

# Мостовая схема тиристорного инвертора тока

## для установок индукционного нагрева металлов

**В статье приводятся результаты исследований электромагнитных процессов в мостовом инверторе тока, выполненном на тиристорно-диодных силовых модулях. Исследования выполнены в демо-версии программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 9. Схемотехническая модель силовых модулей автономного инвертора и системы управления мостовым резонансным инвертором разработана на основе PSpice-описания ее компонентов. Результаты моделирования электромагнитных процессов в мостовом инверторе уточняют параметры силовых вентилях, необходимых при реновации источника питания ТВЧ-установок.**

*«Нужно усложнять, чтобы результат стал проще,  
а не упрощать, чтобы в результате все стало сложнее»  
Веслав Брудзинский, сатирик*

**Юрий Зинин**

umz42@mail.ru

**Илира Рахимова**

karaidel19@mail.ru

### Предисловие

Применение полупроводниковых элементов позволило совершить переворот в микроэлектронике и силовой электронике — технике больших токов и напряжений. От открытия вентильных свойств полупроводников (в 1948 г.) до повсеместного применения их в современной технике прошло вполне обозримое время, в пределах жизни одного поколения. И. В. Сталин, много сделавший для технического перевооружения страны, назвал кибернетику лженаукой. Может поэтому, даже С. П. Королев не доверял полупроводникам при разработке оборудования первого спутника, он считал, что механические реле работают нагляднее и понятнее. С тех пор отечественная авионика — авиационная электроника — безнадежно отстала от мирового уровня.

Полупроводниковые вентили — тиристор и диод — обладают «вентильной» характеристикой. Вентили проводят ток в «прямом» направлении и не проводят его обратно: это их полезное свойство используется не только для выпрямления переменного тока, но и для преобразования постоянного тока в переменный. Силовое устройство, служащее для преобразования напряжения постоянного тока в переменное напряжение или ток, называется автономным инвертором. Инвертор считается автономным, если частота его выходного тока (напряжения) определяется собственными параметрами.

Различают автономные инверторы с большим внутренним сопротивлением по отношению к эквивалентному сопротивлению нагрузки: инверторы тока, в которых нагрузка, по переменной составляющей тока, включается последовательно с инвертором, который, в свою очередь, питается от источника тока. Автономные инверторы с малым внутренним сопротивлением называются инверторами напряжения, и нагрузка в них включается параллельно инвертору, который, в свою очередь, подключен к источнику постоянного напряжения.

Классификация инверторов с точки зрения протекания коммутационных процессов при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки (коммутационной устойчивости) позволяет выделить большой класс «резонансных» инверторов, в которых часто используются «обратные» диоды. Известно много схем автономных мостовых инверторов, которые с успехом можно применять в источниках питания установок токов высокой частоты (ТВЧ) для индукционного нагрева металлов [1].

По отечественным и зарубежным источникам информации мостовой тиристорный инвертор — самая распространенная схема генерирования ТВЧ. Поэтому мостовой инвертор является стандартной схемой, используемой в источниках питания ТВЧ для индукционного нагрева металлов. Характеристики этого инвертора и требования его к вентилям считаются эталоном для сравнения с другими источниками питания установок ТВЧ.

Обратные диоды в инверторе осуществляют стабилизацию внутренних токов и напряжений при переменной нагрузке, характерной для установок индукционного нагрева металлов. Введение обратных диодов расширяет диапазон изменения нагрузочной и регулировочной характеристик инвертора. Предельную выходную частоту автономного инвертора определяет способ коммутации тиристоров — принудительного их выключения после интервала проводимости тока. Коммутация происходит при изменении полярности приложенного к тиристорам обратного напряжения, на время, достаточное для восстановления его запирающей способности. В независимых инверторах используются элементы емкостной коммутации тиристоров, в которых обязательно есть конденсаторы. При этом частота выходного напряжения (тока) автономного инвертора определяется частотой переключения тиристоров инвертора и местом включения нагрузки по переменному току.

Коммутирующая устойчивость — основное свойство инвертора, определяющее надежность его рабо-

ты, она обычно определяется для реальных значений токов и напряжений, воздействующих на полупроводниковые элементы, при проведении натурных испытаний. Такие испытания требуют больших затрат энергии, времени и других ресурсов. Поэтому целесообразно применение методов математического моделирования. К математическому моделированию относится быстрый, дающий достоверные результаты метод схемотехнического моделирования.

### О программе схемотехнического моделирования MicroCap 9

Первая программа схемотехнического моделирования SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), была разработана в начале 1970-х годов в Калифорнийском университете (Беркли). Программа фирмы Spectrum Software под названием Micro-Cap 9 (Microcomputer Circuit Analysis Program 9-й версии) является производством ориентированным симулятором (Industrial-Strength Simulation) и становится все более удобной для широкого круга пользователей. В широко распространенной ранее 5-й версии этой программы (1990-е гг.) наименования файлов должны были быть на английском языке, были и другие существенные ограничения, потому что пользователи Micro-Cap V работали тогда в несовершенной операционной системе Windows 2/3.1. Дружелюбный интерфейс широко распространенных операционных систем (ОС) Windows делает простым и удобным освоение прикладных программ, функционирующих под их управлением. Программа Micro-Cap 9 не является исключением. В версиях выше пятой Micro-Cap практически все внешние ограничения сняты, это объясняется постоянным совершенствованием операционной системы MS Windows 95/98. Номенклатура симуляторов Micro-Cap (последние номера версий): Micro-Cap 9 (Version 9.0.0), Micro-Cap 8 (Version 8.1.2), Micro-Cap 7 (Version 7.2.4), Micro-Cap 6 (Version 6.3.3), Micro-Cap V (Version 2.1.2). Указанные версии появлялись регулярно со значительными усовершенствованиями, как в удобстве пользования интерфейсом, так и в содержательной части — по расчетным возможностям [2].

При схемотехническом моделировании устройств силовой электроники, в которых применяются полупроводниковые вентили, методически решаются несколько задач, обычно называемых синтезом и анализом. При исследовании схемотехнической модели основные параметры, которых достаточно много, для силовых вентилях по току, напряжению и т. д. можно устанавливать произвольно, но так, чтобы они «не мешали» моделированию: это задача анализа схемотехнической модели. В ходе исследований выявляются и устанавливаются необходимые параметры силовых вентилях, исходя из действующих значений токов и напряжений и их производных по времени, с необходимым запасом: это задача синтеза устройства. Разумеется, в процессе исследования схемотехнической модели этапы анализа и синте-

за разделить априори затруднительно, но методически это деление оправдано.

Сегодня широкому применению Micro-Cap 9-й версии на персональных компьютерах способствует Интернет: демо-версия Micro-Cap 9 распространяется бесплатно. Прошло 9 поколений улучшения схемной симуляции. Micro-Cap 9 — это объединенный схемный редактор и совмещенный с ним аналого-цифровой имитатор, который обеспечивает интерактивное графическое представление и имитирует обрудование для инженеров электронной техники. С момента возникновения в 1982 году Micro-Cap был значительно расширен и улучшен. Micro-Cap 9 — девятая версия, она сочетает современный интуитивный интерфейс с жесткими цифровыми алгоритмами и обеспечивает беспрецедентный уровень моделирования и легкость использования. Ничего подобного у других программ моделирования нет [2, 3].

### Расчетный файл схемотехнической модели в программе Micro-Cap

Приведем особенности файла программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 9 — мостовой инвертор 2\_2009, рабочее окно (Page 1) которой показано на рис. 1. Программа использует Spice-описания компонентов: резисторов, конденсаторов и индуктивностей, источников тока и напряжения, условные графические изображения которых на рис. 1 соответствуют общепринятым. Кроме простых компонентов: источника постоянного напряжения — V1 (В); дросселя и индуктивности — INDUCTANCE (Гн); конденсаторов — CAPACITANCE (Ф); резисторов — RESISTANCE (Ом), в схемотехнической модели инвертора использованы следующие модели: модель диода MR750, модель тиристора в виде макроса, в присоединенном файле SCR (кремниевый управляемый вентиль), а также модели двух импульсных источников сигналов MODEL IMPULSE\_1 и MODEL IMPULSE\_2, сдвинутых по фазе на половину периода следования импульсов.

