

Исследование тиристорных преобразователей частоты

для установок индукционного нагрева металлов

При разработке и исследовании тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) для силовых электротермических установок широко используется схемотехническое моделирование. Оно заключается в том, что реальная схема преобразователя частоты, выполненная на силовых полупроводниковых приборах (тиристорах и диодах) с демпфирующими цепями, коммутирующими элементами, питаемая от трехфазной сети через выпрямитель и дроссель постоянного тока, нагруженная на колебательный контур электротермической установки, описывается PSPICE-моделями перечисленных элементов.

Зульфия Валиуллина

valiullina_ela@mail.ru

Юрий Зинин,
к. т. н.

Расчетный файл схемотехнического моделирования CIR в профессиональной версии программы MicroCap по начертанию соответствует принципиальной электрической схеме тиристорного преобразователя частоты, что позволяет производить исследование схемы непосредственно инженеру-разработчику.

Силовая техника отличается, как правило, простотой схемных решений и сложностью анализа электромагнитных процессов, вызванных существенной нелинейностью вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов. Методы исследований с помощью программ схемотехнического моделирования дали разработчикам силовых тиристорных преобразователей частоты необходимые средства для исследований, которые проводятся на моделях электротермических установок различного назначения.

Эмпирические факты, накопленные поколениями инженеров-разработчиков преобразовательной техники, наконец получают подтверждение или опровержение, способствуя прогрессу техники индукционного нагрева. Исследования на реальных объектах

силовой преобразовательной техники трудоемкие, опасные и дорогие.

В то же время проектирование силовых установок на основе результатов схемотехнического моделирования и, главное, проверка его в результате промышленной эксплуатации является оптимальным решением современного уровня. Индукционная технология — как затратная отрасль — для производителей является объектом экономии площадей, персонала и капитальных вложений, но альтернативы ей пока нет.

На рис. 1 показан файл .CIR для схемотехнического моделирования электротермической индукционной плавильной установки с тиристорным преобразователем частоты в программе MicroCap [1].

Тиристорный преобразователь частот, согласно рис. 1, выполнен на основе схемы несимметричного одноячейкового инвертора, который через выпрямитель подключен к трехфазной промышленной сети переменного тока. Нагрузкой автономного последовательного несимметричного инвертора тока является резонансный контур, образованный конденсаторами C5 и C6 и индуктором L8 с эквивалентной нагрузкой электропечи R30. Индуктор является основным элементом в технологическом процессе индукционного нагрева ТВЧ. Величина индуктивности и эквивалентного сопротивления нагрузки индуктора определяется на основе расчетов и последующей экспериментальной проверки [2].

Файл MicroCap, изображенный на рис. 1, с указанными параметрами элементов силовой схемы соответствует ТПЧ для индукционной плавки металлов мощностью 120 кВт, частотой 2,4 кГц, внешний вид которого показан на рис. 2.

На промышленных предприятиях плавка токами высокой частоты (ТВЧ) в печах типа ИСТ (рис. 2) до недавнего времени производилась с помощью машинных генераторов — технических чудовищ эпохи развитого социализма, которые используются и по сей день. К сожалению, отечественные электромеханические генераторы ТВЧ отличаются плохим качеством, большим весом, габаритами и шумом при ра-

