

ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА МОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

ЭДУАРД ФОЧЕНКОВ, начальник бюро механизации и автоматизации, ОАО МСТАТОР, edf01@yandex.ru

В статье на практических примерах рассматриваются варианты использования в импульсных силовых преобразователях моточных изделий с сердечником из магнитомягких кристаллических сплавов — дросселя сетевого фильтра и магнитного усилителя, силового трансформатора, выходных и помехоподавляющих дросселей. Приведены примеры расчёта с помощью программы, выложенной в свободный доступ на сайте производителя — компании ОАО МСТАТОР. Данные, полученные расчётным путем, сравниваются с экспериментальными результатами.

Аморфные и нанокристаллические магнитные сплавы появились относительно недавно — в 1970 г. Область применения этих материалов динамично расширяется [1]. Они имеют свои преимущества и особенности, а информации по их применению мало. Для многих они ещё остаются экзотикой и загадкой [2–4].

Цель этой статьи — познакомить разработчиков с бесплатными программами-калькуляторами, доступными по ссылке [5]. Автор выражает благодарность В.М. Денисенко, создавшему программы по ТЗ производителя и согласованной методике.

На рисунке 1 приведена упрощённая схема прямоходового преобразователя с фиксированной скважностью 0,35 и двухканальным выходом. Скважность задается постоянной вре-

мени цепочки R1–C6. Частота преобразования: 100 кГц. Канал 1 стабилизирован магнитным усилителем (МУ) на дросселе L2. Канал 2 классический, не стабилизированный. Конфигурация схемы выбрана для демонстрации программ. В практических схемах, как правило, присутствует ОС с канала 2 через оптопару на ШИМ-контроллер (или ОС с отдельной обмотки). Остальные выходы стабилизируются локальными МУ, обеспечивающими полную независимость каналов.

РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА

Задаём исходные данные (см. рис. 2). Питание от сети выбрано с учётом её колебаний. Коэффициент заполнения окна небольшой — 0,35; он выбирается с учётом изоляции между обмотками. Номинальное напряжение выходов 18 В

выбрано с учётом запаса на регулирование выходного напряжения с помощью МУ. Номинальный ток нагрузки в канале 1 выбирается ниже заданных 4 А, исходя из требуемой выходной мощности. Допустимая температура: 120°C. Ожидаемая макс. температура позволяет по желанию снизить это ограничение (автором выбрано 110°C). Отношение сопротивлений R_{AC}/R_{DC} позволяет уменьшить поверхностный эффект за счёт увеличения числа проводов. Стабилизация выходов: имеется в виду наличие общей ШИМ-стабилизации преобразователя.

Выбираем серию магнитопроводов (на рисунке 2 вверху справа). Доступны следующие серии.

