

Макромодель микросхемы TOPSwitch

Вячеслав Морозов (г. Ростов-на-Дону)

Представленная в статье макромодель микросхемы серии TOPSwitch® позволяет исследовать в программе Pspice динамические характеристики обратноходового преобразователя, выполненного на основе данной модели. Параметры модели преобразователя вводятся непосредственно из технических описаний микросхем, активных и пассивных элементов, что позволяет легко адаптировать модель к конкретному варианту схемы.

Микросхемы серии TOPSwitch® [1] пользуются популярностью как среди профессиональных разработчиков сетевых импульсных источников питания, так и среди радиолюбителей, благодаря наличию удобных программ для расчёта и оптимизации силовой части источников питания. Методика расчёта [2] и программа PI-Expert позволяют рассчитать статические характеристики источника питания, выполненного по обратноходовой схеме (flyback), однако оставляют открытым вопрос о его динамических характеристиках, таких, например, как область устойчивой работы источника или влияние на выходное напряжение резкого изменения тока нагрузки. Основная трудность при анализе динамических характеристик обратноходового преобразователя заключается в наличии двух возможных режимов работы – с непрерывным током (CCM) и с разрывным током (DCM), передаточные функции которых существенно отличаются друг от друга [3].

Методы анализа, основанные на составлении уравнений для непре-

рывной модели и линеаризации их в рабочей точке [4], позволяют получить передаточную функцию в аналитической форме, однако требуют значительного объёма вычислительных операций. Использование компьютерных программ моделирования позволяет существенно сократить время анализа схемы за счёт того, что значительную часть рутинной работы – составление системы уравнений и линеаризацию их в рабочей точке – программа выполняет автоматически. Предлагаемые далее описательные модели (макромодели) микросхемы TOPSwitch и обратноходового преобразователя на её основе представлены в виде простых и понятных разработчику эквивалентных схем, пригодных для работы с любыми программами, использующими формат Pspice (DesignLab, Orcad и др.). При этом большая часть параметров модели преобразователя задаётся непосредственно из технических описаний микросхем, активных и пассивных элементов, что позволяет легко адаптировать модель к конкретному варианту схемы.

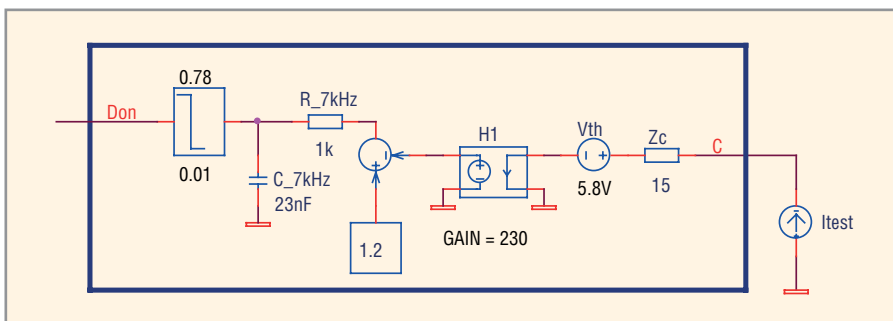


Рис. 1. Модель схемы управления TOPSwitch

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ TOPSwitch

Модель схемы управления TOPSwitch показана на рисунке 1. Входом модели является вход управления С микросхемы, а выходом – коэффициент заполнения D_{on} , выраженный в единицах напряжения, поскольку Pspice не позволяет моделировать безразмерные величины.

Как следует из описания, схема управления TOPSwitch активизируется при напряжении на управляющем входе С, превышающем пороговое значение 5,8 В. В модели схемы управления этот порог задан источником напряжения V_{th} . Последовательно с ним включено динамическое сопротивление Z_c (параметр Dynamic Impedance), влияющее на динамические характеристики преобразователя.

В рабочем режиме схема управления TOPSwitch изменяет коэффициент заполнения в зависимости от тока, протекающего через вход управления С. В модели схемы управления это описывается источником напряжения, управляемым током H1 и вычитающим устройством. Коэффициент передачи GAIN источника H1 задаётся параметром PWM Gain, типовое значение которого равно 230 (23%/mA).

