

Схемотехническое моделирование силовых дросселей

для тиристорных преобразователей повышенной частоты

При разработке высокочастотных полупроводниковых источников питания — тиристорных преобразователей частоты — особое внимание необходимо уделить обоснованному выбору конструкции и определению номинальных параметров силовых дросселей, поскольку они во многом определяют массо-габаритные показатели изделий силовой электроники.

Целью статьи является изложение методики разработки и применения Spice-модели силового дросселя с магнитным сердечником при исследовании электромагнитных процессов в тиристорных преобразователях повышенной частоты. Авторами впервые приводятся результаты исследований разработанной параметрической модели дросселя, в которой выявлена зависимость индуктивности дросселя с сердечником от протекающего через него тока. Решение этой задачи расчетными методами неэффективно.

Зульфия Валиуллина
Юрий Зинин,
к. т. н.

z1983@mail.ru

В тиристорных преобразователях частоты (рис. 1) дроссель постоянного тока включается последовательно с выходом трехфазного мостового выпрямителя, поэтому в силовой обмотке дросселя протекает постоянная составляющая входного тока инвертора, модулированная током от выпрямителя частотой 300 Гц и током основной гармоники выходной частоты тиристорного инвертора.

Применение дросселя обеспечивает «токовый» режим работы тиристорного преобразователя с необходимой внешней характеристикой. Выпрямитель и дроссель рассматриваются совместно как эквивалентный источник тока, питающий автономный тиристорный инвертор высокой частоты.

Инвертор подключен к нагрузочному колебательному контуру с емкостной автотрансформацией напряжения, настроенному на первую или вторую гармонику выходного тока инвертора.

Важной функцией силового дросселя постоянного тока является ограничение уровня помех токов высокой частоты, проникающих в питающую сеть при работе ТПЧ [1]. На рис. 2 показана форма входного тока инвертора, которая характеризуется высокочастотными импульсными помехами

значительной амплитуды, возникающими при работе ТПЧ.

При схемотехническом моделировании ТПЧ имеется возможность изменения параметров модели в режиме Stepping, в простейшем случае дискретно изменяется, например, индуктивность дросселя постоянного тока.

Исследование влияния параметров дросселя на режимы работы автономного инвертора производится включением его модели в состав ТПЧ необходимой мощности и частоты и установлением оптимальной величины воздушного зазора.

При схемотехническом моделировании инвертора мощностью 120 кВт частотой 2500 Гц и дросселя входного тока с индуктивностью 3,2 мГн выявлено, что в цепи выпрямителя и дросселя протекает пульсирующий ток со средним значением 300 А, как это показано на рис. 2.

Из временной диаграммы, полученной с помощью схемотехнического моделирования, видно, что за период пульсаций 756 мкс амплитуда пульсаций тока диода выпрямителя и дросселя достигает 84 А. Это изменяет ход петли гистерезиса дросселя, которая может осуществляться по частному циклу.

В схемах тиристорных преобразователей частоты нами используется унифицированная конструкция