1. MSTN. Недорогой нанокристаллический сплав АМАГ-200. Максимальная индукция: 1,2 Тл. Малые потери.

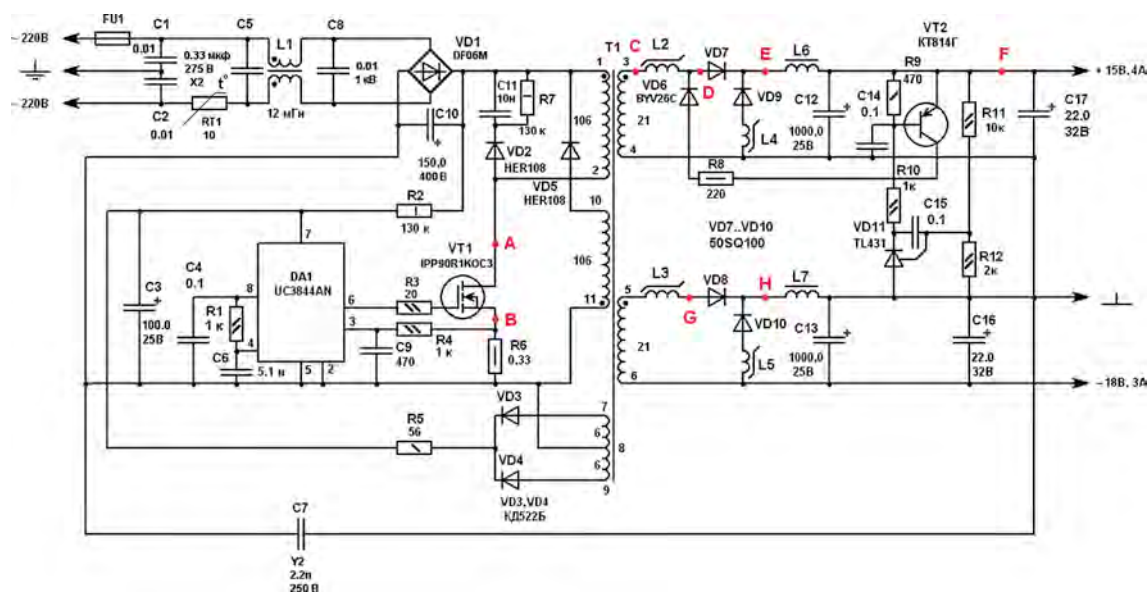


Рис. 1. Схема двухканального прямоходового конвертера

ForwardMST - Расчет импульсного трансформатора прямоходового преобразователя на магнитопроводах серий MST (Версия 2000)

Исходные данные

Частота преобразования, кГц: 100

Коэффициент заполнения импульса, не менее: 0.33

Сопротивление канала Rds(on), Ом: 1 ☒ Rds(on) ☐ Uнас.

Напряжение насыщения Uнас., В: 1.268

Коэффициент заполнения окна: 0.35

Плотность тока, А/мм²: 7

Макс. температура окружающей среды: 40

Количество магнитопроводов в пакете: 1

Питание (неч., ном., макс.), В: 198 220 242

☐ DC ☒ AC

Выходные характеристики преобразователя

Стабилизация выходов: ☐ Есть ☒ Нет

Выходы: 1. 2. 3.

Номинальное напряжение, В: 18 18

Номинальный ток, А: 3.5 3.0

Падение на диодах, В: 0.7 0.7

Диаметр провода обмотки размагничивания, мм: 0.1

Результаты расчета

Размах индукция в магнитопроводе: 0.653 Т

Габаритная мощность трансформатора: 181.3 Вт

Потребляемая нагрузкой мощность: 120.9 Вт

Индуктивность первичной обмотки: 8.607 мГн

Макс. ток намагничивания перв. обмотки: 0.113 А

Амплитуда тока первичной обмотки: 1.401 А

Номинальный ток потребления (DC): 0.430 А

Максимальный ток потребления (AC): 0.647 А

Число витков первичной обмотки и обмотки размагничивания: 106

Диаметр провода обмотки размагничивания: 0.1 мм

Диаметр провода первичной обмотки: 0.38 мм

Число проводов в первичной обмотке: 1

Длина первичной обмотки: 3.108 м

Сопротивление первичной обмотки (DC): 479.555 мОм

Отношение Rac/Rdc первичной обмотки: 1.0000

Мощность потерь в первичной обмотке: 0.381 Вт

Серия магнитопровода: MST-TH cores

Результаты расчета

Сердечник: 1 шт. MST-195-TH (19.5x12.7x6.0)

Габариты пакета (Dxdxh): 21.7 x 11.0 x 8.2 мм

Габариты трансформатора (Dxdh): 26.0 x 13.5 мм

Коэффициент заполнения окна: 0.291

Мощность потерь в обмотках: 0.808 Вт

Мощность потерь в магнитопроводе: 0.732 Вт

Полная мощность потерь: 1.540 Вт

КПД преобразователя: 94.79 %

Ожидаемое превышение температуры: 57.8 град.

Ожидаемая температура трансформатора: 97.8 град.

Последовательность намотки: Первичная обмотка - Вторичные обмотки

Оптимизация

Число витков в первичной обмотке: 106

Первич. обмотка: 1. 2. 3.

Диаметр провода обмоток, мм: 0.38 0.67 0.67

Число проводов в обмотках: 1 1 1

Максимальная амплитуда вторичных обмоток, Вольт: 1.64.4 2.64.4 3.

Старт оптимизации

Автоматические расчеты

Ожидаемая макс. температура, не более: 110 град.

Выбор магнитопровода: MST-195-TH

Автоматический выбор магнитопровода и его расчет

Сохранить Загрузить

Выход

Отношение сопротивлений Rac/Rdc, не более: 2

Предыдущий размер Следующий размер

Рис. 2. Расчет трансформатора прямоходового конвертера

Рабочая температура: до 120°C. Магнитная проницаемость: не менее 20000.

