

Проектирование регулируемых

тиристорных преобразователей повышенной частоты

В статье приводятся результаты проектирования тиристорных преобразователей сетевого напряжения 3×380 В 50 Гц в однофазный ток частотой 5–22 кГц, на основе несимметричных тиристорных автономных инверторов тока мощностью 120–40 кВт с промежуточным уровнем источника нерегулируемого напряжения 510 В. В выходную цепь инвертора включается высокочастотный трансформатор с сердечником из трансформаторной стали (5–10 кГц) или феррита (20–30 кГц). К понижающему трансформатору подключают маловитковые закалочные индукторы. Такие технические решения обеспечивают эффективное применение тиристорных преобразователей повышенной частоты вместо ламповых или электромашинных генераторов для технологических процессов закалки и пайки металлических изделий.

Эй вы, задние! Делай, как я.

Это значит — не надо за мной...

«Чужая колея»

Владимир Высоцкий

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Введение

Существенной особенностью рассматриваемых технических решений автономного несимметричного тиристорного инвертора является высокая надежность в пусковых режимах при изменении рабочей частоты, а также при стабилизации коэффициента мощности индукционной нагрузки. Автор анализирует действие системы регулирования статической инверторно-индукционной схемы по каналу управления коэффициентом мощности нагрузки.

Основной метод исследований — схемотехническое моделирование с использованием PSpice-моделей компонентов. При схемотехническом моделировании получаем верное графическое изображение временных и частотных зависимостей, что является условием их правильной интерпретации.

В статье рассматриваются особенности регулирования электрических режимов электротермических установок, предназначенных для индукционного нагрева небольших изделий при объемной и поверхностной закалке, а также пайке токами высокой частоты от автономных тиристорных преобразователей. В этих тиристорных преобразователях повышенной частоты, традиционных для Уфимской школы проектирования, используется нерегулируемый трехфазный сетевой диодный выпрямитель с бесконтактным выключателем постоянного тока [1–3].

Широко распространенными на промышленных предприятиях различного профиля и поэтому самыми многочисленными индукционными комплексами для производственных технологий с использованием токов высокой частоты (ТВЧ) являются установки для термообработки, в частности закалочные комплексы и установки для пайки относительно небольших изделий (например, токарных резцов, фрез,

сверл). Их общие признаки — повышенная частота выходного тока, относительно небольшое значение выходной мощности, наличие понижающего выходного трансформатора [4–6].

В процессе проектирования статических источников питания для установок индукционного нагрева металлов каждый раз разрешается следующее противоречие: с одной стороны, большое количество таких установок требует применения типовых узлов, с другой стороны, возникает необходимость проектирования новых технических решений, особенно для трансформаторов и нагрузочных индукторов, которые практически никогда не бывают одинаковыми.

Тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), как правило, проектируют из типовых узлов, по индивидуальному техническому заданию, основа которого — требования заказчика. Когда заказчиками были государственные предприятия, исполнитель-разработчик заключал типовой договор, предусматривающий расходы на исследование и промышленное внедрение ТПЧ, что позволяло проводить перспективные разработки. В настоящее время договоры о поставке продукции не представляют такой возможности, поэтому количество новых разработок на отечественном рынке сократилось.

С момента распространения тиристорных в нашей стране и разработки первых ТПЧ для индукционного нагрева металлов практически все учебные заведения страны, имеющие кафедры электротехнического профиля, с большим или меньшим успехом разрабатывали разные автономные инверторы для электротермических установок, соответствующие требованиям большого числа новых, часто оригинальных, технологий. Ведущие промышленные предприятия страны могли самостоятельно заказывать новые разработки и изготавливать ТПЧ для собст-

венных нужд и требований производства. Финансирование осуществлялось из средств министерств на освоение и внедрение новой техники. Существовавшая система научно-технической информации в стране и порядок финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР) обеспечивали проведение единой технической политики (пример — разработка централизованного или индивидуального питания высокочастотных технологических установок).

ТПЧ — не очень сложные изделия силовой электроники, которые допускают различные варианты конструктивного и схемного исполнения силовой части инвертора, блока управления (системы управления, защиты, регулирования и диагностики) и нагрузочного контура, что является большим преимуществом для разработчиков этой техники. На заре развития ТПЧ (прошло уже 40 лет с момента появления первого образца) различные министерства страны считали престижным курировать собственные разработки преобразователей частоты. Подведомственные НИИ, с тем или иным успехом, проектировали ТПЧ, а ведущие предприятия отрасли организовывали их производство и внедряли в традиционных и новых технологических процессах.

В основе метода высокочастотного нагрева лежит явление электромагнитной индукции, открытое в 1831 г. Майклом Фарадеем. Эффект нагрева растет с увеличением частоты переменного тока. В 1907 г. А. Н. Ладыгин предложил использовать индуктированные (вихревые) токи высокой частоты для нагрева металлов.

Еще в 20-е годы прошлого столетия Валентин Петрович Вологдин начал исследования по применению в промышленности высокочастотной техники и осуществил лабораторные разработки индукционных печей, питаемых от электромашинных генераторов (ЭМГ) высокой частоты. В 1925 г. В. П. Вологдин делает первые попытки применить ТВЧ для закалки стали, разрабатывает первые бессердечниковые индукционные печи для плавки металлов. К 1931 г. было построено 10 таких печей емкостью от 30 до 150 кг металла. Они питались от ЭМГ на частоты от 500 до 8000 Гц мощностью от 150 до 6000 кВт [7]. Первые опыты поверхностной закалки деталей выполнялись с применением ламповых генераторов. Тогда считали, что для нагрева эффективны более высокие частоты, чем может дать машинный генератор. Однако опыты показали, что для небольших деталей, которые должны закаливаться на малую глубину, действительно нужен высокочастотный ламповый источник питания, а для больших деталей достаточны токи повышенной частоты, вырабатываемые электромашинными преобразователями. Сегодня даже обычная, промышленная частота в 50 Гц используется для термической обработки массивных деталей.

