

# Проектирование малогабаритного тиристорного преобразователя

## повышенной частоты для индукционной плавки металлов

**В статье описываются особенности проектирования тиристорного преобразователя частоты на основе неуправляемой схемы полумостового выпрямителя и несимметричного тиристорного инвертора 22 кГц × 9 кВт. Источник питания необходим для быстрого расплавления в маловитковом индукторе небольшой порции металла (10–110 г), которая выливается в форму по выплавляемым моделям. Тиристорный преобразователь частоты размещен в малогабаритной центробежной установке для прецизионного литья ответственных изделий.**

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

### Введение

Источники энергии систем индукционного нагрева металлов обеспечивают электропитание токами повышенной частоты специальную катушку индуктивности — индуктор. Индукторы могут быть многовитковыми, со значительной индуктивностью и низкой рабочей частотой, в этом случае возможно непосредственное (без промежуточного трансформатора) подсоединение индуктора к выходу автономного инвертора. Номинальное выходное напряжение источника питания — тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) — должно быть равно рабочему напряжению многовитковых индукторов. Такие индукторы обеспечивают бесконтактный нагрев больших порций металла с высокой производительностью.

Мощная индукционная электропечь в индукторе с 20 витками диаметром 50 см, подключенная к тиристорному источнику электропитания с номинальной выходной мощностью 320 кВт и частотой 1000 Гц, за полчаса плавит около 400 кг черного или цветного металла — различных видов стали или сплавов. Такая производительность часто оказывается недостаточной в условиях литейного производства, в этом случае в цехах промышленного предприятия одновременно работает несколько мощных установок с индукционными печами. Тем более что цикл подготовительных работ при плавке занимает значительную часть рабочего времени. Указанные условия производства характерны для плавки обычных марок стали промышленного назначения [1].

В настоящее время (по известным причинам) масштабы использования мощных источников электропитания в системах индукционного нагрева металлов сократились. Вновь актуальной задачей становится проектирование малогабаритных источников электропитания для индукционной плавки и литья небольших порций качественного металла, из которого можно изготавливать прецизионные изделия [2]. Плавка

с последующей центробежной разливкой металла обеспечивает высокое качество отливок, необходимых для точного литья небольших изделий. Порционная плавка металлов применяется в специальных отраслях производства промышленных изделий, стоматологии, ювелирном деле и т. д.

Выбор схемы тиристорного преобразователя частоты обусловлен знанием особенностей настройки рабочих режимов плавки, при учете изменения свойств нагрузки (индуктора с металлом) при переходе температуры металла через точку Кюри — в условиях потери магнитных свойств.

При проектировании малогабаритной установки с индукционным нагревом токами повышенной частоты 22 кГц необходимо учесть использование системы интенсивного водяного охлаждения для маловиткового индуктора (1–3 витка), высокочастотного выходного трансформатора, дросселей и других узлов. В этом случае ультразвуковые генераторы для индукционных установок небольшой мощности (до 10 кВт) можно выполнять на тиристорах с радиаторами водяного охлаждения, применение которых целесообразно в новых разработках.

Далее проанализированы основные аспекты проектирования тиристорного источника питания, особенности которого рассмотрены в публикациях автора [3–6]. В настоящее время проектирование типичных устройств силовой электроники — выпрямителей и тиристорных автономных инверторов для систем индукционного нагрева — нельзя представить без использования результатов исследований схемотехнических моделей [7–10].

### Применение схемотехнического моделирования при проектировании тиристорных преобразователей частоты

Первой из многих, ныне широко распространенных систем схемотехнического моделирования, стала программа SPICE (Simulation Program with

Integrated Circuit Emphasis), разработанная в начале 1970-х годов в Калифорнийском университете г. Беркли по заказу военного ведомства США. Первая версия программы PSpice для операционной системы IBM PC создана в 1984 г. корпорацией MicroSim. Программа оказалась очень успешной, она интенсивно развивается и стала эталоном моделирования вначале только для аналоговых, а затем и аналого-дискретных устройств электроники.

В настоящее время математические Spice-модели основных элементов силовой электроники, в частности полупроводниковых приборов и магнитных сердечников, широко распространены и используются в последних версиях программ MicroCAP, Dr. Spice, OrCAD, P-CAD и др. Производители нелинейных электронных компонентов распространяют их PSpice-модели и даже предлагают свои варианты электронных программ.

Профессиональные версии программных продуктов защищены законами об авторских правах и международными соглашениями. Незаконное воспроизведение или распространение программы или любой ее части влечет гражданскую и уголовную ответственность. Это предупреждение относится и к профессиональной версии программы MicroCAP, которая широко используется при проектировании схем электроники. В данной статье приводятся результаты схемотехнического моделирования в последней, 9-й демо-версии программы MicroCAP, которую фирма-разработчик распространяет через Интернет бесплатно.

Сейчас изображение схемотехнических моделей, насколько это необходимо, соответствует электрической схеме силового устройства. В настоящее время не имеется существенных ограничений по моделированию работы электронных схем. Учитываются температура элементов, их паразитные параметры и т. д. Программа MicroCAP последней версии дополнена анимированными компонентами электрических схем, полезными при исследовании различных схем силовой электроники: аналоговым индикатором напряжения, светодиодами разного цвета, двигателем постоянного тока, измерительными приборами, переключателями. В процессе схемотехнического моделирования можно оперативно изменять параметры модели. Исследования производятся с необходимой точностью, результаты расчетов выводятся в графическом виде, удобном для дальнейшей обработки. Перечислить все возможности схемотехнического моделирования практически невозможно, каждый разработчик имеет возможность применять свои приемы и пользоваться распространенными методами для быстрого получения необходимого результата.

Далее изложим основные моменты проектирования тиристорного преобразователя повышенной частоты с использованием его схемотехнической модели, которая позволяет исследовать электромагнитные процессы в схеме при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки, — маловиткового индуктора с выходным трансформатором. Приведены результаты анализа схемотехнической модели

выпрямителя. Аналитический расчет электромагнитных процессов не позволяет получить необходимые при проектировании временные диаграммы от момента пуска до установившихся значений. Применение анимированных измерительных приборов в схемотехнических моделях, получение средних и действующих величин рассчитанных токов и напряжений, анализ модели по постоянному току, анализ переходных процессов, применение частотного анализа — вот основные приемы схемотехнического моделирования, применяемые нами при проектировании нелинейных схем силовой электроники.

### Схемотехническая модель выпрямителя

Для тиристорного преобразователя частоты необходим источник питания. Приведем некоторые соображения, которые обусловили выбор схемы выпрямителя для тиристорного автономного инвертора небольшой мощности. Для питания ТПЧ предпочтительным является применение трехфазной промышленной сети. При использовании мостовой схемы трехфазного выпрямителя от сети 3×380 В×50 Гц получаем величину выпрямленного напряжения 510 В с частотой пульсаций 300 Гц. Это напряжение велико для питания инвертора малой мощности, так как требует применения в инверторе нескольких последовательных тиристоров. Известно, что в тиристорных резонансных инверторах рабочее напряжение на элементах (в том числе и тиристорах) значительно превышает напряжение питания. Так называемый эффект раскочки напряжения особенно проявляется при значительном отклонении нагрузки инвертора от номинальной величины, характерном для плавки металлов в индукторе.

