

Аморфные и нанокристаллические сплавы в импульсных источниках питания. Программы расчёта моточных компонентов.

Аннотация:

Иллюстрация пяти программ - калькуляторов для разработки электромагнитных компонентов ИИП с применением современных магнитомягких материалов - аморфных и нанокристаллических сплавов. Пример разработки многоканального форвард конвертера. Расчёт дросселя сетевого фильтра, силового трансформатора, дросселя магнитного усилителя, выходных дросселей, помехоподавляющих дросселей. Советы, рекомендации, полезные ссылки, сравнение расчётных и экспериментальных данных. В помощь профессионалам и радиолюбителям. Программы доступны на сайте www.mstator.ru в группе «Дизайн-центр».

Примечание: Компактная версия статьи «Программы расчёта моточных изделий в импульсных преобразователях» опубликована в журнале «Электронные компоненты», №2, 2014 год.

Сведения об авторе: Фоченков Эдуард Анатольевич. Ведущий инженер, нач. бюро механизации и автоматизации ОАО МСТАТОР, г. Боровичи Новгородской обл. Разработчик технологического оборудования и контрольно-измерительной техники. Технический консультант, автор ряда статей и технических материалов по свойствам и применению аморфных и нанокристаллических магнитопроводов, аппаратуре для измерения динамических параметров петли гистерезиса. Статьи опубликованы в журналах КИПиС, Радио, Электрическое питание и др.

Аморфные и нанокристаллические магнитные сплавы появились относительно недавно, с 1970 года. 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 и радиолюбителей с комплектом программ – калькуляторов [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 (R1, C6) скважностью 0.35 и двухканальным выходом. 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 обычно присутствует ОС с канала 2 через оптопару на ШИМ контроллер (или ОС с отдельной обмотки). Остальные выходы стабилизируются локальными МУ, обеспечивающими полную независимость каналов.

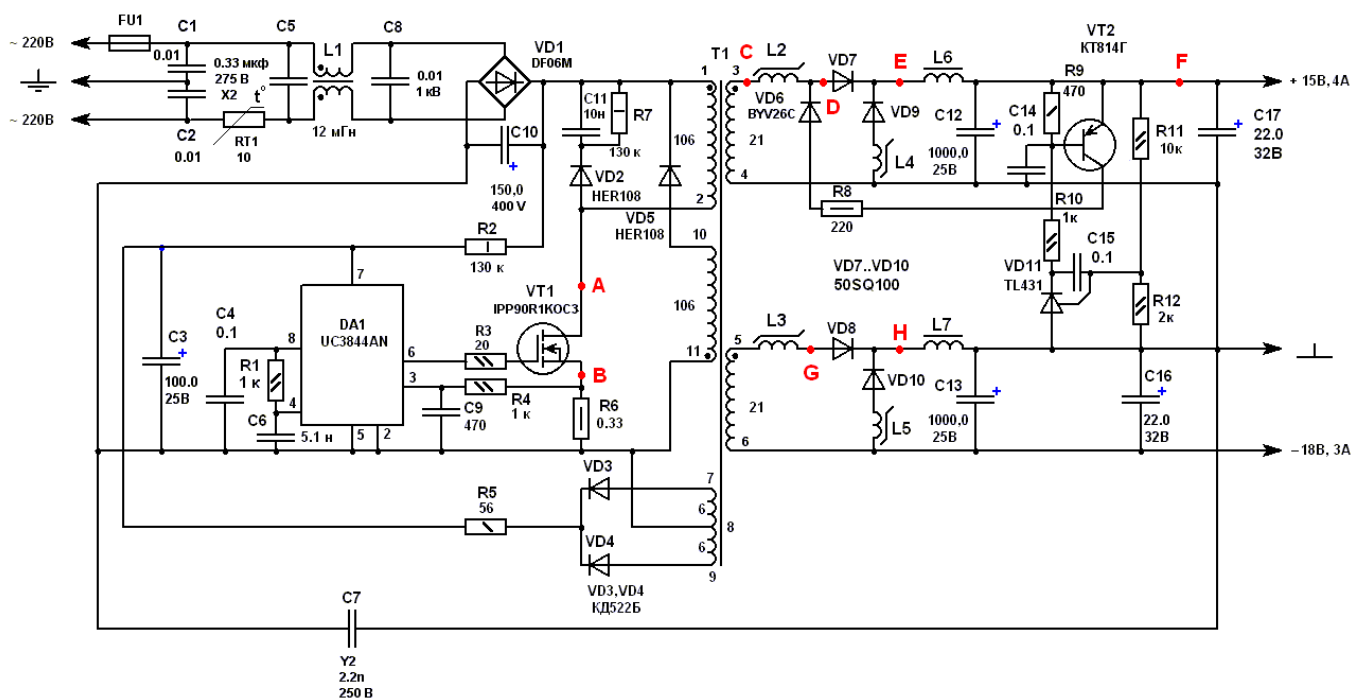


Рис.1. Схема двухканального прямоходового конвертера

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 4А, исходя из требуемой выходной мощности. Допустимая температура 120°C. Ожидаемая макс. температура позволяет по желанию снизить это ограничение (автором выбрано 110°C). Отноше-

