

Анализ процессов

В источниках служебного питания за счет выходных каскадов двухтактных прямоходовых импульсных преобразователей

В статье рассматриваются ограничения, накладываемые схемой импульсного преобразователя и режимами его работы на источник служебного питания. Выделяются параметры элементов источника, определяющие предельные режимы работы. На основании проведенного моделирования даются рекомендации по методике расчета и выбору элементов источника служебного питания.

Ренат Середжинов

r.seredzhinov@aviaok.com

Леонтий Самойлов, д.т.н.

Источник служебного питания — вспомогательный (служебный) маломощный источник напряжения, необходимый для обеспечения работоспособности контроллеров импульсного преобразователя.

Служебное питание импульсных преобразователей, реализованное на выходных каскадах, — наиболее простое решение вопроса его организации с учетом необходимости гальванического разделения. В отличие от главного выхода преобразователя, переменное напряжение этого источника не является стабилизированным и существенно зависит от напряжения питания преобразователя и величины нагрузки. С одной стороны, это приводит к значительным колебаниям выходного напряжения служебного источника, а с другой — создает в его элементах режимы перегрузок, которые зачастую трудно привести в норму. Целью настоящей работы является проведение ана-

лиза процессов в источнике служебного питания, рассмотрение вариантов оптимизации параметров, а также предложение методики расчета.

Принципиальная схема рассматриваемого импульсного преобразователя с источником служебного питания (СП) приведена на рис. 1. На этой схеме ККМ — корректор коэффициента мощности. Остальные обозначения не требуют пояснений.

Блок управляемого пуска обеспечивает начальный заряд конденсаторов источника СП (C1 и C2). Обратим внимание, что цепь питания C2 гальванически развязана от цепи питания C1. Существуют варианты импульсных преобразователей, когда такой развязки нет, но гальванически развязывается цепь обратной связи с выхода всего преобразователя на ШИМ-контроллер. Как видно на рис. 1, переменное напряжение для источников СП берется с помощью дополнительных обмоток выходного трансформатора.

