

# Spice-модели ферромагнитных компонентов тиристорного преобразователя частоты

## для трубогибной установки с ВЧ-нагревом

**В проектировании ферромагнитных компонентов для тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) встречаются определенные трудности, в частности, с расчетом индуктивностей дросселей, трансформаторов, индукторов. Такие расчеты весьма сложны и не дают точных результатов, поскольку индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником нелинейно зависит от величины протекающего по ней тока.**

**В этом случае только методами Spice-моделирования возможно получить надежные результаты. Необходимые Spice-модели ферромагнитных компонентов вставляются в схемотехническую модель ТПЧ, позволяя определить индуктивность при реальной величине протекающего постоянного или переменного тока.**

**Эти данные необходимы для проектирования линейных и нелинейных дросселей, высокочастотных трансформаторов и индукторов, применяемых в ТПЧ.**

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

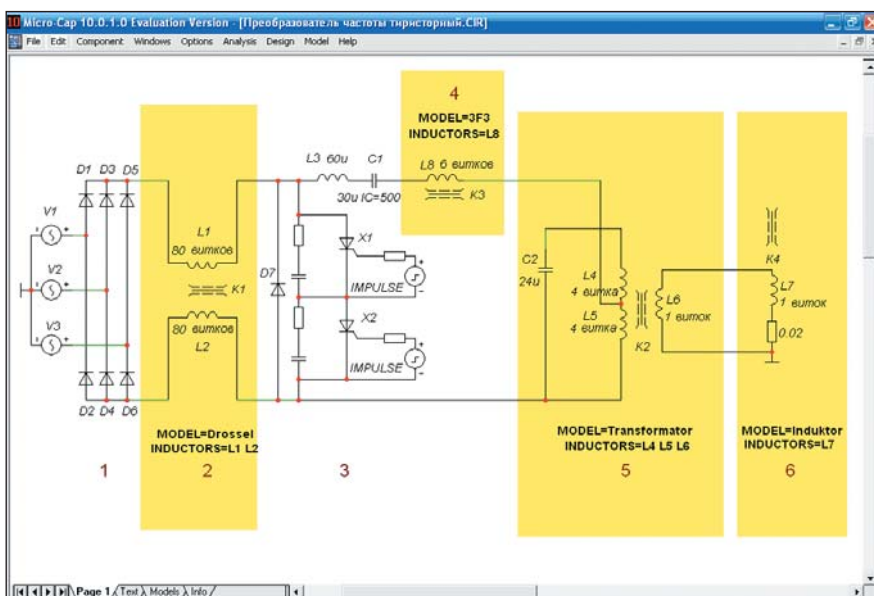
### Схемотехническая модель ТПЧ

В настоящее время тиристорные преобразователи частоты разрабатываются с учетом накопленного опыта эксплуатации в промышленных условиях,

а также с привлечением современных средств проектирования, к которым относятся программы-симуляторы схем электроники. Известная фирма Spectrum Software распространяет программу Micro-Cap (Electronic Circuit Analysis Program), высылая бесплатную демо-версию электронной почтой по индивидуальному запросу. В пакете также имеется большое количество примеров моделирования аналоговых и цифровых схем, а также библиотека Spice-моделей типовых компонентов электронных схем.

Micro-Cap является симулятором, позволяющим инженерам-электрикам выполнять моделирование электронных схем. В последней версии MC 10 расширены сервисные возможности программы и, видимо, обновлены алгоритмы расчетов, в частности для моделей ферромагнитных сердечников, так что теперь практически отсутствуют трудности при схемотехническом моделировании силовой схемы ТПЧ, за исключением ограничения на количество используемых компонентов. Магнитная модель позволяет исследовать нелинейные свойства ферромагнитных сердечников в реакторах и трансформаторах. Можно рассчитать графики потока, индуктивности, напряженности и индукции магнитного поля. Особенности этой программы и работа с ней достаточно широко освещены в оригинальных материалах фирмы-разработчика, в литературе, на форумах в Интернете [1-3].

На рис. 1 показано рабочее окно симулятора MC 10 с графическим изображением разработанной схемотехнической модели ТПЧ для трубогибной установки. Блоки 2, 4-6 (на рис. 1 обозначены желтым цветом) — ферромагнитные компоненты схемотехнической модели, состоящие из одной или нескольких магнитосвязанных



**Рис. 1.** Рабочее окно программы-симулятора MC 10 с изображением схемотехнической модели ТПЧ: 1 — модель источника питания; 2 — модель дросселя постоянного тока; 3 — модель тиристорного автономного инвертора; 4 — модель нелинейного дросселя переменного тока; 5 — модель высокочастотного трансформатора; 6 — модель одновиткового индуктора