2. MST. Аморфный сплав AMAF-186 с высоким содержанием кобальта. Максимальная индукция: 0,9 Тл. Потери немного выше AMAF-200. Рабочая температура: до 120°C. Типовая магнитная проницаемость: 2000. Очень линейная «плоская» петля гистерезиса, проницаемость мало зависит от размаха индукции и частоты, что важно для резонансных преобразователей. Часто применяется для прецизионных трансформаторов тока.

В данной схеме (см. рис. 1) применение серии MSTN может создать проблемы с размагничиванием магнитопровода из-за высокой индуктивности первичной обмотки. Большой период собственных колебаний контура первичной обмотки (первичная обмотка T1 — емкость Cси VT1) может потребовать снижения частоты преобразования или применения другой топологии (например, косого полумоста). Выбираем серию MST.

Программа выводит результаты после нажатия кнопки *Автоматический выбор магнитопровода и его расчет* (см. рис. 2). Предусмотрена ручная оптимизация проекта с возможностью выбора другого магнитопровода, изменения числа витков, диаметра провода и числа проводов каждой обмотки. Например, если потери в магнитопроводе значительно больше, чем в проводах, следу-

ет увеличить число витков первичной обмотки. Если потери в какой-то обмотке доминируют, увеличивается диаметр провода в ней и т.д. Как вариант поиска лучшего решения рекомендуется провести серию последовательных расчетов, изменяя исходную плотность тока в диапазоне 10–2 А/мм². Оптимальный вариант находится в соответствии с конкретными требованиями пользователя. Аналогично работает программа расчета трансформатора двухтактного преобразователя [6].

РАСЧЁТ ДРОССЕЛЯ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ (МУ) L2

Дроссель L2 образует с нагрузкой делитель напряжения. Магнитопровод с прямоугольной петлёй гистерезиса (ППГ) работает по частному циклу. На прямом участке петли гистерезиса (ПГ) магнитопровод намагничивается до полного насыщения, что соответствует очень низкой проницаемости и минимальному импедансу дросселя. Т.е. делителя фактически нет, и весь импульс напряжения прикладывается к нагрузке. На обратном участке ПГ магнитопровод перемагничивается малым обратным током управления, его импеданс становится максимальным, и в следующем цикле он практически отключает нагрузку на определённое время. МУ вырезает часть входного импульса, что приводит к уменьшению коэффициента заполнения (см. рис. 3, осциллограммы C, D; H, E). Величина вырезаемой вольт-секундной площади (потока) регулируется током

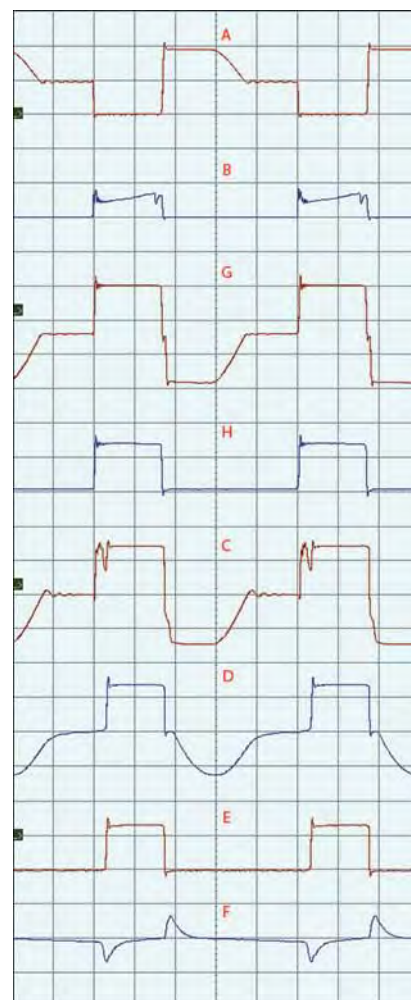


Рис. 3. Осциллограммы в характерных точках схемы рисунка 1

управления, который определяет точку возврата по ПГ. Максимальный ток управления соответствует предельной ПГ. При этом вырезается максимальная часть импульса, и выходное напряжение минимально или отключено. Особенно эффективны эти схемы в низковольтных силовых многоканальных источниках [7].

В целях сокращения объёма далее скриншоты рабочих окон программ заменены таблицами. Оригиналы расчётов см. [5]. Задаём исходные данные (см. табл. 1). Следует заметить, что программа расчёта трансформатора (см. рис. 2) имеет всплывающие подсказки.

