

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Введение	9
Историческая справка	9
Сравнение линейных и импульсных источников питания	10
Глава 1. Основные импульсные схемы	13
1.1. Основы накопления энергии	13
1.2. Понижающий преобразователь	14
1.3. Повышающий преобразователь	16
1.4. Инвертирующий повышающий преобразователь	19
1.5. Комбинированный преобразователь	19
1.6. Преобразователи с трансформаторной развязкой	20
1.7. Синхронное выпрямление	24
1.8. Схемы с накачкой заряда	25
Глава 2. Схемы управления	27
2.1. Типовые схемы управления	27
2.2. Усилитель ошибки	30
2.3. Коррекция усилителя ошибки	31
2.3.1. Последовательность испытания	34
2.4. Типовой ШИМ-контроллер с управлением по напряжению	35
2.5. Управление по току	41
2.6. Типовой ШИМ-контроллер с управлением по току	43
2.7. Схемы с накачкой заряда	47
2.8. Многофазные ШИМ-контроллеры	50
2.9. Резонансные контроллеры	51
Глава 3. Первичный источник питания	52
3.1. Работа от сети	52
3.2. Подавление радиопомех	54
3.3. Требования к безопасности	55
3.4. Компенсация коэффициента мощности	57
3.5. Пусковой ток	61
3.6. Время удержания выходного напряжения	62
3.7. Входной выпрямитель	65
3.8. Характеристики входного накопительного конденсатора	66

Глава 4. Схемы без гальванической развязки	67
4.1. Основной метод проектирования	68
4.2. Схемы понижающих преобразователей	68
4.3. Схемы повышающих преобразователей	78
4.4. Инвертирующие схемы	84
4.5. Комбинированные (понижающие/повышающие) схемы	87
4.6. Схемы с накачкой заряда	90
4.7. Факторы, учитываемые при разводке печатной платы	94
Глава 5. Схемы с трансформаторной развязкой	98
5.1. Механизмы обратной связи	98
5.2. Обратноходовые схемы	105
5.2.1. Проектирование практической обратноходовой схемы	111
5.2.2. Пример сетевого обратноходового источника питания	111
5.2.3. Пример обратноходовой схемы без гальванической развязки	118
5.3. Схемы прямоходовых преобразователей	122
5.3.1. Последовательность проектирования практического прямоходового преобразователя.	124
5.3.2. Пример сетевого прямоходового преобразователя	125
5.3.3. Пример прямоходового преобразователя без гальванической развязки	129
5.4. Двухтактные схемы	133
5.4.1. Проектирование практической двухтактной схемы	135
5.5. Полумостовые схемы	139
5.5.1. Проектирование практической полумостовой схемы	141
5.6. Мостовые схемы	144
Глава 6. Выбор пассивных компонентов	147
6.1. Характеристики конденсатора	147
6.1.1. Алюминиевые электролитические конденсаторы	149
6.1.2. Твердотельные танталовые и ниобиевые конденсаторы	151
6.1.3. Твердотельные полимерные электролитические конденсаторы	153
6.1.4. Многослойные керамические конденсаторы	154
6.1.5. Плёночные конденсаторы	157
6.2. Характеристики резисторов	158
6.2.1. Углеродные композиционные резисторы	159
6.2.2. Плёночные резисторы	160
6.2.3. Проволочные резисторы	161
Глава 7. Выбор полупроводниковых компонентов	162
7.1. Характеристики диодов	162
7.1.1. Плоскостные диоды	162
7.1.2. Диоды Шотки	167
7.1.3. Пассивация	169
7.2. Биполярные транзисторы	170
7.2.1. Мощные полевые МОП-транзисторы (MOSFET)	176
7.2.2. Управление затвором	180
7.2.3. Область устойчивой работы и лавинные характеристики	190
7.2.4. Синхронное выпрямление	193
7.2.5. Измерительные полевые транзисторы	198
7.2.6. Варианты корпусов	198
7.3. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)	200