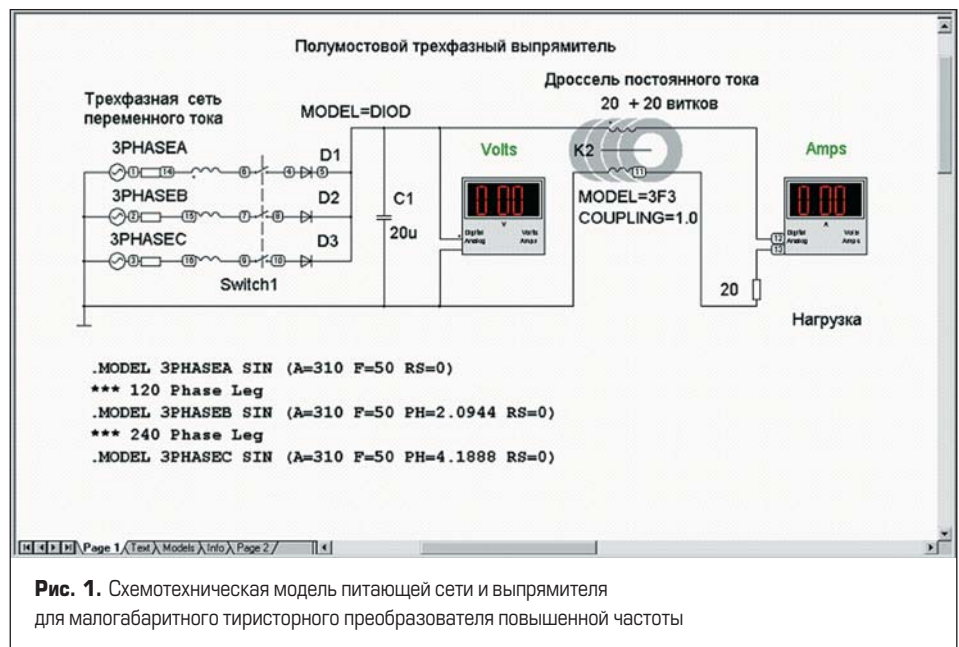
Рассмотрим применение в ТПЧ известной полумостовой схемы выпрямителя, обеспечивающей вдвое меньшую величину выходного напряжения. При этом частота пульсаций равна 150 Гц, и увеличивается амплитуда пульсаций, в сравнении с действующей (или сред-

ней) величиной выпрямленного напряжения. Такое изменение неблагоприятно для проектирования универсальных источников питания, но целесообразно для использования в схемах ТПЧ небольшой мощности. Далее покажем, что для маломощных ТПЧ целесообразно применение полумостового трехфазного диодного выпрямителя с резистивной нагрузкой для ограничения токов КЗ.

Схемотехническая модель питающей сети и выпрямителя в начальной стадии моделирования показана на рис. 1. В схеме выпрямителя применены анимированные переключатели и измерительные приборы с цифровой индикацией, которые вместе с моделями других элементов создают условия для проектирования, подобные разработке и исследованию реального устройства. Переключатель Switch1 разомкнут, показания приборов с цифровой индикацией нулевые. Нелинейными элементами в схеме являются диоды выпрямителя и дроссель фильтра, выполненный на сердечнике K2 с двумя обмотками, включенными согласно последовательно по цепи постоянного тока.

Конденсатор C1 демпфирует перенапряжения на выпрямителе. Емкость этого конденсатора недостаточна для сглаживания пульсаций выходного тока, но это и не нужно в данном применении выпрямителя. Нагрузкой выпрямителя при исследовании его электромагнитных процессов показан резистор. Переменный резистор имитирует подключение к выпрямителю нагрузки автономного инвертора соответствующей мощности. Приведенная схемотехническая модель позволяет определить величины аварийных токов и характеристики элементов защиты, однако этот вопрос выходит за рамки содержания статьи.

На рис. 1 обозначены узлы схемотехнической модели: 1, 2 и 3 — обозначают фазы А, В и С промышленной сети, с действующим напряжением 220 В, относительно «земли», соответствующей нулевому потенциалу в расчетной модели. Внизу приведено описание моделей источников напряжений, сдвинутых по фазе на 120 эл. град.: .MODEL 3PHASEA, .MODEL 3PHASEB и .MODEL 3PHASEC.



**Моделирование трехфазной сети переменного тока**

Схематехническая модель трехфазной сети переменного тока промышленной частоты включает модели трех синусоидальных источников напряжения, PSpice-описание которых приведено на рис. 1.

На рис. 2 представлены рассчитанные временные графики фазных напряжений для узлов 6, 7 и 9 схематехнической модели выпрямителя. Синусоидальные графики напряжений равны по амплитуде (310 В) и периоду (20 мс) и отличаются начальной фазой так, что образуют симметричную систему напряжений прямой последовательности, сдвинутых на 120 эл. град. Анимированный переключатель Switch1, введенный в схематехническую модель, показанную на рис. 1 и 2, обеспечивает отключение выпрямителя от питающей сети с активным и индуктивным сопротивлением, пренебрегать которыми не следует [1]. Присутствие этих компонентов схематехнической модели определяет длительность коммутации диодов выпрямителя и его внешнюю характеристику [9].

Графический интерфейс программы MicroCAP 9 с одновременно включенными рабочими окнами обеспечивает наглядность и удобства при проектировании электрического устройства, сравнимые с применением электронного осциллографа с цифровой обработкой информации (DSP) — автоматическое масштабирование, временная лупа и т. д.

На рис. 3 приведены три рабочих окна программы MicroCAP 9 — фрагмент созданной схематехнической модели выпрямителя (слева сверху), панель редактирования параметров новой модели диода выпрямителя, с именем DIOD, с PSpice-уровнем (Level2) представления в расчетной модели (правая половина экрана монитора), а также классификационная вольт-амперная характеристика PSpice-модели диода (слева внизу). Для получения ВАХ модели диода, при медленном изменении приложенного напряжения, можно воспользоваться функцией PLOT на панели редактирования параметров модели.

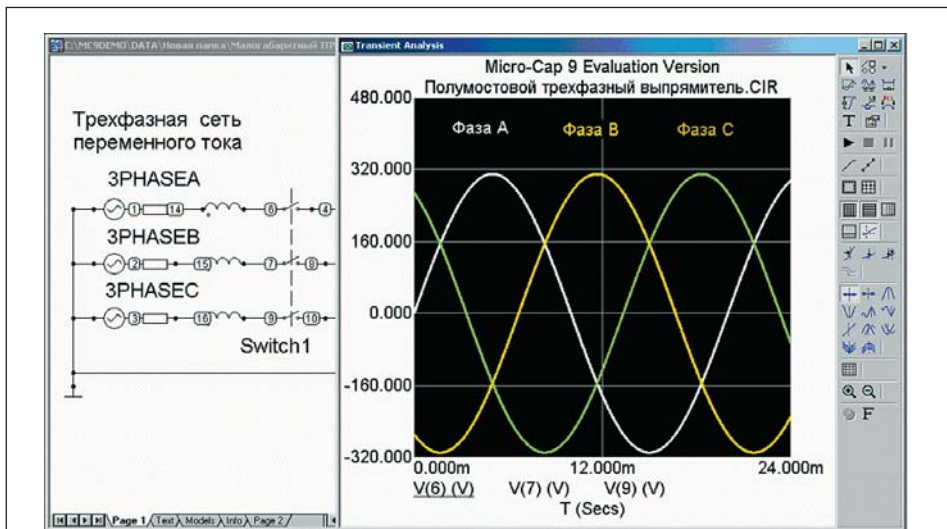


Рис. 2. Схематехническая модель и графики временных диаграмм трехфазной питающей сети 3×380 В×50 Гц

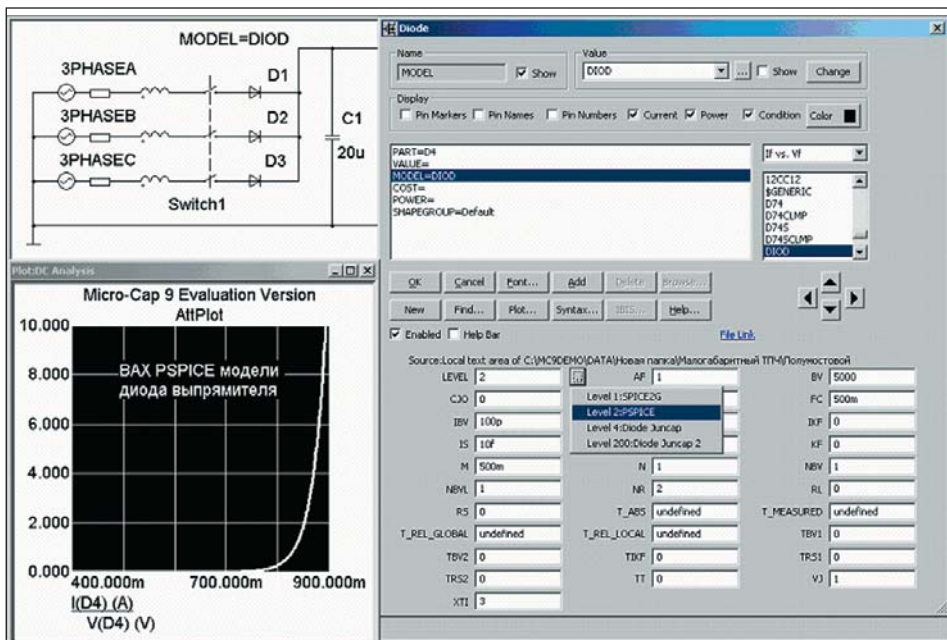


Рис. 3. Установка параметров модели и ВАХ силового диода выпрямителя

**Линейный дроссель фильтра постоянного тока**

Дроссель постоянного тока, включенный на выходе источника напряжения, придает ему свойства источника тока. Источник тока необходим для питания независимого автономного инвертора тока. Для линейризации индуктивности ферромагнитный сердечник дросселя (широко распространенный феррит 3F3) выполнен с зазором 1 см.