Это текстовые пояснения и некоторые дополнительные данные. Например, при наведении курсора на выходное напряжение появляются данные об амплитуде импульса выходного напряжения. Это значение (64,4 В) мы используем далее при расчёте дросселя МУ. Коэффициент заполнения окна достигает 0,45. Опция *Только регулирование* используется, если не требуется защита по выходному току. *Работа с отключением* — когда используется защита по току с полным отключением выхода. *Однослойная обмотка* (в один ряд витков к витку) имеет минимальную паразитную ёмкость. *Многослойная обмотка*

позволяет минимизировать размеры дросселя МУ. *Плотность тока в диапазоне от и до* — программа автоматически перебирает весь заданный диапазон плотности тока и выбирает оптимум по минимальному перегреву.

Серия магнитопроводов. Доступны следующие серии.

1. MSSA-L. Аморфный материал АМАГ-172 на основе кобальта с малой коэрцитивной силой и индукцией 0,6 Тл. Отжиг в продольном поле. Коэффициент прямоугольности на частоте 100 кГц: около 0,98.
2. MSSA-N. Тот же материал. Отжиг без поля. Коэффициент прямоугольности на частоте 100 кГц: около 0,94. Коэрцитивная сила немного ниже относительно MSSA-L. Более плавная кривая регулирования. Используется в ряде применений, когда не устраивает первая серия.
3. MSSN. Недорогой нанокристаллический материал АМАГ-200. Отжиг в продольном поле. За счёт высокой индукции (1,2 Тл) дроссель имеет минимальные габариты. Коэрцитивная сила и ток управления выше MSSA-L. Ограниченный ряд типоразмеров.

Программа выдаёт две температуры дросселя: *температуру дросселя в рабочем режиме (регулирование)* и *температуру при отключении* (защита). Если температура при отключении высокая, на этапе оптимизации можно увеличить число витков дросселя. При этом *температура при отключении* и *ток управления* снижаются, а *температура дросселя* в рабочем режиме повышается. Так, при автоматическом расчёте программа выдаёт для нашего случая 21 виток провода 0,8 мм. *Температура дросселя: 72,3°C. Температура при отключении: 119,9°C*. На этапе оптимизации увеличиваем вручную число витков до 28 и получаем данные, представленные в таблице 1. Малый ток управления позволяет снизить потери транзистора VT2, однако для МУ критичен обратный ток диода VD7. Это постоянная составляющая тока управления, которая приводит к уменьшению верхней границы диапазона регулирования. Для диодов Шоттки обратный ток значителен и растёт с увеличением температуры. Не следует проектировать дроссель МУ с очень малым током управления. Иногда даже приходится отказываться от применения диодов Шоттки.

РАСЧЁТ ВЫХОДНЫХ ДРОССЕЛЕЙ L6, L7

В группе *Исходные данные* (см. табл. 2) не следует указывать неоправданно низкий *минимальный выходной ток*. Это ведёт к увеличению габарита дросселей, т.к. именно это значение используется для расчёта требуемой

Таблица 1. Расчёт дросселя магнитного усилителя L2

Исходные данные		Результаты расчёта	
Наименование	Значение	Наименование	Значение
Выходное напряжение, В	15	Сердечник	MSSN-10B-L
Максимальный ток, А	4	Размеры, мм	11,9-5,8-6,3
Максимальное входное напряжение, В	64,4	Число витков дросселя	28
Частота, кГц	100	Диаметр провода, мм/число проводов	0,67/1
Коэффициент заполнения импульса	0,33	Коэффициент заполнения окна	0,374
Коэффициент заполнения окна, не более	0,4	Диаметр/высота дросселя, мм	13,5/9,4
Падение напряжения на диоде, В	0,7	Минимальное вх. напряжение, В	52,6
Падение напряжения на индукторе, В	0,1	Ток управления (регулирование), мА	16,7
Макс. температура окружающей среды, °C	40	Ток управления (отключение), мА	30,8
Количество магнитопроводов в пакете	1	Примерная длина обмотки, м	0,629
Вид регулирования	С отключен.	Сопротивление обмотки (DC), мОм	31,2
Вид схемы	Однотактная	Отношение RAC/RDC	1,166
Вид обмотки	Многослойная	Плотность тока, А/мм ²	6,55
Ожидаемая температура дросселя, не более, °C	100	Амплитуда переменной составляющей индукции, Тл	0,171
Число проводов в обмотке, не более	1	Мощность потерь в магнитопроводе, Вт	0,131
		Мощность потерь в обмотке, Вт	0,176
Плотность тока в диапазоне, А/мм ²	3÷7	Полная мощность потерь, Вт	0,307
		Температура дросселя, °C	74,1
Серия магнитопроводов	MSSN	Температура при отключении, °C	96,4