Глава 8. Выбор дросселя	204
8.1. Характеристики реальных дросселей	204
8.2. Характеристики сердечника	207
8.3. Расчёт порошкового тороидального сердечника дросселя	218
8.4. Выбор сердечника для повышающего преобразователя	221
Глава 9. Выбор трансформатора	225
9.1. Характеристики трансформатора	225
9.2. Вопросы безопасности	228
9.3. Анализ практических конструкций	229
9.4. Выбор сердечника трансформатора прямоходового преобразователя	231
9.5. Сердечники для обратноходовых преобразователей	233
9.5.1. Выбор сердечника для индуктивно-связанных дросселей в обратноходовом преобразователе.	233
Глава 10. Пример проектирования инвертора «точной синусоиды»	236
10.1. Технические требования	236
10.2. Общее описание конструкции	237
10.3. Проектирование предварительного стабилизатора	241
10.4. Проектирование выходного преобразователя	246
10.5. Проектирование H-моста	249
10.6. Проектирование схемы управления мостом	249
Глава 11. Сетевой источник питания для компьютера	253
11.1. Установочные требования	253
11.2. Первичный источник питания	254
11.3. Преобразователь постоянного напряжения (DC/DC)	256
11.4. Выбор диода	259
11.5. Расчёт дросселей	261
11.6. Расчёт конденсаторов	264
11.7. Расчёт трансформатора	265
Предметный указатель	268

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга предназначена для тех, кто хочет понять принцип работы импульсного источника питания. Я хочу научить вас грамотно формулировать требования к сетевому источнику питания. Прочитав эту книгу, вы получите достаточно информации для самостоятельного проектирования преобразователя DC/DC. Я включил в книгу несколько глав по основам аналогового проектирования специально для тех, чья специальность не связана с аналоговыми схемами. Опираясь на эти основы, я расскажу, как проектировать и рассчитывать практические импульсные источники питания. Те, кто силён в аналоговой схемотехнике, указанные главы могут пропустить.

Существует два обширных класса источников питания: линейные и импульсные. В линейных источниках питания используется непрерывное управление выходным напряжением. Импульсные источники питания представляют собой системы с временной дискретизацией, в которых для управления выходным напряжением используются прямоугольные управляющие сигналы. В этой книге рассматривается каждая из разновидностей импульсных источников питания.

Я привожу математические формулы, как правило опуская подробности их выведения и преобразования. В качестве упражнения читатель может самостоятельно произвести необходимые вычисления.

Благодарности

Как и любая другая работа, эта книга создавалась с участием многих людей. Я хочу выразить свою признательность за большой вклад в моё понимание принципов работы импульсных источников питания авторам книг: «Linear/Switchmode Voltage Regulator Handbook» фирмы Motorola, «HDB-3 Power MOSFET HEXFET Databook» фирмы International Rectifier и «Switch Mode Power Supply» фирмы Philips (превосходная книга, но, к сожалению, доступная только на фирменном сайте).

Хочу также поблагодарить компанию Linear Technology Corporation за предоставленную мне программу SwitcherCAD III. Она предназначена для использования клиентами этой компании, но доступна всем желающим. Большинство схем, представленных в этой книге, первоначально были подготовлены с помощью SwitcherCAD III.

ВВЕДЕНИЕ

Историческая справка

Принципы построения импульсных источников питания (ИИП) используются вот уже более 100 лет (хотя люди и не знали, что речь шла именно об этих принципах). Система зажигания для бензинового двигателя представляет собой не что иное, как самый первый вариант обратного источника питания. Затем импульсные источники нашли применение в высоковольтном блоке телевизора. И снова это был элементарный обратный источник питания. Название «обратной» происходит от названия короткого периода времени, за который точка с правой стороны экрана кинескопа перемещалась на левую сторону (так называемый «обратный ход»). Быстрое изменение тока в отклоняющей катушке производит очень большое напряжение. В телевизоре этот эффект использовался для создания большого ускоряющего потенциала, необходимого для работы электронно-лучевой трубки.