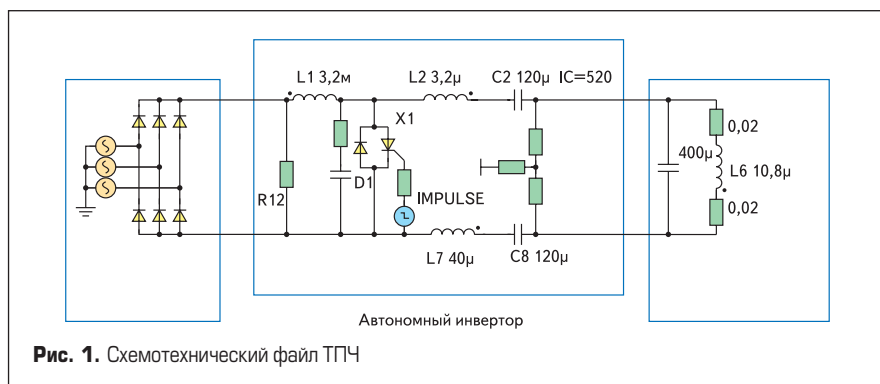


Рис. 1. Схемотехнический файл ТПЧ

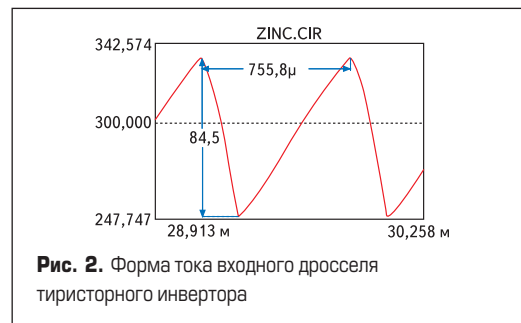


Рис. 2. Форма тока входного дросселя тиристорного инвертора

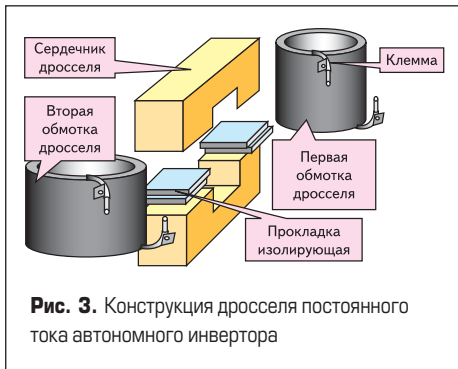


Рис. 3. Конструкция дросселя постоянного тока автономного инвертора

дросселя, выполненная на сердечнике из электротехнической стали и двух симметричных обмотках, включенных согласно и последовательно (рис. 3). Воздушный зазор обеспечивается в процессе сборки дросселя несколькими немагнитными прокладками толщиной 1 см.

Количество витков обмоток дросселя и основные размеры магнитной цепи не меняются для разных случаев применения дросселя, но его воздушный зазор устанавливается исходя из конкретного применения в инверторах различной мощности и частоты.

На сердечнике дросселя размещены две катушки из медной трубки. Отвод тепла, выделяющегося в дросселе, производится проточной водой системы охлаждения. Для повышения эффективности охлаждения «железа» дросселя применяются медные радиаторы. Стыжка конструкции дросселя производится латунными шпильками с изолирующими шайбами.

Для электротехнической стали, из которой выполнен сердечник дросселя, удельные потери и магнитная индукция являются основными нормируемыми характеристиками. При увеличении частоты преобразователя резко возрастают потери в дросселе, поэтому приходится снижать рабочую индукцию магнитопровода.

Считая предельно допустимыми по условиям нагрева и теплоотвода удельные потери 20 Вт/кг, необходимо снижать рабочую индукцию для частоты 400 Гц до 1,5 Тл, а для частоты 8000 Гц — до 0,2 Тл. Этими рекомендациями практически исчерпывались исходные данные для разработчика дросселя.

Аналитический расчет электромагнитной цепи с дросселем постоянного тока, который проводится при определении оптимальной величины зазора дросселя для его эффективного использования, очень сложен и дает приближенные результаты. Повышение точности результатов достигается средствами схемотехнического моделирования, например, применением программы MicroCap, в которой используются самые совершенные сегодня модели схемных элементов ТПЧ — тиристоров и диодов [2].

Программа MicroCap в настоящее время переведена на платформу Windows со стандартным многооконным интерфейсом. Система MicroCap обеспечивает использование макросов основных компонентов. В ней — простое задание начальных условий, а также имеется возможность применения моделей пользователя для нелинейной системы ТПЧ с автоматическим изменением расчетного параметра в необходимом диапазоне (режим Stepping).

Исходные файлы можно создавать в оригинальном формате, либо использовать описание схем и задание на моделирование в формате языка Spice.

Основу рассматриваемых схемотехнических файлов устройств силовой электроники — тиристорных преобразователей частоты — составляют модели полупроводниковых и электромагнитных элементов.

Математические модели Spice-элементов описываются большим количеством параметров, определяемых с помощью директивы MODEL. Пакет моделей Spice входит в состав практически всех программных продуктов схемотехнического моделирования, таких, например, как система Design (модификации Design Center, Design Lab) или система OrCad. Так как в библиотеках Spice отсутствуют встроенные модели индуктивных элементов, для исследования электромагнитных процессов силовых полупроводниковых преобразователей необходимо предварительно создать модели дросселей.