Параметры компонентов схемы указываются в единицах СИ с десятичными пристав-

ками — m (милли) и  $\mu$  (микро). Micro-Cap 9 допускает указание нулевого значения параметра компонента, что удобно при построении схемотехнической модели. Например, сопротивление — RESISTANCE = 0, величина которого указана на рис. 1, может быть различной величины, в том числе и равным нулю. На схеме (рис. 1) включена опция нумерации узлов схемотехнической модели. Нулевым индексом нумеруется узел, относительно которого рассчитываются все напряжения в схеме. Его целесообразно присваивать узлу, реально подсоединяемому к «земле» исследуемой схемы электрического устройства.

Желтые прямоугольники на рис. 1, изображающие четыре модуля и состоящие из тиристорно-диодной пары с демпфирующими элементами и элементами управления, не только визуальны выделяют, но и защищают эти компоненты от непреднамеренного изменения параметров. Прямоугольники в этом случае наносятся последним по порядку «слоем». Текстовые надписи в рабочем окне, параметры компонентов и нумерация узлов схемотехнической модели можно отключить.

Инвертор моделируется со схемой управления, функции которой выполняют PSpice-модели импульсных источников сигналов. Параметры импульсов MODEL IMPULSE\_1 и MODEL IMPULSE\_2 устанавливаются на панели, приведенной на рис. 2. В окне Plot (график) справа изображена импульсная последовательность сигналов управления тиристорами, показывающая временной график MODEL IMPULSE\_2. Более сложный вариант системы управления с одним задающим генератором упрощает процедуру изменения параметров одновременно двух последовательностей импульсных сигналов, необходимых для управления противофазными тиристорами мостового инвертора.

На рис. 3 показан взаимный сдвиг синфазных каналов импульсов управления модулями 1 (синфазного с модулем 2) и синфазных модулей 3 и 4. Отметим, что для мостового инвертора важна временная симметрия каналов управления синфазными тиристорами, которая устанавливается при схемотехническом

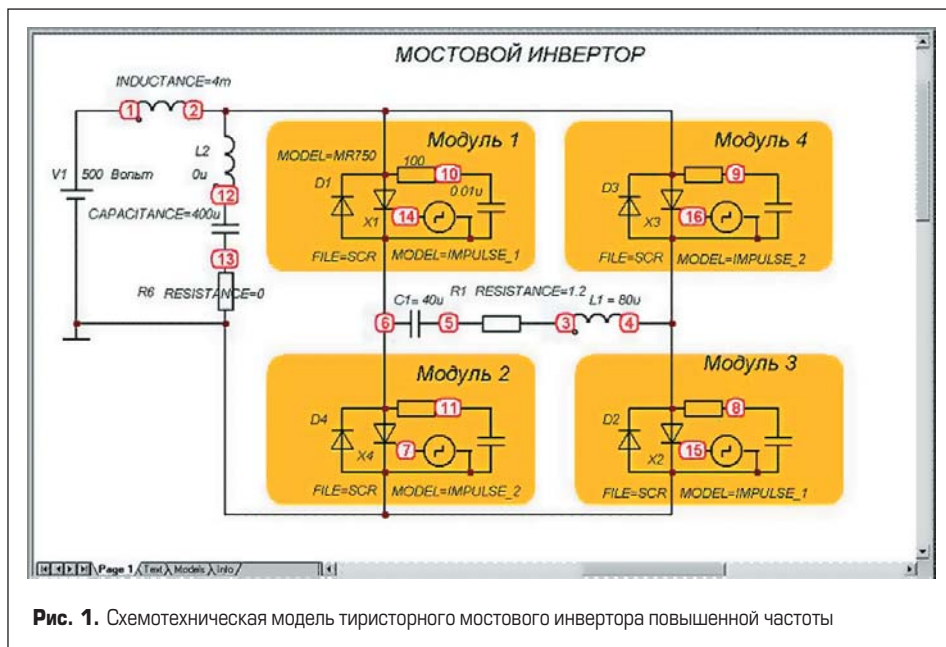


Рис. 1. Схемотехническая модель тиристорного мостового инвертора повышенной частоты

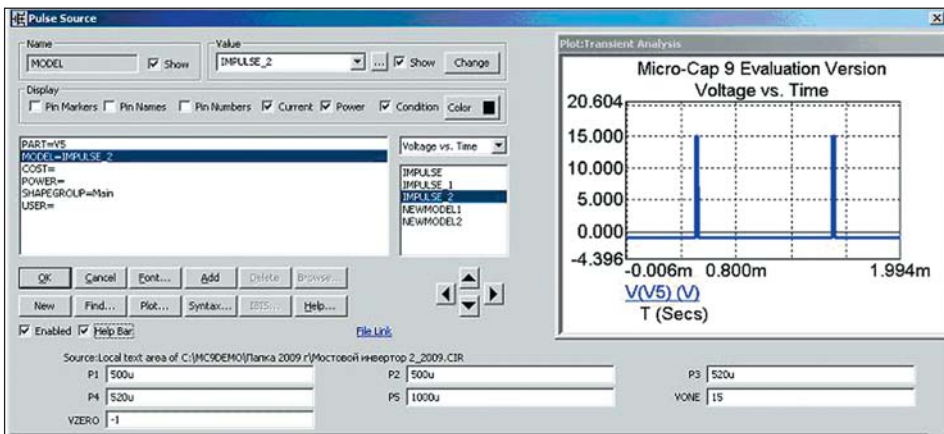


Рис. 2. Панель установки параметров и диаграмма импульсных сигналов управления тиристорами автономного инвертора

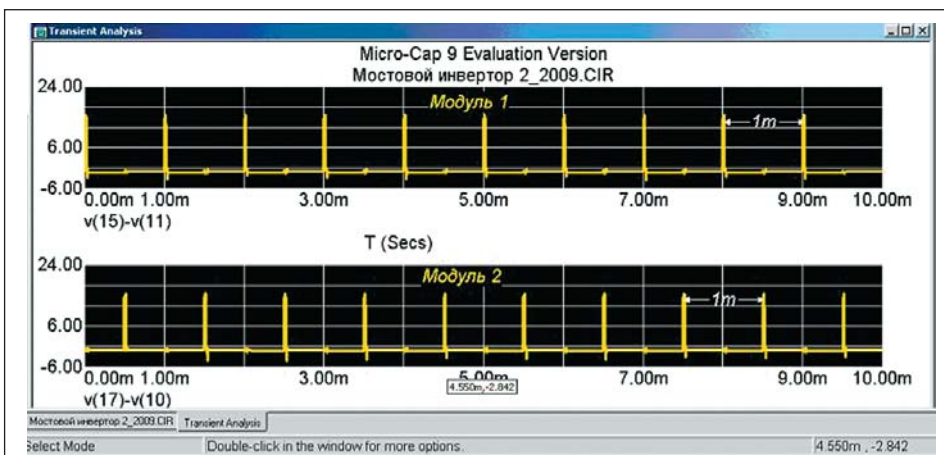


Рис. 3. Импульсные последовательности управления противофазными силовыми модулями автономного мостового инвертора

моделировании. Это свойство мы называем эквидистантностью импульсов управления.

При наличии несимметрии импульсов возникают «перекосы» переменного напряжения на элементах инвертора, наблюдается разница в величине постоянной составляющей токов в синфазных модулях инвертора, возникают несимметричные электромагнитные режимы (при использовании трансформаторов), однако это тема других исследований.

Применение при моделировании мостового инвертора нескольких генераторов импульсов — обычный прием, значительно упрощающий моделирование. Гальваническое разделение цепей управления тиристорами в автономном инверторе, как правило, обеспечивают импульсные трансформаторы или оптроны. Импульсы управления тиристорами должны обеспечивать надежное включение тиристора в необходимый момент времени, с заданным периодом повторения.