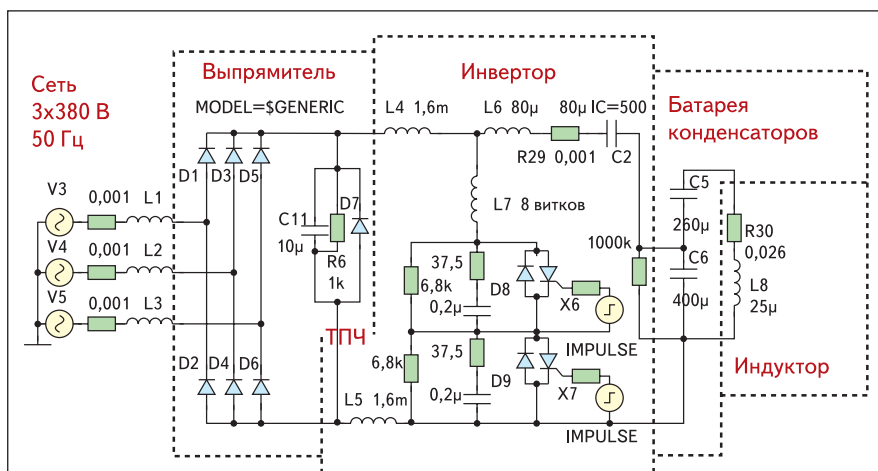
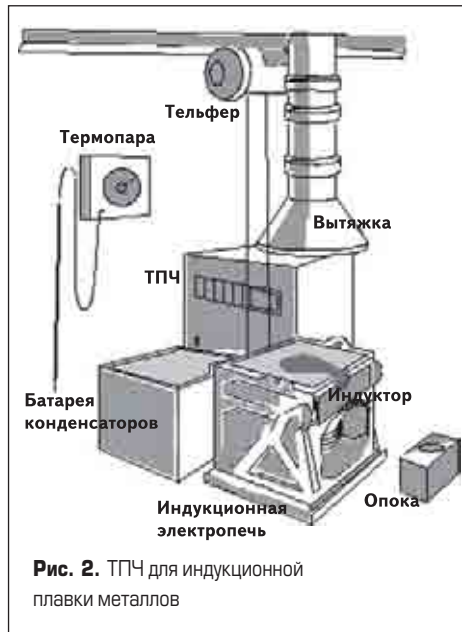


Рис. 1. Схемотехническая модель тиристорного преобразователя частоты



боте. Поэтому началась разработка альтернативных статических источников электропитания повышенной частоты. В России несколько научных центров промышленной технологии индукционного нагрева металлов и разработки ТПЧ. Авторы представляют Уфимскую научную школу, основанную в 1969 г. С. М. Качнельсоном и С. В. Шапиро, которая стала пионером внедрения в промышленную эксплуатацию тиристорных преобразователей повышенной частоты для индукционного нагрева металлов. В Уфе были созданы три КБ, в которых работали сотни инженеров. За рубежом нет большого опыта проектирования статических источников ТВЧ. Ведущие зарубежные электротехнические фирмы набирают и увольняют сотрудников по мере надобности, лишь для выполнения отдельных заказов.

Дополнительным преимуществом ТПЧ, в сравнении с машинными генераторами ТВЧ, является возможность изменения рабочей частоты при плавке металла. Это исключает необходимость переключения электротермических конденсаторов в процессе выхода индукционной электропечи на установившийся режим. Высокочастотные контакторы, применяемые для этого, превратились в технический атавизм.

На рис. 2 изображен автоматизированный комплекс для индукционной плавки черных и цветных металлов в литейном производстве. Область его применения — открытая плавка ТВЧ в индукционных печах типа ИСТ черных и цветных металлов и сплавов, а также переплава отходов производства в печах с кислотной футеровкой и графитовых тиглях для литья по выплавляемым моделям, литья в кокили и земляные формы.

Система регулирования коэффициента мощности ($\cos \phi$) индукционной электропечи, режимы ручного и автоматического регулирования выходной мощности при изменении рабочей частоты литейного комплекса позволяют вести плавку на форсированных, экономически выгодных тепловых режимах.

В уфимских преобразователях применяется неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель. Это устройство вносит меньше искаже-

ний в питающую сеть, чем управляемый выпрямитель, и более надежно в эксплуатации. В его конструкции используются диоды Д143-800-18.

Блок силовых вентилях инвертора выполнен на тиристорах ТБ143-400-10 и обратных диодах ДЧ261-320-12.

На рис. 1 пунктиром выделены ТПЧ, батарея печных конденсаторов и индукционная печь ИСТ с индуктором, общий вид которых показан на рис. 2. Эти компоненты комплекса для плавки ТВЧ сравнимы между собой по габаритам, весу и стоимости.

В созданной нами схмотехнической модели ТПЧ использована макромодель силового тиристора из библиотеки MicroCap (Silicon Controlled Rectifier — SCR), параметры которой приведены на рис. 3.

В схмотехнической модели (рис. 1) включение тиристорной схемы преобразователя частоты производится импульсными источниками сигналов IMPULSE, моделирующими выходной формирователь импульсов системы управления ТПЧ.