При создании Spice-модели параметры магнитного сердечника дросселя постоянного тока вводятся на основании данных о кривой намагничивания, согласно рис. 4.

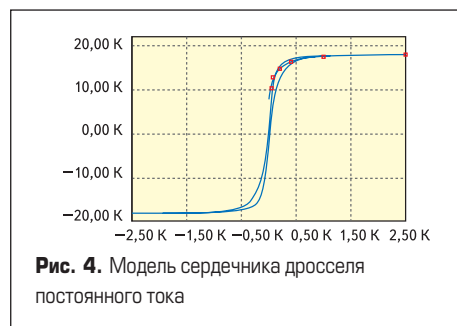


Рис. 4. Модель сердечника дросселя постоянного тока

Для конкретизации результатов нами в модель сердечника введены параметры ленты электротехнической, холоднокатанной, анизотропной, типа 3421 производства предприятия АМЕТ (г. Аша, металлургический завод).

Известно, что при частоте пульсаций 400 Гц наилучшие магнитные свойства имеет стальной лист толщиной 0,12 мм, с учетом коэффициента заполнения оптимальная толщина для этой частоты — 0,15 мм, при частоте 800 Гц оптимальная толщина — 0,08 мм. Увеличение частоты до 2000 Гц уменьшает оптимальную толщину стального листа до 0,05 мм.

При увеличении частоты резко возрастают потери, поэтому приходится снижать рабочую индукцию магнитопровода. Считая предельно допустимыми по условиям нагрева и теплоотвода удельные потери 20 Вт/кг, необходимо снизить рабочую индукцию сердечника для частоты 400 Гц до 1,5 Тл, для частот 8000 и 2000 Гц — до 1,0 и 0,5 Тл, для частот 1000 и 2000 Гц — 1,0 и 1,5 Тл соответственно.

Для рассматриваемой электротехнической стали удельные потери и магнитная индукция являются основными нормируемыми характеристиками. Для стали 3425 при толщине листа 0,15, 0,08 и 0,05 мм удельные потери составляют соответственно 17, 15 и 13 Вт/кг при рабочей индукции 0,75 Тл и частоте 400 Гц.

Потери в стали от вихревых токов пропорциональны квадрату толщины пластин. Для го-

рячекатанной стали предельная магнитная индукция — 1,45–1,5 Тл. Холоднокатанная ориентированная сталь допускает индукцию 1,65–1,7 Тл. Принимаем в качестве сердечника магнитопровода дросселя холоднокатанную сталь 3425, лист толщиной 0,15 мм.

Исходные данные магнитной индукции В (Гаусс) при заданной напряженности магнитного поля (А/м) для электротехнической стали марки 3425, толщиной 0,15 мм, принятые при моделировании сердечника, указаны в таблице.

Таблица

Модель	Параметр
MS	1.43681e+006
Alpha	9.289e-009
A	1115.39
C	0.60837
K	6628.06
Area(cm ²)	135
Path(cm)	106
Gap(cm)	4

С использованием расчетных уравнений Джилса-Атертона, путем инициализации и оптимизации приведенной расчетной модели определяются следующие параметры магнитного сердечника дросселя: MS — намагниченность насыщения, Alpha — параметр магнитной связи доменов, A — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания, C — постоянная упругого смещения доменных границ, K — постоянная подвижности доменов.

Указанные геометрические параметры сердечника дросселя — Area (площадь), Path (длина магнитной линии) и Gap (зазор) — определены для применения дросселя в схемах автономных несимметричных инверторов различной мощности и частоты.

Выбор толщины листа сердечника дросселя определяется оптимальным соотношением требуемых магнитных свойств материала, коэффициентом заполнения и трудоемкостью изготовления магнитопровода.

Существенная нелинейность характеристик дросселя проявляется при изменении тока для номинального режима и во временном интервале, когда дроссель подвергается воздействию тока короткого замыкания тиристорного преобразователя частоты.

Оптимизация расчетной модели сердечника программой MicroCap определяет его основные магнитные параметры с ошибкой не более 1,2%. Модель используется в качестве сердечника взаимосвязанных катушек индуктивности. Изменяемым параметром является величина воздушного зазора сердечника.