На рис. 4 показана форма импульсов управления на тиристорно-диодном модуле. В схематехнической модели импульсные сигналы управляют моментом включения тиристора и обеспечивают спрямление вольт-амперной характеристики (ВАХ) тиристорно-диодного модуля.

В мощных тиристорных инверторах обычно применяются быстродействующие тиристоры на токи 100–400 А, с рабочим напряжением 800–2400 В. Специальная топология катодного эмиттера тиристора обеспечивает удовлетворительные динамические параметры: небольшое время полного включения и низкие потери мощности. Небольшие значения времени задержки включения, нарастания тока и времени выключения позволяют эффективно применять в автономных инвер-

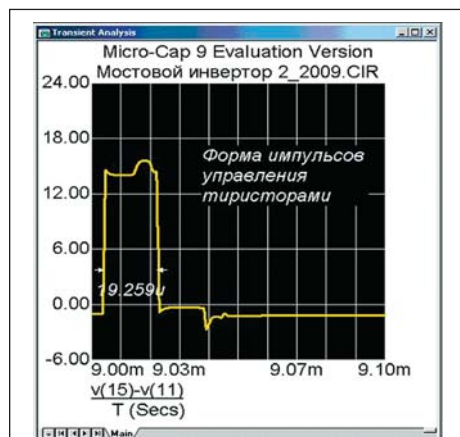


Рис. 4. Параметры импульсов управления силовыми тиристорами тиристорно-диодного модуля

торах быстродействующие тиристоры. Основные сведения по автономным инверторам и мощным тиристорам для них изложены авторами по учебнику Н. Г. Зиновьева [1]. Приводимые в технической документации справочные данные на тиристоры, в основном, необходимы для эквивалентной замены тиристора при эксплуатации. Параметры тиристора определяются из классификационных испытаний, в стандартных условиях, для схем, не соответствующих условиям применения тиристора в конкретной схеме.

Моделированию тиристорных ключевых нелинейных элементов в этой схеме автономного инвертора — посвящено много работ, в том числе и одного из авторов этой статьи [4]. Разработчики обычно ориентируются на применение качественных тиристорных схем с большим номинальным током, чтобы избежать проблем с распределением тока по параллельным тиристорам; с высокими параметрами рабочего напряжения и критической скоростью нарастания прямого напряжения; с предельно малым временем восстановления управляемости, которое, в нашем случае, несколько увеличивается при шунтировании тиристора обратным диодом. Другие параметры тиристора, как правило, не критичны для их использования в схемах тиристорных инверторов и обеспечиваются колебательным (резонансным) режимом работы, а также конструкторскими мероприятиями, например, применением эффективной системы охлаждения, установкой тиристора с контролируемым усилием затяжки, уменьшением длины токопроводящих шин.

Укажем параметры сигнала управления тиристором, обеспечивающие его быстрое включение: напряжение управления  $U_y = 20$  В, при этом ток управления  $I_y$  составляет десятые доли ампера, а длительность импульса управления 20–40 мкс. При этом скорость нарастания тока управления  $dI_y/dt = (1...2)A/мкс$ . Мощность сигнала управления в тысячи раз меньше мощности, переключаемой тиристором в анодной цепи, что важно при использовании тиристора в схемах силовой электроники.

На рис. 5 приведена полученная нами диаграмма включения силового тиристора, изображающая его вольт-амперную характе-

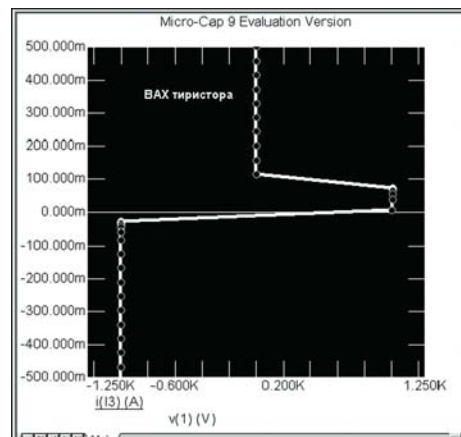


Рис. 5. Диаграмма включения силового тиристора



Рис. 6. Схема испытания тиристорно-диодного модуля при потенциальном управлении

ристку в точке начала координат. В выбранном масштабе по оси тока изображение имеет традиционный вид ВАХ, который приводится в учебной литературе, часто без указания масштабов тока и напряжения, что методически неправильно. Приложенное напряжение к тиристорному модулю превышает напряжение переключения.

Мы рассмотрели, в основном, импульсное управление тиристором — антипод потенциального управления, которое используется при получении его статической ВАХ. Приведем другие свойства тиристорных устройств, учет которых важен при разработке силовых устройств, в частности ТПЧ для индукционного нагрева металлов. Статическую ВАХ тиристорно-диодного модуля получают при медленном изменении тока источника тока  $I_1$ , для фиксированных значений постоянного тока  $I_2$  в схеме, изображенной на рис. 6.

На рис. 7 показаны ВАХ тиристорно-диодного модуля, по которым можно определить напряжение отсечки спрямленной вольт-амперной характеристики тиристора и ее динамическое сопротивление  $R_{дин}$ . Значение напряжения отсечки для мощных кремниевых вентилях равно примерно 1 В, значение динамического сопротивления обратно пропорционально номинальному среднему значению анодного тока и равно тысячным долям ома для мощных тиристорных устройств. Эти параметры определяют потери активной мощности в вентиляторе при прохождении прямого тока, что вызывает разогрев полупроводниковой структуры. При анализе схематехнической модели на коммутационные потери мощности в тиристорах целесообразно устанавливать повышенную температуру.

Укажем, что при моделировании тиристора в программе Micro-Cap 9 температура элементов макроса схемы замещения тиристора, включающая транзисторы различной проводимости и встроенные диоды, может меняться в широких пределах. В этом отношении программа схематехнического моделирования обладает широкими возможностями. На рис. 7 приведена полученная характеристика

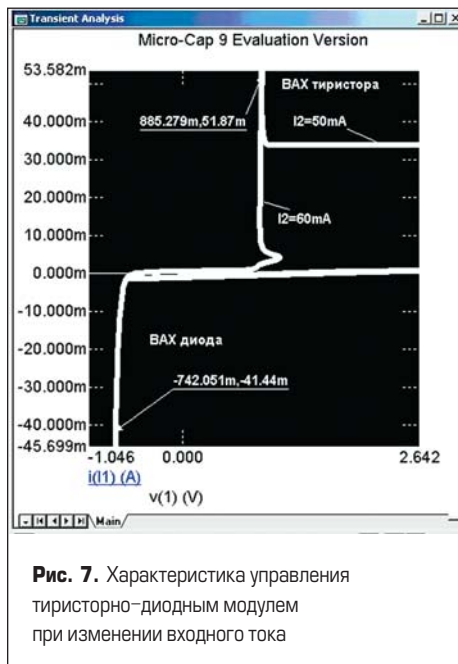


Рис. 7. Характеристика управления тиристорно-диодным модулем при изменении входного тока

тика тока спрямления тиристорно-диодным модулем для температуры структуры 120 °С.

Укажем другие характеристики тиристора, которые также можно исследовать при схематехническом моделировании.

Ток удержания — минимальное значение прямого тока тиристора в случае отсутствия управления, когда тиристор еще остается проводящим. При снижении анодного тока ниже этого значения тиристор выключается (перестает проводить ток). Время включения  $t_{вкл}$  и время выключения  $t_{выкл}$  тиристора относятся к динамическим параметрам и определяют длительность перехода вентиля из выключенного состояния во включенное и из включенного состояния в выключенное на уровне напряжений в 10 или 90%. Отметим, что на первом этапе исследований схематехнической модели мы устанавливаем предельные параметры рассмотренных параметров тиристорно-диодного модуля, чтобы они не препятствовали анализу работы схематехнической модели.

Таким образом, мы рассмотрели основные возможности схематехнического программирования для исследований в режиме анализа переходных процессов. Этот вид анализа соответствует исследованию схемы в практике инженера-исследователя, которому для их проведения необходимы физическая модель ти-

ристорного инвертора, источник питания, система управления тиристорами и электрорадиоизмерительные приборы. Если модель рассчитана на небольшую мощность (как правило, при пониженном напряжении питания), то результаты ее исследований нельзя экстраполировать на инвертор с номинальным напряжением питания и мощностью. Оптимальным выходом является построение схематехнической модели.