Программа MicroCap использует макросы основных компонентов. Исходные файлы можно создавать в оригинальном формате, либо использовать описание схем и задание на моделирование на языке SPICE (расширение имени — .SCT). В стандартной макромодели тиристора уточнены параметры применяемых нами тиристоров.

К сожалению, у отечественных производителей силовых полупроводниковых элементов нет практики выпуска продукции на рынок одновременно с их PSPICE-описанием, как это делают зарубежные фирмы. Это ограничивает рынок российской электротехнической продукции и усложняет задачи разработчиков современной преобразовательной техники, в частности, в области создания и исследования инверторно-индукционных силовых установок.

Описания PSPICE-моделей и стандартных элементов схемы приводятся в файле .TEXT, автоматически формируемом программой MicroCap и доступном для изменения пользователем. Там же указываются использованные нами нелинейные модели элементов — диодов, сердечников дросселей постоянного и перемен-

ного тока, трехфазного источника синусоидального напряжения промышленной частоты, генератора импульсов управления тиристорами.

При моделировании дросселя постоянного тока (индуктивности L4 и L5) со стальным сердечником использована его аппроксимация по нескольким точкам характеристики намагничивания, приведенная в [3] для используемой нами электротехнической стали 3425. Далее приведена методика исследований инверторно-индукционной силовой установки повышенной частоты, с учетом влияния на протекание электромагнитных процессов дросселя постоянного тока и нелинейного дросселя насыщения, включенного последовательно с тиристорами (рис. 1).

Учет при схмотехническом моделировании существенных нелинейностей всех элементов позволяет получить, в ряде случаев, более точные результаты, чем это возможно при непосредственном измерении на ТВЧ-установке.

Первым этапом исследования модели (рис. 1) является проведение частотного анализа (AC Analysis) резонансных свойств нагрузочного колебательного контура и определение его добротности.

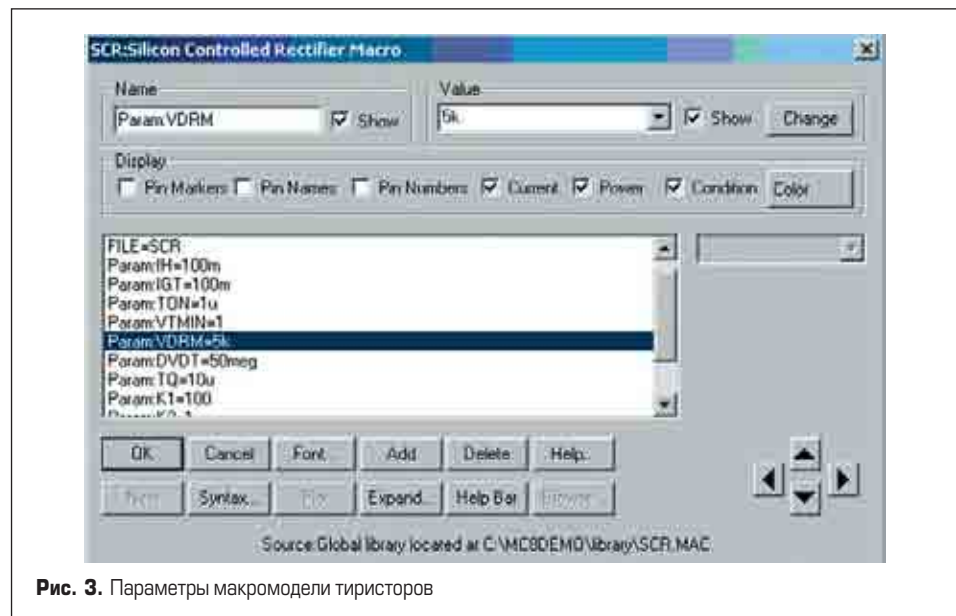
Для плавки в печи ИСТ-0.16 рассчитываем необходимую мощность ТПЧ, при частоте 2,4 кГц равную $360 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т} \times 0,16 \text{ т/ч} = 60 \text{ кВт}$. Учитываем электрический и тепловой КПД индукционной электропечи, равный 0,7.