Вначале опыты В. П. Вологдина по закалке были неудачными: быстрый сквозной прогрев от ЭМГ мощностью 150 кВт приводил к перегреву поверхности валов. После быстрого охлаждения стальные изделия становились хрупкими и ненадежными. В 1935 г. В. П. Волог-

дин организовал лабораторию высокочастотной техники в Ленинградском электротехническом институте имени В. И. Ульянова (Ленина). В лаборатории на Московском автомобильном заводе им. Лихачева был изготовлен станок-автомат для закалки коленчатых валов, наиболее ответственных деталей автомобильных двигателей. Вместо нескольких часов закалка вала сократилась до 2 минут.

С индукционной закалки, одной из немногих промышленных технологий с отечественным приоритетом, началась история индукционного нагрева в России. Источники питания для нагрева ТВЧ совершенствовались параллельно с развитием радиотехники. Электромашинные генераторы — источники питания для радиопередатчиков в телеграфном режиме — разрабатывались В. П. Вологдиным, он же был инициатором применения их для поверхностной закалки ТВЧ железнодорожных рельсов. В 1936 г. появились первые публикации о новом методе термической обработки.

Таким путем развивалась новая отрасль промышленности — силовая высокочастотная электроника. В апреле 1947 г. в Ленинграде был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт промышленного применения токов высокой частоты (НИИ ТВЧ), получивший затем имя профессора В. П. Вологодина. Во время Отечественной войны лаборатория была эвакуирована в г. Челябинск, а часть ее сотрудников продолжила свою работу на Кировском и Уфимском моторном заводах. ТВЧ использовались при закалке деталей и частей тракторов, танков и самолетных двигателей.

Дальнейшее развитие высокочастотной техники и ее промышленное применение имели большое значение для промышленного производства в нашей стране. Сейчас это распространенная технология на любом промышленном предприятии. В настоящее время продолжается совершенствование индукционного технологического оборудования и источников питания.

Отметим, что повышенной частотой переменного тока для ТПЧ обычно называют частоты от 500 Гц до 22 кГц. Для электромашинных генераторов (ЭМГ) эти частоты называли средними. Токами высокой частоты (ТВЧ), как правило, называют токи с частотой 66–440 кГц, получаемые от ламповых генераторов (ЛГ). Используются также термины сверхвысокая частота (СВЧ-нагрев ламповыми генераторами), высокая частота (ВЧ-нагрев от транзисторных источников питания), тиристорные преобразователи повышенной частоты (ТППЧ), средняя частота (среднечастотные электромашинные генераторы), низкая частота (нагрев промышленной частотой 50–60 Гц). Эти термины не отражены в едином стандарте и употребляются в сравнительном смысле, по отношению к применяемому источнику питания установок индукционного нагрева.

Электромашинные генераторы были неэффективны в повторно кратковременных режимах эксплуатации, характерных для пайки и закалки небольших изделий. В то же время массивные металлические детали с глубиной закалки в 2–3 мм требуют рабочей частоты 5–10 кГц, вырабатываемой электромашинны-

ми генераторами. Несмотря на длительное использование ЭМГ, полностью автоматизировать технологические процессы оказалось трудно, в первую очередь из-за большой инерционности изменения параметров по каналу: напряжение возбуждения — выходное напряжение. Система регулирования ЭМГ эквивалентна звену первого порядка со значительной постоянной времени обмотки возбуждения.

ВЧ-установки с ламповыми генераторами (ЛГ) выполнялись, в основном, на рабочие частоты 66 и 440 кГц, которые можно было эффективно использовать для поверхностной закалки изделий. Поэтому ЛГ широко применялись при поверхностной закалке и сквозном прогреве деталей небольших размеров. В электротермических установках с питанием от лампового генератора используются системы регулирования и стабилизации анодного напряжения лампы. В установках мощностью до 160 кВт применяются высоковольтные управляемые выпрямители. Основным управляющим воздействием в промышленных ламповых генераторах является изменение напряжения питания. КПД ламповых генераторов не превышает 50%, их надежность невысока, а высокая частота неблагоприятно воздействует на обслуживающий персонал электротермических установок.

Регулировка рабочих режимов ЛГ с трудом поддается автоматизации и поэтому практически осуществляется оператором. При длительной эксплуатации ЛГ выявились и другие существенные недостатки, в частности ограниченный срок службы генераторных ламп. Тем не менее, ламповые генераторы в течение длительного времени успешно выполняли возложенные на них задачи. К настоящему времени они морально устарели, хотя в индукционных установках их продолжают использовать.

Схемотехническая модель регулируемого тиристорного преобразователя повышенной частоты

Сейчас в мощных автономных высокочастотных инверторах для электротермических установок, в основном, применяются тиристоры. Перспективно использование IGBT-транзисторов, но они пока не получили широкого использования в отечественной промышленности.