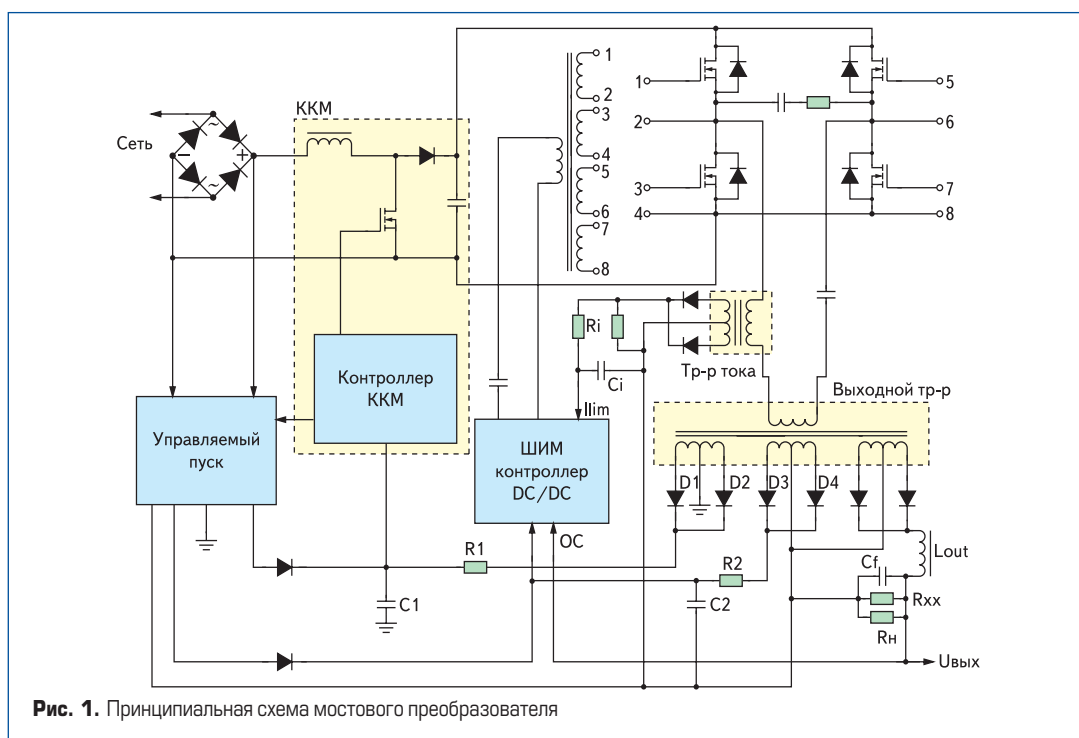


Рис. 1. Принципиальная схема мостового преобразователя

Оценка величины допустимого выходного напряжения источника СП

Введем понятие коэффициента допустимого изменения напряжения СП как отношение максимально-допустимого напряжения $U_{ПИТ}^{МАКС}$ к минимальному напряжению $U_{ПИТ}^{МИН}$

$$\Theta_{ДОП} = U_{ПИТ}^{МАКС} / U_{ПИТ}^{МИН} \quad (1)$$

Для реальных схем обычно вводят коэффициент запаса (ξ), который уменьшает $U_{ПИТ}^{МАКС}$ и увеличивает $U_{ПИТ}^{МИН}$. Величина ξ лежит в пределах 1,1–1,4. Тогда можно записать:

$$\Theta_{ДОП} = U_{ПИТ}^{МАКС} / (U_{ПИТ}^{МИН} \times \xi^2) \quad (2)$$

Источники СП за счет обмоток выходного трансформатора могут иметь повышенные выходные напряжения в связи с тем, что реальное число витков должно быть целым числом. Поясним это на примере. Предположим, что при числе витков первичной обмотки выходного трансформатора $\omega_1 = 20$ расчет показал необходимое число витков для обмотки служебного питания, равное $\omega_{СЛ} = 2,2$. Значение $\omega_{СЛ} = 2,2$ является нормой, и тогда реально возможное значение будет равно $\omega_{СЛ} = 3$. В этом случае максимальные напряжения могут быть больше расчетного в $3/2,2 = 1,36$ раза. Иногда это вынуждает увеличивать ω_1 с целью достижения целого числа $\omega_{СЛ}$.

Введем понятие коэффициента витка K_{δ} .

$$K_{\delta} = \lceil \omega_{СЛ} \rceil / \omega_{СЛ} \quad (3)$$

где $\lceil \omega_{СЛ} \rceil$ — расчетная величина витков обмотки СП, приведенная к ближайшему большему целому числу. В итоге можно записать:

$$\Theta_{ДОП} = U_{ПИТ}^{МАКС} / (U_{ПИТ}^{МИН} \times \xi^2 \times K_{\delta}) \quad (4)$$

Напряжение источника СП подается на контроллеры, которые, в свою очередь, подают пропорциональные напряжения питания управляющие импульсы на силовые ключи ККМ и выходного DC/DC-преобразователя. Проведенный обзор параметров современных контроллеров показал, что величина питающего их напряжения может находиться в пределах 6–35 В. Силовые ключи позволяют по-

давать на их затворы напряжение до 20 В и это значение чаще всего определяет величину Θ . Значение Θ для источника СП должно быть меньше допустимого $\Theta_{ДОП}$.

$$\Theta_{ДОП} = U_{СЛ}^{МАКС} / U_{СЛ}^{МИН} < \Theta_{ДОП} \quad (5)$$

Для нашего случая напряжение питания контроллера равно 9 В. Делая расчет $\Theta_{ДОП}$, получим 1,134 при $K_{\delta} = 1$ и $\xi = 1,4$.

Целью последующего анализа является оценка реального коэффициента Θ и значений токов в основных элементах схемы СП. При анализе будут рассмотрены варианты однотактного и двухтактного выпрямления переменного напряжения. При этом считается, что конденсаторы С1 и С2 предварительно заряжены пусковой схемой. При оценке коэффициента Θ и значений токов ограничимся только анализом процессов в выходном DC/DC-преобразователе, считая ККМ просто синхронным выпрямителем. Если в схеме источника питания стоит ККМ, то напряжение питания моста DC/DC-преобразователя имеет стабильность не хуже $\pm 2,5\%$. При отсутствии ККМ стабильность напряжения моста определяется стабильностью сетевого напряжения, которое в худшем случае имеет допуск $\pm 15\%$.