Типовой индуктор этой печи имеет наружный диаметр 420 мм, сечение витка — $20 \times 20 \text{ мм}$, количество витков — 14, длину индуктора — 460 мм. Верхний диаметр для шаблона — 260 мм, нижний диаметр — 210 мм, высота — 540 мм.

По этим исходным данным рассчитываем индуктивность индуктора с шаблоном ($L8 = 25 \text{ мкГн}$) и эквивалентное сопротивление для рабочего режима ($R30 = 0,026 \text{ Ом}$).

На первом этапе исследований мы решаем следующие задачи, считая, что параметры индуктора соответствуют расчетным значениям:

- выявляем диапазон изменения сопротивления в колебательном контуре нагрузки;
- для известной величины индуктивности индуктора определяем емкости конденсаторов;



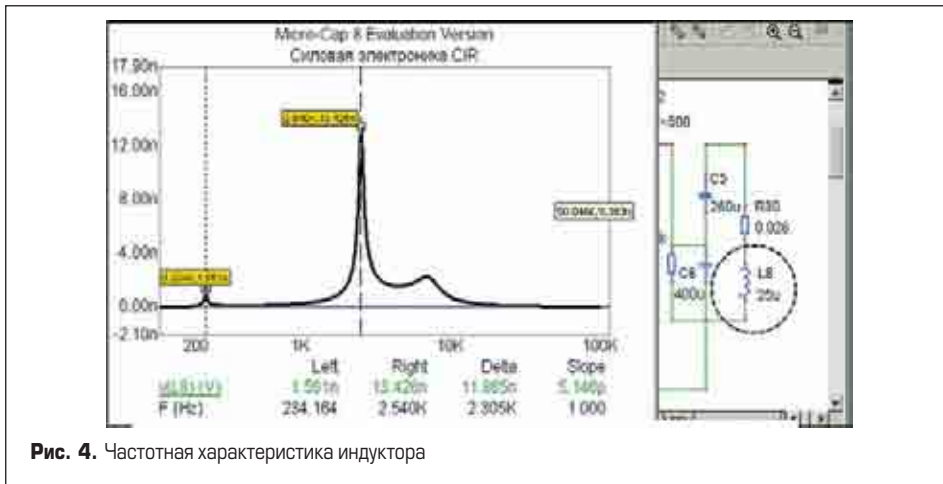


Рис. 4. Частотная характеристика индуктора

- определяем резонансную частоту нагрузочного контура.

Эти задачи решаются подпрограммой моделирования stepping (последовательного расчета с определенным шагом изменения параметров выбранного элемента).

На рис. 4 показаны результаты частотного анализа схемы, проведенного для установления частоты управления тиристорами модели от генератора импульсов и, соответственно, рабочей частоты ТПЧ.

На рис. 4 показаны два открытых окна программы MicroCap. В активном переднем окне изображена полученная характеристика зависимости напряжения на индукторе L8 в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Видно, что резонансная частота колебательного нагрузочного контура близка к стандартному значению — 2,5 кГц. Левый, субгармонический резонанс обусловлен влиянием индуктивности входного дросселя.

Учитываем, что тиристоры этой схемы включаются с вдвое меньшей частотой, чем рабочая частота ТПЧ. Это является одним из основных достоинств рассматриваемой схемы, компенсирующих ее недостаток — значительную установленную мощность реактивных элементов.

По результатам этих исследований определяем длительность интервалов повторения импульсов для генератора импульсов схемотехнической модели, равную 800 мкс. Устанавливаем амплитуду импульсов — 10 В, крутизну переднего фронта — 1 мкс, длительность импульсов — 20 мкс. Эти параметры соответствуют импульсам управления тиристором ТПЧ.

Вторым этапом исследования является проведение анализа переходных процессов (Transient analysis), в том числе особенности включения ТПЧ. На этом этапе производится расчет номинальных значений токов и напряжений основных элементов схемы — тиристор, диодов и конденсаторов.

Всегда считалось, что токи и напряжения полупроводниковых элементов определяют перегрузочные и аварийные режимы силового оборудования. В настоящее время это не совсем так. Совершенствование параметров полупроводниковых элементов привело к тому, что из характеристик силового оборудования исчезают такие понятия, как «коэффициент сменяемости тиристоров», обусловленный количеством их термоциклов, и «установленная

мощность» — раньше указывались «коэффициенты запаса» для лавинных или нелавинных полупроводников.