### Анализ схематехнической модели мостового инвертора

Рассмотрим анализ электромагнитных процессов в схематехнической модели стандартного тиристорного мостового инвертора с выходной частотой 1000 Гц. Априори установим следующие параметры основных элементов: омическая нагрузка  $R_1$  RESISTANCE = 1,2 Ом, емкость коммутирующего конденсатора  $C_1$  = 40 мкФ и коммутирующей индуктивности  $L_1$  = 80 мкГн, дроссель INDUCTANCE = 4 мГн, фильтровый конденсатор CAPACITANCE = 400 мкФ. Сразу отметим, что представление нагрузки автономного инвертора в виде колебательного нагрузочного контура практически не усложняет схематехнической модели и ее исследования, но требует применения методов частотного анализа, что в данном случае неоправданно.

На рис. 8 приведена панель Transient Analysis Limits, вызываемая для установки параметров расчета. Обязательно заполняем окно Time Range (расчетный диапазон времени, который устанавливается исходя из длительности переходных процессов). Попадание кривой на расчетном графике в 3%-ый интервал от установившегося значения может служить критерием завершения расчета. Maximum Time Step установим равным 1 мкс (еще одна паллиатива между временем расчета и его точностью), Auto Scale Ranges — флажок установки автоматического масштаба рассчитанных величин, P (Plot-1) — порядковый номер изображаемого графика, X Expression и Y Expression — ортогональные оси временного графика 1 для изменения тока нагрузки инвертора. Остальные окна обеспечивают удобство повторения расчета при неудачных попытках анализа переходных процессов в Micro-Cap 9. Отметим, что в 9-й версии есть

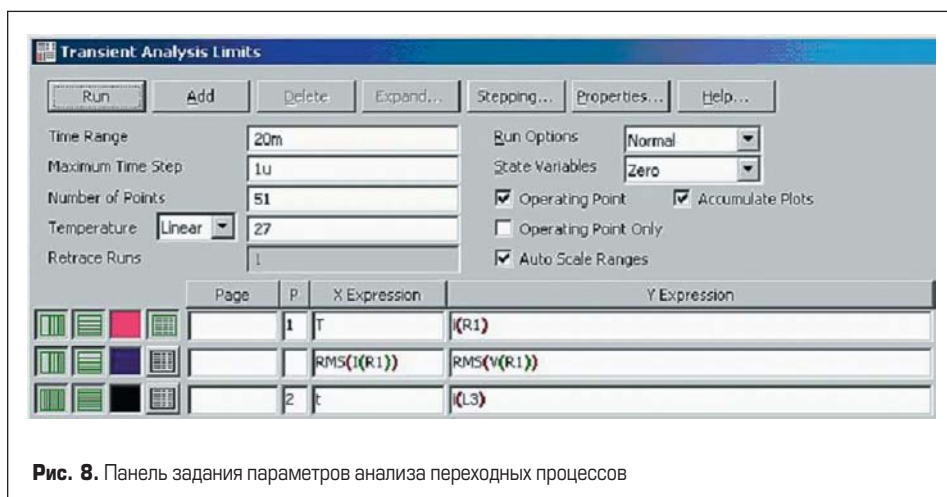


Рис. 8. Панель задания параметров анализа переходных процессов

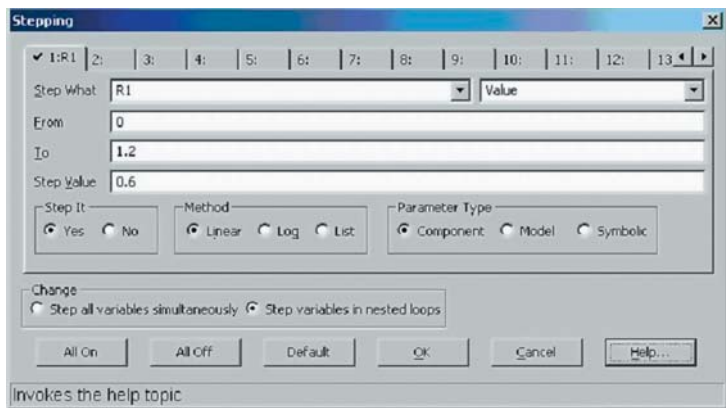


Рис. 9. Панель изменения параметров расчетной модели при анализе переходных процессов

особенности, обеспечивающие удобство опытному пользователю, но затрудняющие ее освоение новичку, которому лучше начинать изучение этой программы с V версии.

Повторение описанной программы расчетов с измененными параметрами элементов обслуживает опция Stepping, панель которой (рис. 9) вызывается ниспадающим меню рабочего окна, либо из соответствующего окна Transient Analysis Limits.

Кратко укажем основные свойства этой опции. Step What — COMPONENT R<sub>1</sub>, Value — варьируемая величина, From — 0; To — 1,2; Step Value — 0,6; Step It — Yes; Method — Linear; Parameter Type — Component. Из этого следует, что задано изменение величины сопротивления нагрузки инвертора R<sub>1</sub> (RESISTANCE) в пределах от 0 (КЗ) до 1,2 Ом с шагом 0,6 Ом (три графика, в единых координатах).

При отсутствии ошибок в задании параметров схемотехнической модели и параметров расчета в главном (Main) рабочем окне выводятся расчетные графики, которые автоматически масштабируются. Текущие расчетные значения показываются в рабочем окне.

Результаты расчетов выходного тока мостового инвертора в указанном диапазоне изменения сопротивления нагрузки приведены на рис. 10. Токи тиристора и диода в инверторе в режиме КЗ имеют практически синусоидальную форму. Обратим внимание на разность амплитуд даже для этого случая, вызванную коммутационными потерями в тиристорах. Это

показывает на возможность выделения коммутационных потерь из суммарных потерь мощности в инверторе, что важно на высокой частоте работы тиристоров. На частоте 1000 Гц эта задача не актуальна. Главный вывод при анализе этой кривой следующий: изменение нагрузки инвертора практически не влияет на величину тока тиристора, это следствие наличия в модели встречных диодов.

Далее можно анализировать изменение амплитуды токов тиристора и диода, длительность протекания этих токов, скорость подхода тока диода к нулю и т. д. Полученной информации достаточно для обоснованного выбора токовых характеристик тиристора и диода в модуле инвертора. Исходя из уровня допустимых потерь активной мощности (выделения тепла) в тиристоре при прохождении прямого тока, завод-изготовитель указывает среднее значение анодного тока тиристора. Испытательный ток вентиля имеет вид полуволны синусоиды в каждом периоде сетевого напряжения 50 Гц. При этом отношение амплитуды тока к среднему значению равно  $\pi$ , отношение действующего значения тока к среднему — коэффициент формы  $\pi/2$ . Вычисление средней (AVG) и действующей величины (RMS) функций — это новые возможности Micro-Cap 9. RMS (Root-mean-square) — действующее значение, AVG (average) — средняя величина.

Амплитуда тока тиристора определяет предельную скорость нарастания прямого тока

тиристора при его включении, обусловленную медленным распространением тока по площади *p-n*-перехода тиристора. Обычно эта величина ограничивается производителем на уровне от нескольких десятков до нескольких сотен ампер в микросекунду. Постоянная скорость распространения зоны проводимости при включении тиристора составляет 0,1 мм/мкс. Известны эффективные технические решения для предотвращения возможного повреждения тиристора вследствие превышения допустимой скорости нарастания прямого тока: включение специального дросселя насыщения последовательно с тиристорно-диодным модулем. Для автономных инверторов тока в колебательном режиме проблема актуальна на повышенных частотах.

На рис. 11 приведены кривые изменения напряжения на коммутирующем конденсаторе инвертора при изменении сопротивления нагрузки от нуля до номинальной величины. Для цепей переменного тока значительной величины предназначаются силовые конденсаторы. Даже в цепях без изменения полярности постоянного напряжения в автономных инверторах полярные конденсаторы (электролитические) обычно не используются. Поэтому все силовые конденсаторы в автономном инверторе одного типа — электротермические, высокочастотные.