ние сопротивлений R_{ac}/R_{dc} позволяет уменьшить поверхностный эффект (скин-эффект) за счёт увеличения числа проводов. Стабилизация выходов: имеется в виду наличие общей ШИМ-стабилизации преобразователя.

Серия магнитопроводов (вверху справа). Выбираем серию магнитопроводов (на рисунке 2 вверху справа):

1. MSTN. Недорогой нанокристаллический сплав АМАГ-200. Максимальная индукция 1.2 Тл. Малые потери. Рабочая температура до 120 °С. Магнитная проницаемость не менее 20 000.
2. MST. Аморфный сплав АМАГ-186 с высоким содержанием кобальта. Максимальная индукция 0.9 Тл. Потери немного выше АМАГ-200. Рабочая температура до 120 °С. Возможно изготовление из трёх близких сплавов, отличающихся проницаемостью: АМАГ-187 – проницаемость 1400; АМАГ-186 – проницаемость 2000; АМАГ-185 – проницаемость 3300. В схеме (рис. 1) использован магнитопровод из материала АМАГ-185 с проницаемостью 3300. 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 (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 Т1 – емкость $C_{сн}$ VT1) может потребовать снижения частоты преобразования или применения другой топологии (например, косого полумоста). Выбираем серию MST.

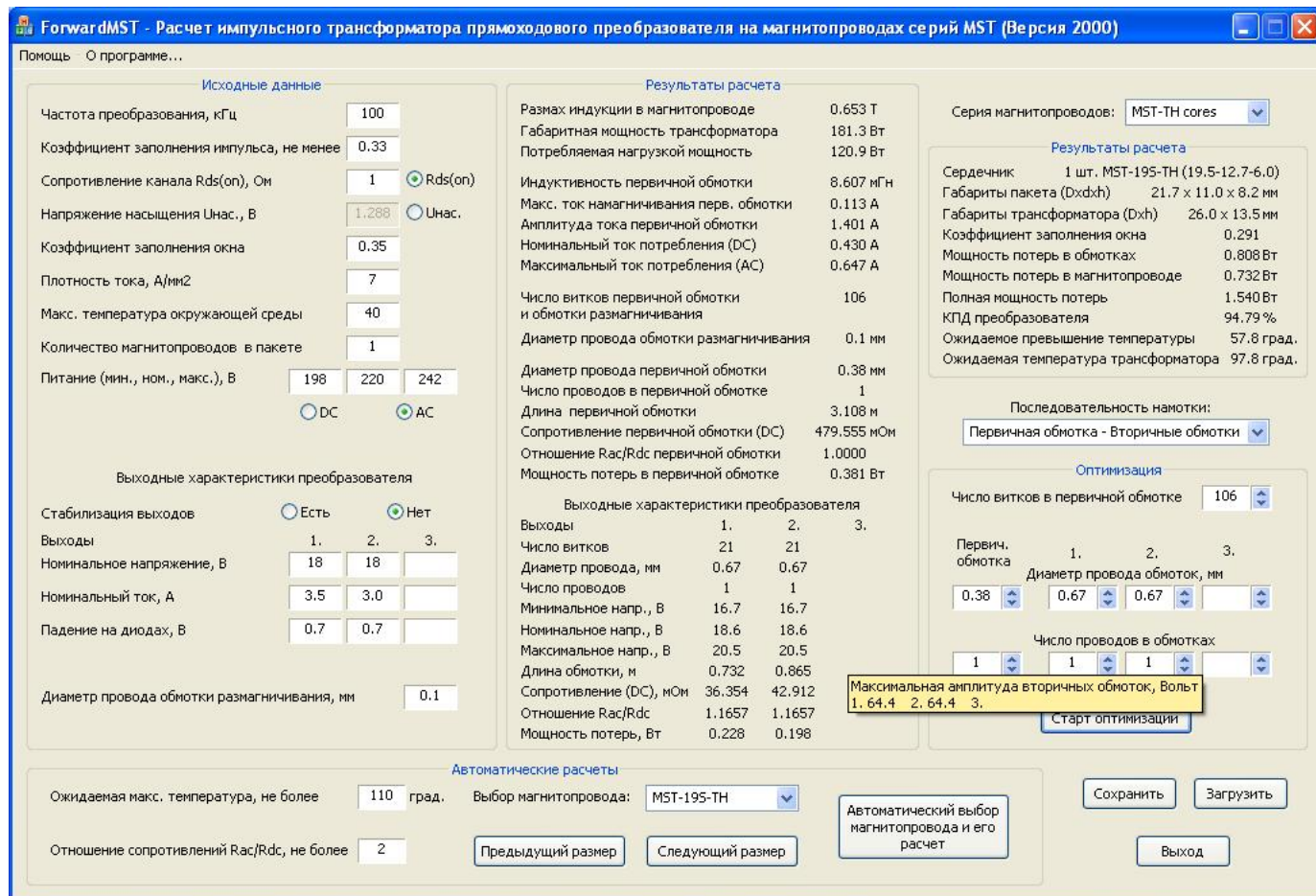


Рис.2. Расчёт трансформатора форвард конвертера

После нажатия кнопки *Автоматический выбор магнитопровода и его расчёт*, программа выводит результаты (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, нужно увеличить число витков первичной обмотки. Если потери в какой то обмотке доминируют, увеличивается диаметр провода в ней и т.п. Как вариант поиска лучшего решения, советую провести серию последовательных расчётов, изменяя исходную плотность тока в диапазоне от 10 до 2 А/мм². Лучший вариант далее оптимизируется в соответствии с конкретными требованиями разработчика [6].

Расчёт дросселя 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 цик-

ле он практически отключает нагрузку на определённое время. МУ «вырезает» часть входного импульса, что приводит к уменьшению коэффициента заполнения (см. рис. 7, осциллограммы С,D; Н,Е). Величина вырезаемой вольт-секундной площади (потока) регулируется током 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 сильноточных многоканальных источниках [7].

Задаём исходные данные (см. рис.3). 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 (64.4В) мы используем далее при расчёте дросселя МУ. Коэффициент заполнения окна может быть более высоким, до 0.45. Опция *Только регулирование* – используется, если не требуется функция защиты 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 перебирает автоматически весь заданный диапазон плотности тока и выбирает оптимум по минимальному перегреву.

Серия магнитопроводов. Доступны 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.

Рис.3. Расчёт дросселя магнитного усилителя L2

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, приведённые на рисунке 3. 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 ростом 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. рис.4) не следует указывать неоправданно низкий *минимальный выходной ток*. Это ведёт к увеличению габарита дросселей, т.к. именно это значение используется для расчёта требуемой 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, получается минимум потерь и перегрева.

Серия магнитопроводов. Для выбора доступны следующие серии:

1. MSC. Серия из известного аморфного сплава 2HCP с распределённым зазором. Максимальная индукция 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 150Э для серии APHP60 . Очень малые потери, на уровне лучших импортных магнитодиэлектриков, 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 приведён на рисунке 4. Можно использовать тот же дроссель L7.