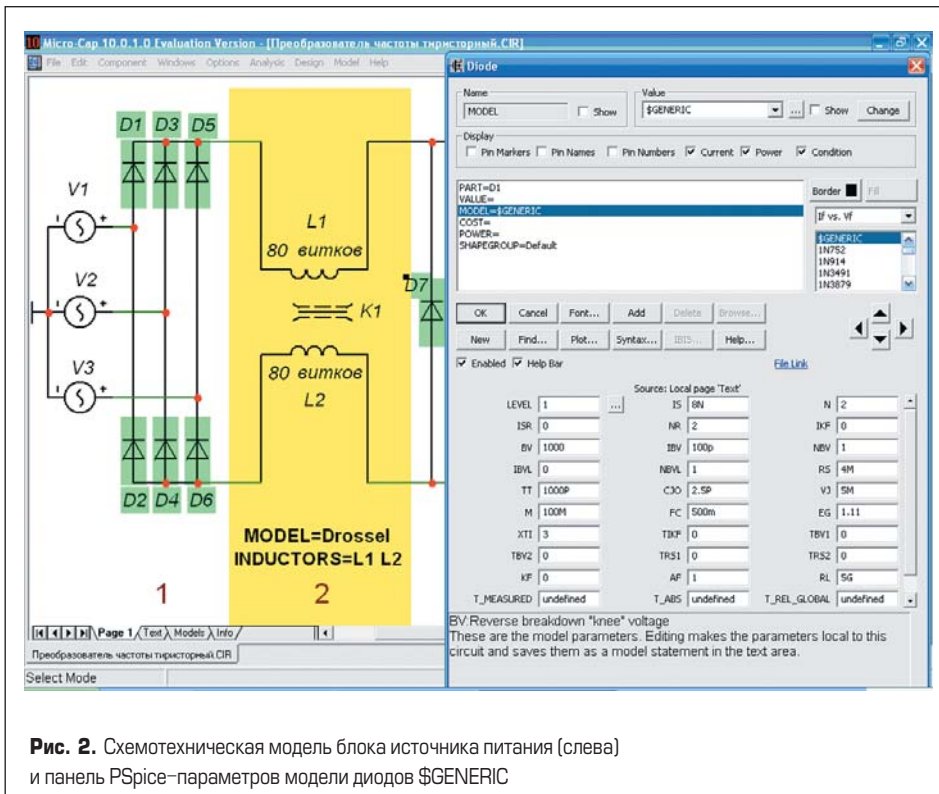


Рис. 2. Схематехническая модель блока источника питания (слева) и панель PSpice-параметров модели диодов \$GENERIC

индуктивностей с сердечником. Желтые прямоугольники выполняют роль масок от преднамеренного изменения параметров моделей. Схематехническая модель ТПЧ показана в виде рабочего файла программы MC 10, на исследовании которого базируются материалы статьи.

На рис. 2 показана схематехническая модель источника питания (слева) и панель Spice-параметров модели диодов выпрямителя и инвертора (справа) под именем \$GENERIC. Модели диодов выделены зеленым цветом.

Для всех выделенных в окне диодов использована одна PSpice-модель, у которой модельный параметр допустимого обратного напряжения  $BV=1000\text{ В}$  — MODEL \$GENERIC D ( $IS=8\text{N}$   $N=2$   $BV=1000$   $RS=4\text{M}$   $TT=1000\text{P}$   $CJO=2.5\text{P}$   $VJ=5\text{M}$   $M=100\text{M}$   $RL=5\text{G}$ ).

V1, V2 и V3 — Spice-модели синусоидальных источников, сдвинутых по фазе на 120 эл. град., с параметрами:

```

*** 0 Phase Leg
.MODEL 3PHASE SIN (A=310 F=50 RS=0).
*** 120 Phase Leg
.MODEL 3PHASEB SIN (A=310 F=50 PH=2.0944 RS=0).
*** 240 Phase Leg
.MODEL 3PHASEC SIN (A=310 F=50 PH=4.1888 RS=0).
    
```

Отметим, что редактировать Spice-параметры созданных моделей можно как с помощью соответствующих панелей, так и в текстовом описании созданного файла.

На рис. 3 показаны параметры макроса тиристоров X1 и X2 — SCR (Silicon Controlled

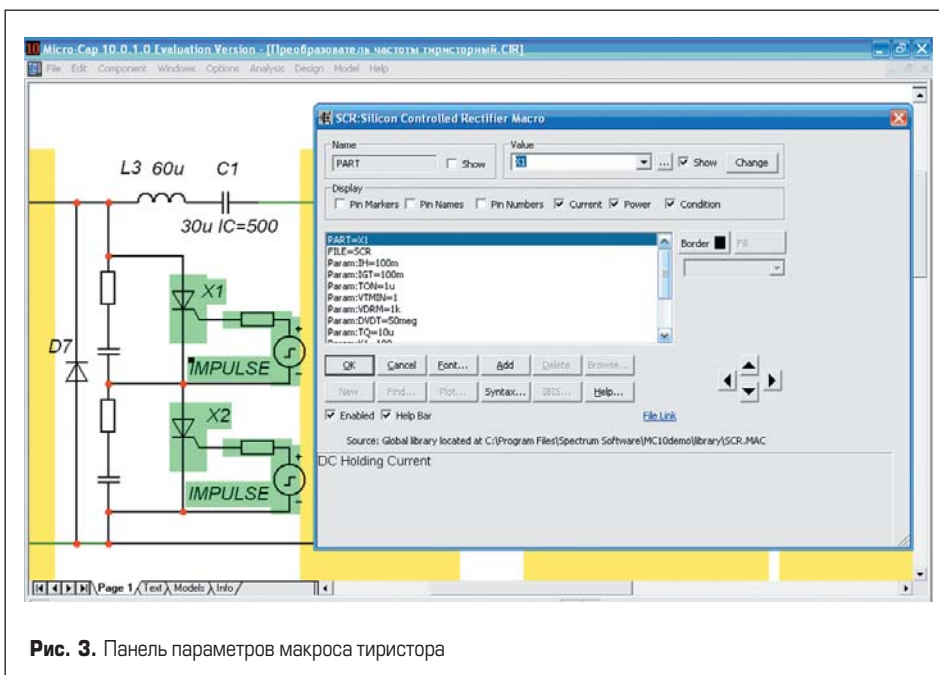


Рис. 3. Панель параметров макроса тиристора

Rectifier Macro) и соответствующая панель редактирования Spice-параметров макромодели. Макромодель (макрос) тиристора имеет в своем описании PSpice-модели транзисторов и диодов.

Параметры макроса SCR, приведенные на рис. 3, имеют следующий смысл: IH (DC holding current) определяет ток удержания тиристора; IGT (gate trigger current) — величина отпирающего тока управления; TON (turn on time) — время включения тиристора; VTMIN (minimum anode to cathode on state voltage) — минимальное падение напряжения во включенном состоянии; VDRM (maximum repetitive peak off-state voltage) — максимальная величина обратного напряжения; DVDT (critical rate of rise of off state voltage) — критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии; TQ (turn of time) — время переключения в закрытое состояние; K1 (Tweak factor for DVDT) — коэффициент для DVDT; K2 (Tweak factor for TQ) — коэффициент для параметра TQ. Более подробно характеристика макроса тиристора приведена в [4].