Описание модели сердечника дросселя — .MODEL 3F3 CORE (A = 21,607291, Area = 40, C = 34,927959 м, Gap = 1, K = 16,07888, MS = 363,8987 K, Path = 80). Основные магнитные параметры модели сердечника приведены в библиотеке MicroCAP: A — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания; C — постоянная упругого смещения доменных границ; K — постоянная подвижности доменов; MS — намагничённость насы-

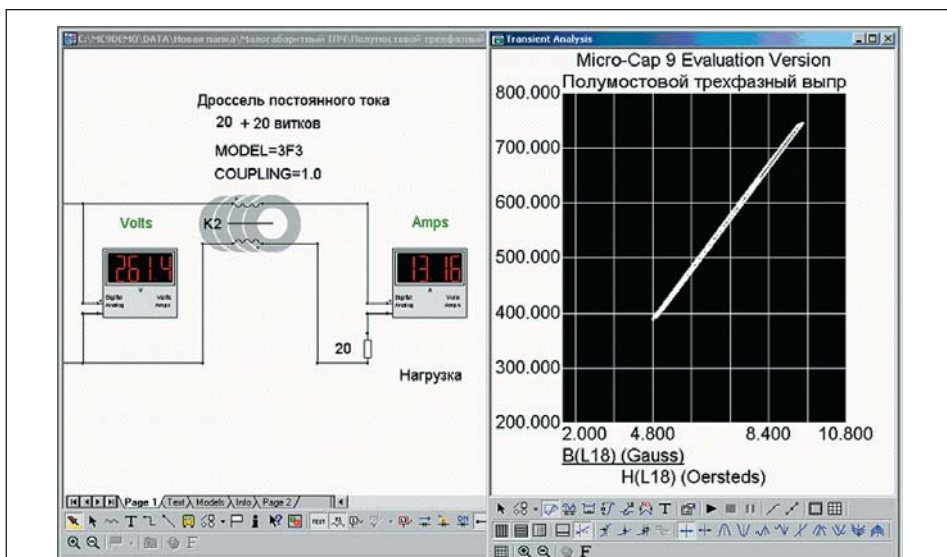
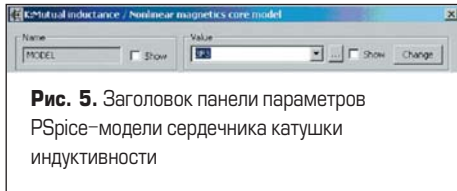


Рис. 4. Модель дросселя постоянного тока с ферромагнитным сердечником (слева) и кривая намагничивания ферромагнитного сердечника (справа)



**Рис. 5.** Заголовок панели параметров PSpice-модели сердечника катушки индуктивности

щения. В ранних версиях MicroCAP указывался дополнительный параметр — Alpha (параметр магнитной связи доменов). Оптимизация моделей возможна только в профессиональной версии и производится по нескольким точкам кривой намагничивания с высокой точностью (небольшой ошибкой относительно данных изготовителя феррита).

В приведенном описании модели сердечника указываются следующие геометрические параметры сердечника: Area (площадь сердечника, см), Path (длина магнитной линии, см) и Gap (воздушный зазор, см), которые определяются разработчиком для применения дросселя в конкретной схеме выпрямителя.

На рис. 4 показан фрагмент схематехнической модели дросселя постоянного тока и кривая намагничивания сердечника. Кривая намагничивания показывает, что сердечник работает по частному циклу.

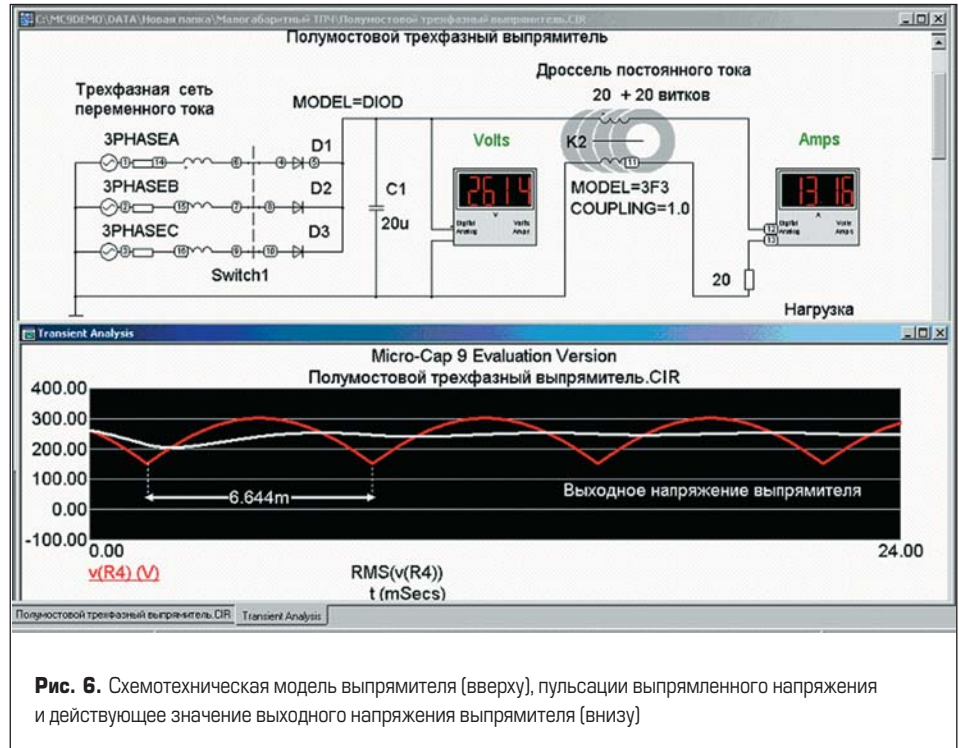
Сердечник дросселя (в схематехнической модели обозначен К) индуктивно связывает симметричные катушки индуктивности.

В процессе моделирования определяется необходимое число витков обмоток дросселя и коэффициент связи Coupling между ними. При наличии воздушного зазора в сердечнике индуктивность «правильного» дросселя практически не зависит от величины тока в его обмотках, что является условием окончания итерационного процесса выбора числа витков обмотки дросселя и его геометрических размеров.

На рис. 5 приведен фрагмент панели модели нелинейного сердечника дросселя, вызываемой для изменения указанных параметров.

В результате моделирования определено, что обмотка дросселя должна содержать 20+20 витков, включенных последовательно-согласно с нагрузкой выпрямителя. Точность определения параметров дросселей обычно не превышает 20–35%, что достаточно для проектирования, так как исходные справочные данные изготовителей сердечников имеют такую же погрешность.