Массо-габаритные показатели силовых конденсаторов существенно зависят от конструктивно-технологических особенностей их исполнения. Электротермические конденсаторы — громоздкие, дорогие и требовательные к условиям эксплуатации элементы электротермических установок. Режимы эксплуатации конденсаторов определяют уровень потерь активной мощности, а значит, и степень электрической загрузки в зависимости от частоты и формы напряжения (тока) цепи. Как известно, потери мощности в конденсаторе пропорциональны тангенсу угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Для несинусоидального напряжения на конденсаторе результирующие потери определяются суммированием действующих гармоник. В программе Micro-Cap стандартная опция выявляет состав гармоник тока и напряжения полученных кривых. С возрастанием частоты активные потери увеличиваются, что требует соответствующего сниже-



Рис. 10. Временные диаграммы выходного тока мостового инвертора при изменении сопротивления нагрузки

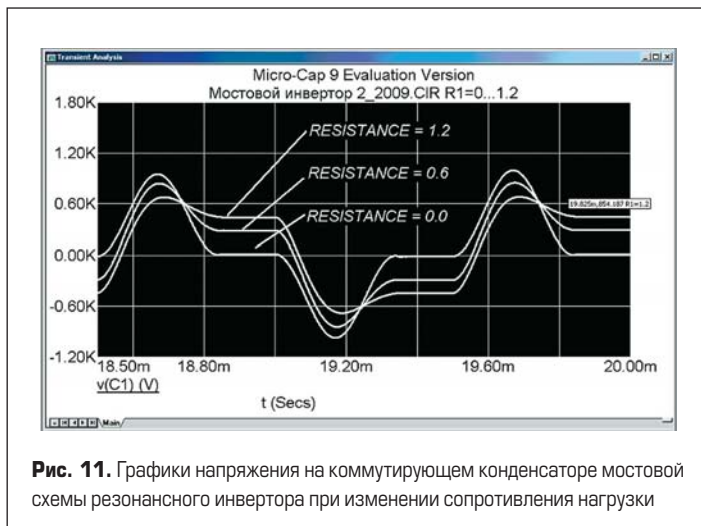


Рис. 11. Графики напряжения на коммутирующем конденсаторе мостовой схемы резонансного инвертора при изменении сопротивления нагрузки

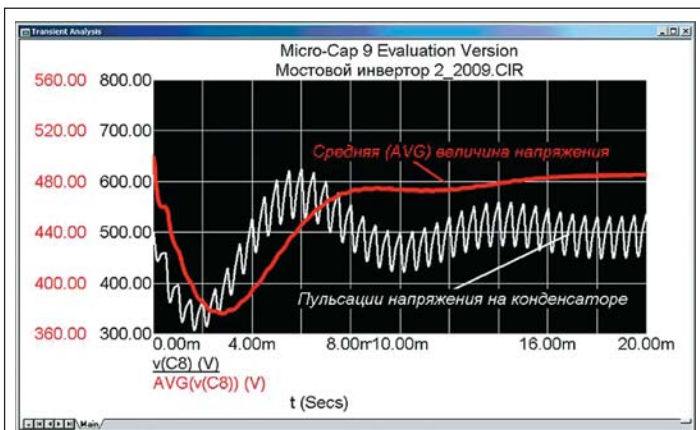


Рис. 12. Средняя величина и пульсации напряжения на конденсаторе фильтра мостового инвертора

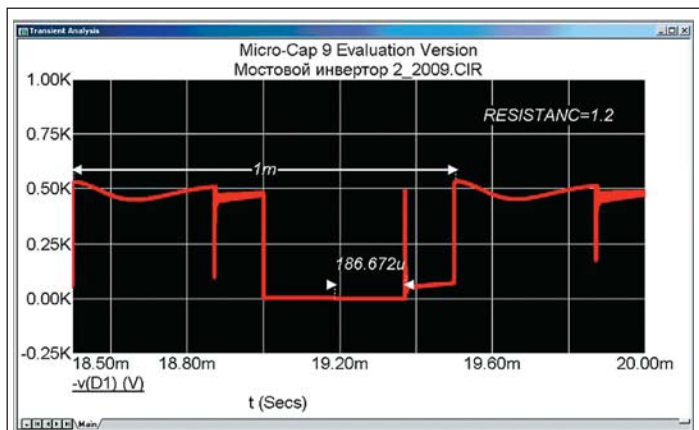


Рис. 13. Напряжение на тиристорно-диодном модуле мостового инвертора при максимальном сопротивлении нагрузки

ния напряжения на конденсаторе. Это, в свою очередь, приведет к увеличению удельных массо-габаритных показателей. Далее приведены параметры типового электротермического силового конденсатора с реактивной мощностью 1000 кВАр. Напряжение на конденсаторе — 0,75 кВ; рабочая частота — 2,5 кГц; суммарная емкость — 112 (4 секции × 28,0) мкФ; вес одного конденсатора — 24 кг. Стоимость силового конденсатора пропорциональна его реактивной мощности.

Реактивная мощность конденсатора в цепи синусоидального напряжения рассчитывается как произведение действующих значений напряжения и тока конденсатора, а при наличии высших гармоник в токе величина их ограничивается в зависимости от их частоты. Конденсатор в цепи постоянного напряжения характеризуется запасенной энергией при заданном уровне напряжения. При схемотехническом моделировании определяется реактивная мощность конденсаторов в одном «корпусе», которые при необходимости могут соединяться последовательно или параллельно.

Основным параметром реактора в цепи постоянного тока является индуктивность, определяющая запасенную энергию при протекании тока. Преобразование энергии в инверторах осуществляется с помощью сугубо нелинейных элементов — вентилях, которые могут находиться только в одном из двух состояний — включенном (проводящем) или выключенном (запертом). В результате потребление энергии от источника питания и передача ее в нагрузку происходит дискретно, что приводит к ухудшению качества потребляемой электроэнергии. Для уменьшения последствий дискретности потребления энергии от источника питания применяются емкостной и индуктивный фильтры на входе инвертора. Эти фильтры обеспечивают электромагнитную совместимость инвертора с источником питания. Под электромагнитной совместимостью понимается способность узлов ТПЧ, объединенных по цепям питания или электромагнитным полем, не создавать недопустимых электромагнитных помех в сети другим устройствам, присоединенным к этой сети, в частности системе его управления [5, 6].

На рис. 12 приведены диаграммы средней величины и пульсаций напряжения на кон-

денсаторе фильтра автономного инвертора. Этих кривых, полученных при вариации сопротивления нагрузки, достаточно для выбора основных параметров линейного дросселя (реактора) и конденсатора в цепи постоянного тока. Обычно принимается, что необходимая емкость и индуктивность должны быть на порядок больше емкости коммутирующего конденсатора и индуктивности коммутирующей катушки инвертора. Но это слишком упрощенное соображение, пригодное лишь для первого этапа схемотехнического моделирования. Далее эти величины уточняются, с целью уменьшения установленной мощности реактивных элементов. Нелинейный «железный» сердечник дросселя, применяемый с целью концентрировать поля рассеяния катушки и уменьшить ее габариты, придает дросселю нелинейные свойства, которые сглаживаются введением минимально необходимого воздушного зазора.

Рис. 12, на котором приведены средняя величина и пульсации напряжения на конденсаторе фильтра, показывает, что в случае совмещения двух и более графиков по оси времени при анализе переходных процессов слева автоматически указываются масштабы полученных кривых по оси ординат.

На рис. 13 показана полученная нами временная диаграмма напряжения на тиристорно-диодном модуле мостового инвертора. На основе этой диаграммы определяются: действующее

прямое и обратное напряжение на вентилях, время, предоставляемое на восстановление управляющих свойств тиристора, которое должно превышать минимально необходимую продолжительность времени приложения обратного напряжения (интервал проводимости тока диодом, показанный на рис. 13), в течение которого он восстанавливает свои запирающие свойства. Последовательный резонансный инвертор критичен к максимальной нагрузке, но работоспособен при коротком замыкании нагрузки. Во всех случаях важной остается проблема обеспечения времени, предоставляемого схемой на восстановление управляющих свойств тиристоров, анализ которого может быть сделан в общем случае моделированием либо численными методами [7, 8].