Таблица 2. Расчёт выходного дросселя L6

Исходные данные		Результаты расчёта	
Наименование	Значение	Наименование	Значение
Номинальный выходной ток, А	4	Сердечник	APM18P125
Минимальный выходной ток, А	0,6	Размеры, мм	18,0-9,0-7,1
		Число витков дросселя	39
Выходное напряжение, В	15	Диаметр провода, мм/число проводов	0,67/2
		Коэффициент заполнения окна	0,432
Амплитуда импульса перед дросселем, В	64,4	Плотность тока, А/мм ²	5,712
		Диаметр/высота дросселя, мм	21,1/13,4
Частота, кГц	100	Индуктивность дросселя, мкГн	70,529
		Индуктивность без тока смещения, мкГн	135,369
Коэффициент заполнения окна, не более	0,47	Макс. напряжённость магнитного поля, Э	57,01
		Максимальная индукция, Тл	0,507
Макс. температура окружающей среды, °C	40	Амплитуда переменной составляющей индукции, Тл	0,064
		Примерная длина обмотки, м	1,113
Количество магнитопроводов в пакете	1	Сопротивление обмотки, мОм	34,2
		Мощность потерь в обмотке, Вт	0,547
Ожидаемая температура дросселя, не более, °C	125	Мощность потерь в магнитопроводе, Вт	0,137
		Полная мощность потерь, Вт	0,684
Число проводов в обмотке, не более	3	Ожидаемое превышение температуры, °C	35,3
		Макс. температура дросселя, °C	75,3
Серия магнитопроводов	APMP125	Эффективность (КПД), %	98,87

Таблица 3. Расчёт помехоподавляющих дросселей

Исходные данные		Результаты расчёта	
Наименование	Значение	Наименование	Значение
Выходное напряжение, В	15	Сердечник	MSB-04S-N
Выходной ток, А	4	Размеры, мм	5,1-1,5-6,0
Коэффициент заполнения импульса	0,33	Число витков дросселя	3
Время обратного восстановления диода, нс	50	Диаметр провода, мм/число проводов	0,45/1
Коэффициент заполнения окна, не более	0,35	Коэффициент заполнения окна	0,27
		Примерная длина обмотки, м	0,053
Плотность тока, А/мм ²	15	Сопротивление обмотки, мОм	6,4
		Плотность тока, А/мм ²	14,448
Вид преобразователя	Прямоходовой	Диаметр/высота дросселя, мм	6,2/7,1
		Мощность потерь в обмотке, Вт	0,034
Конструктивный вид дросселя	Многовитковый	Перегрев от потерь в обмотке, °С	16,4

Таблица 4. Расчёт дросселя сетевого синфазного фильтра

Исходные данные		Результаты расчёта	
Наименование	Значение	Наименование	Значение
Индуктивность обмотки, не менее, мГн	12	Сердечник	MSFN-10S-TH
На частоте, кГц	100	Размеры, мм	11,3-5,3-5,6
Макс. ток, А	0,65	Число витков дросселя	2×49
Зазор между обмотками, мм	0,5	Диаметр провода, мм/число проводов	0,3/1
Коэффициент заполнения окна, не более	0,35	Коэффициент заполнения окна	0,314
Плотность тока, не более, А/мм ²	10	Диаметр/высота дросселя, мм	12,8/8,6
Макс. температура окружающей среды, °С	40	Мин. индуктивность (10 кГц), мкГн	53,542
Количество магнитопроводов в пакете	1	Мин. индуктивность (100 кГц), мкГн	12,485
Вид фильтра	Однофазный	Примерная длина обмотки, м	2×0,975
Ожидаемая температура дросселя, не более, °С	90	Сопротивление обмотки, мОм	241,3
Число проводов в обмотке, не более	1	Плотность тока, А/мм ²	9,2
		Мощность потерь в обмотке, Вт	0,249
Серия магнитопроводов	MSFN	Температура дросселя, °С	71,7

индуктивности. Величину *амплитуды импульса перед дросселем* берём из программы расчёта трансформатора (см. рис. 2). Величину *коэффициента заполнения окна* можно выбирать повыше (0,45÷0,47). Когда окно полностью заполнено проводом, как правило, достигается минимум потерь и перегрева.