Практически всегда индуктивность и ток дросселя постоянного тока могут быть больше, чем расчетная величина. Так как по обмоткам дросселя, кроме переменной составляющей, протекает еще и постоянный ток, то индуктивность обмотки уменьшается. Чтобы избавиться от этого эффекта, в сердечнике делается воздушный зазор, длина которого зависит от размеров сердечника, индуктивности обмотки и силы постоянного тока, проходящего по обмотке. При введении в сердечник дросселя воздушного зазора эффективная магнитная проницаемость сердечника уменьшается, поэтому для постоянства индуктивности увеличиваем число витков. Определяем, что допустимый ток дросселя возрастает в несколько раз.



**Рис. 6.** Схематехническая модель выпрямителя (вверху), пульсации выпрямленного напряжения и действующее значение выходного напряжения выпрямителя (внизу)

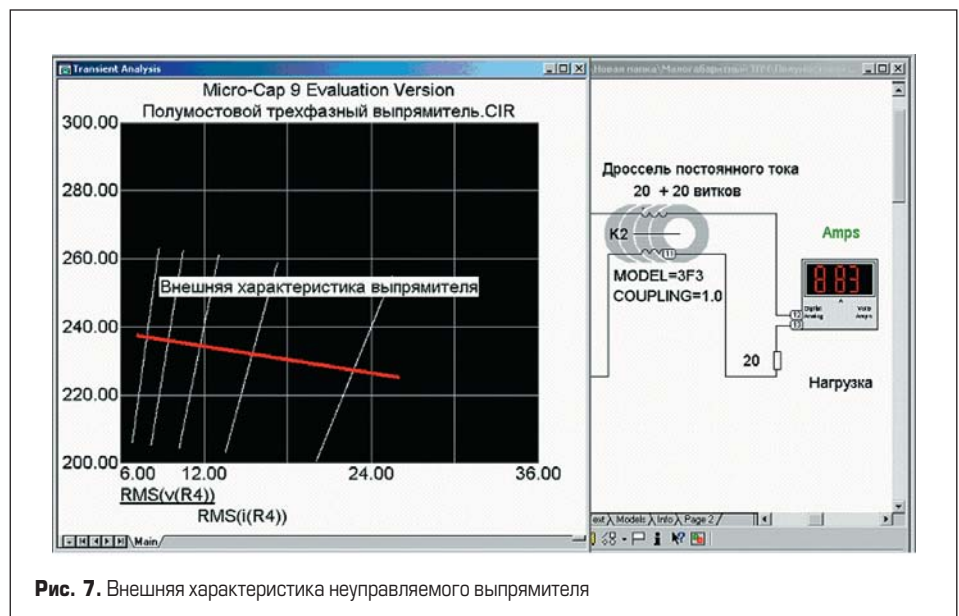
**Пульсации выпрямленного напряжения**

На рис. 6 показаны рабочие окна модели полумостового трехфазного диодного выпрямителя. Активным является окно результатов расчета переходных процессов кривой выходного напряжения выпрямителя. Полученные кривые показывают, что период пульсаций выпрямленного напряжения равен 6,6 мс, что соответствует частоте 150 Гц. Вторая кривая на нижнем временном графике (t, мс) показывает действующее напряжение (RMS) выходного напряжения выпрямителя. AVG — среднее значение выпрямленного напряжения, которое практически совпадает с RMS. Для схемы однополупериодного выпрямителя RMS значительно больше AVG. Указанные соотношения весьма просто выявляются при схематехническом моделировании, что высоко оценивается разработчиками в ходе исследований.

**Внешняя характеристика выпрямителя**

На рис. 7 активным рабочим окном (заголовок которого выделен синим цветом) является диаграмма внешней характеристики выпрямителя. «Жесткость» этой характеристики определяет совокупность параметров схематехнической модели, выделить доминанту которой затруднительно. Можно констатировать, что полученная характеристика удовлетворяет нашему применению выпрямителя. Таким образом, методами схематехнического моделирования можно получить все характеристики схемы, определяемые множеством параметров элементов. В профессиональной версии, в режиме Stepping, можно варьировать одновременно несколько параметров, получая наглядные 3D-изображения.

Исследование схематехнической модели выпрямителя позволило определить параметры его элементов и получить временные диаграммы



**Рис. 7.** Внешняя характеристика неуправляемого выпрямителя

мы при изменении эквивалентного омического сопротивления нагрузки. В дальнейшем используем этот резистор в качестве балласта при возникновении неисправности в тиристорном инверторе. В этом случае защита от аномальных режимов инвертора обеспечивается простым и эффективным техническим решением. Пониженное напряжение электропитания тиристорного автономного инвертора позволит, в первую очередь, обеспечить полную загрузку высокочастотного тиристора и диода по напряжению и току, на рабочей частоте.

**Схемотехническая модель тиристорного инвертора повышенной частоты**

**Тиристор и диод инвертора**

Тиристор в схемотехнической модели представлен макросом SCR (кремниевый управляемый вентиль), который описывает ВАХ тиристора и диода, представленную на рис. 8.

Деформация ВАХ при изменении тока управления тиристора показывает, что для его включения необходим минимальный ток 60 мА, сглаживающий прямую характеристику. Подобные кривые ВАХ следует получать при изменении температуры (20... 140 °С), указывая ее величину при моделировании. Детальное исследование свойств макроса тиристора SCR требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки статьи.

Семейство кривых ВАХ встречно-включенных тиристора и диода получены нами при потенциальном управлении от источников тока. В ТПЧ необходимо импульсное управление тиристором. Описание схемотехнической модели источника импульсных сигналов для управления моделью тиристора следующее: .MODEL IMPULSE PUL (P1 = 0U, P2 = 0U, P3 = 0U, P4 = 10U, P5 = 90U, VONE = 20, VZERO=-1). Как и в предыдущих случаях, временную диаграмму этой модели можно просматривать и корректировать отдельно, с помощью вызываемой панели параметров и окна PLOT.

Приведем результаты исследований схемотехнической модели несимметричного автономного инвертора тока. Тиристорный преобразователь частоты с несимметричным инвертором имеет большие возможности для регулирования режимов работы путем изменения выходной частоты, необходимого для согласования инвертора с нагрузкой периодического нагрева [8, 9]. Схемотехническая модель резонансного тиристорного инвертора, соответствующая его принципиальной схеме, с моделью независимого источника управляющих импульсов (.MODEL = IMPULSE), приведена на рис. 9.

Параметры импульсов выходного тока несимметричного автономного инвертора для установившегося режима приведены на рис. 10. Период включения тиристора определяется импульсами управления. Определены амплитуды токов тиристора (158,8 А) и тока диода (31,48 А), по которым можно определить средние значения этих токов и потребляемый ТПЧ ток.

На высокой рабочей частоте резонансного инвертора проявляется проблема уменьше-

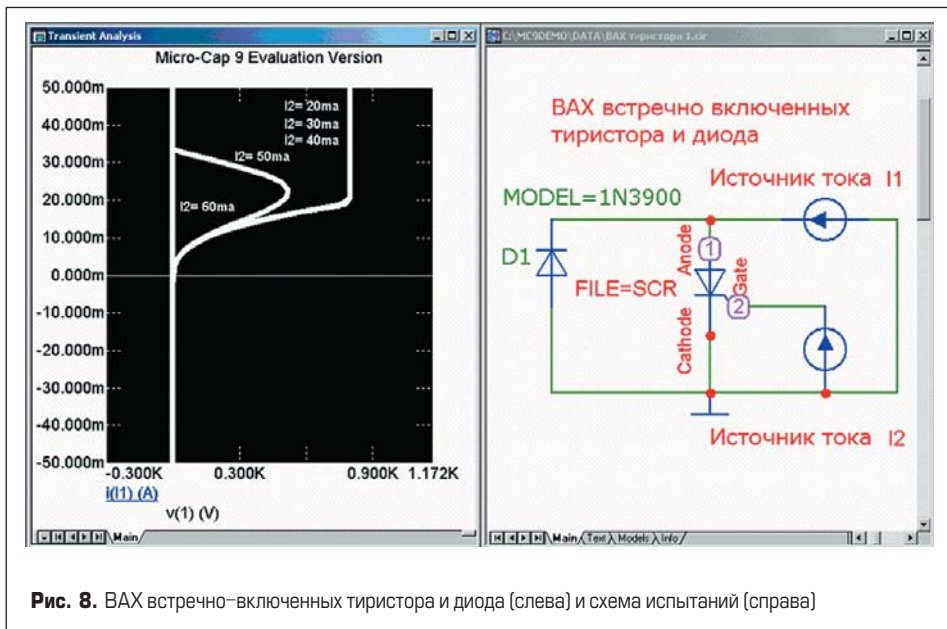


Рис. 8. ВАХ встречно-включенных тиристора и диода (слева) и схема испытаний (справа)