Современным методом исследования электрической схемы тиристорного автономного инвертора как устройства силовой электроники является схемотехническое моделирование с использованием Spice-моделей компонентов электрических схем. Система Spice-моделирования создавалась по заказу военного ведомства студентами университета Беркли и быстро нашла признание во всем мире. Spice-модели начали разрабатывать в 1970-е годы, и к настоящему времени они стали стандартом для других систем схемотехнического моделирования на персональных компьютерах: PSpice (фирма Microsim), Micro-Cap (компания Spectrum Software, основанная в 1980 г.), WorkBench (Cadence), ViewSpice (Deutsch Research) и др.

PSpice-модели для программ моделирования в настоящее время хорошо известны специалистам. Если нужно проверить работу электронного устройства, не создавая его чертежей и разводки печатной платы, то целесообразно использовать программу схемотехнического моделирования Micro-Cap. Это надежный инструмент для анализа процессов в схеме электрического устройства. Сейчас фирма Spectrum Software разработала доступную для бесплатного пользования 9-ю демоверсию этой программы, именно ее применил автор. Далее описана схемотехническая модель автономного тиристорного инвертора повышенной частоты для индукционной закалики изделий и некоторые результаты ее исследований. Схемотехническая модель использует возможное для демоверсии программы Micro-Cap 9 количество — 50 дискретных компонентов схемы, для профессиональной, полной версии программы такого ограничения нет.

На рис. 1 изображена схемотехническая модель силовой схемы источника питания постоянного тока, автономного тиристорного инвертора и нагрузки. Эта модель состоит из следующих компонентов, подключенных к узлам электрической схемы: 1, 2 — коммутирующая индуктивность инвертора; 2, 3, 15 — датчик выходного тока инвертора (ДТИ), 3, 4 — коммутирующий конденсатор инвертора; 5, 7, 8 — закалочный трансформатор; 6, 0 — индуктор; 9, 10, 11 — вентильная пара тиристор/диод с R-C цепочкой, демпфирующей коммутационные перенапряжения, и источником управляющих импульсов; 12, 16 — датчик тока контура нагрузки (ДТН); 13, 14 — дроссель постоянного тока.

Схемотехническая модель включает в себя следующие функциональные узлы тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ): источник питания, автономный тиристорный инвертор, выходной трансформатор, нагруженный индуктором. Автономный инвертор выполнен по несимметричной схеме, на одном тиристоре с диодом обратного тока, показавшей высокую эффективность в аналогичных установках индукционного нагрева. В инверторе нагрузка (высокочастотный трансформатор с индуктором) включена последовательно по переменному току с коммутирующими элементами инвертора и нелинейным дросселем насыщения. Силовые коммутирующие элементы — конденсатор и индуктивность — обеспечивают колебательный характер выходного тока, который характерен пониженными значениями коммутационных воздействий на тиристоры (di/dt), в сравнении с инверторами напряжения. Назначение неуправляемого диода встречного тока — это параметрическая стабилизация токов и напряжений в схеме инвертора при изменении параметров нагрузки.

При моделировании сетевой выпрямитель как источник питания тиристорного инвертора представлен источником ЭДС, равной выходному напряжению трехфазного выпрямителя. При исследованиях в профессиональной версии Micro-Cap и ЭВМ с большим объемом оперативной памяти в такой замене необходимости нет. Укажем, что на результатах исследований указанное упрощение схемотех-

