления пульсаций с нагрузкой и цепь обратной связи (при её отсутствии в составе микросхемы).

АЧХ и ФЧХ соответствуют режиму «малого» сигнала для линеаризованных систем. Обеспечение такого режима для компонентов в составе микросхемы DC/DC-преобразователя – непростая задача с учётом значительного коэффициента усиления постоянной составляющей сигнала обратной связи.

Один из вариантов решения этой задачи предполагает применение типовой схемы DC/DC-преобразователя с замкнутым контуром регулирования выходного напряжения при включении в контур источника тестовых сигналов [3, 4]. При этом обеспечивается стабилизация постоянных

составляющих сигналов в контуре. Недостатками этого варианта являются невозможность определить характеристики модулятора и значительная погрешность при определении запасов устойчивости по фазе и амплитуде из-за значительного коммутационного шума.

Автор предлагает определять частотные характеристики микросхем DC/DC-преобразователей по схеме, которая в среде симулятора LTspice приведена на рис. 2. Объектом исследования служит микросхема U1 понижающего DC/DC-преобразователя LT1576.

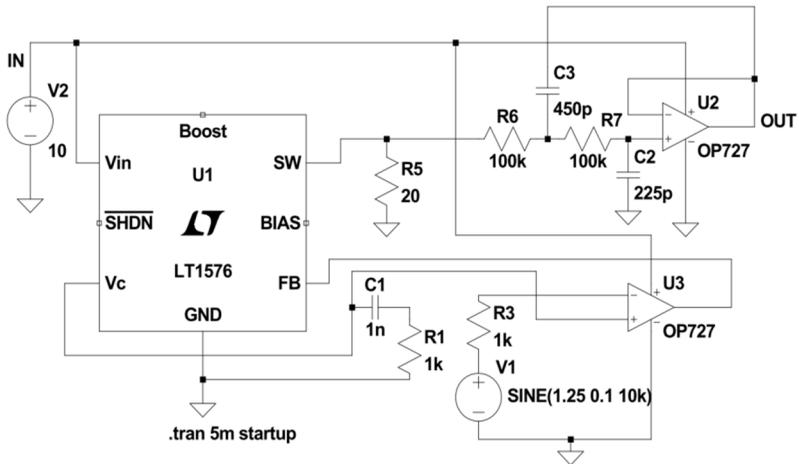


Рис. 2. Имитационная схема устройства частотного анализа

В схеме отсутствует основной контур регулирования напряжения, а стабилизация постоянных составляющих сигналов достигается применением вспомогательного операционного усилителя U3. С его помощью формируется также тестовый сигнал для определения частотных характеристик микросхемы. Опорное напряжение источника V1, содержащее постоянную составляющую (1,25 В) и синусоидальную составляющую (амплитуда 0,1 В, частота 10 кГц), воспроизводится на выходе регулятора EA в составе микросхемы U1 (вывод Vc). Элементы C1, R1 реализуют типовую для преобразователя цепь частотной коррекции. Ещё один операционный усилитель U2 вместе с элементами R6, C3, R7, C2 образует активный фильтр нижних частот второго порядка с передаточной функцией $W(s) = 1 / (R_6 R_7 C_3 C_2 s^2 + C_2 (R_6 + R_7) s + 1)$. При указанных на рис. 2 параметрах R6, C3, R7, C2 имеем фильтр Баттерворта с граничной частотой 5 кГц.

Частотные характеристики микросхемы U1 определяются с помощью серии экспериментов при изменении частоты тестового сигнала (синусоидальной составляющей источника V1) и регистрации напряжений на выводах FB, Vc и OUT.

АЧХ усилителя ошибки (регулятора) с учётом внешней корректирующей цепи определяется соотношением

$$K_{EA}(f) = 20 \log[V_{Vc}(f)/V_{FB}(f)],$$

где V_{Vc} и V_{FB} – амплитуды сигналов соответственно на выводах микросхемы V_c и FB .

АЧХ модулятора с переключателем определяется с учётом характеристики $K_{\Phi}(f)$ активного фильтра нижних частот:

$$K_M(f) = 20 \log[V_{OUT}(f)/V_{Vc}(f)] - K_{\Phi}(f).$$

Здесь V_{OUT} – амплитуда выходного сигнала фильтра.

АЧХ микросхемы определяется суммой АЧХ компонентов:

$$K_{IC}(f) = K_{EA}(f) + K_M(f).$$

ФЧХ компонентов определяется временным сдвигом Δt_{O-I} выходного сигнала O по отношению к входному сигналу I . Для усилителя ошибки

$$\varphi_{EA}(f) = \Delta t_{Vc-FB} f \cdot 360^\circ.$$

Для модулятора с переключателем

$$\varphi_M(f) = \Delta t_{OUT-Vc} f \cdot 360^\circ - \varphi_{\Phi}(f).$$

ФЧХ микросхемы определяется суммой ФЧХ компонентов:

$$\varphi_{IC}(f) = \varphi_{EA}(f) + \varphi_M(f).$$

Результаты серии экспериментов по схеме рис. 2 и соответствующих расчётов приведены в таблице.

Таблица. Результат частотного анализа микросхемы *LT1576*

f, кГц	0,5	1	2	5	10	20	50
K_{EA} , дБ	50,4	48	43	35,4	30	23,6	16
K_M , дБ	19	19	19	16	6,4	-5,2	-20
K_{IC} , дБ	69,4	67	62	51,4	36,4	18,4	-4
φ_{EA}	146 ⁰	93 ⁰	110 ⁰	101 ⁰	95 ⁰	101 ⁰	106 ⁰
φ_M	2 ⁰	-1 ⁰	2 ⁰	0 ⁰	1 ⁰	5 ⁰	-2 ⁰

Аналогичная схема определения частотных характеристик применима и для микросхем DC/DC-преобразователей повышающего типа. Она отличается способом включения нагрузочного резистора (R_5 на рис. 2).

Список литературы

1. *Ali, H.* Frequency response measurements of dc-dc buck converter / H. Ali [et al.] // IEEE International conference on information and automation. – 2015. – pp. 2233-2237.
2. *R. Ridley.* Frequency Response Measurements for Switching Power Supplies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/267855326_Frequency_Response_Measurements_for_Switching_Power_Supplies – Дата доступа 05.05.2019.
3. *F. Dostal.* Measure Power-supply Loop Transfer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edn.com/design/test-and-measurement/4385974/Measure-power-supply-loop-transfer-4385974>. Дата доступа 05.05.2019.
4. *Henry J. Zhang.* Modeling and Loop Compensation Design of Switching Mode Power Supplies. Analog Devices [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN149fa.pdf> (дата обращения 05.05.2019).

Материал поступил в редколлегию 10.10.19.