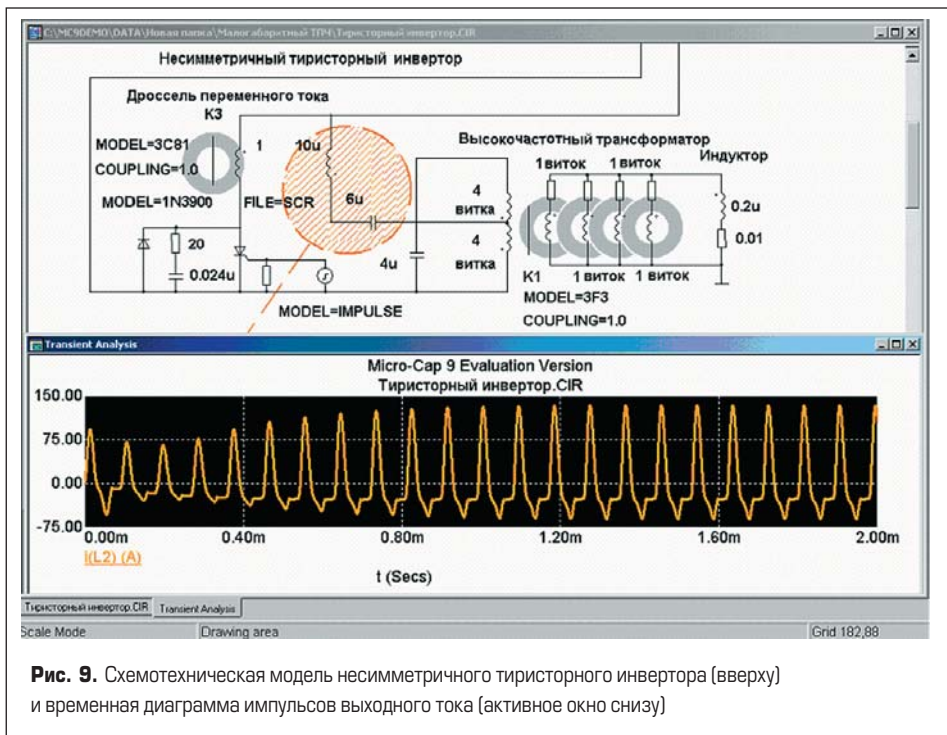


Рис. 9. Схемотехническая модель несимметричного тиристорного инвертора (вверху) и временная диаграмма импульсов выходного тока (активное окно снизу)

ния в нем коммутационных перенапряжений. Для уменьшения перенапряжений на полупроводниковых элементах в инверторе используются демпфирующие цепочки и нелинейный дроссель насыщения, показанные на рис. 9.

Нелинейный дроссель, выполненный на кольцевом сердечнике К3 из феррита 3С81, включается последовательно с вентильным узлом инвертора. Применение нелинейного дросселя отражается, в основном, на временных диаграммах уменьшением амплитуды выброса тока диода. Обрыв с высокой скоростью тока является причиной возникновения коммутационных перенапряжений на индуктивных элементах автономного инвертора, демпфировать которые RC-цепочками не всегда целесообразно.

Модель сердечника нелинейного дросселя, через окно которого проходит шина тока тиристора и диода, следующая: .MODEL 3C81 CORE (A = 20,568442, Area = 2, C = 5m,

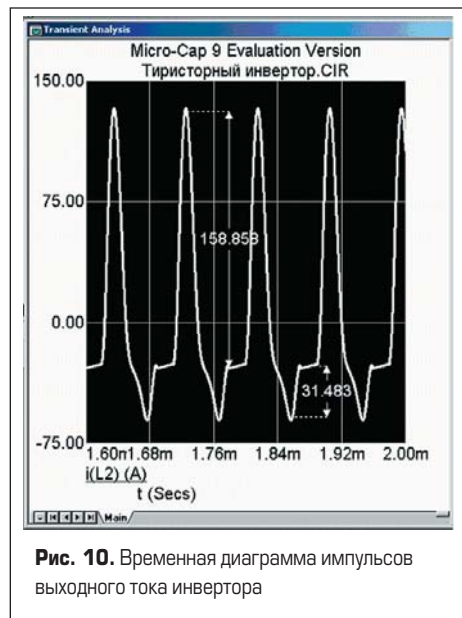


Рис. 10. Временная диаграмма импульсов выходного тока инвертора

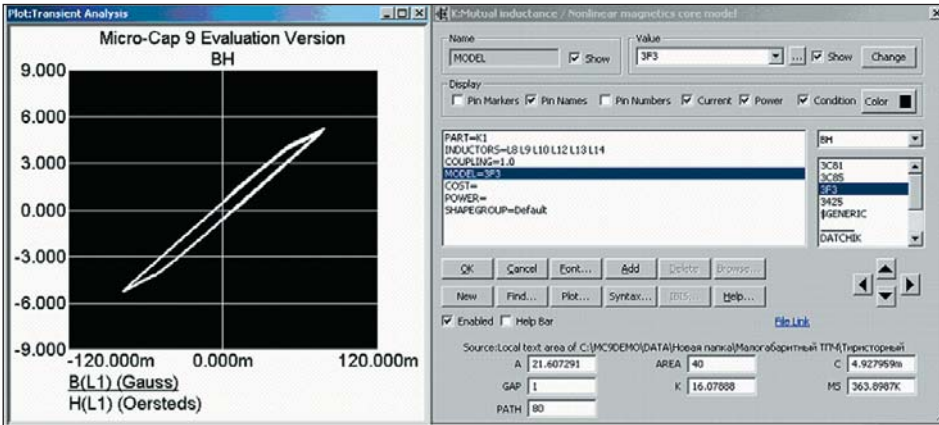


Рис. 11. Петля гистерезиса и панель параметров сердечника выходного трансформатора

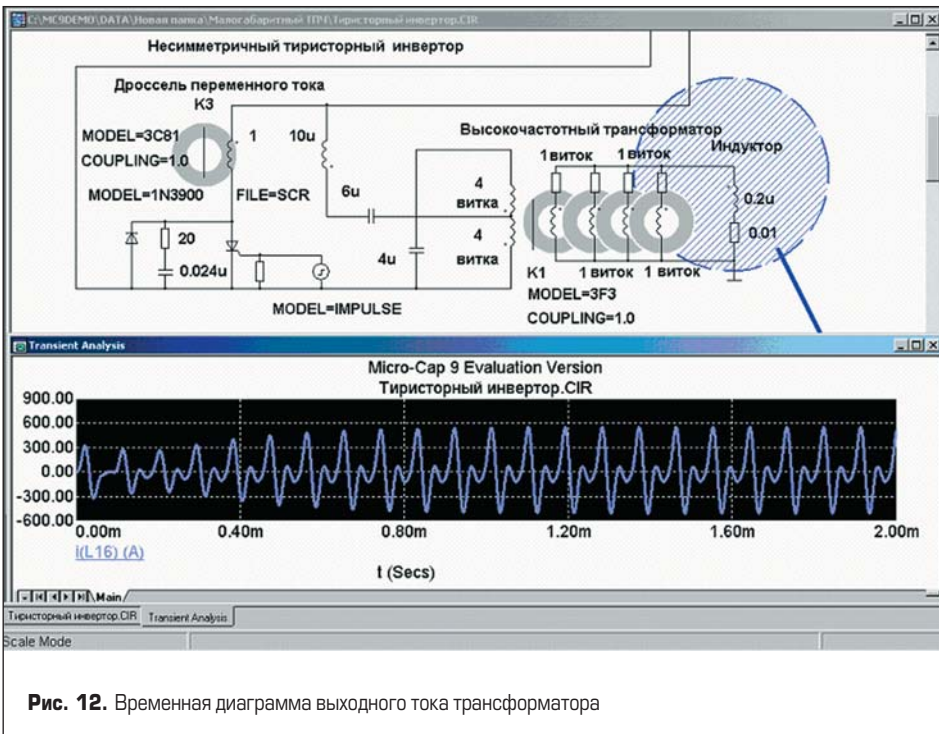


Рис. 12. Временная диаграмма выходного тока трансформатора

$K = 15,533772$ ,  $MS = 386,009$  K,  $Path = 40$ ). Особенности схемотехнического моделирования нелинейного дросселя подробно рассмотрены в [10].