Временная диаграмма (рис. 13) определяет действующую скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре, при превышении которой возможно включение тиристора, даже в отсутствие сигнала управления. Для различных типов тиристоров допустимая скорость  $du/dt$  составляет 100–1000 В/мкс. На временной диаграмме видно, что требования инвертора со встречно-параллельными диодами к этому параметру тиристора весьма высоки. Не рассматривая источника этих перепадов, отметим, что применение демпфирующих цепочек — эффективное средство для снижения коммутационных перенапряжений.

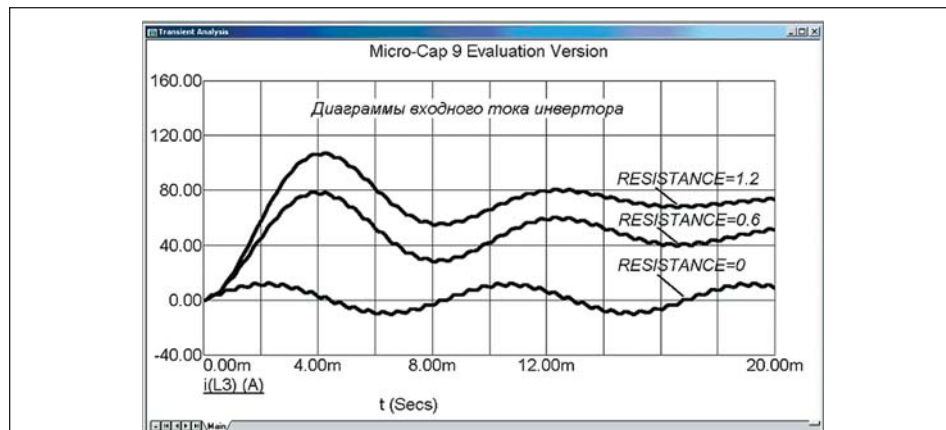


Рис. 14. Диаграммы входного тока мостового инвертора при изменении сопротивления нагрузки

Необходимо иметь в виду, что рабочие участки на основных характеристиках автономного инвертора — внешней  $U_{\text{вых}}^* = U(I_{\text{вых}}^*, \omega_y^*)$  и регулировочной  $U_{\text{вых}}^* = I^*(I_{\text{вых}}^*, \omega_y^*)$  — ограничиваются условием, чтобы время проводимости диода обратного тока было больше времени восстановления управляющих свойств тиристоров. Иначе в модели инвертора, как и его прототипе, произойдет «срыв» инвертирования, который моделируется для исследования аварийных процессов. При моделировании электромагнитных процессов автономного инвертора для получения внешних и регулировочных характеристик необходимо использование профессиональной версии Micro-Cap [11].

Увеличение частоты выходного напряжения инверторов сопровождается ростом потерь мощности при переключении тиристоров, в результате нагрузка тиристоров по току должна снижаться. Практически это приводит к снижению выходной мощности инвертора обратно пропорционально квадрату увеличения рабочей частоты.

### Исследование резонансного мостового инвертора с удвоением выходной частоты

Преобразователи частоты, выполненные по схеме «выпрямитель – автономный инвертор», называются преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока (напряжения) в зависимости от типа автономного инвертора (тока или напряжения). Мы рассматриваем инвертор тока, применяемый в тиристорных инверторах для установок индукционного нагрева. Далее приводятся результаты исследований мостовой схемы тиристорного инвертора [9] с нагрузкой, включенной в цепь разделительного конденсатора, что позволяет удвоить его выходную частоту по отношению к частоте включения тиристоров. Это, в свое время, позволило получить выходную частоту инвертора 2400 Гц при существенных ограничениях на время восстановления управляемых силовых тиристоров типа ТЛ-2. На основе авторского свидетельства Кацнельсона-Ухова [9] предложены десятки других технических решений, которые позволили создать в УГАТУ, под руководством доц. С. М. Кацнельсона, отраслевую лабораторию полупроводниковых преобразователей частоты (ОЛППЧ) для индукционных технологий: нагрева металлов, плавки, закалки и т. д.

Первый уфимский тиристорный преобразователь частоты для индукционного нагрева частотой 2500 Гц, мощностью 120 кВт, созданный на основе мостового тиристорного инвертора со встречно-параллельными диодами, нашел широкое применение в технологиях индукционного нагрева металлов и стал основой для большого количества новых технических решений. Антипараллельный частотному тиристор неуправляемый лавинный диод превратил этот комплект в полупроводниковый модуль, который позднее стал самостоятельной конструктивной единицей изделий силовой электроники.

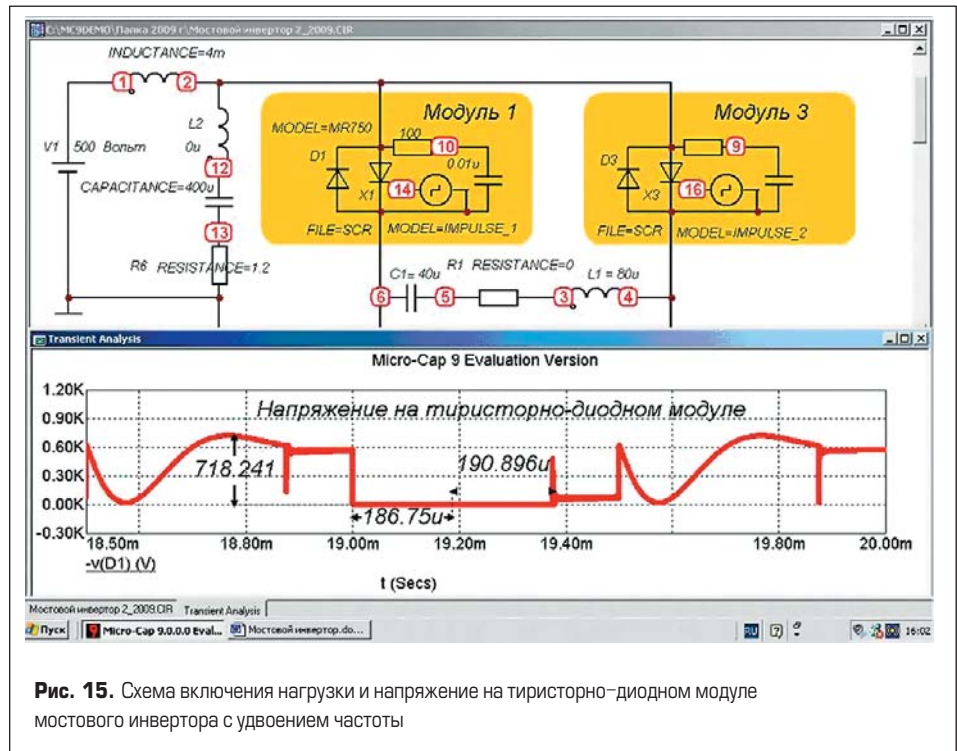


Рис. 15. Схема включения нагрузки и напряжение на тиристорно-диодном модуле мостового инвертора с удвоением частоты

Резонансным является инвертор, у которого периодический характер электромагнитных процессов в нагрузке обусловлен колебательными свойствами коммутирующего контура инвертора. Мы рассматриваем резонансный инвертор тока с закрытым входом, который подключается к источнику питания через большую индуктивность в цепи постоянного тока, на входе инвертора. В резонансной схеме инвертора частота выходного напряжения может увеличиваться в два раза. При этом используется свойство резонансных инверторов увеличивать вдвое частоту пульсаций в цепи постоянного тока инвертора. Схема включения нагрузки для резонансного инвертора с вентилями обратного тока и с удвоением частоты показана на рис. 15. В этой схеме нагрузка RESISTANCE  $R_0 = 1,2$  Ом через разделительный конденсатор CAPACITANCE = 400 мкФ подключена параллельно входу мостовой схемы инвертора, при этом в нагрузку выделяется основная гармоника выходного тока, с двойной частотой по отношению к частоте включения тиристорно-диодных модулей инвертора. Сопротивление в цепи контура коммутации (диагонали мостовой схемы) RESISTANCE  $R_1$  устанавливаем равным нулю.