Резистор R_7kHz и конденсатор C_7kHz образуют низкочастотный фильтр с частотой среза 7 кГц согласно параметру CONTROL Pin Internal Filter Pole.

Ограничитель задаёт максимальный коэффициент заполнения, равный 0,78 (параметр Maximum Duty Cycle).

Для считывания регулировочной характеристики «ток управления – коэффициент заполнения» к входу С подключен источник тока Itest. На рисунке 2 приведена регулировочная характеристика модели, полученная в режиме DC sweep при изменении тока Itest от 1 до 6 мА, а на рисунке 3 приведена та же характеристика, взя-

тая из описания микросхем серии TOPSwitch [1, Fig. 7].

Сравнение графиков показывает достаточно близкое соответствие регулировочных характеристик модели схемы управления TOPSwitch и микросхем TOP242-5 для режима работы с максимальным коэффициентом заполнения 78%.

Модель обратноходового преобразователя

На рисунке 4 показана макро-модель микросхемы TOPSwitch в обратноходовом преобразователе по схеме [5]. В модель включены также паразитные элементы – эквивалентные последовательные сопротивления конденсаторов и дросселя, обозначенные соответственно RC и RL.

Схема, показанная на рисунке 4, содержит:

- модель схемы управления TOPSwitch;
- модели оптопары F_{opto} и усилителя ошибки G_{TL431};
- непрерывные модели трансформатора T1 и ключевых элементов – диода и транзистора – UI;

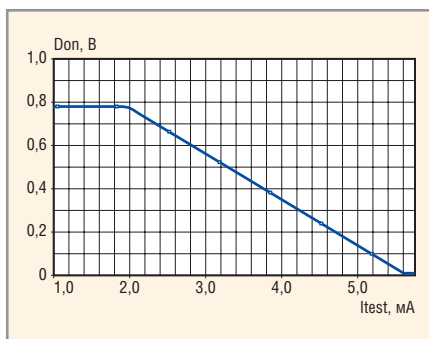


Рис. 2. Регулировочная характеристика модели схемы управления TOPSwitch

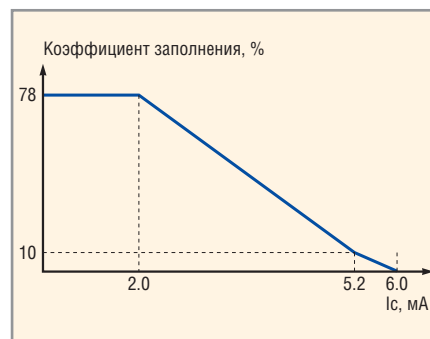


Рис. 3. Регулировочные характеристики микросхем TOP242 – TOP250

- тестовые сигналы AC для малосигнального частотного анализа и Transient – для анализа переходных процессов.

Модели оптопары и усилителя ошибки

Многие производители микросхем, полупроводниковых и оптоэлектронных приборов размещают описания Pspice-моделей на своих интернет-страницах. Описания можно создавать и самостоятельно, пользуясь методикой, приведённой в [6].

Основными параметрами, необходимыми при моделировании оптопары, являются коэффициент передачи по току CTR и время задержки сигнала между входом и выходом T_{fall}. На рисунке 4 оптопара моделируется источником тока, управляемым током F_{opto}, коэффициент передачи которого GAIN определяется согласно справочному значению CTR; в данном примере, для ISP817C, – от 2 до 4 (от 200 до 400%). Падение напряжение на светодиоде оптопары моделируется