Параметры коммутирующих элементов инвертора, выделенных штриховкой на рис. 9,

в основном определяют выходную мощность ТПЧ. При этом необходимо поддерживать минимально необходимое время восстановления управляемости ( $T_{восст}$ ) тиристоры [11]. Таким образом, наиболее важный параметр для инверторов повышенной частоты определяется

длительностью протекания тока через обратный диод инвертора. Этот ток протекает при эквивалентном сопротивлении нагрузки, меньшем критической величины. Для согласования сопротивления нагрузки инвертора (индуктора с расплавленным металлом) и характеристического сопротивления инвертора ( $\rho_k = L_k/C_k$ ) необходимо применение согласующего выходного трансформатора.

**Согласующий выходной трансформатор**

На рис. 11 приведены параметры ферромагнитного сердечника высокочастотного трансформатора, связывающего 2 первичных обмотки по 4 витка и соединенные параллельно 4 вторичных витка. Применение нескольких обмоток трансформатора вызвано необходимостью повышения напряжения на первичной обмотке и увеличения тока во вторичной обмотке, к которой подключен маловитковый индуктор.

Зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  показывает, что эта характеристика симметрична относительно начала координат, так как трансформатор подключен к инвертору через выходной конденсатор.

Модель сердечника трансформатора: MODEL 3F3 CORE ( $A = 21,607291$ ,  $Area = 40$ ,  $C = 4,927959m$ ,  $Gap = 1$ ,  $K = 16,07888$   $MS = 363,8987K$ ,  $Path = 80$ ).

На рис. 12 штриховкой показан индуктор ТПЧ, подключенный к вторичной обмотке согласующего трансформатора. Расчетная форма тока в индукторе приведена на нижней временной диаграмме.

Выходной ток тиристорного инвертора при индукционном нагреве ТВЧ желательно увеличивать, для этого создают резонансный контур нагрузки, в который включают индуктор. Параллельно индуктору, через повышающий трансформатор, включают силовой конденсатор. Высокочастотный силовой конденсатор компенсирует реактивную мощность индуктора, повышая в нем ток.

**Ток индуктора**

Исходя из необходимости быстрого нагрева ТВЧ порции металла весом 100 г, принимаем необходимую частоту тока в индукторе, равную 22 кГц. На рис. 13 показан ток ин-

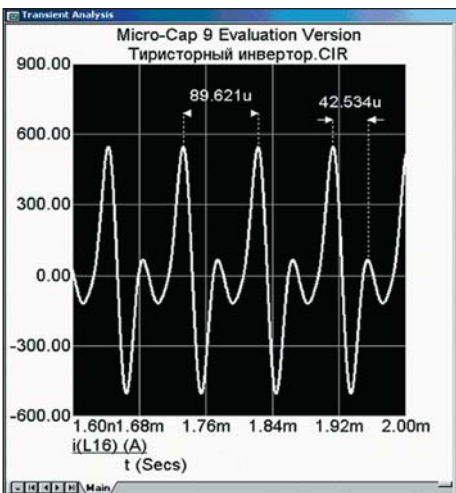


Рис. 13. Ток индуктора

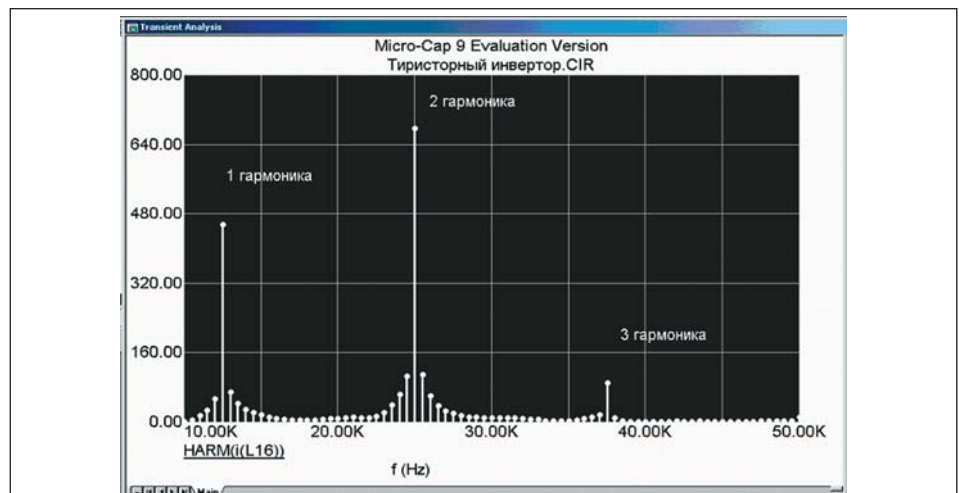


Рис. 14. Гармоники тока индуктора

дуктора, амплитуда которого в 4 раза больше выходного тока инвертора. Форма тока свидетельствует о наличии основной и высших гармоник, а также отсутствии в кривой постоянной составляющей. Схематическое моделирование позволяет определить гармонический состав любой наблюдаемой кривой, поэтому применим опцию HARM для выяснения гармонического состава кривой тока индуктора.

Гармоники тока индуктора показаны на рис. 14, на нем выделяются 3 гармоники: основная (первая), совпадающая с частотой импульсов управления, вторая гармоника — несколько бóльшая по амплитуде, и третья (доля которой в частотном спектре разложения кривой тока незначительна). Пропорционально амплитуде в активном сопротивлении нагрузки выделяется мощность на соответствующих гармониках. Гармонический состав кривой может целенаправленно изменяться частотой управления инвертором и радикально — настройкой резонансного контура нагрузки на другие гармоники [11, 12].

### Изменение магнитных свойств металла при индукционном нагреве

Изменение магнитных свойств металла сыграло положительную роль в истории развития индукционного нагрева. Для металла, из которого изготавливались швейные иглы, существует температура (точка Кюри), при превышении которой магнитные свойства не проявляются. Конструкторы установили над индуктором постоянный магнит. Иглы зависали в поле магнита и нагревались вихревыми токами до 780 °С (точка Кюри для стали). Потеряв магнитные свойства, игла продолжала движение в индукторе, за время которого температура иглы повышалась до нужной величины, и падала в воду. Это решение позволило обеспечить стабильное качество закалки швейных игл при невиданной производительности процесса: 4 тыс. швейных игл в час. Наша страна стала одной из немногих в мире, которые могли изготавливать швейные иглы, при этом 1 кг игл по стоимости тогда равнялся легковому автомобилю. После индукционной закалки вала двигателя автомобиля и железнодорожных рельсов это была очередная оригинальная технология, закрепившая технический прогресс нашей страны.

Индукционный нагрев широко применялся в годы Великой Отечественной войны, а после нее, в 1947 г. для координации проводимых работ в Ленинграде был создан Институт токов высокой частоты, ныне ВНИИ ТВЧ им. В. П. Вологодина. С тех пор успешно развивается отдельное направление силовой электроники: источники питания для технологических установок индукционного нагрева. До последнего времени основным направлением развития систем индукционного нагрева было повышение производительности технологического процесса и единичной мощности установок.

Характер изменения магнитных свойств металла определяет два основных направления индукционных технологий: методический и периодический нагрев.

При периодическом нагреве металл в индукторе нагревается от температуры окружающей среды до необходимого значения (при плавке — до температуры плавления). Эквивалентное сопротивление индуктора изменяется во времени нелинейным образом и в значительных пределах. При методическом нагреве эквивалентное сопротивление индуктора с металлом относительно постоянно во времени.