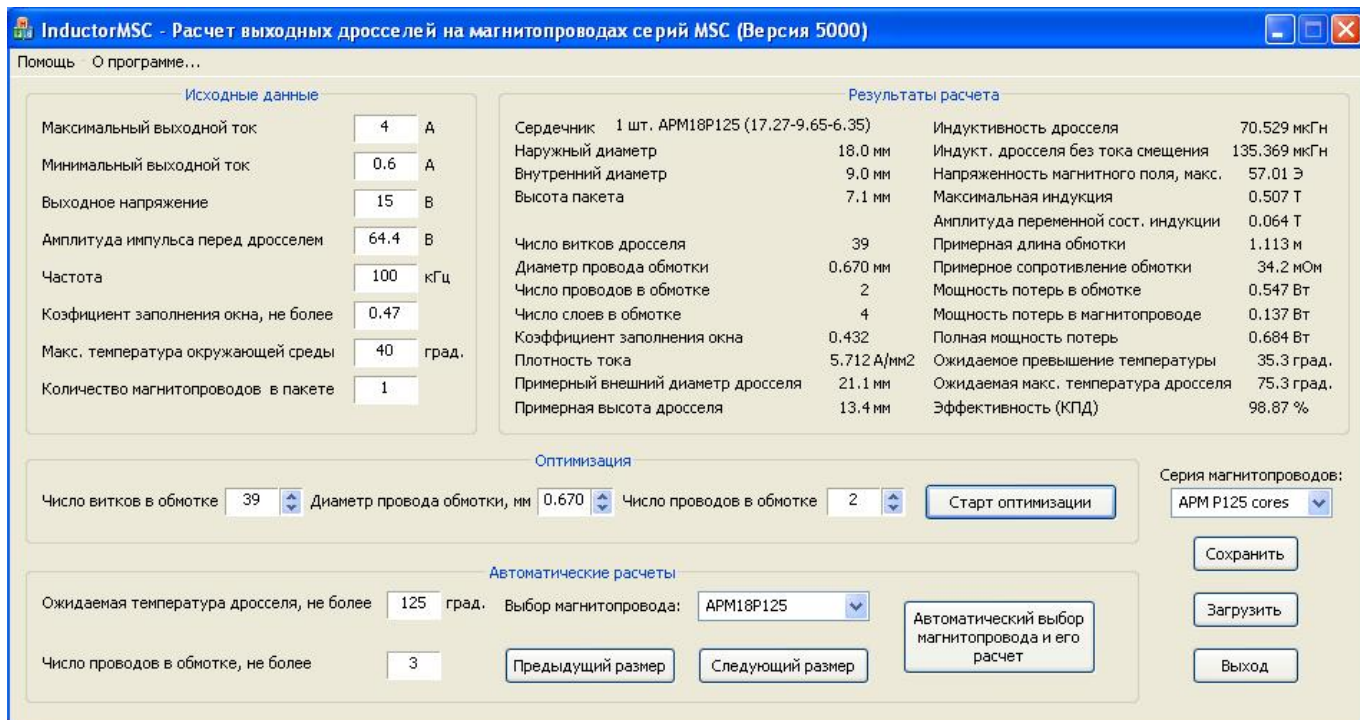


Рис. 4. Расчёт выходного дросселя L6

Выбор помехоподавляющих дросселей L3 - L5.

Помехоподавляющие дроссели применяются взамен традиционных RC демпферных 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].

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 на рисунке 5.

Расчёт синфазного фильтра.

Задаём требуемую *индуктивность обмотки* 12 мГн на частоте преобразования 100 кГц (см. рис.6). 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)* 0.65А. 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 на рисунке 6.