При включении преобразователя его выход может быть отключен от нагрузки (режим холостого хода); иметь номинальную нагрузку; быть в режиме короткого замыкания. Во всех этих режимах источник служебного питания должен обеспечить нормальный запуск преобразователя.

Импульсные диоды

Импульсные диоды характеризуются рядом параметров, среди которых выделим: I_{FSM} — прямой ударный ток диода; I_{FM} — прямой импульсный ток диода; U_{BR} — пробивное обратное напряжение.

Источник служебного питания является слаботочным источником с максимальным постоянным током 100 мА для большинства приложений. Поэтому для выпрямления переменного напряжения в этом источнике можно использовать малогабаритные слаботочные диоды. Анализ характеристик отечественных диодов КД-706АС9, КД-707АС9, КД-803АС9, КД-509А, КД-510А, КД-513А, КД-522А и их зарубежных аналогов показал, что значения то-

ков I_{FM} и I_{FSM} для большинства современных слаботочных диодов не должны превышать 2,5 и 4,5 А соответственно. Пробивное обратное напряжение U_{BR} для всех диодов лежит в диапазоне 50–75 В.

Анализ процессов в источнике СП при номинальной внешней нагрузке

При работе источника СП с номинальной внешней нагрузкой определяющим фактором изменения его выходного напряжения, а следовательно, и коэффициента Θ будет изменение входного сетевого питающего напряжения. Зависимость от сетевого напряжения носит линейный характер и в наихудшем случае напряжение источника СП будет изменяться в пределах $\pm 15\%$. Для такого изменения входного напряжения значение коэффициента Θ будет равно 1,353, что не удовлетворяет условию для $\Theta_{ДОП} = 1,134$. Выполнение условия возможно за счет применения стабилизатора напряжения.

Для получения графиков зависимости токов I_{FSM} и I_{FM} от изменения сетевого напряжения для однотактной схемы воспользуемся моделью в Micro-Cap, часть которой в виде принципиальной схемы показана на рис. 2. Для этой модели был выбран диод BAS16, имеющий характеристики, близкие к характеристикам перечисленных диодов.

Результат моделирования однотактной схемы показан на рис. 3.

Как видно на рис. 3, значения токов через диод Ds1 во всем диапазоне изменения сетевого напряжения не превышают допустимых величин.

Анализ процессов в источнике СП в режиме холостого хода

Для анализа процессов в режиме холостого хода (ХХ) применим прежнюю схему модели, приведенную на рис. 2. В этом режиме ШИМ-контроллер переходит в режим выдачи импульсов малой длительности для ограни-