На рис. 5 показаны рассчитанные нами графики изменения индуктивности схемотехнической модели дросселя от величины тока, протекающего через его обмотки, размещенные на сердечнике с воздушным зазором. Приведены результаты изменения индуктивности для модели дросселя с воздушным зазором в пределах от 5 до 1 см с шагом 1 см.

Для указанных параметров сердечника дросселя оптимальной является суммарная величина воздушного зазора, равная 3 см. При большей и меньшей величине зазора индуктивность

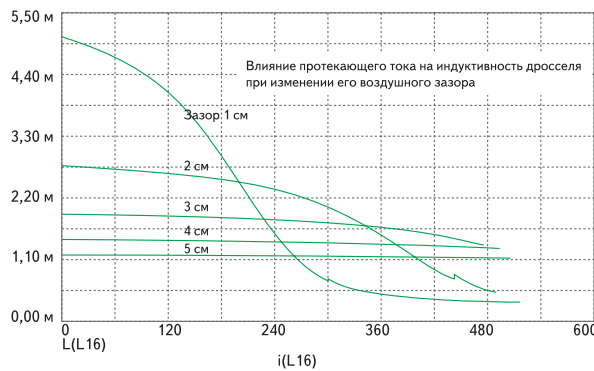


Рис. 5. Параметрическая зависимость индуктивности обмоток дросселя с сердечником от протекающего через обмотки тока

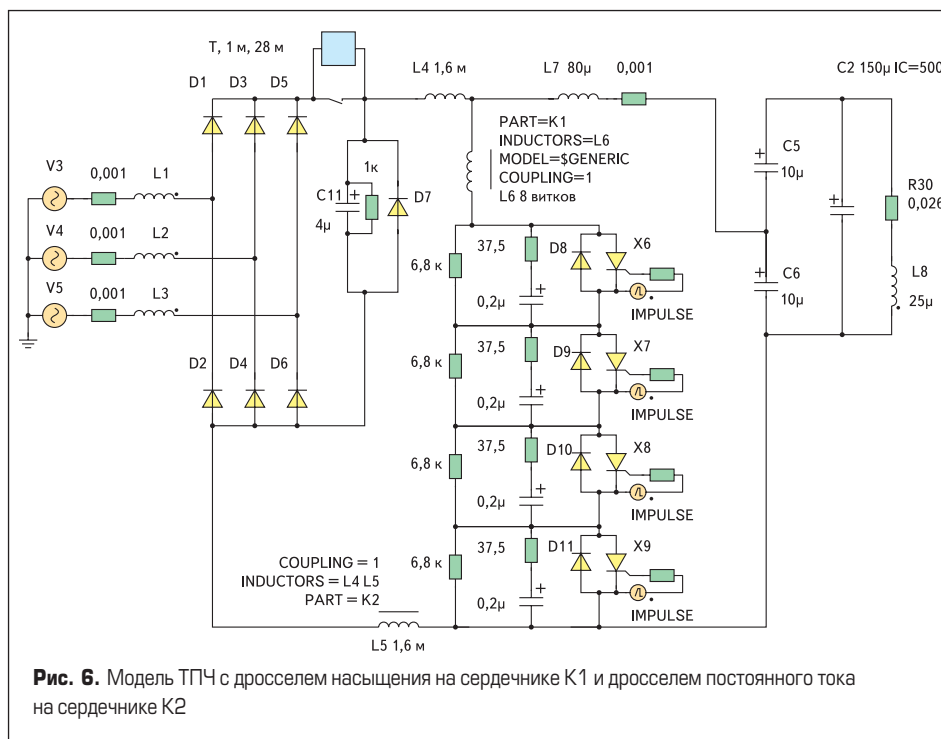


Рис. 6. Модель ТПЧ с дросселем насыщения на сердечнике K1 и дросселем постоянного тока на сердечнике K2

ненасыщенного дросселя на рабочем токе инвертора значительно снижается.

Существенная нелинейность характеристик дросселя проявляется при изменении тока в нем, когда дроссель подвергается воздействию тока короткого замыкания инвертора.