Слева на схеме (рис. 3) выделены тиристоры автономного инвертора и импульсные источники сигналов управления. Spice-модель для импульсных источников следующая: .MODEL IMPULSE PUL (VZERO=-5 VONE=25 P1=0U P2=0U P3=10U P4=10U P5=400U). Период повторения импульсных сигналов управления ( $P5=400\mu$ ) определяет рабочую частоту автономного инвертора.

Компоненты схематехнической модели L3 и C1 (рис. 3) определяют колебательный режим работы схемы автономного инвертора и предельную частоту инвертирования. Это линейные элементы, параметры которых не зависят от величины протекающего тока, поэтому их расчет производится согласно [5-7].

Отметим, что показанные на схематехнической модели инвертора вспомогательные компоненты (резисторы, конденсаторы), не играющие принципиальной роли и служащие лишь для ограничения либо демпфирования тока и напряжения, не имеют обозначения и указания величины. Остальные параметры элементов приведены в обозначениях Micro-Cap, в частности, u — это приставка «микро» к основной единице измерения элемента.

На рис. 4 показаны рассчитанные с помощью рабочего Spice-файла (он имеет название «преобразователь частоты тиристорный.CIR») временные диаграммы напряжений схематехнической модели выпрямителя (блок 1) — источника постоянного напряжения ТПЧ, в которую входит трехфазная сеть синусоидальных источников амплитудой 310 В/50 Гц и мостовой неуправляемый выпрямитель. Средняя величина (AVG) выходного напряжения выпрямителя — 509 В. Для графиков напряжений синусоидальных источников и выходного напряжения выпрямителя установлены общие координаты. По центру графиков координатная сетка выключена, чтобы иметь возможность фиксировать положение точек на графиках. Здесь и в дальнейшем для обработки результатов расчетов автор использует широкие возможности Микро-Сар.



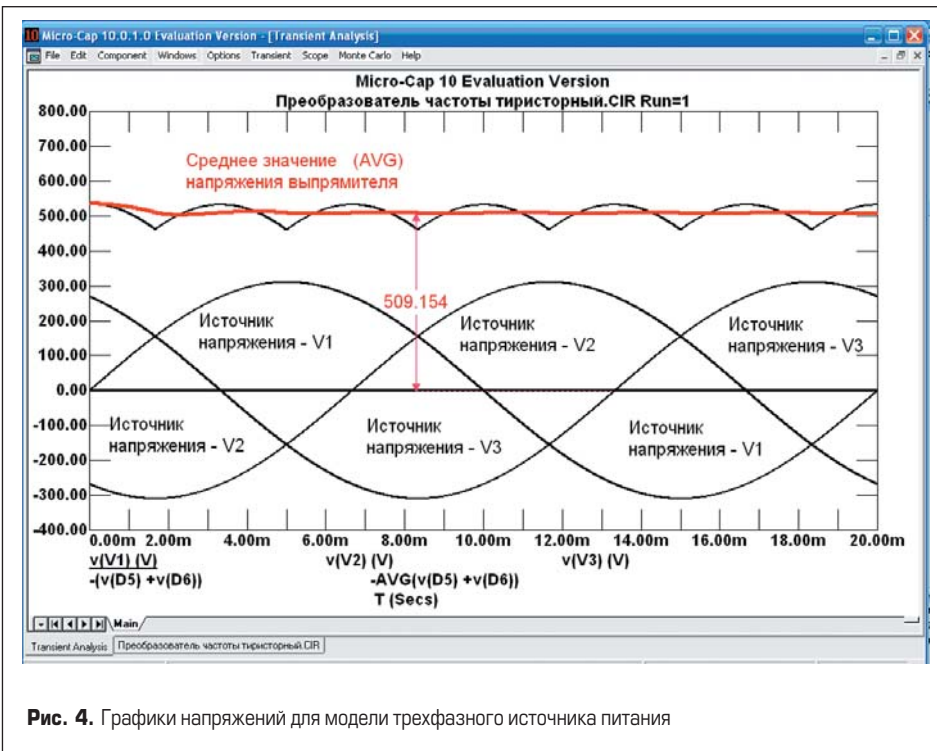


Рис. 4. Графики напряжений для модели трехфазного источника питания

Трехфазное напряжение выпрямляется по двухполупериодной (двухпульсовой) схеме. При этом выпрямленный ток имеет небольшие пульсации. Реактивная мощность сети через выпрямитель не циркулирует, поэтому можно считать, что он потребляет только активную мощность. У мостового выпрямителя хорошее использование активной мощности трехфазной питающей сети.

Параметры источника питания ТПЧ соответствуют подключению выпрямителя к стандартной промышленной трехфазной сети 380 В/50 Гц переменного тока с глухозаземленной нейтралью. Следует отметить, что при анализе работы выпрямителя программа рассчитывает токи, напряжения и другие па-

раметры всех компонентов схемотехнической модели, в том числе в автономном инверторе, выходном трансформаторе и индукторе. Выборка заданных графиков с необходимой точностью может производиться после окончания расчета.

На рис. 5 показаны рассчитанные графики выходного тока автономного инвертора и выходного тока трансформатора (тока в индукторе). Для этих графиков установлен общий масштаб по вертикали и видно, что поставленная нами цель увеличения тока в индукторе достигнута применением выходного трансформатора.