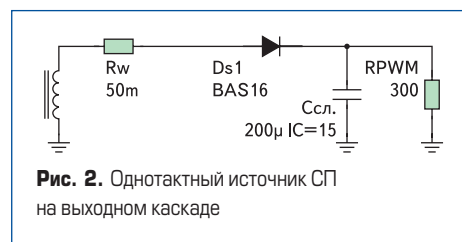


Рис. 2. Однотактный источник СП на выходном каскаде

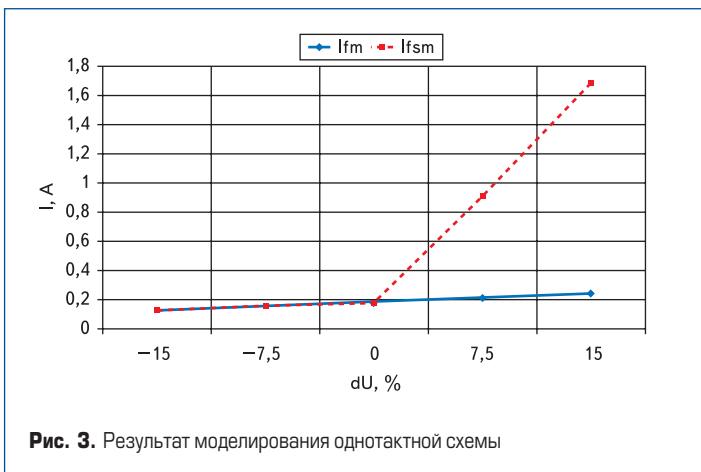


Рис. 3. Результат моделирования однотактной схемы

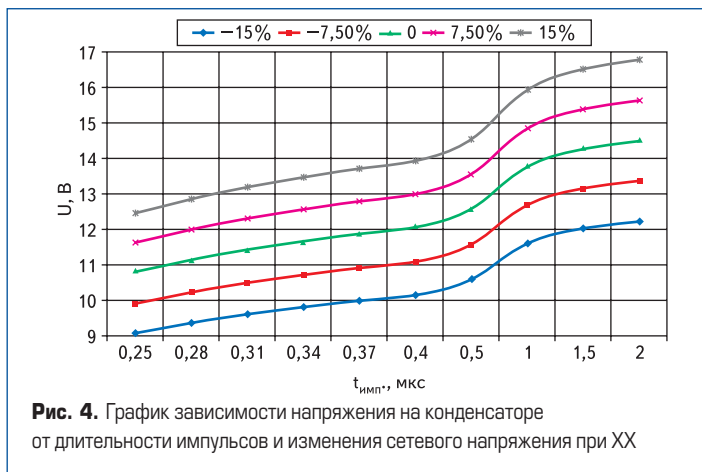
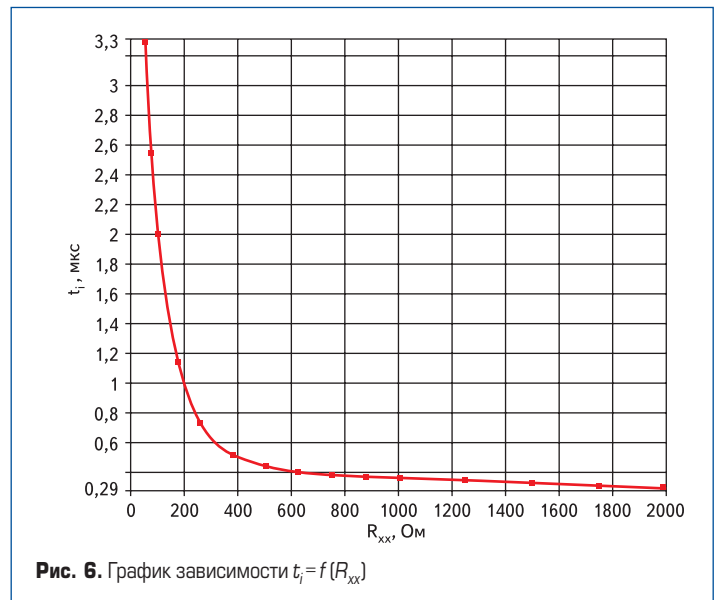
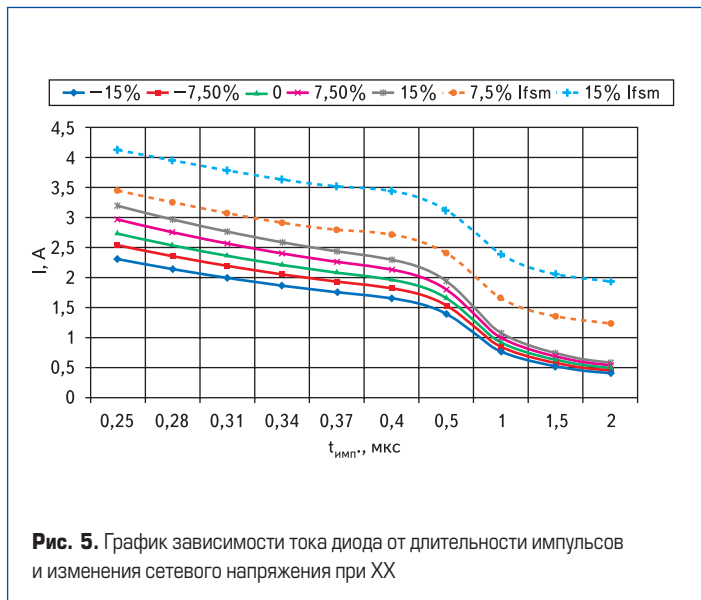


Рис. 4. График зависимости напряжения на конденсаторе от длительности импульсов и изменения сетевого напряжения при ХХ



чения нарастающего выходного напряжения. Такое сокращение длительности оказывает влияние на величину напряжения источника СП и импульсного тока через диод. Графики зависимости напряжения на конденсаторе и тока диода от длительности импульсов и изменения сетевого напряжения показаны на рис. 4 и 5.