На рис. 15 внизу показан рассчитанный график напряжения на тиристорно-диодном модуле мостового инвертора с удвоением частоты. График напряжения показывает его форму для интервала установившегося режима работы инвертора, после окончания переходного процесса, вызванного его пуском: включением питания и подачей импульсов управления на тиристоры.

На рис. 16 показана временная диаграмма выходного тока мостового инвертора с удвоением частоты, при изменении сопротивления нагрузки в диапазоне от 0 до 1,2 Ом. Диаграмма показывает кривые изменения тока для интервала времени 18,5–20 мс с момента включения инвертора. Длительность переходного режима пуска определяется, в основном, нарастанием

тока в индуктивности дросселя INDUCTANCE = 4 мс, что устанавливается при намеренном изменении его параметров. На этом этапе исследований индуктивность дросселя постоянна, в случае необходимости он может быть представлен в схеме нелинейным элементом — катушкой индуктивности с заданным числом витков и параметрами стального сердечника, с определенными геометрическими размерами с воздушным зазором.

Когда в инверторе проводят ток два синфазных тиристора вентильного моста, коммутирующий конденсатор в контуре коммутации заряжается колебательным образом от источника входного напряжения. На следующем интервале происходит колебательный разряд конденсатора через вентили обратного тока той же диагонали вентильного моста, при этом тиристоры восстанавливают управляющие свойства. В интервале «паузы» все вентили инвертора не проводят ток, и постоянный ток дросселя — звена постоянного тока — течет в цепь нагрузки. Затем включаются синфазные тиристоры другой диагонали моста и происходят аналогичные процессы перезаряда коммутирующего конденсатора через индуктивность в противоположном направлении. Ток нагрузки определяется как разность тока в звене постоянного тока и тока коммутирующего контура и имеет двойную частоту по отношению к частоте выходного тока мостового инвертора. Вторая гармоника входного тока выделяет полезную мощность в нагрузке инвертора.

На рис. 17 приведен график входного тока мостового инвертора с удвоением частоты (аналогичный изображенному на рис. 14). На нижнем графике приведена кривая выходного тока инвертора. Выходной ток протекает через разделительную емкость инвертора и нагрузку, сопротивление которой RESISTANCE = 1,2 Ом. Сравнивая указанные диаграммы, можно констатировать, что при равной емкости конденсаторов в схемах pulsa-

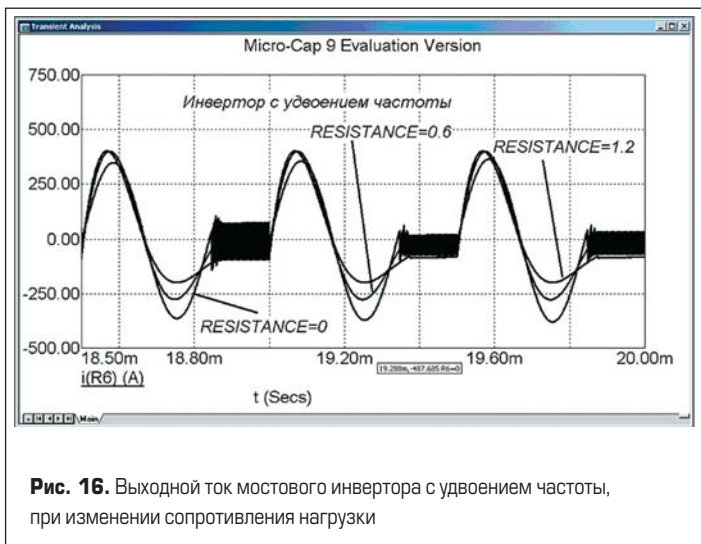


Рис. 16. Выходной ток мостового инвертора с удвоением частоты, при изменении сопротивления нагрузки

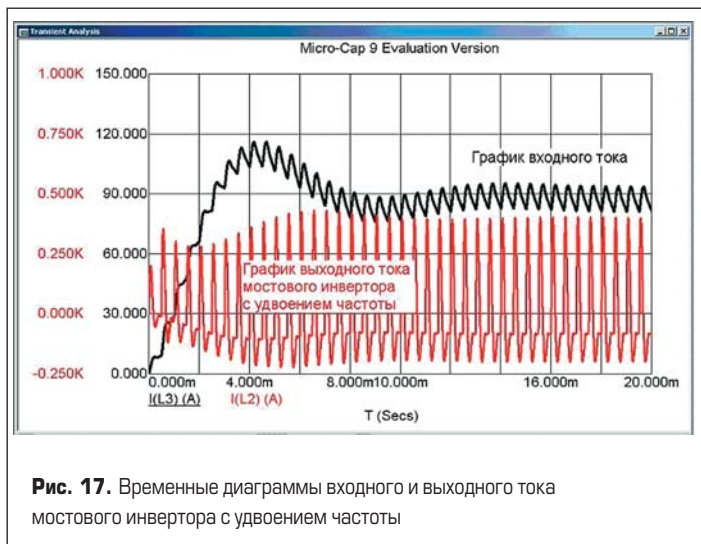


Рис. 17. Временные диаграммы входного и выходного тока мостового инвертора с удвоением частоты

ции входного тока во второй схеме значительно возрастают. Следовательно, может потребоваться увеличение эффективности фильтра постоянного тока.

Класс резонансных инверторов разнообразен по техническим решениям, несмотря на то, что базовых схем автономных инверторов немного: несимметричная одноячейковая, полумостовая и симметричная мостовая. Тиристорные резонансные инверторы без обратных диодов более эффективно преобразуют постоянный ток в переменный, они предназначены для питания условно постоянной нагрузки. Электромагнитные процессы в тиристорных последовательных резонансных инверторах с обратными диодами несколько сложнее, чем в инверторах без обратных диодов. Предельная частота тока нагрузки тиристорных инверторов с обратными диодами достигается при равной выходной мощности с инверторами без встречных диодов [10]. Таким образом, мы показали и описали исследования электромагнитных процессов в схеме мостового тиристорного инвертора для установок ТВЧ.

### Перспективы силовой электроники и производства силового оборудования для индукционного нагрева

Журнал «Силовая Электроника» публикует актуальные статьи, посвященные проблемам развития и современному состоянию этого направления электроники [12, 13]. К сожалению, возникающие новые проблемы требуют немедленного решения. Даже верный путь развития для стабильного периода существования государства в нестабильных условиях не может быть реализован. Один из авторов статьи много лет работает в области силовой электроники, с тех пор, когда она называлась промышленной электроникой, потом преобразовательной техникой. Все направления силовой электроники, как дети одной семьи, различны и сейчас болеют разными болезнями. Как не существует лекарства от всех болезней (панацеи), так и одинаковые меры в нестабильной ситуации не могут быть верными. Для лечения недостаточно поставить диагноз. Участковый врач менее эффективен,

чем домашний врач, знающий динамику (генезис) болезни. Извините за обилие метафор. В конце 1940-х – начале 1950-х годов японские товары были символом плохого качества, даже по отношению к советским товарам народного потребления. В настоящее время Япония в области электроники уже недостижима для России, и отстали мы от нее не на 10–20 лет, а навсегда. Скоро нас обгонит Китай, который не декларирует, а на практике диверсифицирует промышленное производство. В названных странах нет таких запасов железной руды, как в России, нет таких объемов производства металлов.