Постоянная составляющая в кривой выходного тока инвертора отражает мощность, по-

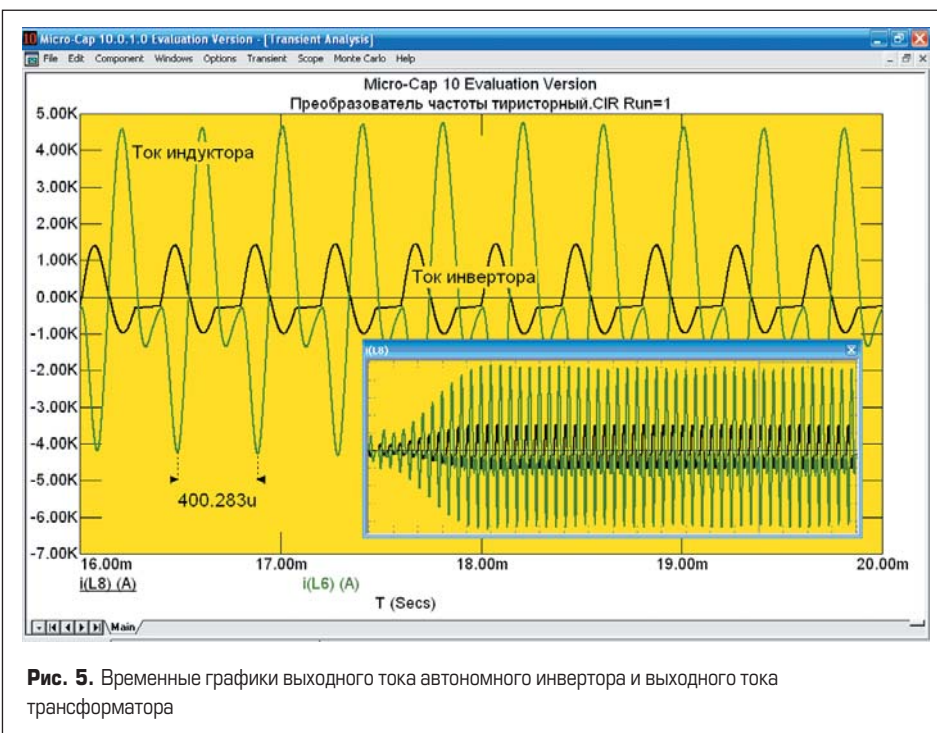


Рис. 5. Временные графики выходного тока автономного инвертора и выходного тока трансформатора

требляемую ТПЧ от источника питания. Для детализации кривых на графике показан общий вид и отдельно выбранный фрагмент.

Рассчитанные графики свидетельствуют о возможности и целесообразности включения ферромагнитных компонентов в схемотехническую модель ТПЧ, что позволит уточнить расчеты переходных и установившихся в нем процессов и параметры моделей ферромагнитных компонентов.

В отличие от традиционных мостовых или полумостовых схем тиристорных инверторов, нагрузка этого ТПЧ включается последовательно с коммутирующими элементами автономного инвертора — конденсатором и катушкой индуктивности. Нагрузкой в электротермических устройствах для индукционного нагрева металлов служит резонансный контур, образованный индуктором и параллельным конденсатором, компенсирующим низкий коэффициент мощности индуктора. Между индуктором и компенсирующим конденсатором включается высокочастотный трансформатор, служащий для согласования выходных напряжений и токов [8, 9].

### Особенности моделей ферромагнитных компонентов и линейризация их характеристик

Для инженеров-электриков важны некоторые особенности Spice-проектирования нелинейных ферромагнитных сердечников трансформаторов и дросселей, поскольку они во многом определяют массу, габариты и стоимость ТПЧ, предназначенного для работы в составе высокочастотной индукционной трубогибной установки. Не останавливаясь подробно на описании функциональных узлов 1 (модели источника питания) и 3 (модели тиристорного автономного инвертора), подобных описанным в [9, 10], перейдем к особенностям Spice-моделей с ферромагнитным сердечником.

Нами рассматривается применение схемы однофазного инвертора, которая работает в режиме инвертора тока и поэтому требует на выходе источника питания (соответственно, и на входе инвертора) применения линейного дросселя постоянного тока.

Функции дросселя постоянного тока с постоянной индуктивностью может выполнять силовая катушка индуктивности круглого сечения из медного провода, но у нее будут большие размеры, вес и значительные активные потери мощности. Высота такой катушки должна быть равна ее диаметру, и она будет иметь большие электромагнитные поля рассеяния, которые, замыкаясь по элементам конструкции ТПЧ, вызывают их нагрев. С целью снижения указанных недостатков и расхода меди катушку обычно выполняют с ферромагнитным сердечником, конструктивно превращая ее в дроссель постоянного тока.

Ввиду значительного разнообразия возможных вариантов исполнения такого дросселя его проектирование производится разработчиками ТПЧ. Основной критичный параметр — эквивалентная индуктивность,

которая не должна быть меньше заданной величины.

Для предотвращения перехода дросселя в нелинейный режим в магнитной цепи вводится немагнитный зазор, величина которого определяется компромиссом между минимальной индуктивностью и предельной величиной протекающего тока. Чем больше величина протекающего через такой дроссель тока, тем меньше допустимое число витков катушки при одинаковых форме и размерах сердечника.

На рис. 6 приведено рабочее окно PSpice-моделирования ферромагнитного сердечника для дросселя постоянного тока. Материал сердечника — холоднокатаная анизотропная лента стальная электротехническая, типа 3421, производства Ашинского металлургического завода. Параметры модели определяются на основании данных производителя о кривой намагничивания. Моделирование возможно только в профессиональных версиях программы Micro-Cap, поэтому автор воспользовался версией программы MC V.

Инициализация расчетной модели магнитного сердечника определила следующие Spice-параметры: MS — намагниченность насыщения, ALPHA — параметр магнитной связи доменов, A — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания, C — постоянная упругого смещения доменных границ, K — постоянная подвижности доменов.

Эта модель используется в качестве сердечника дросселя постоянного тока для катушек индуктивности, поэтому в их параметрах указывается число витков. Геометрические параметры сердечника дросселя — Area (площадь), Path (длина магнитной линии) и Gap (зазор) — указывают на применение дросселя в конкретных схемах автономного несимметричного инвертора различной мощности. При этом изменяется только величина немагнитного зазора.