Использование импульсных источников питания в массовом применении вплоть до конца 1960-х годов было ограничено функциональными возможностями трёх главных их компонентов: магнитопровода, ключа и выпрямителя. Компоненты для ИИП стали доступными ещё в начале 1960-х с появлением высоковольтных биполярных транзисторов, но в маломощных схемах использовать их было экономически невыгодно до тех пор, пока цена полупроводников не упала до вполне приемлемой. С 1970 года достижения в разработке всех категорий компонентов кардинально изменили ситуацию на рынке источников питания, особенно в тех его секторах, где применение линейных трёхвыводных стабилизаторов было невозможно вследствие их неспособности обеспечить требуемый уровень мощности. Достижения полупроводниковой электроники тех времён позволяли производить малогабаритные импульсные источники питания с номинальной мощностью несколько десятков ватт. В них использовались ИС, дроссель и пара конденсаторов, и весь стабилизатор напряжения имел габариты меньше, чем габариты импульсного транзистора 1960-х годов в корпусе ТО-3.

Стоимость одного ватта сетевых источников питания упала настолько, что разработчикам стало невыгодно проектировать и изготавливать собственные источ-

ники, если не выпускать их в максимально больших количествах. Многие компании представили на рынок линейки источников питания со стандартными выходными напряжениями. Многие из этих компаний могут также за отдельную плату производить модификацию своих стандартных схем под нестандартные напряжения.

Большинство ведущих производителей линейных ИС (Linear Technology, Maxim, TI, National Semiconductor, Analog Devices и др.) предлагают линейки импульсных стабилизаторов, подходящих для локальной стабилизации («point-of-load») или преобразования напряжения. Современные полупроводниковые компоненты производства этих фирм обладают очень малыми габаритами и высокой эффективностью. Это особенно актуально для устройств, питающихся от батареи, когда важную роль играет продолжительность работы между подзарядками. Современные компоненты зачастую сочетают в одном корпусе схему управления, ключ и выпрямители.

Производители пассивных компонентов также были заняты совершенствованием своей продукции. Компании, производящие магнитные материалы (Ferroglobe, Siemens, Micrometals, подразделение Magnetics компании Spang & Co. и др.), расширили частотный диапазон трансформаторов и дросселей — от нескольких десятков килогерц в 60-х годах до единиц мегагерц в настоящее время. Благодаря этому усовершенствованию современные схемы характеризуются малыми габаритами фильтрующих конденсаторов и магнитных сердечников. Производители конденсаторов также усовершенствовали фильтрующие конденсаторы для импульсных схем. Обычные электролитические конденсаторы обладают очень большим эквивалентным последовательным сопротивлением, вследствие чего при быстро меняющемся постоянном напряжении происходит рассеивание мощности. Если эквивалентный переменный ток будет слишком высоким, эти электролиты могут перегреться и взорваться. Все производители электролитических конденсаторов в настоящее время выпускают линейки конденсаторов с пониженным эквивалентным последовательным сопротивлением.

Сравнение линейных и импульсных источников питания

Сравнение типовых схем линейных и импульсных источников питания показывает, почему в большинстве случаев предпочтительно применять импульсный источник.

Линейный источник питания способен производить напряжение только ниже входного. Для всех линейных стабилизаторов требуется входное напряжение, которое выше выходного напряжения на определённую минимальную величину, которая называется падением напряжения. Падение напряжения является определяющим параметром при расчёте производительности и рассеивания мощности.