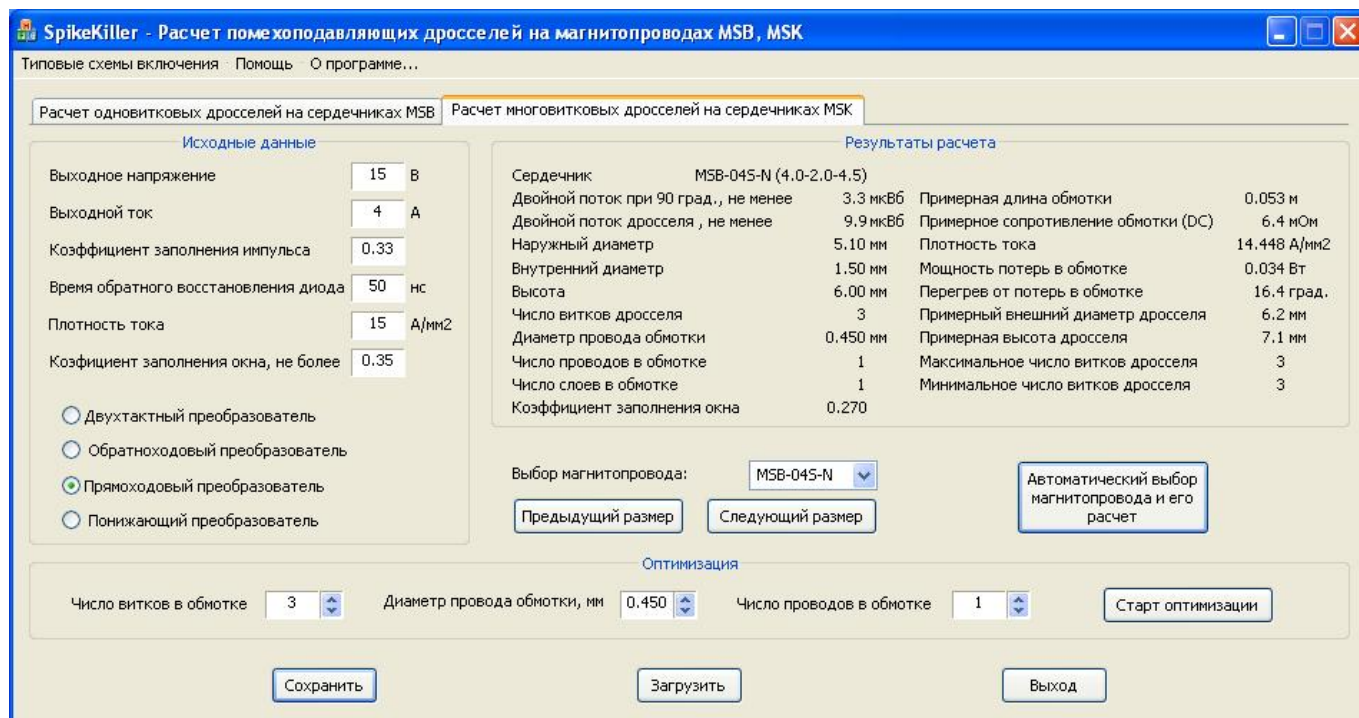


Рис.5. Расчёт помехоподавляющих дросселей

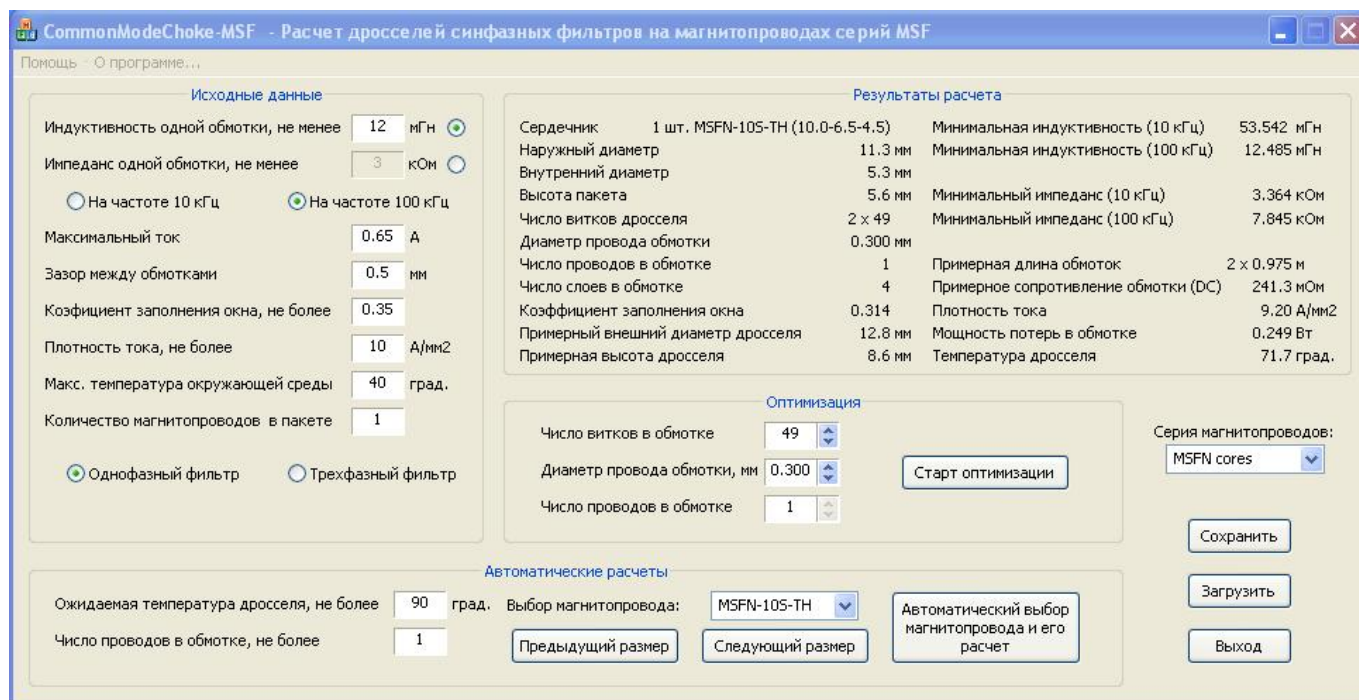


Рис.6. Расчёт дросселя сетевого синфазного фильтра

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность всех моточных компонентов и показала неплохое совпадение расчётных данных с фактическими (см. табл. 1).

При проектировании печатной платы необходимо учитывать взаимное тепловое влияние элементов, 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 7 приведены осциллограммы в характерных точках схемы. В качестве иллюстрации эффективности помехоподавляющих дросселей L4, L5 на рисунке 8 представлены осциллограммы в точках E,F при исключённом дросселе L4.