При создании модели дросселя постоянного тока с нелинейным сердечником использована аппроксимация по точкам характеристики намагничивания стального сердечника для электротехнической стали 3425, с толщиной ленты 0,08 мм. В правую верхнюю таблицу вводятся предоставляемые изготовителем данные (B и H, Region 1) для начального участка кривой намагничивания, соответствующие 1-й области петли гистерезиса. После расчета параметров модели (Model Parameters) производится оценка ошибки.

Оптимизация модели сердечника определила его параметры с ошибкой error = 0,98%. В последующих версиях программы Micro-Cap параметр магнитной связи доменов ALPHA опускается.

Нелинейная модель сердечника дросселя постоянного тока в Micro-Cap используется для взаимосвязанных катушек индуктивности, поэтому в их параметрах указано расчетное число витков и коэффициент связи между ними. При Transient-анализе в режиме Stepping допустимо изменение всех параметров модели, но целесообразно варьировать

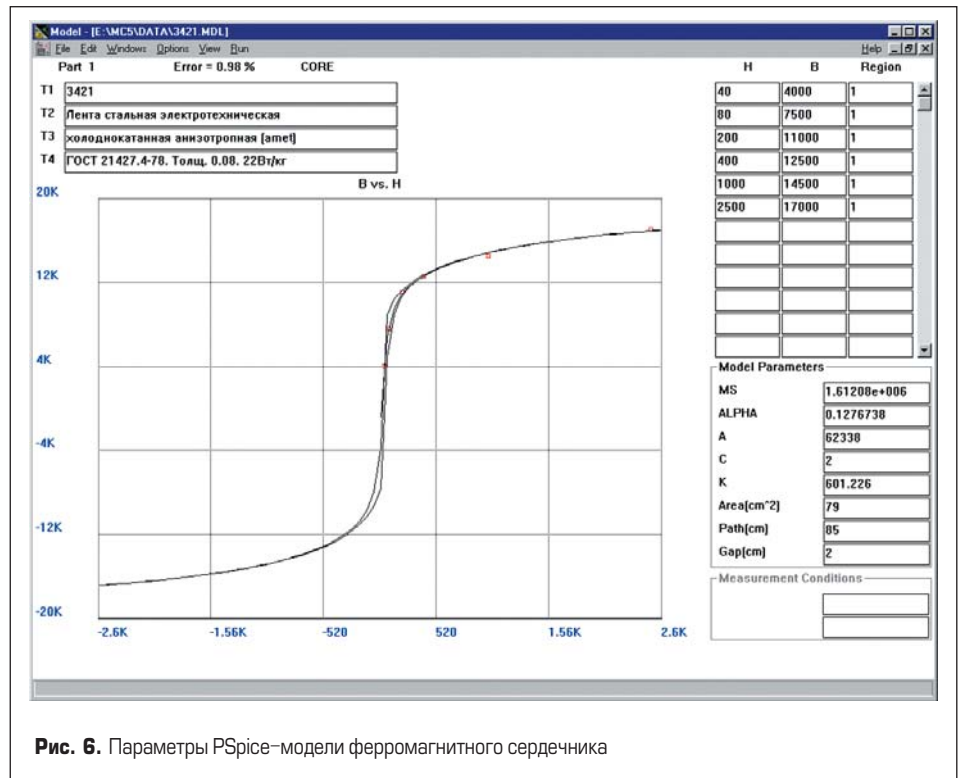


Рис. 6. Параметры PSpice-модели ферромагнитного сердечника

величину воздушного зазора (Gap (см)) сердечника — геометрический параметр, изменение которого не влияет на конструктивное исполнение дросселя, но позволяет линеаризовать его характеристики.

На рис. 7 показана панель параметров Spice-модели сердечника K1, сохраненной под именем Drossel, для взаимосвязанных катушек индуктивности L1, L2 и коэффициента связи между ними COUPLING = 0,9.

На рис. 8 показана панель редактирования параметров индуктивности L1 дросселя постоянного тока K1. Обе полуобмотки дросселя имеют одинаковое число витков и включены согласно по направлению протекающего тока.

Согласно рис. 8, опция Plot позволяет определить зависимость B от H для катушки индуктивности L1, полученную моделированием дросселя, состоящего из двух одинаковых согласно включенных катушек, размещенных на общем сердечнике с воздушным зазором. Ширина петли гистерезиса отражает потери мощности в сердечнике при изменении магнитного поля.

Напряженность магнитного поля для начальной кривой намагничивания при изменении от 0 до Hmax указывается в Эрстедах (Э), магнитная индукция — в Гауссах (Гс), согласно системе СГС. В программе имеется возможность использовать другие единицы (1 Э = 79,5775 А/м и 1 Тл = 10 000 Гс).