Возьмём устройство, работающее от 6.0 В и потребляющее максимальный ток 2 А. Типичный линейный стабилизатор будет иметь падение напряжения 2 В. Если мы решим использовать свинцово-кислотную батарею, она будет разряжаться до напряжения примерно 1.9 В на элемент. Так как для корректной работы нам

требуется напряжение минимум 8 В (6 В для нагрузки плюс 2 В на падение напряжения), для получения требуемого напряжения нам понадобится как минимум 5 элементов. Следовательно, при разряженной батарее минимальное входное напряжение равно 9.9 В. Поступающая в нагрузку мощность при токе 2 А равна 12 Вт, а стабилизатор должен рассеивать при разряженной батарее 7.8 Вт. Отсюда КПД равен 60%. При полностью заряженной батарее напряжение каждого элемента равно 2.26 В, и батарея выдаёт 11.3 В. Мощность нагрузки по-прежнему равна 12 Вт. Стабилизатор теперь должен рассеивать 10.6 Вт, откуда КПД получается равным 53%.

Ситуацию можно улучшить, если не полностью разряжать каждый элемент. Мы можем увеличить производительность и снизить стоимость батареи (ценой более частой подзарядки), если будем прекращать работу, когда напряжение на каждом элементе упадёт до 2.0 В. При этом нам понадобится только 4 элемента. Мощность, рассеиваемая на стабилизаторе при разряженной батарее, составит 4 Вт, поэтому КПД возрастет до 75%. При полной зарядке КПД увеличится всего лишь до 67%.

В первом примере 2 из 5 элементов расходуют всю свою энергию на нагрев окружающей среды. Во втором примере на такой нагрев полностью работает 1 из 4 элементов. Понятно, что линейная стабилизация — слишком дорогой способ получения постоянного напряжения в системе, работающей от батарей.

Для вышеприведённого примера можно сконструировать простой импульсный источник питания с ключами на полевых транзисторах, обладающих сопротивлением в открытом состоянии порядка 0.008 Ом. Коммутирующий диод может быть диодом Шотки с прямым напряжением всего лишь 0.5 В. В первом приближении рассеиваемая ключом мощность будет составлять максимум 0.032 Вт, а диод будет рассеивать 1.0 Вт. КПД при полной зарядке будет равен 92%, а при разряженной батарее окажется близок к 99%. Причём эти относительные значения КПД справедливы для батареи из 4, 6 или 12 элементов.

Есть ещё одно преимущество импульсных источников питания перед линейными. С линейным источником питания батарея обязательно должна состоять из 4 элементов или более. С импульсным источником можно получать требуемое питание от батареи из 1...3 элементов, да к тому же ещё и с лучшей производительностью.

Примерно так же обстоит дело и с сетевыми источниками питания. Для сетевого линейного источника питания требуется трансформатор. Для линейного источника питания мощностью 1000 Вт потребуется трансформатор весом под 50 кг, массивные радиаторы с вентиляторами для полупроводниковых компонентов, и по объёму он займёт около половины кубометра. Если нужно обеспечить возможность работы от обоих напряжений — 110 и 220 В, для линейного источника потребуется ручное или сложное электронное переключение между ними. Для сравнения, импульсный источник питания, работающий от 110 и 220 В без переключения, весом около 20 кг занимает четверть объёма линейного источника. К тому же импульсный источник питания в несколько раз дешевле.

Однако не всегда импульсные источники питания являются наилучшим вариантом. На выходе импульсного источника питания обязательно присутствует вы-

сокочастотный шум. Линейные источники шумят на два-три порядка меньше. Для очень чувствительных к шуму аналоговых схем обычно рекомендуется линейный источник питания. Если требуется максимальная производительность, в современных системах часто используется предварительная стабилизация напряжения импульсным источником до значения чуть выше падения на линейном источнике, а затем с помощью линейного источника получают малошумящее питание для аналоговых схем. Ещё один недостаток импульсных источников питания — большее время восстановления при скачкообразных изменениях тока нагрузки или входного напряжения по сравнению с линейными источниками.