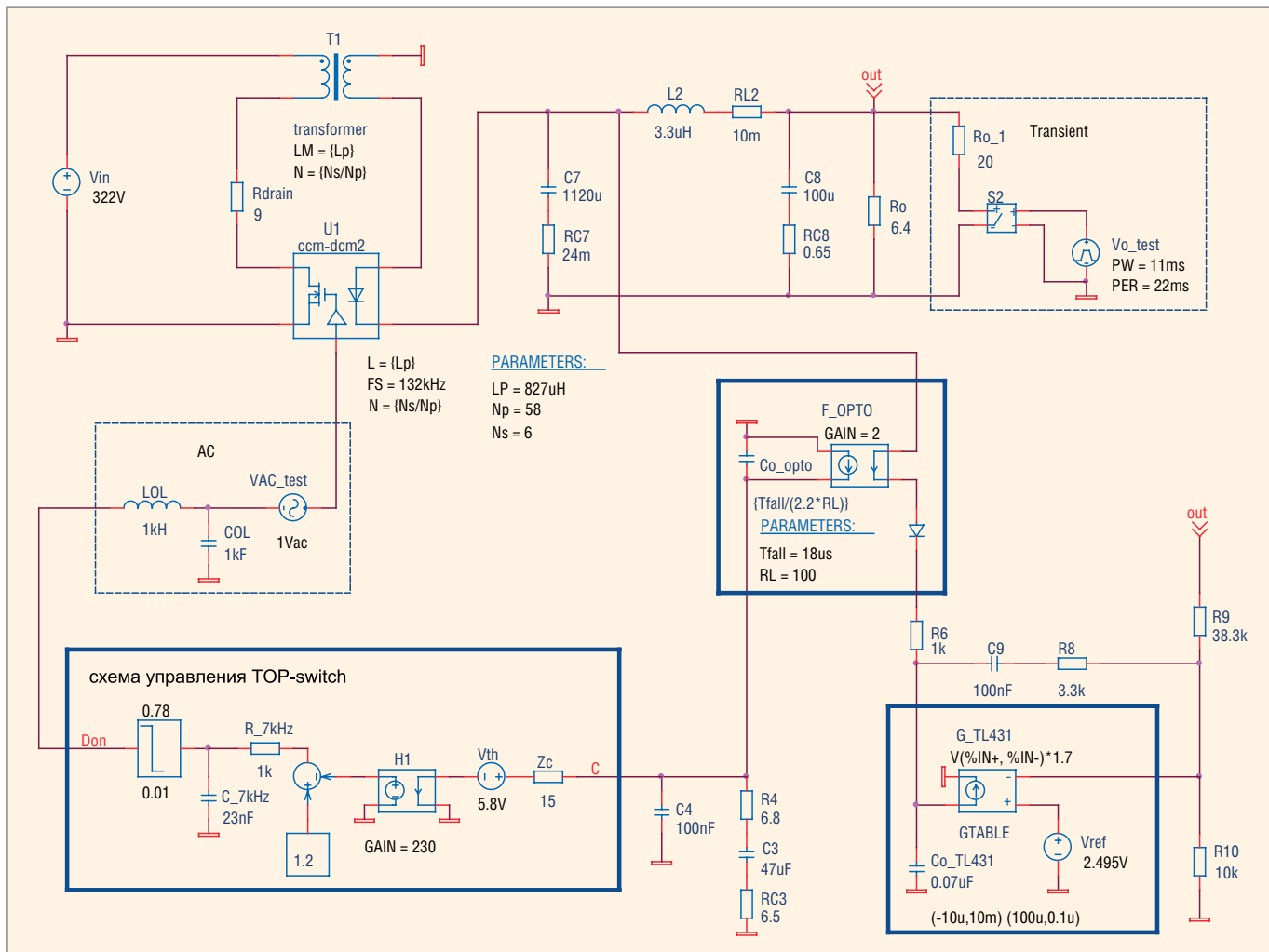


Рис. 4. Макромодель микросхемы TOPSwitch в обратноходовом преобразователе

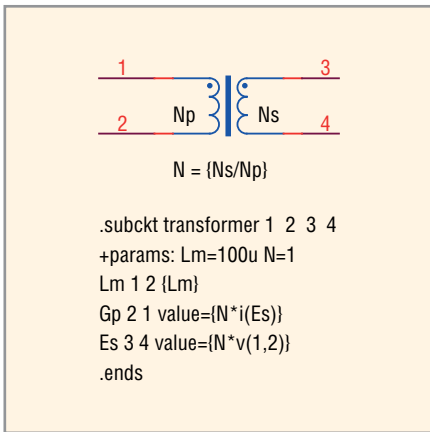


Рис. 5. Модель трансформатора

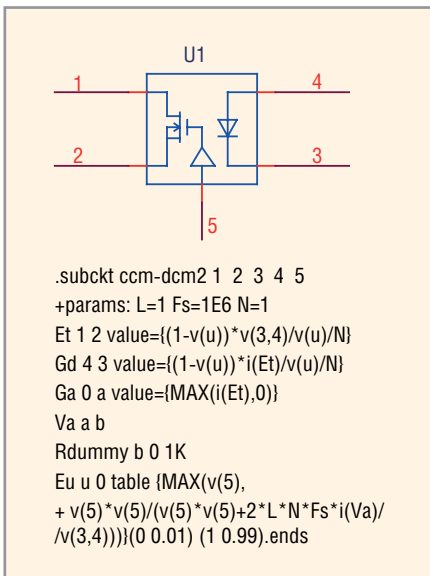


Рис. 6. Модель ключевых элементов

диодом, включенным последовательно с входной цепью источника F_{opto} . Время задержки сигнала моделируется подключенным к выходу источника тока конденсатором Co_{opto} , ёмкость которого определяется справочными данными оптопары:

$$Co_{opto} = T_{fall} / (2,2 * RL),$$

где T_{fall} – время задержки сигнала (Output Rise Time, Output Fall Time); RL – сопротивление нагрузочного резистора, при котором производится измерение времени задержки (обычно 100 Ом).

Усилитель ошибки является типовым для изолированных обратноходовых преобразователей и выполнен на основе микросхемы TL431 (LM431 и аналогичных). Согласно описанию, микросхема TL431 изменяет ток катода в зависимости от разности напряжений на управляющем электроде и внутреннего источника опор-

ного напряжения 2,495 В, т.е. представляет собой источник тока, управляемый напряжением (G_TL431 на рис. 4). К неинвертирующему входу G_TL431 подключен источник опорного напряжения V_{ref} , а к инвертирующему – делитель выходного напряжения R9, R10. Согласно графику АЧХ (Small-Signal Voltage Amplification vs Frequency), приведёному в описании микросхемы, частотная характеристика TL431 содержит низкочастотный полюс, заданный в модели конденсатором Co_TL431.

МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В схеме на рисунке 4 использованы непрерывные модели трансформатора и ключевых элементов из библиотеки switch.lib [7]. На рисунке 5 показано условное графическое обозначение модели трансформатора T1 и её описание в формате Pspice:

- в первой строке описания модели определено имя модели – transformer – и заданы номера выводов;
- во второй строке определены внешние параметры – индуктивность первичной обмотки L_m и коэффициент передачи N , равный отношению числа витков вторичной N_s и первичной N_p обмоток;
- в третьей строке показано подключение индуктивности первичной обмотки L_m к входным контактам 1 и 2 трансформатора;
- в четвёртой и пятой строках определены уравнения, характеризующие работу трансформатора, – ток первичной обмотки, заданный источником тока Gp, равен току вторичной обмотки $i(Es)$, умноженному на коэффициент трансформации N ; напряжение на вторичной обмотке, заданное источником напряжения Es, равно напряжению на первичной обмотке $v(1,2)$, умноженному на коэффициент трансформации N .

В отличие от реального трансформатора, представленная модель способна передавать постоянный ток, что необходимо для работы непрерывной модели ключевых элементов.

На рисунке 6 показано условное графическое обозначение непрерывной модели ключевых элементов

ccm-dcm и её описание в формате Pspice. Методика перехода от импульсной модели к непрерывной описана в различных источниках, например, [4].

Внешними параметрами модели являются индуктивность первичной обмотки обратноходового трансформатора L , частота коммутации Fs и коэффициент передачи трансформатора N .