Серия магнитопроводов. Для выбора доступны следующие серии.

1. MSC. Серия из известного аморфного материала 2НСР с распределённым зазором. Максимальная индук-

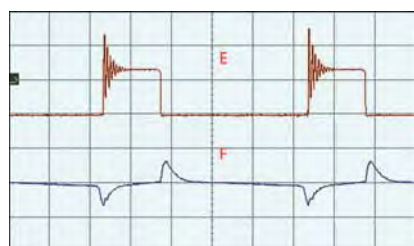


Рис. 4. Осциллограммы в точках Е, F с замкнутым дросселем L4

ция: 1,5 Тл. Изделия имеют высокий коэффициент индуктивности, средние потери, максимальное поле смещения: до 35 Э.

2. MSC-L. Тот же материал. Малогабаритные низкопрофильные магнитопроводы с распределённым зазором, применяемые в микросборках.
3. APHP60, APHP90. Новейшая серия порошковых магнитопроводов на основе измельчённой аморфной ленты с покрытием. Максимальная индукция: 1,5 Тл. Очень высокое максимальное поле смещения за счёт высокой индукции — до 100 Э для серии APHP90 (проницаемость 90) и выше 150 Э для серии APHP60. Очень малые потери, на уровне лучших импортных магнетодиэлектриков, имеющих гораздо меньшее допустимое поле смещения [10].
4. ARMP60, ARMP90, ARMP125. Новейшая серия порошковых магнитопроводов на основе измельчённой нанокристаллической ленты с покрытием. Индукция: 1,2 Тл. Проницаемость,

соответственно: 60, 90, 125. Самые малые потери — ниже, чем у серии APHP. Допустимое поле смещения меньше относительно серии APHP из-за меньшей индукции.

В нашем случае выходной ток небольшой, оптимальна порошковая серия с максимальной проницаемостью и минимальными потерями ARMP125. Результат расчёта дросселя L6 см. в таблице 2. Можно использовать тот же дроссель L7.

ВЫБОР ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ L3–L5

Помехоподавляющие дроссели применяются взамен традиционных демпферных RC-цепей (снабберов), включаемых параллельно диодам. Дроссели формируют паузу на время обратного восстановления диодов. Они блокируют быстрые изменения тока, изменяют характер переключения на мягкий, устраняя саму причину помех. Дроссели имеют меньший габарит относительно классических снабберов и меньшие потери [8].

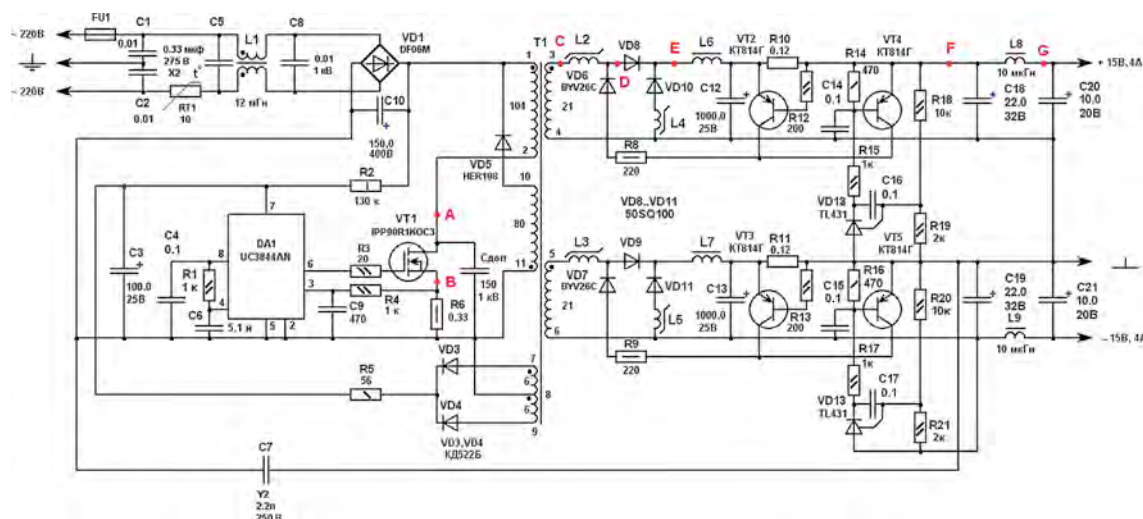


Рис. 5. Вариант схемы двухполярного источника

Магнитопроводы серии MSB, как правило, используются как одновитковые дроссели, т.е. надеваются на выводы элементов. В данном случае (для небольшого выходного тока) они используются автором в качестве трёхвитковых дросселей, устанавливаемых отдельно. Результаты расчёта приведены в таблице 3.