В маломощных схемах, как правило, предпочтительнее применять линейные источники питания. В вышеприведённом примере мы аппроксимировали потери в ключе формулой $P = I^2R$. В случае более тщательного анализа следует учитывать потери в ключе в моменты отпирания и запираания, а также мощность, расходуемую на управление ключом. К тому же существуют линейные стабилизаторы с очень малым падением напряжения, специально предназначенные для применения в маломощных схемах.

ОСНОВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ

- Основы накопления энергии
- Понижающий преобразователь
- Повышающий преобразователь
- Инвертирующий повышающий преобразователь
- Комбинированный преобразователь
- Преобразователи с трансформаторной развязкой
- Синхронное выпрямление
- Схемы с накачкой заряда

В этой главе мы рассмотрим временные характеристики идеальных индуктивностей и конденсаторов, а также дадим обзор идеальных моделей для каждого типа импульсных источников питания. В последующих главах мы поговорим о магнитных, электрических и паразитных свойствах индуктивностей и конденсаторов и их влиянии на расчёт отдельных компонентов.

1.1. Основы накопления энергии

Уравнение (1.1), выражающее правило Ленца, содержит определение индуктивности. Катушка обладает индуктивностью в один генри, если изменение тока на один ампер за одну секунду производит напряжение на катушке в один вольт:

$$V = L \, di/dt. \tag{1.1}$$

Первое следствие уравнения (1.1) состоит в том, что ток, протекающий через катушку индуктивности, не может изменяться мгновенно. Ведь в этом случае на катушке возникло бы бесконечное напряжение. В реальности же такие эффекты, как, например, возникающая при «пробое» контактов электрическая дуга, ограничивают это напряжение очень высоким, но не бесконечным значением. Вторым следствием уравнения (1.1) является то, что напряжение на катушке индуктивности мгновенно изменяется с положительного на отрицательное при переключении с накопления энергии в индуктивности (производная di/dt положительна) на извлечение энергии из неё (di/dt отрицательна). Уравнение (1.2), полученное интегрированием уравнения (1.1), используется для определения тока в катушке индуктивности при известном напряжении.

$$I = 1/L \int V dt + I_{\text{нач.}} \quad (1.2)$$

Уравнение (1.3) даёт определение ёмкости. Конденсатор обладает ёмкостью в один фарад, если накопленный заряд в один кулон создаёт напряжение на нём в один вольт.

$$Q = CV \quad (1.3)$$

Уравнения (1.4) и (1.5) определяют ёмкость конденсатора через напряжение и ток (заряд представляет собой интеграл от тока, а ток — соответственно производную заряда по времени dq/dt):

$$V = 1/C \int i dt + V_{\text{нач.}}, \quad (1.4)$$

$$I = C dv/dt. \quad (1.5)$$

Ток в конденсаторе фильтра импульсного источника питания обычно принимает пилообразную форму. Назначение конденсатора состоит в том, чтобы ограничивать колебания напряжения (пульсации). Из уравнения (1.4) следует, что выполнить эту задачу можно, либо увеличивая ёмкость конденсатора, либо уменьшая dt . Одним из главных достоинств импульсных источников питания является возможность использования очень малых dt (за счёт повышения частоты коммутации), благодаря чему ёмкость конденсатора фильтра существенно уменьшается.

1.2. Понижающий преобразователь

На Рис. 1.1 изображена идеальная модель понижающего преобразователя, состоящего из идеального источника напряжения, идеального управляемого ключа, идеального диода, идеального дросселя, идеального конденсатора и нагрузочного резистора. Преобразователь называется понижающим потому, что выходное напряжение всегда меньше входного, так как напряжение на дросселе «противится» входному (противоположно по полярности напряжению источника). Данный идеальный стабилизатор предназначен для работы от источника напряжением 20 В и обеспечивает напряжение 5 В на нагрузке 10 Ом. Ключ размыкается и замыкается через каждые 10 мкс, при этом на пассивных компонентах формируется сигнал с широтно-импульсной модуляцией. В установившемся режиме выходное напряжение стабилизатора равно

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times DC, \quad (1.6)$$

где DC — коэффициент заполнения¹⁾.