Сейчас экстремальные характеристики полупроводниковых элементов — мощных тиристор и силовых диодов — в целом, удовлетворяют разработчиков. В настоящее время отработаны технические средства защиты силовых полупроводников (быстродействующие предохранители и автоматы), появились новые элементы, которые демпфируют перенапряжения, разработаны эффективные схемы бесконтактной защиты. Но это отдельная тема.

На первый план при проектировании устройств силовой электроники вышли новые, удельные характеристики — кВт/кг, величина КПД.

На рис. 5 слева вверху показана кривая, которая характеризует изменения выходного тока при включении однофазной схемы инвертора. Эта кривая соответствует процессам индукционной силовой установки при заданной индуктивности дросселя входного тока.

Во втором окне рис. 5 наверху выделен коммутирующий конденсатор C2, через который протекает выходной ток инвертора.

Форма выходного тока преобразователя рассчитана для нагрузочного контура, настроенного на вторую гармонику.

Величина тока C2 рассчитана в амперах. По первому циклу этой кривой мы выявляем необходимость предварительного заряда коммутирующего конденсатора C2, емкостью 80 мкФ, с начальной величиной напряжения $U_C = 500$ В. Заряд этого конденсатора, перед

включением ТПЧ, обеспечивает тиристорам время восстановления их управляемости.

Задержка тока перехода пары тиристор/диод через нулевое значение (видимая с помощью электронной лупы) обусловлена применением последовательного дросселя насыщения.

Нижняя кривая (рис. 5) показывает максимальную величину и отсутствие перенапряжений на тиристоре и диоде (они выделены на схеме внизу) от момента включения ТПЧ. На этом этапе исследований уточняем параметры демпфирующих элементов для снижения коммутационных перенапряжений силовых полупроводников.

По результатам расчета в MicroCap переходных процессов определяется их длительность, характер и гармонический состав. Далее, в основном, нас интересует гармонический состав выходного тока ТПЧ.

В этой статье, написанной специально для журнала «Силавая электроника», нами приводятся результаты исследований схемотехнической модели электротермической установки мощностью 100 кВт, частотой 2,4 кГц, для индукционной плавки металла в индукционной плавильной печи типа ИСТ 0.16, работающей на 2-й гармонике выходного тока.

Гармонический анализ производится разложением по Фурье кривой выходного тока тиристорного преобразователя и осуществляется в ходе схемотехнического моделирования методами цифровой обработки сигнала (DSP) рассчитанной кривой переходного процесса.

Определение амплитуды гармоник позволит установить возможные режимы ТПЧ из условий выделения максимальной мощности в нагрузке и минимизации загрузки элементов реактивными токами [4, 5].

Анализ гармонического состава следует проводить для установившегося режима ТПЧ, который характеризуется постоянным уровнем раскачки напряжения, или его амплитудой, при определенном значении напряжения на тиристорах относительно величины выпрямленного напряжения источника питания постоянного тока.

На рис. 6 показан результат анализа гармонического состава одного периода кривой выходного тока, длительностью 800 мкс.

Справа в окне MicroCap выделено изображение конденсатора C2, кривая тока которого исследуется нами. Амплитуды и частоты четырех первых гармоник и нулевая гармоника,