Схематехнический файл в программе MicroCar высокочастотного ТПЧ с использованием модели дросселя, состоящего из двух обмоток L4 и L5, приведен на рис. 6. Коэффициент связи между обмотками, расположенными на сердечнике K2, принят равным 1.

Согласно приведенной на рис. 1 схематехнической модели производилось исследование различных ТПЧ частотой 2500–22 кГц, мощностью 250–40 кВт. При этом учитываются все существенные особенности реального объекта моделирования и режимов его работы.

На рис. 6 приведен файл схематехнического моделирования высокочастотного ТПЧ частотой 22 кГц, номинальной мощностью 40 кВт, в котором использована разработанная модель дросселя постоянного тока, выполненная на сердечнике K2.

Особо отметим, что величина индуктивности дросселя постоянного тока практически не влияет на работоспособность силовой

схемы этого тиристорного инвертора, что позволило провести экспериментальную проверку основных выводов данной работы на установках номинальной мощности [3].

В высокочастотном ТПЧ мощностью 40 кВт, согласно рис. 7, использована Spice-модель дросселя насыщения, выполненного на сер-

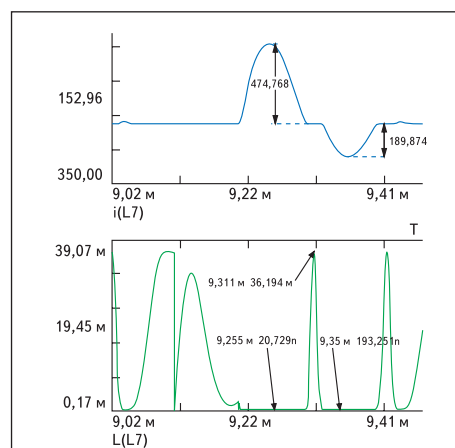


Рис. 7. Задержка дросселем насыщения тока диода ТПЧ (вверху) и кривая изменения индуктивности дросселя насыщения

дечнике K1 из ферритовых колец размером 100×80×15 мм сечением 25 см². Дроссель содержит обмотку из 8 витков медной трубки с охлаждением проточной водой. Этот дроссель включен последовательно в цепь вентильной пары тиристор–диод высокочастотного инвертора и осуществляет задержку протекания тока тиристора и диода в пределах 15–18 мкс.

Изменение индуктивности дросселя насыщения используется в схеме ТПЧ, в основном, для уменьшения коммутационных перенапряжений на тиристорах автономного инвертора при увеличении рабочей частоты.

Временная диаграмма тока вентильной пары тиристорного инвертора, обусловленная наличием дросселя насыщения, и кривая изменения индуктивности дросселя (от 36 мГн до практически нулевой величины) приведены на рис. 7. Моделирование произведено в программе MicroCar 8 версии.

Схематехническое моделирование дросселя насыщения показало необходимую высокую точность расчетов конструктивных параметров и обеспечение заданного времени задержки тока. В реальной конструкции изменение варьируемых параметров невозможно.

Описанные Spice-модели силовых дросселей с ферромагнитными сердечниками широко используются нами при схематехническом моделировании устройств силовой электроники [4].

Заключение

1. В практике проектирования и исследования характеристик схематехнической модели силового дросселя постоянного тока переменным параметром целесообразно считать величину воздушного зазора магнитной цепи.
2. Создана новая Spice-модель силового дросселя с сердечником, которая предусматривает возможность дальнейшего уточнения в процессе схематехнического моделирования.
3. Проведенные исследования схематехнических моделей позволяют целенаправленно изменить характер протекания электромагнитных процессов электротехнического оборудования, имеющего в своем составе силовые индуктивные дроссели.

Литература

1. Климов В. П., Москалев А. Д. Способы подавления гармоник тока в системах электропитания // Практическая силовая электроника. Науч.-техн. сб. /Под ред. Малышкова Г. М., Лукина А. В. М.: АОЗТ «ММП-Ирбис». 2002. Вып. 6.
2. Зинин Ю. М. Методика схематехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 2 (13).
3. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
4. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Некоторые аспекты моделирования систем силовой электроники // Силовая электроника. 2006. № 4.