¹⁾ Коэффициент заполнения (Duty Cycle) — величина, характеризующая соотношение между положительными и отрицательными полупериодами в последовательности импульсов. — *Примеч. ред.*

Это уравнение определяет выходное напряжение преобразователя вне зависимости от значений индуктивности, тока нагрузки и ёмкости выходного конденсатора, при условии, что через дроссель течёт непрерывный ток. При этом подразумевается, что напряжение на дросселе имеет прямоугольную форму.

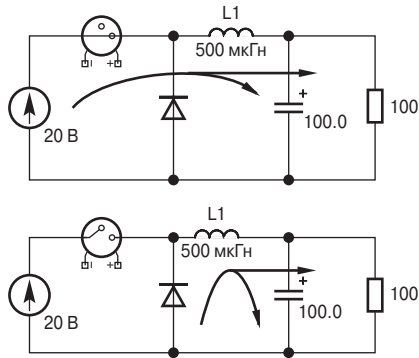


Рис. 1.1. Идеализированная модель понижающего преобразователя

В данной схеме диод используется в качестве управляемого напряжением вентиля. В то время, когда входной ключ разомкнут (см. Рис. 1.1), диод обеспечивает канал для протекания разрядного тока дросселя¹⁾. Когда же дроссель накапливает энергию²⁾, диод смещён в обратном направлении, поэтому ток через него не течёт.

При проектировании импульсных источников питания мы будем для простоты считать, что прикладываемое к дросселю напряжение в процессе накопления энергии имеет идеально прямоугольную форму. В нашем примере пульсации выходного напряжения источника питания составляют 20 мВ. Хорошее приближение к идеально прямоугольной форме достигается при колебаниях напряжения на дросселе в процессе накопления энергии в пределах 0.02 В при входном напряжении 15 В, т. е. 0.13%, а в процессе отдачи энергии — 0.02 В при выходном напряжении 5 В, т. е. 0.4%. Постоянная амплитуда прямоугольных импульсов способствует постоянству di/dt в уравнении (1.1).

На Рис. 1.2 изображены кривая выходного напряжения (нижний график) и кривая тока дросселя (верхний график) в установившемся режиме преобразователя, обеспечивающем напряжение 5 В и ток 500 мА на нагрузочном резисторе.

Заметим, что колебания выходного тока относительно малы по сравнению со значением постоянного тока в дросселе. В данном случае пиковый ток пульсаций составляет 75 мА. Ещё одним важным моментом является то, что в установившемся режиме ток пульсаций не зависит от тока нагрузки, так как ток, протекающий через дроссель, управляется напряжением на нём. Крутизна нарастания тока и

¹⁾ Напряжение на дросселе при уменьшении протекающего через него тока, в соответствии с уравнением (1.1) имеет отрицательную полярность, поэтому диод открывается. — Примеч. ред.

²⁾ Это происходит тогда, когда ключ замкнут. — Примеч. ред.