Оценка максимальных величин токов по графикам рис. 5 показывает, что при установленной длительности импульсов 0,25 мкс и максимально возможном входном напряжении питания, величина прямого импульсного тока составляет 3,21 А, а величина прямого ударного тока — 4,23 А. По значению прямого импульсного тока I_{FM} использование слаботочного диода в источнике СП при ХХ неприемлемо.

Исходя из крайних значений изменения напряжения для каждой длительности (рис. 4), значение коэффициента Θ будет лежать в интервале от 1,374 до 1,383. Полученные значения больше $\Theta_{ДОП} = 1,134$ и условие для $\Theta_{ДОП}$ не выполняется. Выполнение этого условия возможно за счет:

- увеличения числа витков ω_{cl} и постановкой стабилизатора напряжения;
- увеличения длительности управляющих импульсов путем подбора сопротивления холостого хода R_{xx} на главном выходе (рис. 1) вместе с увеличением числа витков ω_{cl} и постановкой стабилизатора напряжения.

Рассмотрим первый подход. Для обеспечения выполнения условия (5) необходимо поднять нижний уровень напряжения выше уровня $U_{ПИТ}^{MIN} \times \xi$ путем увеличения числа витков ω_{cl} и обеспечить стабилизацию напряжения на уровне $U_{ПИТ}^{MAX} / \xi$.

Второй подход вместе с рассмотренными способами предполагает изменение длительности импульсов в установившемся режиме ХХ. Представим зависимость длительности импульса от выбранного сопротивления R_{xx} (рис. 6).

Изменение сопротивления резистора ведет к изменению рассеиваемой мощности R_{xx} и, как следствие, к изменению общего КПД преобразователя.

Регулировка служебного напряжения постановкой резистора нагрузки более эффективна, чем повышение его амплитуды за счет увеличения числа витков. Поэтому в рамках второго подхода необходимо выставить максимально возможную длительность импульса, а затем увеличивать амплитуду напряжения добавлением витков ω_{cl} . Верхний уровень $U_{ПИТ}^{MAX} / \xi$ ограничивается стабилизатором напряжения.

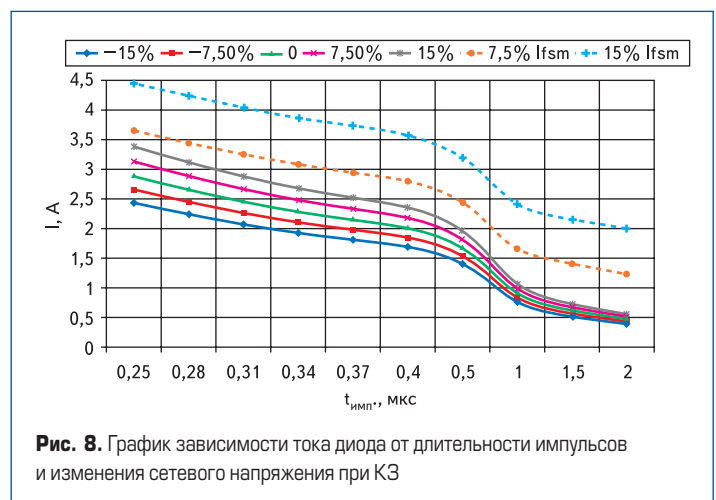
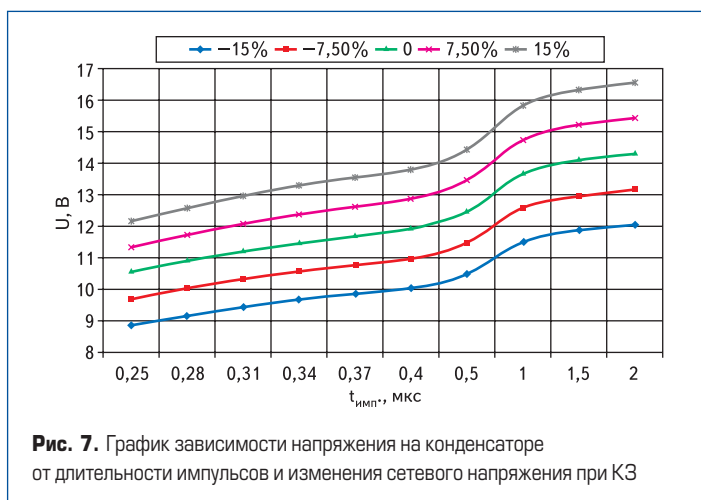
Из рассмотренных подходов наилучшим является второй, поскольку требует минимального повышения напряжения, что уменьшает требования к стабилизатору напряжения и уменьшает импульсные токи через диод (рис. 5).