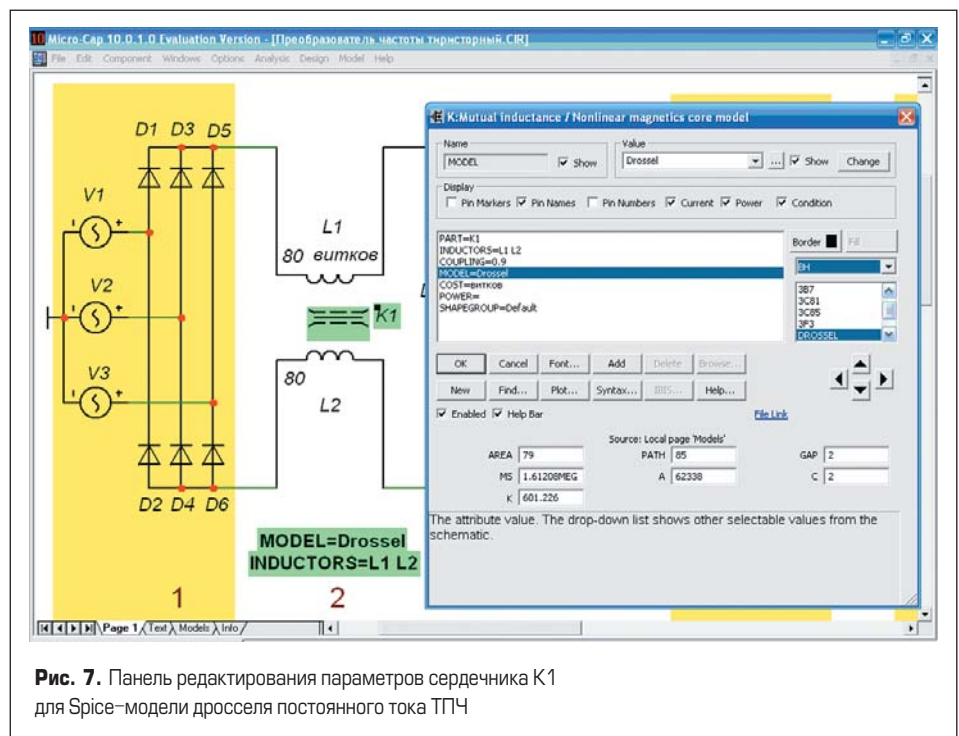


Рис. 7. Панель редактирования параметров сердечника K1 для Spice-модели дросселя постоянного тока ТПЧ



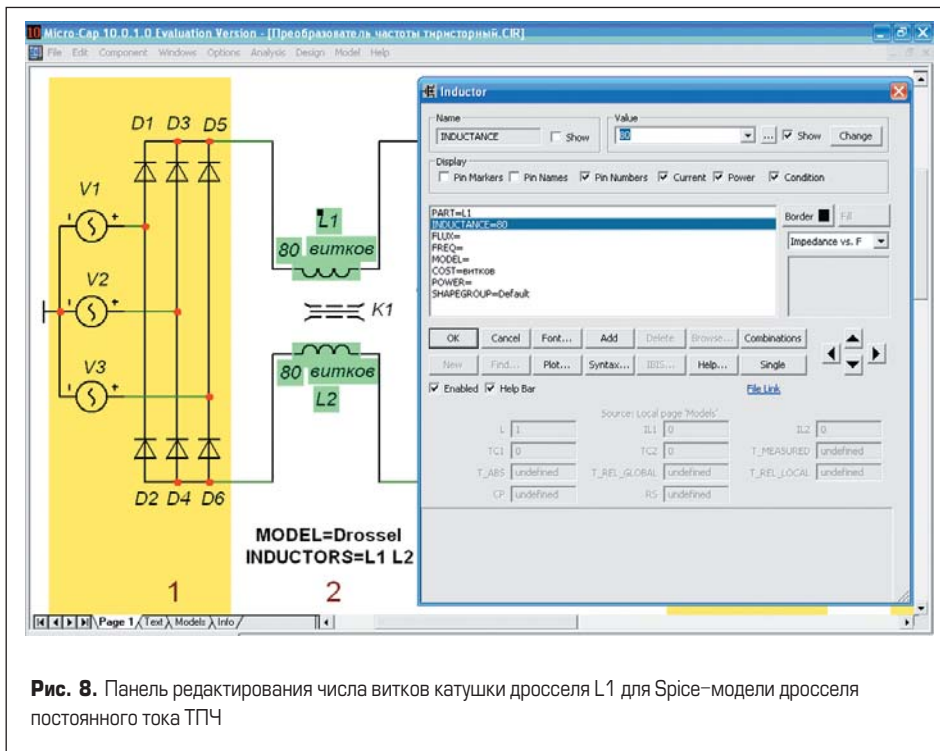


Рис. 8. Панель редактирования числа витков катушки дросселя L1 для Spice-модели дросселя постоянного тока ТПЧ

Все изложенные операции являются предварительными для определения величины индуктивности катушки L1. Отметим, что при наличии ферромагнитного сердечника и пульсирующем через катушку токе ее индуктивность не может быть величиной постоянной, как это происходит, например, при моделировании катушки с заданной величиной индуктивности как простого компонента расчетной схемы.

На рис. 9 приведены графики изменения средней величины тока (А) дросселя L1 и среднего значения ее индуктивности (мГн) с момента включения автономного инвертора, на расчетном интервале 20 мс, определяемом практическим окончанием переходных процессов.

Указания числа витков катушки и геометрических размеров модели сердечника достаточно для определения целесообразного выбора величины воздушного зазора (GAP) дросселя постоянного тока. Выбор производится на основании компромисса между потерями в сердечнике и активным сопротивлением его обмоток, с учетом требуемой индуктивности для ограничения уровня высокочастотных помех, генерируемых ТПЧ в питающую сеть. Принятие решения по такого рода компромиссам является прерогативой разработчика силовой схемы. Чем большее число факторов принимается во внимание, тем выше уровень разработки.