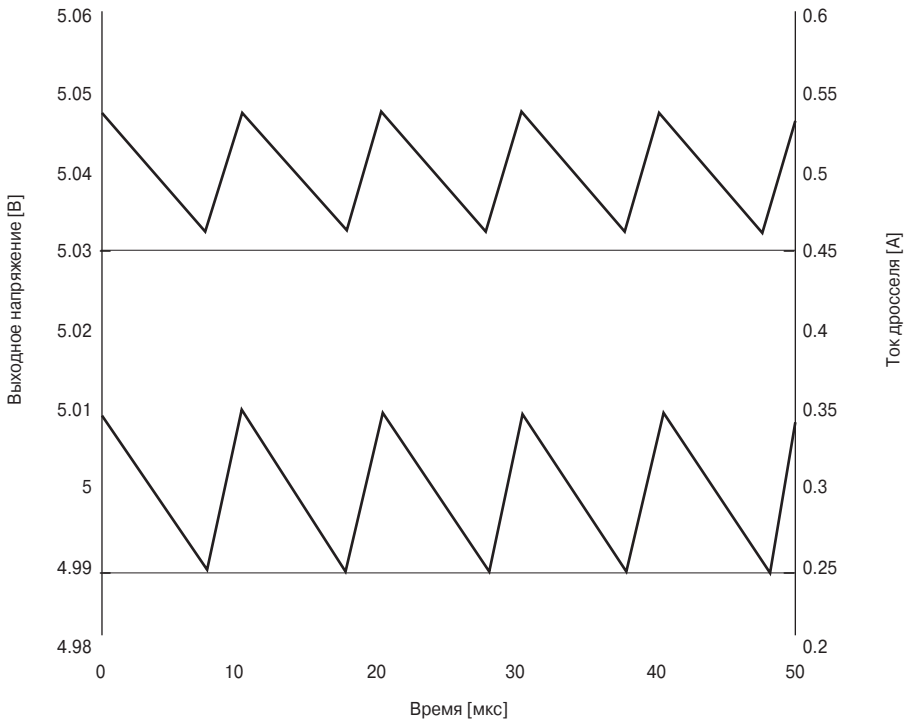


Рис. 1.2. Выходное напряжение и ток дросселя в понижающем стабилизаторе

продолжительность фазы накопления энергии определяются исключительно разностью напряжений $V_{in} - V_{out}$. Средний ток дросселя равен выходному току.

Работа понижающего преобразователя может также осуществляться в прерывистом режиме, при котором в течение некоторой части периода коммутации ток дросселя равен нулю.

Для прерывистого режима работы уравнение (1.6) несправедливо. Пульсации выходного напряжения в понижающем преобразователе, работающем в прерывистом режиме, выше, так как конденсатор фильтра должен обеспечивать ток нагрузки в то время, когда ток дросселя равен нулю. Как правило, понижающий преобразователь работает в прерывистом режиме, только когда ток нагрузки становится намного меньше номинального расчётного значения.

1.3. Повышающий преобразователь

На Рис. 1.3 изображена идеальная модель повышающего преобразователя, состоящего из идеального источника напряжения, идеального ключа, идеального диода, идеального дросселя, конденсатора и нагрузочного резистора. Преобразователь называется повышающим, так как напряжение на дросселе суммируется с

входным напряжением и значение выходного напряжения превышает значение входного. Данный идеальный стабилизатор предназначен для работы от источника напряжения 5 В и обеспечивает напряжение 20 В на нагрузке 1000 Ом. Когда ключ разомкнут, диод открыт и проводит ток. Когда ключ замыкается, диод закрывается. Ключ размыкается и замыкается через каждые 10 мкс.

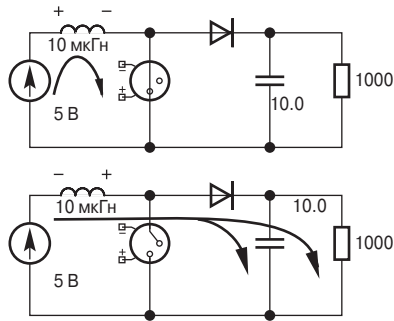


Рис. 1.3. Идеализированная модель повышающего преобразователя

Ток от источника напряжения протекает через дроссель и замкнутый ключ, при этом происходит накопление дросселем энергии. В это время поступление тока в нагрузку обеспечивается конденсатором, так как диод смещён в обратном направлении. Когда ключ размыкается, ток в дросселе продолжает течь, но теперь он смещает диод в прямом направлении и течёт через нагрузочную цепь. Напряжение на дросселе инвертируется и добавляется к напряжению входного источника питания. Когда преобразователь работает в установившемся режиме, выходное напряжение равно

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} / (1 - DC), \quad (1.7)$$

где DC — коэффициент заполнения.