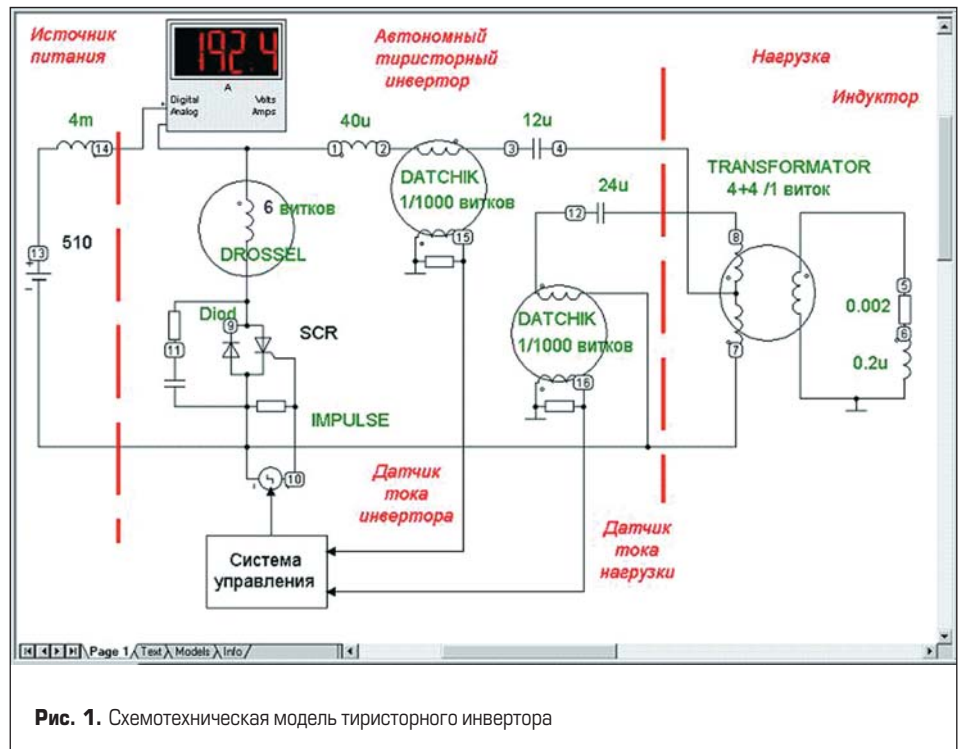


Рис. 1. Схемотехническая модель тиристорного инвертора

нической модели не отражается, при этом оно полезно при проведении расчета и анализе результатов. Полный цикл повторения электромагнитных процессов в трехфазном выпрямителе, соответствующий одному расчетному циклу схемотехнической модели, составляет 20 мс, а время окончания переходных процессов в тиристорном инверторе, определяемых, в основном, индуктивностью дросселя входного тока, составляет величину порядка 4 мс. Поэтому расчеты, например, выходного тока инвертора, можно произвести на значительно меньшем интервале времени. Качество анализа при схемотехническом моделировании определяется количеством расчетных точек на заданном интервале времени. В Micro-Cap имеется возможность для успешного завершения заданного интервала

расчета изменять исходные данные и результаты предшествующих попыток.

Источник напряжения 510 В, соответствующий выпрямленному напряжению промышленной трехфазной сети 380 В, подключен к инвертору через дроссель постоянного тока с индуктивностью 4 мГн (4м). Напомним, что основными единицами для обозначения параметров элементов схемотехнической модели являются: индуктивность — Гн; емкость — Ф; сопротивление — Ом и т. п. с наиболее распространенными префиксами: р — пико, н — нано, м — микро, т — милли и т. д.

Выходной ток источника питания отражает мощность, потребляемую тиристорным инвертором. Дроссель постоянного тока придает источнику напряжения свойства источника тока. Автономный инвертор по отношению к нагрузке проявляет свойства источника то-

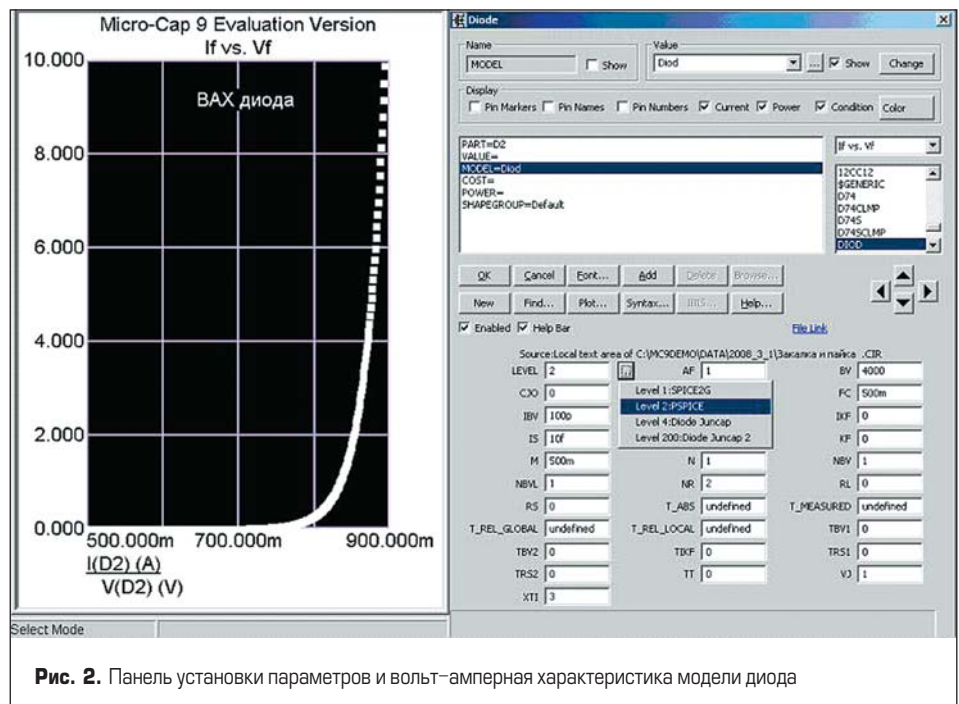


Рис. 2. Панель установки параметров и вольт-амперная характеристика модели диода

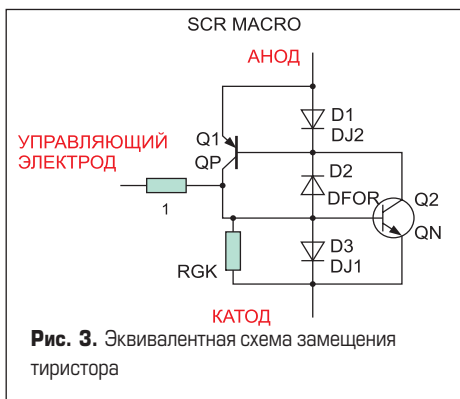


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения тиристора

ка, формируя на выходе разнополярные импульсы тока тиристора и диода, разделенные интервалом — паузой регулируемой длительности. Изменением длительности паузы регулируется рабочая частота автономного инвертора. Таким образом, изменяя интервал паузы, регулируют выходную мощность тиристорного автономного инвертора. Сказанное находит подтверждение при рассмотрении квазиустановившихся электромагнитных процессов в инверторе и его модели.

На схематической модели (рис. 1) концентрическими окружностями обозначены магнитные сердечники для соответствующих индуктивностей, отражающие тороидальную конструкцию изображаемых магнитопроводов без магнитного зазора ($GAP = 1$). На схеме указывается целочисленное количество витков, магнитосвязанных с помощью PSpice-моделей сердечников. Присутствие этих компонентов представляет собой существенное отличие этой модели высокочастотного автономного инвертора повышенной частоты, которое не следует игнорировать при исследовании электромагнитных процессов. Еще одна особенность модели — это представление диода и тиристора как нелинейных полупроводниковых элементов в виде PSpice-моделей с импульсным управлением.