Непрерывная модель ключевых элементов представлена в виде «идеального» трансформатора:

$$\langle V_{1,2}(t) \rangle_{T_s} = \frac{1-\mu}{\mu} \frac{1}{N} \langle V_{3,4}(t) \rangle_{T_s}.$$

В третьей строке (см. рис. 6) определена взаимосвязь средних напряжений на ключе и выходном диоде, где $\langle V_{1,2}(t) \rangle_{T_s}$ – среднее за период коммутации T_s напряжение, приложенное к ключу (обозначено как источник напряжения Et); $\langle V_{3,4}(t) \rangle_{T_s}$ – среднее за период коммутации T_s напряжение, приложенное (в обратном направлении) к выходному диоду; $N = N_s/N_p$ – коэффициент передачи трансформатора; N_p, N_s – число витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора; μ – коэффициент преобразования ключевых элементов, для режима непрерывных токов равный коэффициенту заполнения D (в модели обозначен как $v(u)$); в четвёртой строке аналогичным образом определена взаимосвязь среднего тока, протекающего через выходной диод (источник тока Gd), и среднего тока ключа $i(Et)$.

Источник напряжения Eu определяет коэффициент преобразования μ :

- в режиме непрерывных токов μ равен коэффициенту заполнения, который в модели задан напряжением на управляющем входе $v(5)$;
- в режиме разрывных токов μ определяется выражением:

$$\mu = \frac{D^2}{D^2 + \frac{2LNf_s}{R_o}},$$

где D – коэффициент заполнения; L и N – индуктивность первичной обмотки и коэффициент трансформации T1 соответственно; Fs – частота коммутации; R_o – сопротивление нагрузки. Как видно из описания, модель ccm-dcm позволяет исследовать работу преобразователя в режиме

как непрерывных, так и разрывных токов.

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Частотный анализ

Малосигнальный частотный анализ модели, представленной на рисунке 4, осуществляется при помощи источника переменного напряжения VAC_test, включенного в разрыв цепи управления Don. Элементы COL, LOL размыкают цепь обратной связи по переменному току, сохраняя соединение по постоянному току, что позволяет исследовать передаточную функцию силовой части преобразователя. На рисунке 7 приведены амплитудно-частотные DB(V(out)) и фазочастотные P(V(out)) характеристики силовой части преобразователя для двух значений напряжения питания: 230 В и 115 В.

Сравнение графиков показывает существенные различия передаточной функции преобразователя при разных значениях напряжения питания:

- при напряжении питания 115 В преобразователь работает в режиме разрывных токов (DCM); АЧХ си-

ловой части имеет один низкочастотный полюс, а запаздывание фазы не превышает 70° на частоте единичного коэффициента передачи;

- при напряжении питания 230 В преобразователь работает в режиме непрерывных токов (CCM), АЧХ силовой части содержит двойной комплексно-сопряжённый полюс, что обуславливает запаздывание фазы до 144°.

Наихудшим для обеспечения устойчивости режимом работы обратного преобразователя является режим CCM, что иллюстрирует рисунок 7. Компенсация запаздывания фазы осуществляется нулём, образованным в данном случае цепью обратной связи C9R8 усилителя ошибки. Частота нуля должна быть ниже частоты резонанса, составляющей, как видно из рис. 7, примерно 900 Гц. В данном примере частота нуля равна:

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_8 C_9} \approx 482 \text{ Гц.}$$

Для исследования АЧХ и ФЧХ преобразователя с замкнутой цепью об-

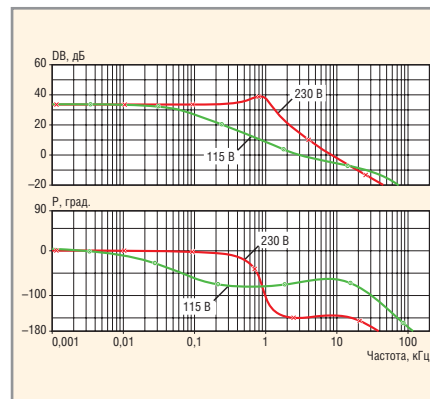


Рис. 7. АЧХ (верхние графики) и ФЧХ (нижние графики) передаточной функции силовой части обратного преобразователя для двух значений напряжения питания – 230 В и 115 В

ратной связи необходимо исключить элементы COL и LOL или установить для них пренебрежимо малые значения, например, 1 пФ и 1 нГн. Из схемы преобразователя, показанной на рис. 4, видно, что коэффициент передачи цепи обратной связи непосредственно зависит от коэффициента передачи по току CTR оптопары и коэффициента передачи схемы управления TOPSwitch. Для