Нагрев металла остается распространенным производственным процессом в металлургии и машиностроении, влияющим на технико-экономические показатели производства промышленных изделий. Выбор метода нагрева существенным образом отражается на технологичности производственных процессов. Индукционный нагрев является эффективным, экологичным и потому безальтернативным методом. Основное преимущество индукционного метода нагрева заключается в том, что индуцированные токи нагревают непосредственно металл, заготовку или даже отдельные части детали. При индукционном нагреве отсутствует обезуглероживание металла и образование окалины. Для индукционного нагрева используется переменный ток низкой (50 Гц), средней (500–1000 Гц), повышенной (2400–10 000 Гц) или высокой частоты (22–400 кГц), который производится гидро-, тепловыми и атомными станциями на промышленной частоте в 50 Гц. Существенный фактор эффективности использования устройств индукционного нагрева — это рациональный выбор источника питания. Наиболее распространенными источниками питания индукционных нагревателей в настоящее время являются тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), которые должны быть заменены источниками питания на JGBT-модулях.

Комплекс оборудования индукционного нагрева, как правило, состоит из нескольких габаритных узлов: тиристорного преобразователя частоты; станции водоохлаждения; конденсаторной батареи; согласующего трансформатора; индукционной плавильной электро-

печи, либо нагревательного, закалочного поста, и комплектующих узлов. Перечисленное оборудование для индукционных комплексов мощностью 100–1000 кВт представляет собой функциональные узлы, технические характеристики которых должны быть согласованы по мощности и частоте, для применения в нагревательной установке. Применение ТПЧ позволяет сократить затраты электроэнергии, эксплуатационные расходы и, в конечном итоге, снизить себестоимость продукции. Изменение рабочей частоты ТПЧ и напряжения питания позволит более эффективно регулировать и распределять температуру нагрева по поверхности изделия, управлять глубиной прогрева изделия.

В настоящее время отечественные потребители испытывают недостаток в качественном и доступном по стоимости оборудовании для индукционного нагрева. Традиционные источники питания (электромашинные генераторы и ламповые генераторы) правомерно сняты с производства. Современное оборудование ТВЧ не соответствует конкурсным требованиям производителей (при отсутствии тендеров), так как количество разработчиков и производителей постоянно уменьшается. Сегодняшняя российская ниша в области электроники — это разработки устройств силовой электроники, которые требуют не высоких технологий, как в микроэлектронике, в которой Россия безнадежно отстала от мирового уровня, а профессиональных знаний.

Существует расхожее мнение, что лучших ученых в США переманивают из других стран, но это не совсем так. Иначе из одного университета в Беркли (Калифорния) не вышло бы 26 лауреатов Нобелевской премии. Заметим, что советской и монгольской альтернативой Нобелевской премии в области науки и техники является открытие. Другие страны мира открытий не регистрируют. Индукционный нагрев — одна из немногих технологий с отечественным приоритетом, ее предложил, разработал и довел до широкого промышленного применения В. Вологдин. Таких примеров в современной России очень мало. Силовые энергетические установки индукционного нагрева изготавливаются, как правило, малыми сериями. Их стоимость значительно меньше зарубежных аналогов, они более при-



способлены к специфике отечественных условий эксплуатации, например, колебаниям сетевого напряжения или плохому качеству воды для систем охлаждения, с большим содержанием солей.

Несмотря на отмеченные особенности, в целом технический уровень отечественного оборудования индукционного нагрева достаточно высок, что подтверждается его конкурентоспособностью по отношению к ведущим зарубежным фирмам и продажей технологических комплексов за границу (пока в развивающейся стране). При изготовлении силового оборудования используются компоненты зарубежных производителей и современные методы проектирования, происходит обмен техническими специалистами высшей квалификации и т. д. Это позволяет решать основную проблему индукционного оборудования — сертификацию продукции на соответствие международным стандартам качества. Тем не менее, приходится отметить, что на российском рынке индукционного оборудования уже представлены китайские промышленные компании, продукция которых соответствует действующим нормам и требованиям мировых стандартов. Ввиду громадных размеров нашей страны, территориальной изоляции целых промышленных районов, а также темпов экспансии китайского промышленного оборудования, например, в технике связи, китайские производители могут составить серьезную конкуренцию и в области поставки оборудования для индукционного нагрева металлов.

Для нагрева малогабаритных изделий, заготовок или деталей, для плавки металлов небольших объемов применяются индукционные нагревательные установки высокой частоты.

В высокочастотных источниках питания таких установок проектируются генераторы, выполненные на IGBT-транзисторах, что является перспективным направлением новых разработок. В то же время китайские производители предлагают на отечественном рынке промышленные преобразователи ТВЧ 20–80 кГц мирового уровня.

Тиристорные преобразователи частоты и технологическое оборудование для индукционного нагрева металлов ТВЧ несколько десятков лет разрабатываются и изготавливаются на многих предприятиях г. Уфы, поддерживающих традиции Уфимской школы тиристорных преобразователей, заложенных С. М. Кацнельсоном и профессором С. В. Шапиро. Очевидно, что можно удовлетворить запросы промышленности и производства, если иметь базовые разработки ТПЧ, которые модифицируются по частоте и мощности. Унификация основных силовых узлов, применение типовых технических решений, блочные универсальные конструкции систем управления, защиты и регулирования позволяют произвести реновацию типовых конструкций ТПЧ.

В настоящее время в Уфе успешно работают несколько организаций, которые выполняют новые проекты, изготавливают электротермическое оборудование и внедряют его на предприятиях Башкирии, в стране и за рубежом. Уфа, Екатеринбург, Челябинск, наряду с Москвой и Санкт-Петербургом, становятся региональными центрами разработки электротермического оборудования. Сейчас выясняется, что повышение квалификации инженеров, разработчиков изделий силовой электроники, требует больше затрат времени и средств, чем специалистов других направлений электронной техники. С другой стороны, специализация может иметь индивидуальный характер, так как большое количество разработчиков не требуется.

Напомним старую историю. Учитель говорит: «Дети, я учил, как нужно складывать дроби — числитель с числителем, а знаменатель со знаменателем. Но, оказывается, в городе дроби складывают иначе!» Менять надо таких учителей. Упомянутый Билл Гейтс написал свою первую программу для ЭВМ в возрасте 13 лет, и с этого времени зарабатывал на жизнь разработками программ для сиэтлских бизнесменов. Насколько известно, зарубежные фирмы, производители оборудования силового профиля, периодически меняют менеджеров, у них нет множества постоянных сотрудников. Для решения конкретной масштабной задачи набирается необходимый коллектив исполнителей. Компетентность, мобильность, постоянная готовность к решению новых задач, использование отечественного и мирового опыта — это главный путь развития силовой электроники.

### Заключение

- Мостовой тиристорный инвертор, согласно большинству литературных источников, является типовой схемой в установках ТВЧ для индукционного нагрева металлов.

Его технические характеристики постоянно улучшаются, благодаря совершенствованию силовых компонентов, в первую очередь силовых конденсаторов и полупроводников.

- При схемотехническом моделировании тиристорных инверторов как электротехнических устройств большой мощности решаются две задачи — анализа и синтеза. Задача анализа — построение работоспособной схемотехнической модели. Синтез модели — определение параметров ее элементов, при которых решается поставленная цель моделирования.
- Оборудование индукционного нагрева отечественного производства пока еще остается конкурентоспособным среди мировых производителей, которые, с целью снижения издержек производства, переводят его в страны Востока. Японские производители постепенно уступают место китайским фирмам.

*Благодарим В. Ланцова, С. Эраносяна и редакцию журнала «СЭ» за предложенную ими актуальную тему размышлений о проблемах отечественной силовой электроники.*

### Литература

1. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.
2. support@spectrum-soft.com.
3. <http://www.spectrum-soft.com>.
4. Зинин Ю. М. Идентификация схемотехнического моделирования мостовых тиристорных инверторов для индукционного нагрева металлов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. УГАТУ, 2006.
5. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Зинин Ю. М. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
7. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
8. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
9. Кацнельсон С. М., Ухов В. С. Авт. св. № 235177. Независимый инвертор. 1969.
10. Патент на изобретение № 2215361. Мостовой инвертор. Зинин Ю. М., Ветюшкин А. В., Ройзман Ю. П. Опубл. 27.10.2003. Бюл. № 30.
11. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-CAP V. М.: Солон, 1997.
12. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2008. № 1.
13. [www.power-e.ru](http://www.power-e.ru).