Анализ процессов в источнике СП в режиме короткого замыкания внешней нагрузки

При коротком замыкании (КЗ) ШИМ-контроллер, так же как и при ХХ, переходит в режим выдачи импульсов минимальной длительности, при которых величина выходного тока главного выхода преобразователя лежит в допустимых пределах. Результаты моделирования схемы, приведенной на рис. 2, для тока и напряжения источника СП при КЗ показаны на рис. 7 и 8.

При длительности импульса 0,25 мкс максимальные значения токов равны $I_{FM} = 3,38$ А, ток $I_{FSM} = 4,41$ А. Для большинства слаботочных импульсных диодов эти значения превышают предельно-допустимые, что может заставить использовать в цепях служебного питания силовые высокочастотные диоды.

Оценим значение коэффициента Θ . По графикам рис. 7 для представленного диапазона длительности импульсов получим $\Theta = 1,365 - 1,375$. Получившиеся значения близки к значениям для режима ХХ и больше, чем $\Theta_{ДОП}$. Выполнение условия (5) возможно с применением двух рассмотренных подходов для ХХ. Но с тем исключением, что регулировка длительности импульса происходит с помощью интегрирующей цепочки $R_i C_i$ (рис. 1), которая расширяет длительность управляющих



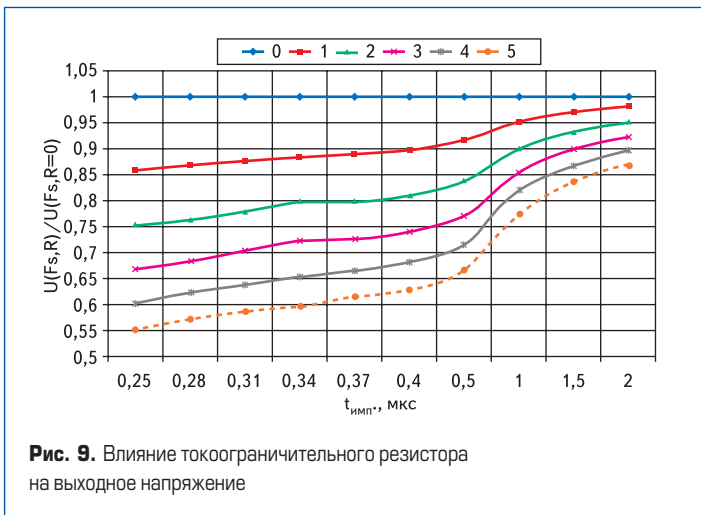


Рис. 9. Влияние токоограничительного резистора на выходное напряжение

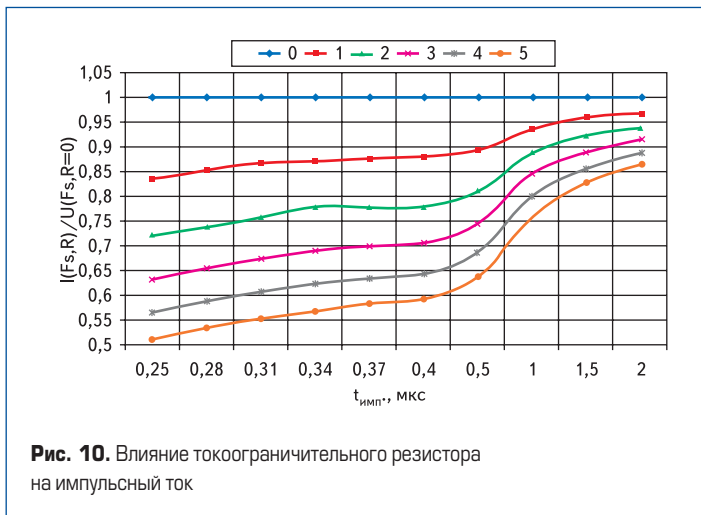


Рис. 10. Влияние токоограничительного резистора на импульсный ток

импульсов ШИМ-контроллера, а значит, и выходные импульсы. При этом следует учитывать, что увеличивается соответственно и выходной ток короткого замыкания.