Статические тиристорные преобразователи частоты в производственных технологиях с периодическим нагревом были применены значительно позже, чем для методического нагрева. Сейчас разрабатываются различные источники питания для индукционного нагрева в диапазоне частот 500 Гц – 400 кГц. На нижних частотах этого диапазона используются тиристоры и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), в верхнем диапазоне применяются мощные полевые транзисторы.

### Литейная установка с тиристорным генератором

Предварительно принимаем, что для расплавления в индукторе порции металла в 100 г необходим источник ТВЧ с номинальной выходной мощностью примерно 3 кВт. КПД высокочастотного источника питания, в целом, не превышает 50%, поэтому, исходя из схемы выпрямителя, обеспечивающего действующее напряжение на выходе 250 В, определяем величину потребляемого тока тиристорным инвертором как  $6000 \text{ Вт} / 250 \text{ В} = 24 \text{ А}$ .

Опуская изложение конструктивных особенностей подобных литейных установок зарубежной производства, в которых используются источники электропитания, выполненные на основе электронных ламп, приведем краткое описание разработанной нами установки. Установка малогабаритная, плавильная, литейная с индукционным нагревом и центробежной разливкой в формы по выплавляемым моделям далее будет называться кратко — литейная установка. Центробежная разливка литейных сплавов в выплавляемые модели обеспечивает высокое качество изготовления отливок с минимальными припусками на последующую механическую обработку. Немаловажную роль имеют эргономические показатели, качество изготовления и современный дизайн технологического оборудования.

Эта литейная установка обеспечивает плавку и разливку в формы по выплавляемым моделям высоколегированных нержавеющей сталей. Область ее применения — прецизионное литье нержавеющей металлов и сплавов для стоматологии, ювелирной промышленности и различных отраслей техники.

В центробежной литейной установке выполняется ускоренный разгон разливочного механизма с тиглем и расплавленным металлом. Подобное оборудование предъявляет повышенные требования в отношении безопасности, поэтому корпус установки сварной и обеспечивает необходимую жесткость при значительных угловых скоростях центробежного механизма.

Установка состоит из следующих основных частей (рис. 15): выпрямитель сетевой с дросселем постоянного тока, ультразвуковой тиристорный генератор, трансформатор понижающий с маловитковым индуктором, механизм центробежный с двигателем, тигель керамический, форма литейная с регулятором, бак с водой и погружным насосом.

Регулирование мощности тиристорного генератора осуществляется оператором. Выключатель сети необходим при длительных перерывах в работе. Кнопки управления осуществляют автоматический пуск установки. Индикация показывает готовность генератора установки и ее механизма к работе. Индуктор, состоящий из трех витков медной трубки диаметром 10 мм, служит для форсированной бесконтактной передачи мощности расплавленному металлу, помещенному в керамический или фарфоровый тигель.

Двигатель приводит во вращение центробежный горизонтальный механизм, который снабжен устройством динамической балансировки. В откидной крышке установки имеется окно, закрытое светофильтром, для визуального наблюдения за плавкой металла в тигле, из которого расплавленный металл выливается в форму. В этом окне устанавливается оптический пирометр. Положение литейной формы регулируется оператором. Внутренний бак наполнен оборотной водой, предназначенной для охлаждения узлов тиристорного генератора и индуктора. Погружной насос находится внутри бака.

Тиристорный генератор подключен к высокочастотному понижающему трансформатору с ферритовым сердечником. Трансформатор необходим для согласования параметров генератора с индуктором и повышает безопасность работы персонала при эксплуатации установки. Дополнительные удобства оператору создает регулируемая опора для использования литейных форм различного диаметра и автоматический прижим формы при вращении центробежного устройства.

Установка обеспечивает полуавтоматический процесс литья. Регулировка выходной мощности ультразвукового генератора в пределах от 20

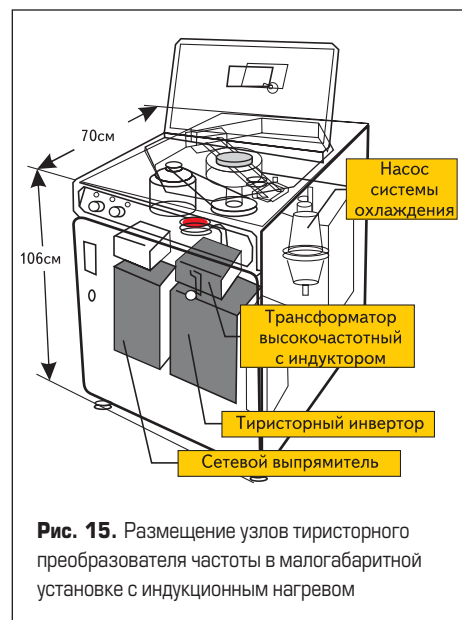


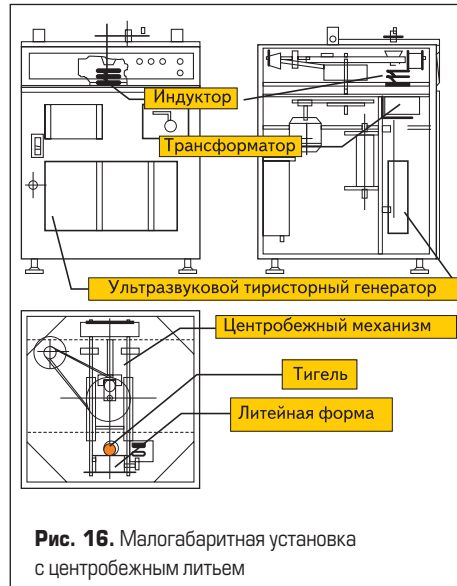
Рис. 15. Размещение узлов тиристорного преобразователя частоты в малогабаритной установке с индукционным нагревом

до 100% производится оператором. Установка подключается к трехфазной сети переменного тока. Обратная система водяного охлаждения объемом 30 литров позволяет осуществить до 10 циклов работы в течение одного часа. Центробежное литье реализовано во вращающемся в горизонтальной плоскости механизме, обеспечивающем статическую и динамическую балансировку. Подъемный индуктор в режиме плавки охватывает керамический тигель с металлом. После окончания процесса плавки оператор опускает индуктор, после чего автоматически включается приводной двигатель центробежного разливающего механизма.

Литьевая прецизионная установка не имеет отечественных аналогов. В зарубежных литьевых установках диаметр центробежного устройства меньше и отсутствует автоматическая балансировка центробежного устройства в процессе литья, что не позволяет получать бездефектные отливки. Тиристорный генератор ультразвуковой частоты является оригинальным узлом установки. Ультразвуковой тиристорный генератор, разработанный специально для нее, в отличие от ламповых генераторов в зарубежных литьевых установках не излучает высокочастотные электромагнитные поля, вредные для обслуживающего персонала. Техническая характеристика литьевой установки приведена в таблице.

**Таблица.** Техническая характеристика литьевой установки

<b>Питающая сеть</b>	3×380 В×50 Гц, 15 А
<b>Рабочая частота тиристорного генератора</b>	22–25 кГц
<b>Максимальная температура нагрева</b>	1650 °С — определяется стойкостью тиглей
<b>Время плавки</b>	40...50 с
<b>Габариты и вес</b>	1060×700×720 мм, 185 кг
<b>Вариант охлаждения установки</b>	Циркуляционный насос обратной системы водяного охлаждения
<b>Тип литейного агрегата</b>	Горизонтальный, центробежный
<b>Тигли</b>	Керамические, для установок типа «Форнакс»
<b>Размер литьевых форм</b>	
<b>Диаметр</b>	100 мм
<b>Длина</b>	90 мм
<b>Максимальный вес отливки</b>	110 г
<b>Радиус центробежного механизма</b>	300 мм



**Рис. 16.** Малогабаритная установка с центробежным литьем

Тиристорный генератор установки характеризуется малым коэффициентом ПВ (продолжительности включения) относительно времени технологического цикла. Поэтому весовая производительность установки небольшая, но она не имеет большого значения. В разработанной литейной установке применена оригинальная динамическая балансировка центробежного механизма, при этом в процессе работы уменьшается вибрация центробежного механизма и всей системы в целом. Разработанное техническое решение центробежного механизма литейной установки показало хорошие результаты при вращении со скоростью 500 об/мин и массе расплавленного металла 10–110 г.