Полупроводники НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ



Практическое применение

ПРИМЕНЕНИЕ SiC-диодов ШОТКИ ПОЗВОЛЯЕТ

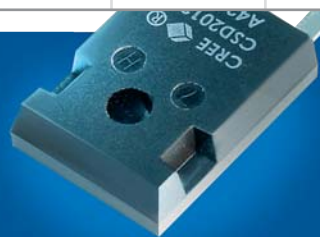
Характеристики высоковольтных диодов Шоттки фирмы Cree

- Снизить потери в диоде и ключевом транзисторе в 2 раза
- Уменьшить количество силовых электронных компонентов в 3 раза
- Увеличить надёжность
- Повысить частоту преобразования, снизить массу и габариты
- Получить выигрыш в стоимости и эффективности одновременно

Наименование	CSD04060A CSD04060D CSD04060E	CSD06060A CSD06060D CSD06060G	CSD10060A CSD10060D CSD10060E	CSD20060D	CSD05120A	CSD10120A CSD10120D	CSD20120D
U _{макс} , В	600	600	600	600	1200	1200	1200
I _{пост} , А	4	6	10	20	5	10	20
Типы корпусов	T0252, T0220-2, T0220-3	T0263, T0220-2, T0220-3	T0263, T0220-2, T0220-3	T0247-3	T0220-2	T0220-2, T0247-3	T0247-3

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Активные корректоры коэффициента мощности — снижение динамических потерь в ключевом транзисторе и диоде до 60%
- Антипараллельные диоды MOSFET- и IGBT-транзисторов и модулей для жёсткого переключения — снижение динамических потерь на 20...30%
- Мощные высоковольтные выпрямители для частот до единиц мегагерц



ПРОСОФТ – официальный дистрибьютор компании CREE в России и странах СНГ



ПРОСОФТ – АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (495) 232-2522 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.prochip.ru

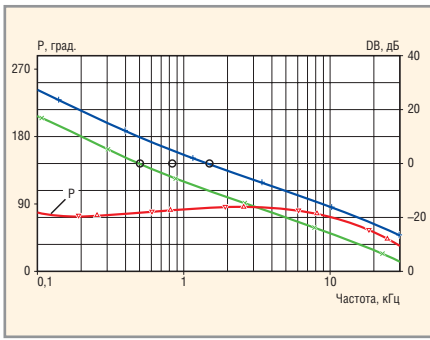


Рис. 8. АЧХ и ФЧХ передаточной функции модели обратного преобразователя при замкнутой петле обратной связи для минимального и максимального коэффициентов передачи в петле

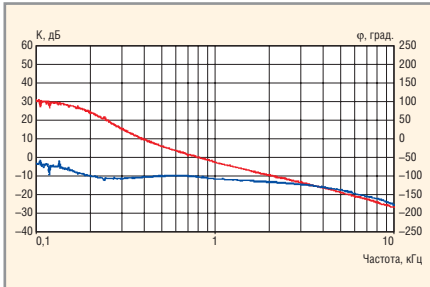


Рис. 9. Экспериментальные АЧХ и ФЧХ передаточной функции обратного преобразователя

По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложены значения частоты в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц, по оси ординат – модуль коэффициента передачи в дБ (график А – верхний) и фаза коэффициента передачи в градусах (график В – нижний)

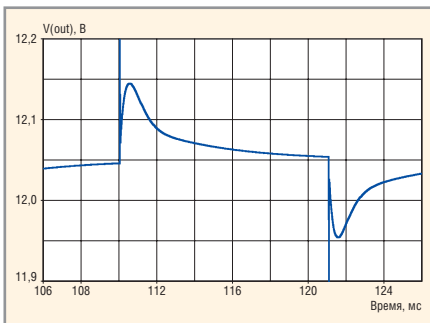


Рис. 10. Отклик модели преобразователя на воздействие периодически меняющейся нагрузки

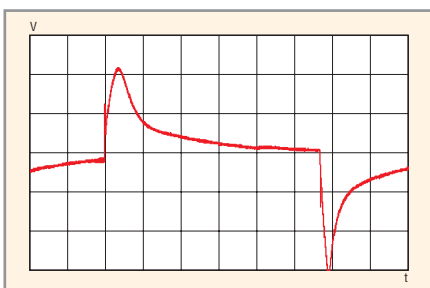


Рис. 11. Экспериментальный отклик преобразователя на воздействие периодически меняющейся нагрузки