Цепь источника служебного питания является слаботочной, и для нормального режима существует большой выбор выпрямительных диодов. Но в нештатных режимах трудно подобрать слаботочный диод по параметрам I_{FM} и I_{FSM} . Для решения задачи обеспечения приемлемых импульсных токов через диод есть два пути:

1. Постановка последовательного токоограничительного резистора.

2. Реализация источника СП с двухтактным выпрямлением переменного напряжения.

Рассмотрим первый путь. Для этого проведем моделирование схемы рис. 2 в двух нештатных режимах с дополнительным последовательным резистором R1(R2) (рис. 1). Делая переход от абсолютных значений к относительным, получим графики для тока и напряжения, показанные на рис. 9 и 10. Анализ этих зависимостей дает нам основание утверждать, что для выбранного диода оптимальным, с точки зрения коэффициента Θ и токов I_{FM} и I_{FSM} будет сопротивление в 2–3 Ом.

Второй путь решения задачи заключается в применении двухтактного выпрямления. Как показывают результаты моделирования, добавление второго такта позволяет уменьшить в каждом диоде протекающий прямой импульсный ток в 1,7 раза и прямой ударный ток в 1,2 раза через каждый диод без применения токоограничительного резистора. Добавление второй обмотки дает и улучшение значения коэффициента Θ за счет уменьшения скважности импульсов. Таким образом, можно уверенно сказать, что наилучшим вариантом реализации источника СП на выходном каскаде, с учетом коэффициента Θ и токов I_{FM} и I_{FSM} для слаботочных диодов, является двухтактная схема выпрямления. Если по соображениям технологичности выходного трансформатора или по каким-либо другим причинам разработчик не может использовать двухтактную схему выпрямления, то может сложиться ситуация, когда компромисс между токами и напряжением не будет найден. В этом случае выходом станет замена слаботочного диода силовым, рассчитанным на большие токи I_{FM} и I_{FSM} .

Стабилизация напряжения

Обеспечивая выполнение условия (5), все три рассмотренных режима работы требуют стабилизатора напряжения, который ограничивает верхнее значение напряжения на уровне $U_{ПНТ}^{МАКС} / \xi$.

Для выбора схемы стабилизатора необходимо определить минимальный коэффициент стабилизации K_c . Его можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_c = (\Delta U_{\text{вх}} / \Delta U_{\text{служ}}) \times (U_{\text{служ}} / U_{\text{вх}}). \quad (6)$$

Моделирование однотактной схемы показало, что при минимальной длительности импульсов требуется повышение их амплитуды на 5,5 В. Расчет K_c по формуле (6) дает коэффициент 2,35. Простейший стабилизатор на стабилитроне имеет коэффициент стабилизации в оптимальном по КПД режиме менее двух. Применение стабилитрона требует постановки ограничительного сопротивления, которое задает ток стабилизации. Использование сопротивления отрицательно сказывается на значении параметра Θ в режимах ХХ и КЗ. Из этого следует, что применение одиночных стабилитронов для стабилизации напряжения в системе служебного питания недопустимо. Расчеты показывают что для этих целей необходимо использовать параметрические стабилизаторы или интегральные стабилизаторы серии 142ЕН.

Методика расчета

Имеющиеся результаты моделирования трех основных режимов работы преобразователя позволяют сформулировать ряд рекомендаций, которыми необходимо руководствоваться при реализации источника СП за счет выходных каскадов:

1. Определиться с максимальными и минимальными значениями $U_{ПНТ}$ для устройств, получающих служебное питание от каждой служебной обмотки. Делая выбор $U_{ПНТ}^{МАКС}$ и $U_{ПНТ}^{МИН}$ из имеющихся значений, необходимо выбрать наименьшее максимальное значение и наибольшее минимальное значение.
2. Ввести величину запаса ξ из диапазона 1,1–1,4.
3. Рассчитать коэффициент витка по формуле (3).