Таким образом, модель линейного дросселя постоянного тока для ТПЧ представляет

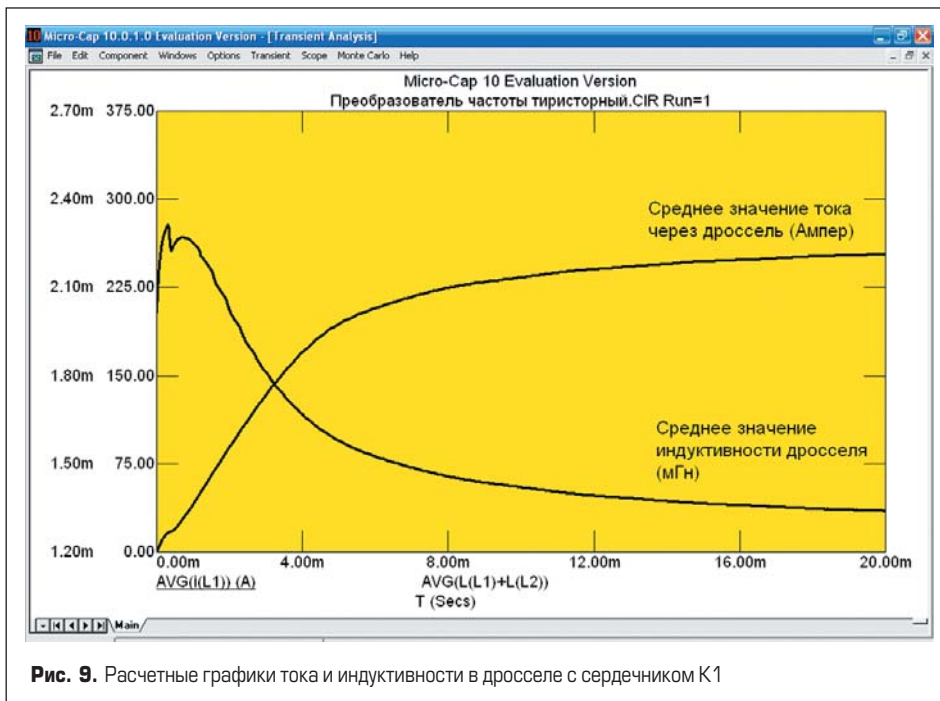


Рис. 9. Расчетные графики тока и индуктивности в дросселе с сердечником K1

собой нелинейный магнитный сердечник с индуктивно взаимосвязанными обмотками, работающий на линейном участке зависимости  $B$  от  $H$  при установившейся величине протекающего тока [10–15].

На рис. 10 изображены графики зависимости напряженности магнитных полей от индукции в сердечниках катушек индуктивности схемотехнической модели ТПЧ. На графиках кривая намагничивания не достигает насыщения и практически линейна, это объясняется большой величиной индукции насыщения сердечника и ограниченным числом витков катушек. L1 — полуобмотка дросселя постоянного тока с сердечником K1, поэтому характеристика несимметрична и соответствует частой петле гистерезиса сердечника. L6 — катушка выходной обмотки высокочастотного трансформатора. Ее характеристика практически линейна, но постоянное подмагничивание сердечника также требует наличия воздушного зазора. L7 — катушка индуктора. Ширина петли гистерезиса определяет потери мощности в индукторе. Определение Spice-параметров при схемотехническом моделировании индуктора не достигло еще удовлетворительного решения.

Spice-параметры рассмотренных моделей ферромагнитных сердечников ТПЧ приведены в сводной таблице.

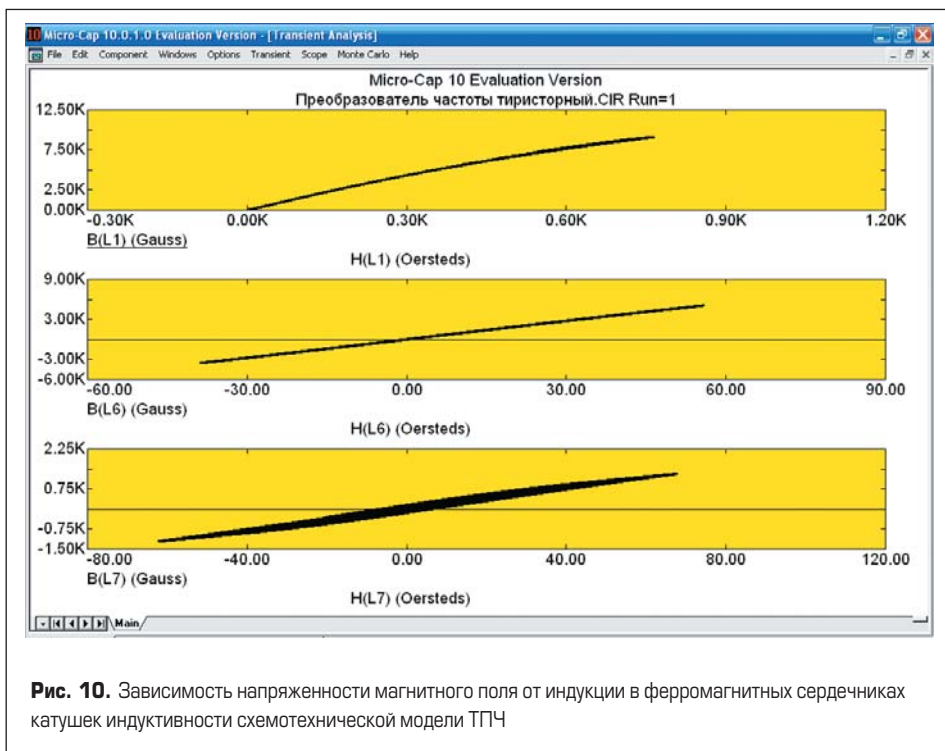
В схемотехнической модели ТПЧ присутствует и нелинейный дроссель насыщения L8 (блок 4, рис. 1). Условия работы сердечника этого дросселя более жесткие, мгновенные потери мощности в нем на высокой частоте больше, он выполнен на сердечнике из феррита с небольшой, относительно электротехнической стали, индукцией насыщения. Катушка индуктивности L8 выполнена с ферромагнитным сердечником из кольцевого феррита типа 3F3. Дроссель насыщения и его влияние на протекание электромагнитных процессов в автономном инверторе подробно рассмотрены в [16].

### Установка для изгиба бесшовных стальных труб большого диаметра

Для нефтяной, газовой, машиностроительной, судостроительной и других отраслей промышленности актуальной является вторичная обработка изделий из металла, например изгиб стальных труб различного диаметра. При этом в первую очередь необходимо сохранить исходную структуру металла трубы и ее поперечное сечение. Для решения данной задачи потребитель самостоятельно производит нагрев и гибку отрезков труб необходимой конфигурации, для чего необходимо специализированное механическое оборудование и мощные источники питания установок ТВЧ [17–21].

В отечественных и зарубежных трубогибочных установках широко используется индукционный способ местного нагрева металлов токами высокой частоты (ВЧ).