Характеристики PSpice-модели диода показаны на рис. 2. В модели установлены необходимые параметры, в частности обратное напряжение $BV = VDRM = \text{Maximum repetitive peak off-state voltage} = 4000 \text{ V}$, оно обеспечивает работоспособность автономного инвертора с источником питания 510 В.

Эквивалентная схема замещения тиристора и обозначения ее моделей приведены на рис. 3. Тиристор схематической модели, представленный в исследованиях в виде макроса SCR (рис. 4), описывается следующими параметрами — SCR MACRO: $IH = \text{DC Holding Current} = 50 \text{ mA}$; $IGT = \text{Gate Trigger Current} = 40 \text{ mA}$; $TON = \text{Turn on time} = 1 \text{ US}$; $VTMIN = \text{Minimum anode to cathode on state voltage} = 1 \text{ V}$; $VDRM = \text{Maximum repetitive peak off-state voltage} = 800 \text{ V}$; $DVDT = \text{Critical rate of rise of off-state voltage} = 50 \text{ MEG}$; $TQ = \text{Turn off time} = 20 \text{ US}$; $K1 = \text{DVDT adjustment (set to 1 unless otherwise specified)} = 1$; $K2 = \text{TQ adjustment (set to 1 unless otherwise specified)} = 1$.

В модели тиристора используется его представление в виде двух транзисторов различной проводимости Q1–QP, Q2–QN и трех диодов — DJ1, DJ2, DFOR. Модели транзисторов и диодов представлены в следующем виде:

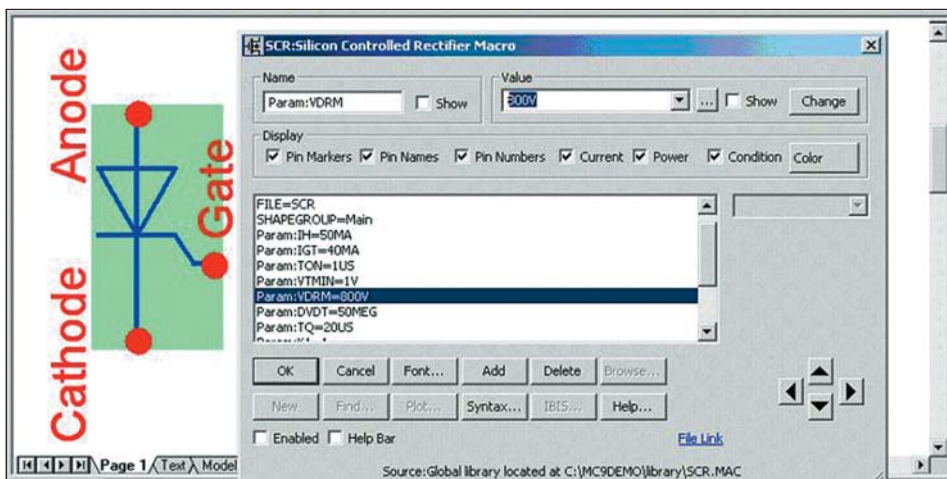


Рис. 4. Панель редактирования параметров макроса тиристора

$p-n-p$ транзистор —.model QP PNP (BF=BF1 IS=IS1 RE=RE1 CJE=CJE1 BR=BF1 TF=TF1 TR=TR1); $n-p-n$ транзистор —.model QN NPN (BF=BF2 IS=IS2 CJC=CJC2); диод DJ1 —.model DJ2 D (IS=.001*(IS1) BV=VDRM); диод DJ2 —.model DFOR D (BV=VDRM); диод DJ3 —.model DJ1 D (is=.001*IS1 BV=5). Пользователю нужно установить необходимые параметры макроса силового тиристора, показанные на рабочей панели рис. 4.

Макромодель тиристора схематической модели инвертора, представленная макросом SCR, управляется импульсами напряжения от генератора импульсов — IMPULSE. График (Plot) управляющих импульсов тиристора, формируемый с помощью панели MODEI IMPULSE, показан на рис. 5. Импульсные сигналы управления имеют идеальную форму, временные параметры напряжения которой следующие: $P1=0$ — начало переднего фронта импульсов; $P2=0$ — окончание переднего фронта импульсов; $P3=0$ — начало заднего фронта импульсов; $P4=30u$ (30 микросекунд) — окончание заднего фронта импульсов; $P5=200u$ — период повторения импульсов; $VONE=20$ (Вольт) — амплитуда прямой полярности импульсов; $VZERO=-1$ — величина отрицательного напряжения, показанная на графике. Эти импульсы инициируют включение тиристора в автономном инверторе.

На левом графике рис. 5 показан интервал времени $P5$, точное значение которого, соглас-

но панели справа, равно 200 мкс. Укажем, что в рабочем окне Micro-Cap имеются средства точной фиксации особых или экстремальных точек рассчитанных графиков, если в этом есть необходимость. На рис. 5 показан установленный интервал схематической модели, соответствующий частоте включения тиристора автономного инвертора. Величина $P4$ должна превышать время, необходимое для нарастания тока тиристора свыше величины тока удержания. В общем, схематическая модель — в качестве электронного имитатора (симулятора) — практически полностью имитирует (симулирует) свойства электрической схемы автономного инвертора.