4. По формуле (4) рассчитать $\Theta_{ДОП}$.
5. Выбрать вариант выпрямления переменного напряжения — однотактную или двухтактную схему.
6. Выбрать выпрямительный диод исходя из требований по максимальному допустимому обратному напряжению и прямому постоянному току.
7. Уточнить модель и произвести моделирование преобразователя в Micro-Cap или в аналогичных PSpice совместимых программах для трех режимов работы.
8. По полученным результатам моделирования определить значения I_{FM} , I_{FSM} и реальный коэффициент Θ .
9. Если значения I_{FM} , I_{FSM} и Θ удовлетворяют допустимым, то расчет закончен, если нет, то необходимо провести повторное моделирование с токоограничительным резистором и снова проверить получившиеся значения I_{FM} , I_{FSM} и Θ .
10. Выбрать другой диод, если для допустимых I_{FM} , I_{FSM} условие для $\Theta_{ДОП}$ не выполняется.
11. Рассчитать по формуле (6) коэффициент стабилизации и выбрать схему стабилизатора.

Здесь же можно дать рекомендации по реализации модели ШИМ-контроллера импульсного преобразователя. Так, в стандартной базе макромоделей пакета Micro-Cap 7.0 есть модель двухтактного ШИМ-контроллера с функциями управления по напряжению и току. Модель является общей и настраиваемой для реального контроллера. Основные параметры для настройки следующие:

- PERIOD — период переключения;
 - DEAD — мертвое время между OUT1 и OUT2;
 - IMAX — максимальное напряжение на внешнем резисторе;
 - RAMPMAX — максимальное значение пилообразного напряжения;
 - RAMPMIN — минимальное значение пилообразного напряжения;
 - VOUTH1 — высокий уровень сигнала по выходу OUT1 и OUT2;
 - VOUTH2 — высокий уровень сигнала по выходу OUT1 и OUT2;
 - VOU1LO — низкий уровень сигнала по выходу OUT1 и OUT2;
 - VOU2LO — низкий уровень сигнала по выходу OUT1 и OUT2;
 - ROUT — выходное сопротивление.
- Параметры усилителя ошибки:
- VHIGH — максимальное выходное напряжение;

VLOW — минимальное выходное напряжение;

POLE — первый полюс передаточной характеристики в Гц;

GAIN — усиление с разорванной цепью обратной связи.

Новые значения параметров из спецификации на реальный ШИМ-контроллер вводятся в поле 'PARAMS:' окна настроек макромодели.

Заключение

В итоге отметим, что, несмотря на кажущуюся простоту рассматриваемой схемы, обеспечение ее нормальной работы связано с нахождением ряда параметров на границе допустимых значений. Это касается:

- максимального напряжения питания контроллеров;
- импульсного тока диодов;
- ударного тока диодов;
- минимального напряжения при ХХ и КЗ.

Особенно жесткие условия работы возникают в AC/DC-преобразователях без корректора коэффициента мощности. В источниках служебного питания часто приходится ставить простейшие стабилизаторы напряжения для ограничения максимального напряжения.

Приведенная в работе методика расчета элементов схемы позволяет подойти к оптимальной области, но точный результат может быть гарантирован после итогового моделирования полученной схемы.

Литература

1. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Издание 2-е. М.: ДОДЭКА, 2000.
2. Эраносян С. А., Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.

3. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7.0. М.: Горячая Линия — Телеком, 2003.
4. Готтлиб И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. М.: Постмаркет, 2002.
5. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Пер. с англ. М.: МК-Пресс, 2007.
6. Диоды. Справочник / Григорьев О. П., Замятин В. Я. и др. М.: Радио и связь, 1990. Массовая радиобиблиотека. Вып. 1158.
7. Basso C. Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook, McGraw-Hill, 2001.
8. Самойлов Л. К., Середжинов Р. Т. Основные факторы, определяющие эффективность служебного питания с использованием выходного напряжения в импульсных преобразователях напряжения // Мат-лы междунар. науч. конференции «Информационные технологии в современном мире». Ч. 3. Таганрог: ТРТУ, 2006. С. 77–81.