Центробежный механизм с динамической балансировкой не требует постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала. Центробежный механизм, показанный на рис. 15 со стороны уравнивающих грузов для статической балансировки, снабжен специальным устройством для динамической балансировки, включающим в себя емкость с водой, клапан, трубку и приемный бак специальной формы. Клапан приводится в действие при смещении устройства, вызванном перемещением металла из тигля в форму, при этом вода переливается под действием центробежной силы из емкости в бачок, пока устройство при данной скорости вращения центробежного механизма не уравнивается.

Разработанная схема динамической балансировки не требует постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала, так как при прекращении вращения балансировочного центробежного механизма вода перетекает в рабочую емкость, и установка готова к работе и повторению цикла плавки через короткий промежуток времени.

На рис. 16 показан вариант размещения функциональных узлов. Малогабаритный ультразвуковой тиристорный генератор, разработанный специально для этой установки, размещен внутри и использует общую с индуктором систему водяного охлаждения. Система охлаждения заполнена дистиллированной водой и прокачивается центробежным погружным насосом.

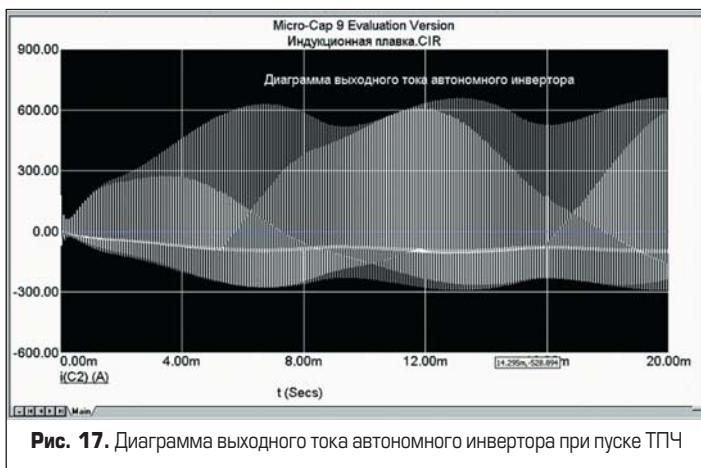
Литьевые центробежные установки изготовлены небольшими партиями и эксплуатируются в России, в частности в Республике Башкортостан. За время длительной эксплуатации выявлены и устранены недостатки конструктивного исполнения отдельных узлов и деталей, позволившие создать рациональную в технологическом отношении конструкцию установки для порционной плавки и центробежного литья.

Выходную мощность автономного инвертора, при необходимости, можно значительно увеличить. На рис. 17–19 приведены временные диаграммы автономного инвертора мощностью 25 кВт. Схемотехническая модель ТПЧ в файле .CIR с названием «Индукционная плавка» служит для исследования электромагнитных процессов в мощном автономном несимметричном инверторе с полумостовым выпрямителем.

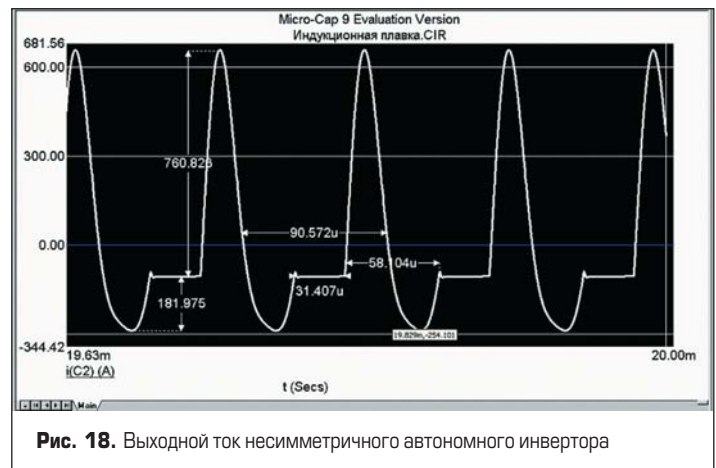
На рис. 17 приведена временная диаграмма выходного тока для установившегося режима тиристорного инвертора, подключенного к полумостовому выпрямителю. Диаграмма показывает, что переходной процесс выходного тока, с момента пуска ТПЧ, заканчивается примерно через 14 мс.

На рис. 18 показан фрагмент кривой тока, изображенной на рис. 17, для диапазона времени 19,63–20 мс, когда переходный процесс завершился.

На рис. 19 представлена форма тока индуктора, характерная для настройки на вторую гармонику выходного тока ТПЧ. Настил мощности индуктора, обусловленный большой частотой и амплитудным значением тока, де-

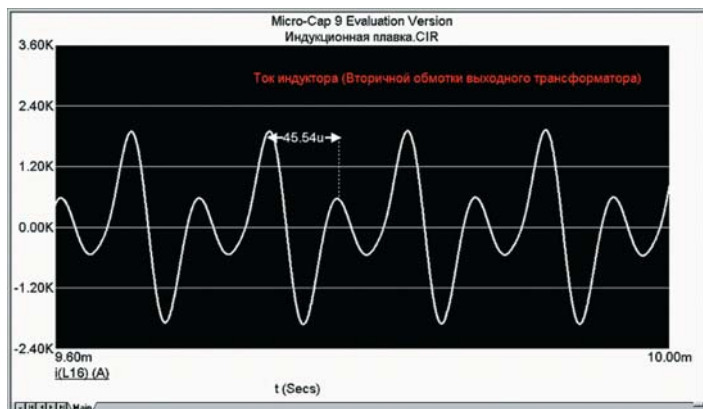


**Рис. 17.** Диаграмма выходного тока автономного инвертора при пуске ТПЧ



**Рис. 18.** Выходной ток несимметричного автономного инвертора





**Рис. 19.** Амплитуда и частота тока индуктора, настроенного на вторую гармонику выходного тока тиристорного инвертора

дает привлекательным применение ТПЧ в технологиях двухчастотной плавки металлов.

При подключении к выпрямителю автономного инвертора резистивный балласт гарантирует защиту источника питания при возникновении аварийных режимов ТПЧ. Такое техническое решение обеспечивает селективность защиты: избирательное действие по отношению к месту возникновения неисправности. Общее отключение установки осуществляется отдельным электромагнитным контактором. Согласно правилам ТБ, на вводе питания установки следует установить предохранители.

Эксплуатацию малогабаритных литейных установок зарубежного производства, как правило, производит технический персонал, не имеющий электротехнической подготовки, поэтому при проектировании источника питания — статического тиристорного преобразователя повышенной частоты — авторы уделили значительное внимание вопросам безопасности работы с ним.

Далее сформулированы принципиальные положения, реализованные нами при проектировании малогабаритной литейной установки с индукционным нагревом токами повышенной частоты.

### Заключение

1. При питании индукционной установки номинальной мощностью до 10 кВт от трехфазного источника промышленной частоты в ТПЧ можно использовать полумостовой диодный выпрямитель.
2. Так как индукторы, осуществляющие нагрев ТВЧ, требуют обязательного интенсивного водяного охлаждения, в индукционных установках целесообразно применение высокочастотных тиристорных с радиаторами водяного охлаждения.
3. В селективной защите от аварийных режимов ТПЧ небольшой мощности, ПВ которых мала, целесообразно применять балластный резистор.

### Литература

1. Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П. Высокочастотный комплекс для индукционной плавки. Академия наук РБ, НТД № 19. Уфа: РНТИК, 1999.
2. Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П., Гончаров А. В. Установка литейная центробежная индукционная. Академия наук РБ, НТД № 19. Уфа: РНТИК, 1994.

3. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.
4. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
5. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 3.
6. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.
7. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
8. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
9. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
10. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схематического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
11. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
12. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полрезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.