На изображенной схематической модели (рис. 1) отсутствует непосредственное заземление полюсов источника питания, как это осуществляется в действительности при использовании сетевого трехфазного выпрямителя. С другой стороны, одна шина индуктора и вторичные обмотки датчиков тока должны быть заземлены. Это условие, согласно технике безопасности, также выполнено в схематической модели.

Для оперативной оценки результатов исследований применен анимированный компонент — цифровой амперметр, показания которого свидетельствуют об успешном выполнении сеанса анализа переходных процессов в схеме с установленными параметрами компонентов. Исходные показания анимированного измерительного прибора нулевые. Ани-

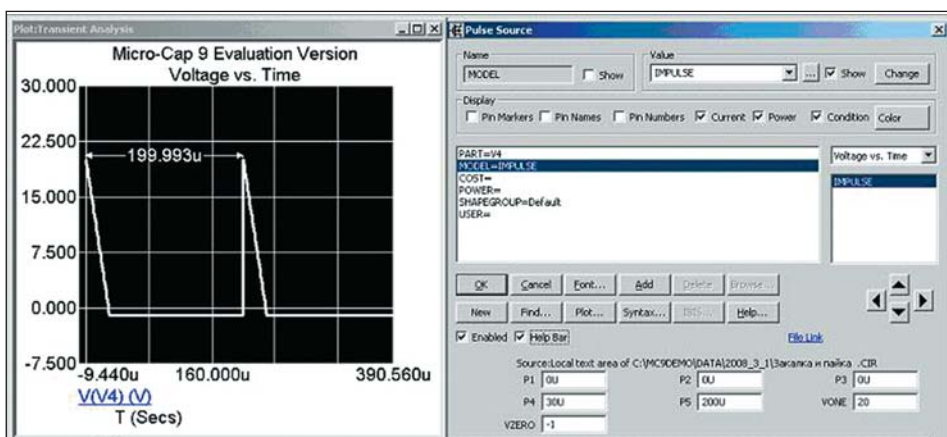


Рис. 5. Диаграмма импульсов управления тиристорами автономного инвертора



Рис. 6. Участок временной диаграммы на вентильной паре тиристор – диод

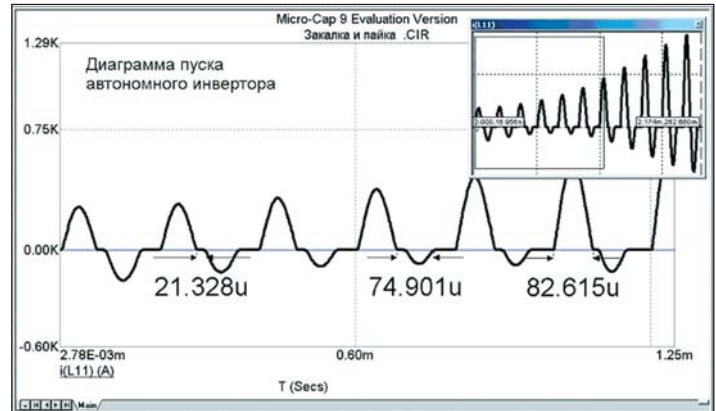


Рис. 7. Диаграмма тока через тиристор и диод при пуске автономного инвертора

мированные приборы обладают свойством автоматического выбора предела измерения и показывают мгновенную величину измеряемого тока или напряжения в цифровом с плавающей запятой или аналоговом виде.

Параметры компонентов схемы далее будут указываться по мере необходимости. На рис. 6 представлен расчет формы напряжений на тиристоре, с момента подачи импульсов управления и до установившегося значения.

Согласно рис. 6, после расчета переходных процессов, вызванных включением инвертора и низкочастотными колебаниями тока входного дросселя, уточняется необходимая величина максимального напряжения (VDRM) тиристора.

В режиме настройки колебательного контура нагрузки на вторую гармонику основной рабочей частоты автономного инвертора [8–10], как рекомендуемого режима автономного инвертора, с величиной паузы в выходном токе, равной примерно одной трети от периода управления тиристором, определяем надежность пуска ТПЧ. На рис. 7 показано, что время восстановления тиристора не меньше минимально необходимой величины. Правильное графическое изображение математической зависимости, обеспечиваемое симулятором, — условие верной интерпретации расчетных данных и, в конечном итоге, физического явления. Для решения проблем пуска автономного ин-



Рис. 8. Сигналы датчика тока инвертора (красный) и датчика тока нагрузки (белый) для канала управления выходными параметрами инвертора

вертора с различной нагрузкой можно применить предварительный заряд коммутирующего конденсатора.

На рис. 7 хорошо видна «ступенька» в момент перехода кривой тока через нулевую величину, ее появление вызвано присутствием в схеме дросселя насыщения, последовательно включенного с вентильной парой [11].

На рис. 8 представлены выходные сигналы датчиков тока инвертора и нагрузки в рабочем режиме, необходимые нам для анализа работы системы стабилизации выходных параметров автономного инвертора при изме-

нении нагрузки, характерной для заковки и пайки.

На рис. 9 представлен график напряжения на выходе заковочного трансформатора индукционной установки.