учёта технологического разброса параметров оптопары и микросхемы TOPSwitch необходимо провести моделирование в программе Pspice для минимальных и максимальных значений указанных параметров. На рисунке 8 показаны АЧХ $DB(V(Do)/V(VAC_test+))$ и ФЧХ $P(V(Do)/V(VAC_test+))$ модели преобразователя при замкнутой цепи обратной связи для минимального и максимального коэффициентов передачи схемы управления TOPSwitch и оптопары (соответственно 18%/мА, 200% и 28%/мА, 400%). На рисунке 9 показаны экспериментальные частотные характеристики преобразователя [5, Fig. 26] при том же значении напряжения питания преобразователя (230 В).

Сравнение графиков, приведённых на рис. 8 и 9, показывает:

- частотные характеристики модуля коэффициента передачи (GAIN), как экспериментальная, так и полученные в результате моделирования, пересекают линию 0 дБ с наклоном -20 дБ на декаду, что обеспечивает рабочий запас устойчивости;
- частота единичного коэффициента передачи модели изменяется в зависимости от минимального и максимального коэффициентов передачи TOPSwitch и оптопары в диапазоне от 506 Гц до 1,46 кГц (на рис. 8 граничные значения отмечены кружками); экспериментально измеренная, согласно рис. 9, частота единичного коэффициента передачи 831,764 Гц (отмеченная на рис. 8 перечёркнутым кружком) находится примерно в середине диапазона 506...1460 Гц, что соответствует типовым значениям параметров TOPSwitch и оптопары;
- экспериментально измеренный запас устойчивости по фазе $79,4^\circ$ находится достаточно близко к значениям, полученным в результате моделирования (от $78,6^\circ$ до $85,6^\circ$).

Таким образом, в частотной области представленная модель показывает достаточно близкое соответствие результатов моделирования экспериментальным данным.

Анализ переходных процессов

Представленная на рисунке 4 модель преобразователя позволяет

также исследовать переходные процессы, например, при скачкообразном изменении тока нагрузки. На схеме тестовое воздействие выполнено в виде дополнительного нагрузочного резистора Ro_1 , подключаемого к основной нагрузке ключом S2, который управляется генератором импульсов Vo_test . На рисунке 10 показано изменение выходного напряжения модели преобразователя при воздействии на выход преобразователя периодически меняющейся нагрузки 75% – 100% – 75% от номинальной, а на рисунке 11 – экспериментальный график для тех же параметров тестового воздействия [5, Fig. 19].

Сравнение графиков, приведённых на рис. 10 и 11, показывает достаточно близкое соответствие результатов моделирования и экспериментальных данных. Разница в амплитуде коротких «выбросов», обусловлена увеличением погрешности непрерывной модели по мере приближения исследуемого диапазона частот к частоте коммутации.

Результаты малосигнального частотного анализа и анализа переходных процессов подтверждают адекватность представленной модели микросхемы TOPSwitch и обратного преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. TOPSwitch®-GX Family, www.powerint.com.
2. TOPSwitch®-GX Flyback Design Methodology. Application Note AN-32, www.powerint.com.
3. Dixon L. Closing the Feedback Loop & Appendix C. <http://www-s.ti.com/sc/techlit/slup068.pdf> <http://www-s.ti.com/sc/techlit/slup071.pdf>.
4. Rogers E. Control Loop Modeling of Switching Power Supplies, www.ti.com/sc/docs/msp/papers/1998/rogers.pdf.
5. Engineering Prototype Report for EP-34 – Single Output 30 W AC-DC Power Supply Using TOP245Y (TOPSwitch®-GX), www.powerint.com.
6. Kollman R., Betten J. Closing the Loop with a Popular Shunt Regulator. Power Electronics Technology, September 2003, http://powerelectronics.com/mag/Kollman_and_Betten_September_2003.pdf.
7. <http://ece-www.colorado.edu/~pwlect/book/PSPICE/index.html>.