Это уравнение определяет выходное напряжение преобразователя вне зависимости от значений индуктивности, тока нагрузки и ёмкости выходного конденсатора при непрерывном режиме работы.

Для повышающих преобразователей требуются гораздо большие ёмкости, чем для понижающих преобразователей, так как именно конденсатор обеспечивает полный ток нагрузки, пока ключ замкнут.

На Рис. 1.4 изображены кривая выходного напряжения (нижний график) и кривая тока дросселя (верхний график) в установившемся режиме работы, обеспечивающем напряжение 20 В и ток 20 мА в нагрузочном резисторе. Как и для понижающего преобразователя, в непрерывном режиме работы ток пульсаций в дросселе не зависит от выходного тока. Обычно пиковый ток дросселя лишь немного превышает его средний ток.

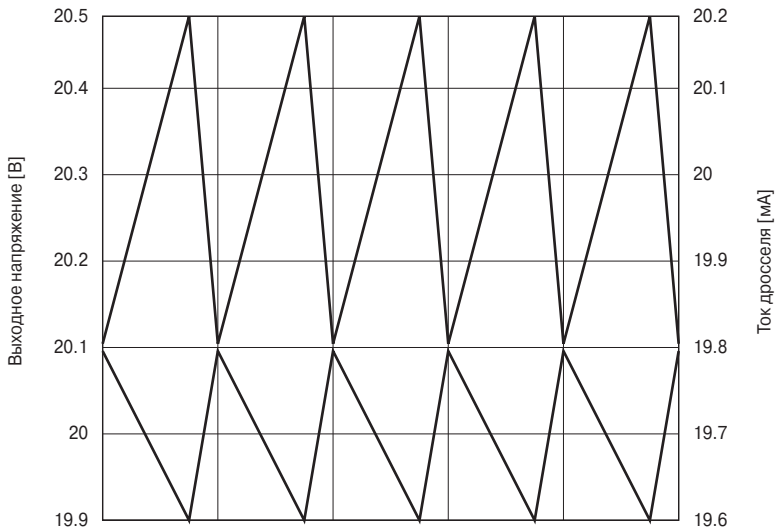


Рис. 1.4. Выходное напряжение и ток дросселя в повышающем преобразователе

Работа повышающего преобразователя возможна также в прерывистом режиме. Пульсации выходного напряжения в этом режиме выше (точно так же, как это было и для понижающего преобразователя), поскольку конденсатор должен обеспечивать ток нагрузки в те моменты времени, когда ток дросселя равен нулю. Ещё одной особенностью прерывистого режима работы повышающих преобразователей является очень большой пиковый ток, протекающий в ключе и в дросселе.

Можно вычислить входной ток в обоих режимах для заданного выходного тока. В схеме, пример которой изображён на Рис. 1.3, в непрерывном режиме работы средний входной ток составляет 80 мА. Уравнение (1.8) определяет средний входной ток для обоих режимов. Уравнение (1.9) задаёт пиковый входной ток для прерывистого режима работы.

$$I_{\text{in-avg}} = I_{\text{out-avg}} (1 / (1 - DC)), \quad (1.8)$$

$$I_{\text{in-peak}} = 2 I_{\text{out-avg}} ((1 - (V_{\text{out}}/V_{\text{in}})) / DC), \quad (1.9)$$

где $I_{\text{in-avg}}$ — средний входной ток, $I_{\text{out-avg}}$ — средний выходной ток, $I_{\text{in-peak}}$ — пиковый входной ток, DC — коэффициент заполнения.

Если схема в нашем примере работает с коэффициентом заполнения 0.25 (прерывистый режим) вместо 0.75 (непрерывный режим), то пиковый ток дросселя и ключа будет составлять 480 мА вместо 81.75 мА.