Графики на рис. 9 показывают амплитудное значение и частоту вторичного напряжения высокочастотного трансформатора, служащего для согласования напряжений на нагрузке автономного инвертора-индуктора с индуктивностью 0,2 мкГн и эквивалентным сопротивлением 0,002 Ом. Эти величины определены получением выходной мощно-

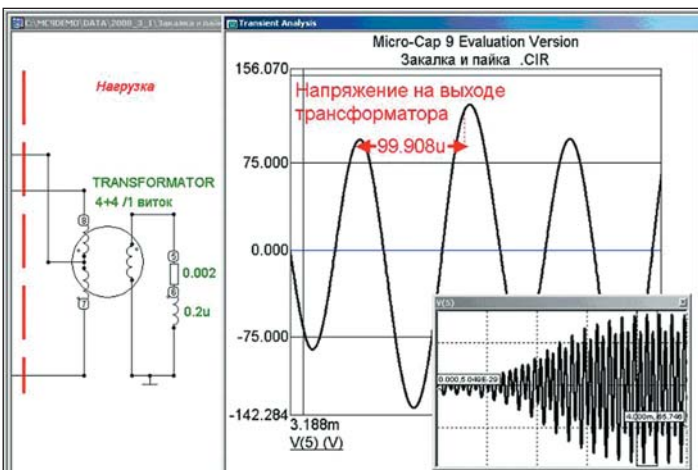


Рис. 9. График выходного напряжения на заковочном трансформаторе индукционной заковочной установки

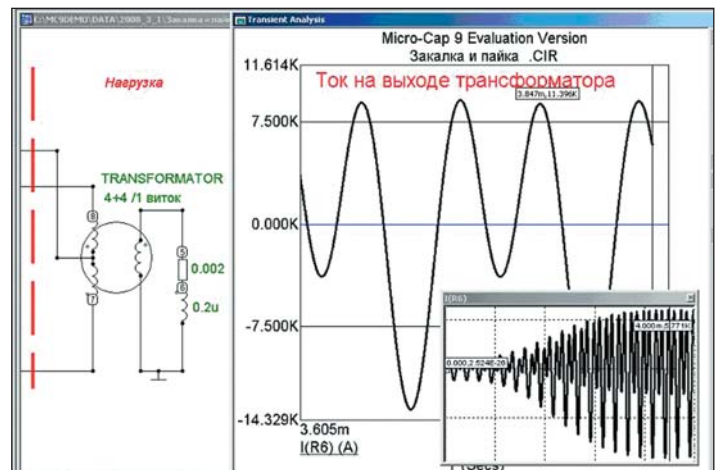


Рис. 10. График выходного тока в индукторе индукционной заковочной установки

Таблица 1

Трансформатор высокочастотный выходной	
Сердечник — феррит 3F3	
Число витков первичной обмотки	(2-4)+(2-4)
Число витков вторичной обмотки	1
Coupling (коэффициент связи между обмотками)	0,4-0,9
Режим работы	линейный
Дроссель насыщения	
Сердечник — феррит 3C85	
w — число витков обмотки	4-8
Coupling	1
Режим работы	нелинейный
Датчики тока	
Сердечник — феррит 3F3	
Число витков первичной обмотки	1
Число витков вторичной обмотки	1000
Coupling	1
Режим работы	линейный

ти автономного инвертора, когда заданы параметры коммутирующих элементов и рабочая частота тиристорного инвертора.

Согласимся с тем, что априори определить указанные величины невозможно, так как задача имеет множество удовлетворительных решений. Определение экстремумов установленной мощности компонентов, временных интервалов и т. д. имеет эвристический характер. Даже после завершения очередного этапа проектирования однозначный вывод о целесообразности различных режимах электрической схемы автономного инвертора сделать трудно.

Параметры магнитных сердечников, использованных в схемотехнической модели, приведены в таблице 1. А на рис. 11-13 показаны графики кривых намагничивания магнитных сердечников автономного инвертора, полученные схемотехническим моделированием.

Регулирование выходной мощности и работа канала стабилизации коэффициента мощности

Особенность разрабатываемых в Уфимской школе силовой электроники ТПЧ — это неуправляемый диодный выпрямитель. Регулирование выходной мощности ТПЧ осуществляется изменением частоты. Управление частотой инверторно-индукционной системы эффективно при возможности изменять рабочую частоту ТПЧ в достаточно широких пределах. Примененная схема тиристорного несимметричного инвертора кроме хороших пусковых характеристик обладает и широким диапазоном регулирования частоты. На рис. 1 показано включение трансформаторных датчиков в инверторный и нагрузочный контуры системы управления ТПЧ.

Когда для индукционной закалки использовались машинные генераторы, в них нельзя было изменять рабочую частоту, а изменение режимов нагрева производилось регулированием тока возбуждения и переключением емкости электротермических конденсаторов, подключенных к выходному трансформатору

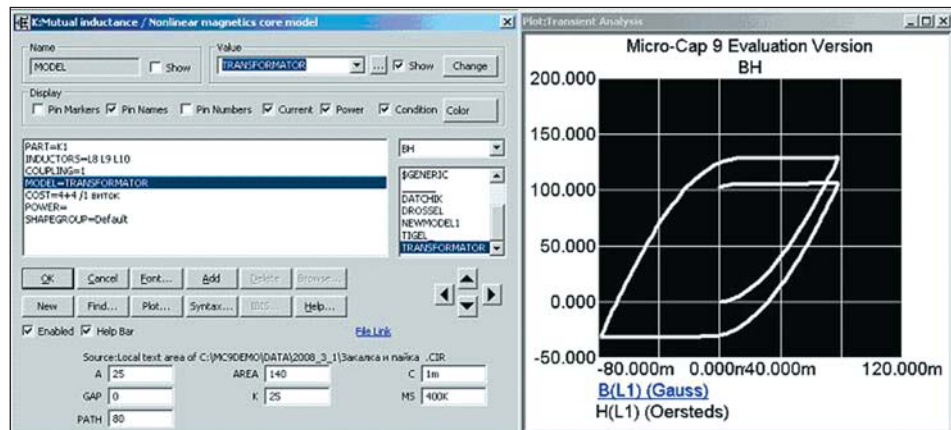


Рис. 11. Расчетная зависимость В от Н для сердечника выходного высокочастотного трансформатора в схемотехнической модели автономного инвертора