Таблица 1

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	31.0
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	45.0
		Перегрев (отключение), °С.	56.4	48.0
Трансформатор T1.	MST-19S-TH АМАГ-185 (Прониц. 3300) (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. 0.67мм.	Внешний диаметр, мм.	26.0	25.5
		Высота, мм.	13.5	15.0
		Индуктивность первичной обмотки, мГн.	8.6	8.5
		Индуктивность рассеяния, мкГн.	-	40.5
		Перегрев, °С.	57.8	63.0
Дроссель сетевого фильтра L1.	MSFN-10S-TH (10.0-6.5-4.5) 2×49 вит. 0.3 мм.	Внешний диаметр, мм.	12.8	13.0
		Высота, мм.	8.6	8.5
		Индуктивность (10 кГц), мГн.	53.5	60.0
		Индуктивность (100кГц), мГн.	12.5	13.5
		Перегрев, °С.	31.7	36.0

В заключение кратко остановимся на интересной особенности работы прямоходового конвертера в том случае, когда в схеме нет классического выхода. Рассмотрим, например, двухканальный стабилизированный источник ±15В, 4А на рисунке 9.

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. 9) напряжение на стоке транзистора VT1 ограничено на уровне 700В за счёт размагничивающей обмотки. При этом включение транзистора VT1 происходит не в нуле, но с достаточно малым напряжением стока (около 50В – осциллограмма А, см. рис.10) 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 А,В,Д на рисунке 10). 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 не зависимо от выходного тока, температуры, входного напряжения и т.п. В случае меньшего входного напряжения (например, DC-DC преобразователь) или используя высоковольтный транзистор, можно получить чистый ZVS преобразователь с переключением в нуле напряжения. В этом случае размагничивающая обмотка исключается. При этом качественные характеристики трансформатора повышаются. 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, исходя из требуемой индуктивности при заданном токе нагрузки. Осциллограммы приведены на рисунке 10.