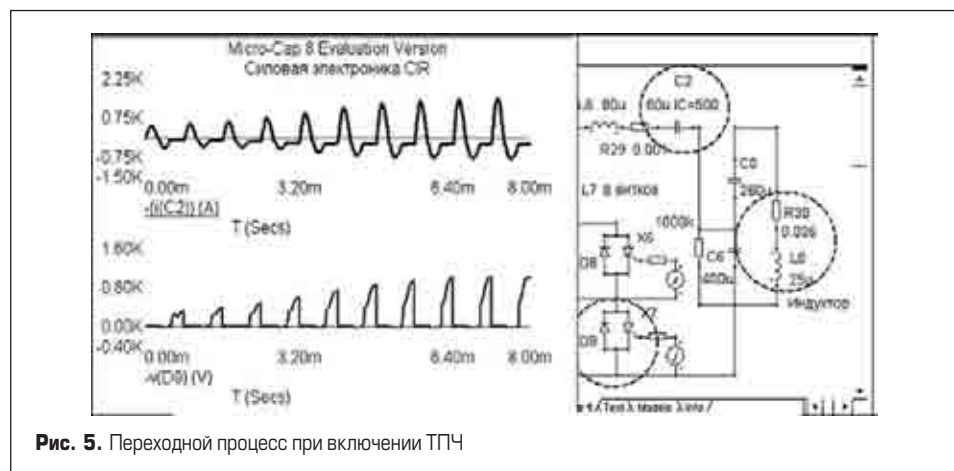


Рис. 5. Переходной процесс при включении ТПЧ

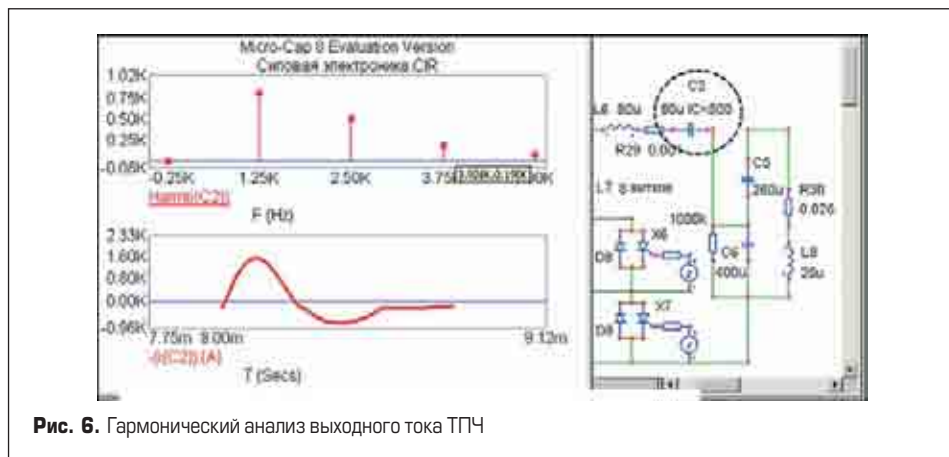


Рис. 6. Гармонический анализ выходного тока ТПЧ

изображенные на верхней диаграмме (рис. 6), показывают, что исследуемая схема ТПЧ может эффективно работать на первой или второй гармониках. Эти настройки используются в ТПЧ в зависимости от дополнительных требований технологического процесса.

Настройка на вторую гармонику [4] является компромиссом между дополнительной нагрузкой полупроводников ТПЧ реактивной мощностью и повышением выходной частоты.

Настройка на первую гармонику характеризуется лучшим использованием тиристоров, снижением рабочей частоты и повышением выходной мощности [5].

Настройка на третью гармонику для установленных в схеме параметров элементов практического интереса не представляет. Дополнительная нагрузка силовых полупроводников циркулирующей реактивной мощностью и снижение выходной мощности не компенсируются эффектом увеличения выходной частоты.

При других параметрах реактивных элементов эта схема автономного инвертора находит применение для создания ТПЧ частотой до 22 кГц, мощностью 20 кВт. Исследование режимов аналогичных закалочных установок проводится с учетом параметров закалочного трансформатора с индуктором. Основным регулирующим воздействием является частота управления, при изменении которой реактивная мощность системы изменяется в значительных пределах.

Нами создана библиотека схемотехнических файлов ТПЧ различного технологического назначения, которая сопровождает процесс проектирования индукционной установки от начальных этапов до внедрения в промышленную эксплуатацию, или реновации.

Далее показаны особенности определения мощности, рассеиваемой на отдельных элементах модели ТПЧ и его нагрузки, что позволяет определить КПД инверторно-индукционной установки.

Полезную мощность определяем как среднее значение (AVG) мощности, рассеиваемой гармониками тока в сопротивлении индуктора (выделен на рис. 7). Альтернативный расчет выходной мощности ТПЧ производится всегда с большой погрешностью, обусловленной учетом только основной гармоники. Точной является экспериментальная величина, которую обычно определяют как потери тепла в каналах протока воды системы охлаждения ТПЧ.