РАСЧЁТ СИНФАЗНОГО ФИЛЬТРА

Задаём требуемую индуктивность обмотки 12 мГн на частоте преобра-

зования 100 кГц (см. табл. 4). В программе можно задать индуктивность на двух частотах — 100 и 10 кГц. На этих частотах производителем нормируется коэффициент индуктивности магнитопроводов.

Из данных расчёта трансформатора (см. рис. 2) берём **максимальный ток потребления (AC)** 0,65 А. Обмотки разделены диэлектрической вставкой для исключения пробоя. Задаём зазор между обмотками, фактически равный толщине вставки — 0,5 мм.

Плотность тока для открытых обмоток может быть высокой при допустимом перегреве. Задаём 10 А/мм². Данные расчёта приведены в таблице 4.

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность всехмоточных компонентов и показала неплохое совпадение расчётных данных с фактическими (см. табл. 5).

При проектировании печатной платы необходимо учитывать взаимное тепловое влияние элементов,

Новые линейки регулируемых маломощных источников питания

КОМПАКТНЫЕ
TMR 1, TMR 15M

- Выходная мощность 1Вт
- Компактные размеры:
SMD 19x17x9мм
SIP 17x8x11мм
- Устойчивы на холостом ходу
- Дистанционное управление для TMR 15M
- Привлекательная цена

КОММЕРЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ
TMR 2E, TMR 3E, TMR 3WIE

- Выходная мощность 2-3 Вт
- Популярный корпус SIP 22x9x11мм
- Вход 2:1, 4:1
- Отличное соотношение цена/качество
- Для замены популярных серий TMR, TMR 3, TMR 3WI

С БОЛЬШОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ
TMR 6, TMR 6WI

- 6 Вт!** - самая большая мощность в корпусе SIP
- Очень высокая удельная мощность - 3 Вт/см²
- Вход 2:1, 4:1
- Модели с выходным напряжением 3.3В, 9В и 24В
- Высокий КПД - до 86%
- Полная выходная мощность в диапазоне температур:
TMR 6 -40...+65°C
TMR 6WI -40...+71°C
- Очень высокая надежность
- Опционально металлический корпус**
- Устойчивы на холостом ходу

НА ШАГ ВПЕРЕДИ

Москва Тел.: (495) 660-28-55 Факс.: (495) 660-28-55 cmp@argussoft.ru

Санкт-Петербург Тел.: (812) 412-01-07 Факс.: (812) 412-18-49 spb@argussoft.ru

Новосибирск Тел.: (383) 227-11-55 Факс.: (383) 222-40-31 nsk@argussoft.ru

Екатеринбург Тел.: (343) 378-32-42 Факс.: (343) 378-32-41 ural@argussoft.ru

Казань Тел.: (843) 206-01-12 Факс.: (843) 293-41-00 kazan@argussoft.ru

Ростов-на-Дону Тел.: (863) 231-56-56 Факс.: (863) 242-44-52 rostov@argussoft.ru

www.argussoft.ru

ARGUSSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

РЕКЛАМА

Электронные компоненты №2 2014



Рис. 6. Осциллограммы в характерных точках схемы рисунка 5

увеличивающее перегрев. Дроссель L2 одновременно выполняет функцию помехоподавляющего (для диода VD7). Поскольку он гасит высокочастотные колебания на фронтах импульсов, его перегрев значительно выше расчётного. Во всех случаях необходима практическая проверка проекта с измерением рабочей температуры компонентов.

На рисунке 3 приведены осциллограммы в характерных точках схемы. В качестве иллюстрации эффективности помехоподавляющих дросселей L4, L5 на рисунке 4 представлены осциллограммы в точках E, F при исключённом дросселе L4.

В заключение кратко остановимся на интересной особенности работы прямоходового конвертера в том случае, когда в схеме нет классического выхода. Рассмотрим, например, двухканальный стабилизированный источник ± 15 В, 4 А на рисунке 5.