На рис. 11 приведен общий вид промышленной установки, предназначенной для изгиба бесшовных стальных труб большого диаметра. Изгиб трубы происходит под сило-



вым воздействием подвижных частей станка на разогретом до температуры достижения высокой пластичности небольшом участке трубы под индуктором. На рисунке показан фрагмент изогнутой бесшовной трубы, установленной на трубогибочном станке. Одновитковый индуктор разогревает металл «настилом» высокочастотного тока, труба непрерывно передвигается по роликовым опорам и медленно изгибается, затем участок трубы выходит из зоны нагрева и попадает под спреер (душ) холодной воды, металл теряет пластичность, и изделие снова приобретает исходную прочность.

Одновитковый индуктор для подобной установки должен обладать большой механической прочностью, выполнять наряду с основным назначением — глубинным нагревом — функции спреера, выполняться на небольшое действующее напряжение (20–50 В) и обеспечивать протекание большого тока высокой частоты (3–5 кА).

Укажем, что указанные требования к индуктору выполняются при его подключении к источнику тока высокой частоты необходимой мощности через стандартный или самостоятельно изготовленный высокочастотный закалочный трансформатор с одновитковым выходом. При этом основной функцией высокочастотного трансформатора является согласование выходного сопротивления источника питания ВЧ и нагрузки — индуктора с находящейся в нем разогретой массой металла. В процессе работы источника электропитания трубогибной установки электрический режим можно назвать квазистационарным, так как выходная мощность источника ВЧ постоянна во времени.

При проектировании источника питания, исходя из заданной производительности, в первую очередь определяем необходимую выходную мощность статического источни-

ка индивидуального питания трубогибной установки для нагрева стальных труб диаметром до 300 мм.

Тепловой и электрический расчет можно выполнить приближенно, используя графики и номограммы, приведенные в [22]. Для теплового расчета задаются глубина прогрева и температура поверхности.

Далее определяем мощность источника питания, необходимую для нагреваемого участка трубы с учетом КПД индуктора и высокочастотного трансформатора. Рассчитываем ширину индуктора исходя из мощности источника питания и длины прогреваемой полосы. В соответствии с частотой выходного тока определяем глубину нагрева в активном слое и находим время нагрева, а затем мощность источника питания. В результате расчета получаем значения удельной мощности источника питания, его полной мощности и времени нагрева, которые полностью характеризуют режим источника питания ВЧ.

Таблица. Spice-параметры моделей ферромагнитных сердечников ТПЧ

Наименование Spice-модели	Drossel	TRANSFORMATOR	Индуктор
Назначение	Дроссель постоянного тока	Выходной трансформатор	Индуктор
Обозначение сердечников			
PART	K1	K3	K4
Материал сердечника	Сталь электротехническая	Сталь электротехническая	Сталь конструкционная
Индуктивности	L1, L2	L4, L5, L6	L7
Количество витков	80+80	4+4+1	1
Spice-параметры			
KOUPPING — коэффициент связи между обмотками	0,9	0,9	1
AREA — площадь сечения, см <sup>2</sup>	79	100	90
PATH — длина магнитного пути, см	85	100	90
GAP — немагнитный зазор, см	2	1.0	0
MS — индукция насыщения	1,61208 MEG	1,61208 MEG	1,4 MEG
A	62338	62338	60k
C	2	2	2
K	601,226	601,226	600



С учетом мощности по высокой частоте ширину индуктора задаем равной 3 см, тогда мощность, необходимая для нагрева участка трубы, составит примерно 100 кВт. Учитывая КПД трансформатора и индуктора, определяем требуемую мощность на выходе высокой частоты, равную 120 кВт. Номинальная мощность выходного трансформатора, полученная моделированием, равна 200 кВ·А.

Далее рассчитываем мощность индуктора трубогибной установки, реактивную и полную мощности. Для увеличения коэффициента мощности необходимо параллельно индуктору подключить компенсирующий конденсатор. Определение требуемой реактивной мощности конденсаторной батареи приведено в [23].

Автор выражает благодарность инженеру Антонову И. Ф. за помощь в подготовке материалов для данной статьи и проведении экспериментальных исследований на промышленном образце ТПЧ в составе трубогибной установки.

**Закключение**

- Исследование PSpice-моделей ферромагнитных компонентов в составе схемотехнической модели ТПЧ позволяет выполнить проектирование точнее, чем это возможно при измерении их параметров инструментальными средствами.
- Проверка результатов моделирования в условиях промышленной эксплуатации ТПЧ по-

казывает, что разработанная схемотехническая модель правильно отражает электромагнитные процессы реальной электротермической установки, выполненной на полную мощность.

### Литература

1. <http://www.spectrum-soft.com/demodownnew.shtm>.
2. Micro-Cap 7.0. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual.
3. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-Cap V. М.: СОЛОН. 1997.
4. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.
5. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полрезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
6. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
7. Зинин Ю. М. Анализ электромагнитных процессов в мостовом резонансном инверторе с обратными диодами // Электричество. 2009. № 9.
8. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.
9. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
10. Зинин Ю. Определение длины воздушного зазора в сердечнике для дросселей и трансформаторов // Компоненты и технологии. 2009. № 5.
11. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
12. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
13. Зинин Ю. Схемотехническая модель индукционного комплекса с тиристорным преобразователем частоты // Силовая электроника. 2009. № 4.
14. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
15. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
16. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
17. Зинин Ю. М., Лобанов А. В. Система управления инверторно-индукционной установкой // Датчики и системы. 2008. № 5 (108).
18. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
19. Зинин Ю. М. Методика схемотехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. 2005. № 2 (13).
20. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
21. Антонов И. Ф., Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Автоматизированный трубогибный комплекс ТГУ-325 // Академия наук РБ. «Баштехинформ». 1996. НТД № 96-20.
22. Электротермическое оборудование: Справочник. М.: Энергия. 1980.
23. Зинин Ю. Определение энергетического баланса реактивных мощностей в индукторной нагрузке тиристорного преобразователя частоты методом схемотехнического моделирования электромагнитных процессов // Силовая электроника. 2010. № 5.