На рис. 7 приведены расчетные кривые входной и выходной мощности модели ТПЧ, при работе инвертора на второй гармонике. Расчетный интервал времени достаточно большой, чтобы приблизиться к установившемуся значению.

Входная мощность в модели ТПЧ определяется как произведение постоянного тока входного дросселя и напряжения на выходе выпрямителя ($U_d = 520$ В).

Все расчетные кривые в MicroCap можно хранить в файлах, но перемножать, сдвигать, изменять их масштаб и т. д. необходимо в процессе проведения исследований.

Обычно напряжение U_d принимается за базовую величину при изображении характеристик схемы инвертора в относительных единицах и для сравнения с другими схемами.

Для токов базовой величиной является U_d/ρ .

$$\rho = (L/C)^{1/2},$$

где L — величина коммутирующей индуктивности (на схеме рис. 1 — L_6), C — величина емкости коммутирующего конденсатора (на схеме рис. 1 — C_2).

Для времени T_u базовой величиной является период управления тиристорами инвертора.

На рис. 7 показано, что расчетный КПД статического ТПЧ выше, чем средняя величина в 50% для машинного генератора. При определении КПД для реального ТПЧ нас интересует, в первую очередь, повышение температуры в каналах протока воды, расходуемой для охлаждения силовых элементов ТПЧ. В модели ТПЧ производится измерение мгновенной мощности, с возможностью вывода среднего, за период управления, значения. Этим объясняется дискретный характер входной и выход-

ной мощности, кривые которых представлены на рис. 7.

Мы показали, пожалуй, 10% от возможностей применения программы MicroCap для исследования ТПЧ. Функция Proba позволяет производить проверку заранее созданной модели оперативно, так как в ней не нужны значительные изменения и новые установки параметров расчета.

Опыт показывает, что созданные схемотехнические модели ТПЧ являются таким же удобным инструментом для инженеров электронной техники, как цифровой осциллограф [5]. Уточнение параметров модели по осциллограммам электромагнитных режимов ТПЧ позволяет получить расчетную модель, соответствующую реальному комплексу индукционного нагрева ТВЧ.

Заключение

1. В схемотехнической модели MicroCap учитываются все особенности нелинейных компонентов силовой электроники. Итерационные способы уточнения параметров схемы тиристорного инвертора по интегральным критериям позволяют приближать параметры модели к реальному объекту.
2. Интерактивные циклы уточнения схемотехнической модели ТПЧ позволяют получить адекватную модель для более полных исследований.
3. Приведенные результаты получены в интернет-версии MicroCap 8.

Литература

1. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-CAP V. М.: СОЛОН. 1997.
2. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
3. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
4. Зинин Ю. М., Марон В. М., Иванов А. В., Ройзман П. С. Методика расчета резонансных инверторов для электротермии // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. 1983.
5. Зинин Ю. М. Методика схемотехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 2 (13).

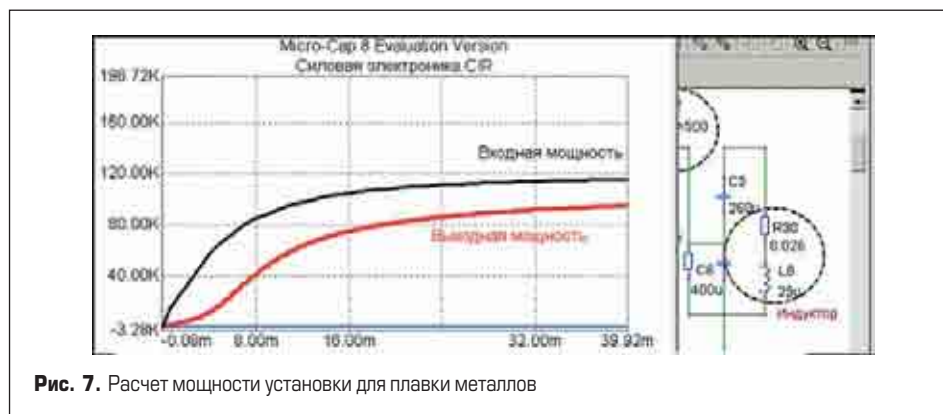


Рис. 7. Расчет мощности установки для плавки металлов