В этом случае дроссели МУ отключают выход в части периода и исключают переход энергии собственных колебаний контура первичной обмотки в нагрузку. Это может быть использовано при разработке схем с включением транзистора при нуле напряжения (ZVS). Для сетевых источников с целью снижения напряжения на ключе, как правило, применяют активное демпфирование. В компромиссном варианте (см. рис. 5)

Таблица 5. Результаты экспериментальной проверки проекта

Элемент схемы	Конструкция	Параметр	Расчётное значение	Фактическое значение
Дроссель выходного фильтра L6	APM18P125 (18,0-9,0-7,1) 39 вит. 2×0,67 мм	Длина провода, м	1,11	1,06
		Внешний диаметр, мм	21,1	20,5
		Высота, мм	13,4	11,5
		Индуктивность без смещения, мкГн	135,4	137,5
		Перегрев, °С	35,3	31
Дроссель магнитного усилителя L2	MSSN-10B-L (10,0-6,8-4,5) 28 вит. 0,67 мм	Внешний диаметр, мм	13,5	13,4
		Высота, мм	9,4	9,0
		Длина провода, м	0,63	0,60
		Перегрев (регулирование), °С	34,1	45
Трансформатор T1	MST-19S-TH (19,5-12,7-6,0) 106 вит. 0,38 мм 106 вит. 0,1 мм 2×6 вит. 0,1 мм 2×21 вит. 0,67 мм	Перегрев (отключение), °С	56,4	48
		Внешний диаметр, мм	26,0	25,5
		Высота, мм	13,5	15
		Индуктивность первичной обмотки, мГн	8,6	8,5
		Индуктивность рассеяния, мкГн	—	40,5
Дроссель сетевого фильтра L1	MSFN-10S-TH (10,0-6,5-4,5) 2×49 вит. 0,3 мм	Перегрев, °С	57,8	63,0
		Внешний диаметр, мм	12,8	13,0
		Высота, мм	8,6	8,5
		Индуктивность (10 кГц), мГн	53,5	60
		Индуктивность (100 кГц), мГн	12,5	13,5
		Перегрев, °С	31,7	36

напряжение на стоке транзистора VT1 ограничено на уровне 700 В за счёт размагничивающей обмотки. При этом включение транзистора VT1 происходит не в нуле, но с достаточно малым напряжением стока (около 50 В — осциллограмма A, см. рис. 6) при минимальном токе, т.к. нагрузка отключена дросселем МУ. Подключение нагрузки и скачкообразный рост тока VT1 происходят с задержкой, уже при нулевом напряжении на стоке (см. осциллограммы A, B, D на рисунке 6). Малое напряжение и ток в момент включения VT1 снижают ВЧ-помехи и динамические потери. Подбором $C_{доп}$ обеспечивается совпадение момента включения VT1 с минимумом напряжения на стоке. Благодаря уникальной линейности ПГ (без зазора) и стабильности свойств магнитопровода [9] это совпадение сохраняется независимо от выходного тока, температуры, входного напряжения и т.д. Транзисторы VT2, VT3 обеспечивают ограничение выходного тока каналов на заданном уровне (источник тока). Дроссели L8, L9 сглаживают ВЧ-пульсации и выполнены на низкопрофильных магнитопроводах MSC1020. Они имеют 16 витков провода диаметром 0,67 мм. Расчёт был выполнен с помощью той же программы для выходных дросселей (п. 3) исходя из требуемой индуктивности при заданном токе нагруз-

ки. Осциллограммы приведены на рисунке 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martin Ferch. Magnetec GmbH. Application examples of nanocrystalline inductive components in today's power electronic systems. Soft Magnetic Materials Conference. Budapest. Hungary. September 2013.
2. В.С. Чернов, О.Г. Иванов и др. Российские аморфные и нанокристаллические магнитные материалы: физические свойства и применение. М. Научно-технические. №10. 2008.
3. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы МСТАТОР//www.mstator.ru.
4. Ленты аморфные и нанокристаллические//www.mstator.ru.
5. Программы для расчёта компонентов. Дизайн-центр//www.mstator.ru.
6. Особенности и порядок работы с программой//www.mstator.ru.
7. Э. Фоченков. Применение аморфных магнитопроводов насыщения серии MSSA в многоканальных импульсных источниках питания//www.mstator.ru.
8. Э. Фоченков. Применение малогабаритных помехоподавляющих магнитопроводов из аморфных металлических сплавов. Радио. №2. 2003.
9. Магнитопроводы для силовых трансформаторов ИИП//www.mstator.ru.
10. Новейшие порошковые магнитопроводы APH, APM//www.mstator.ru.