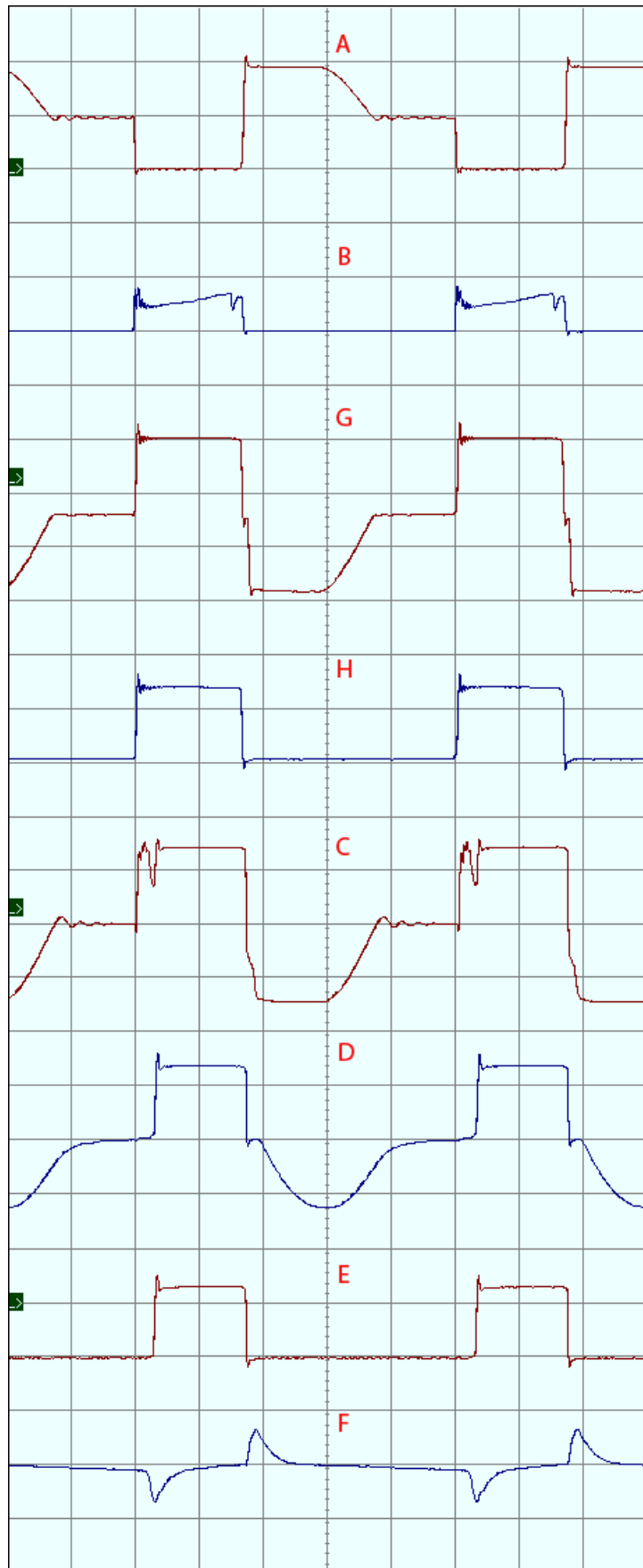


Рис. 7. Осциллограммы в характерных точках схемы рисунка 1

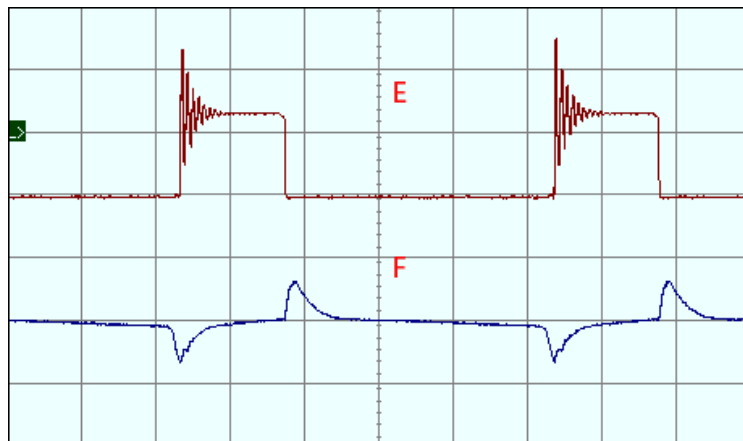


Рис. 8. Осциллограммы в точках E,F с замкнутым дросселем L4

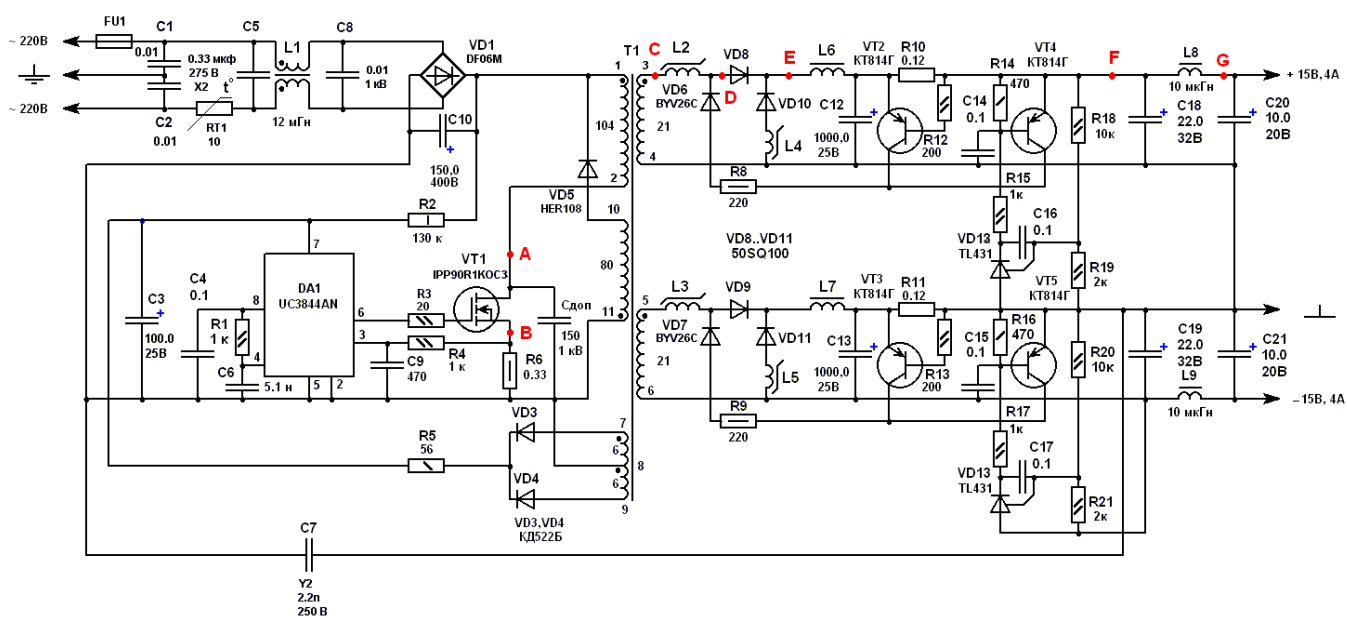


Рис.9. Вариант схемы двухполярного источника

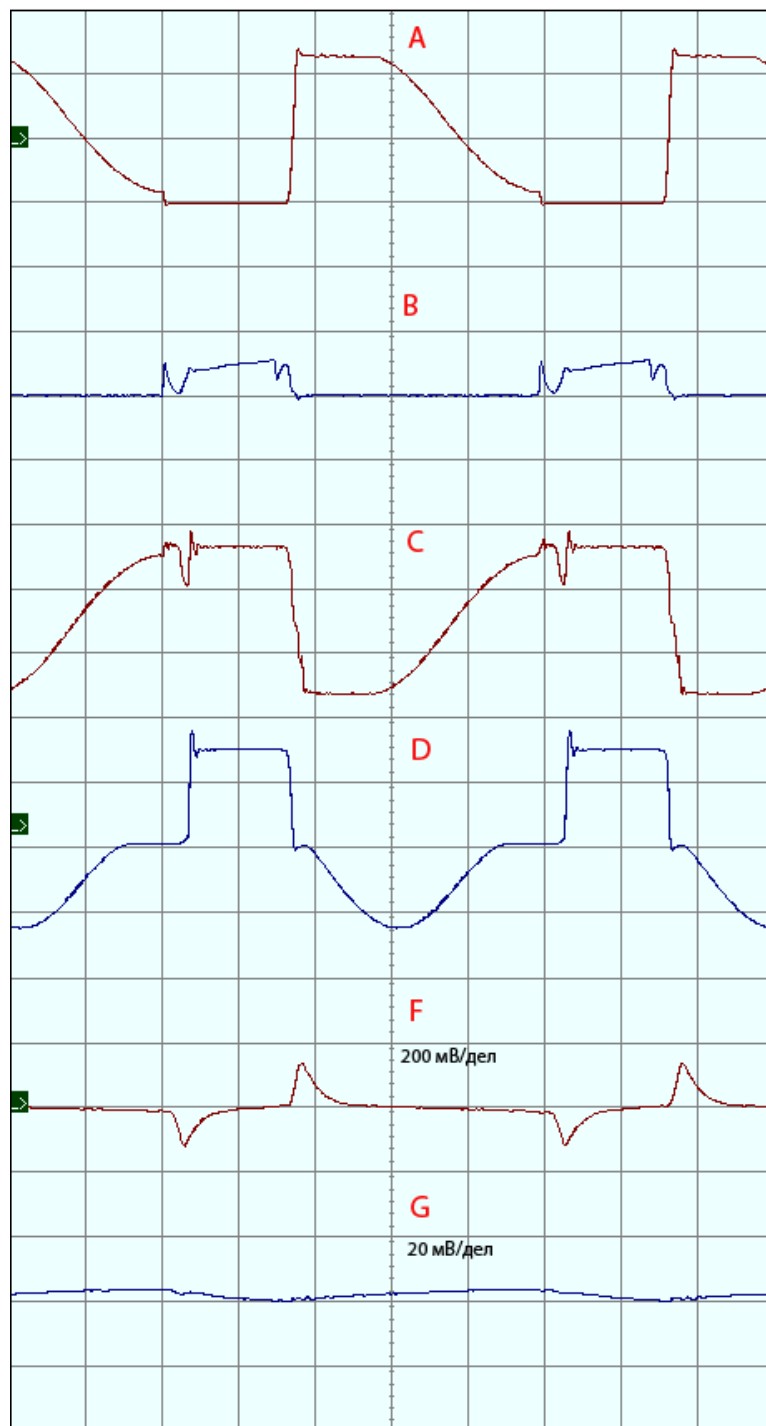


Рис. 10. Осциллограммы в характерных точках схемы рисунка 9.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Martin Ferch, Magnetec GmbH, Langenselbold, Germany: "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 технологии, №10, 2008 г.
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 программами. Дизайн-центр // www.mstator.ru.
7. Э.Фоченков. Применение аморфных магнитопроводов насыщения серии MSSA в многоканальных импульсных источниках питания. МСТАТОР. Аморфные магнитопроводы с прямоугольной петлёй гистерезиса. Информация по применению// www.mstator.ru.
8. Э. Фоченков. Применение малогабаритных помехоподавляющих магнитопроводов из аморфных металлических сплавов. Радио. №2, 2003.
9. Магнитопроводы для силовых трансформаторов ИПП // www.mstator.ru.
10. Новейшие порошковые магнитопроводы АРН, АРМ// www.mstator.ru.