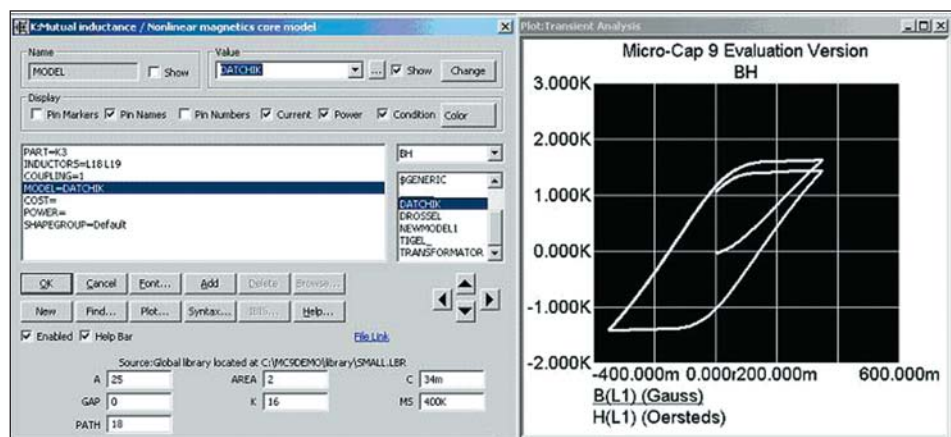


Рис. 12. Зависимость В от Н тороидальных сердечников трансформаторов для датчиков тока

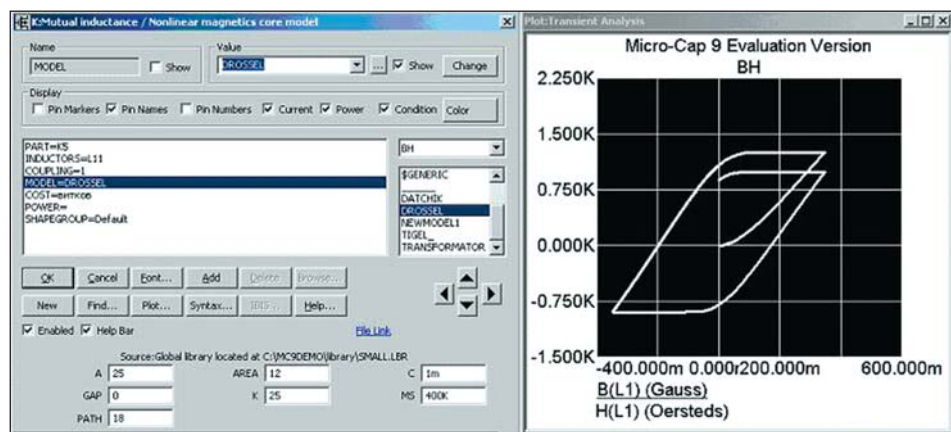


Рис. 13. Зависимость В от Н для сердечника выходного трансформатора в схемотехнической модели автономного инвертора

ру индукционной нагрузки. Регулирование тока возбуждения осуществляется с большим запаздыванием, обусловленным инерционностью канала регулирования. Переключение во время работы индукционной установки ВЧ-конденсаторов уменьшает ее надежность.

Применение различных устройств управления, осуществляющих изменение рабочей частоты системы нагрева при переменной нагрузке индуктора для тиристорного инвертора, приводит рабочую частоту к резонансной частоте колебательного контура нагрузки. Это обеспечивает быстрдействие канала регулирования и его эффективность. Поддержание

на максимальном уровне коэффициента мощности инверторно-индукционной системы приводит, в конечном счете, к сокращению времени нагрева в инверторно-индукционной закалочной установке.

Задачей, на решение которой направлено рассматриваемое техническое решение системы управления ТПЧ, является управление каналом изменения рабочей частоты индукционной части системы. Технический результат использования этого канала управления — это поддержание на максимальном или установленном уровне коэффициента мощности инверторно-индукционной нагревательной системы.

На рис. 1 показаны трансформаторные датчики, которые регистрируют режим работы индукционной установки. Трансформаторные датчики тока выполнены в виде колец из феррита с вторичной обмоткой, нагруженной на резисторы. Первичной обмоткой датчика с расчетным числом витков, равным единице, служит соответствующая шина переменного тока силовой схемы, проходящая через окно трансформатора. Достоинством тороидального датчика является незначительное влияние внешних помех.

Система управления выделяет сигналы управления и определяет рабочую частоту управления ТПЧ. При этом сигналы управления формируют монотонно изменяющееся напряжение, величина которого не зависит от текущего значения частоты управления. Это напряжение сравнивают с заданным уровнем, а сигналом рассогласования управляют рабочей частотой инвертора при переменных параметрах нагрузки.

Реализация частотного управления позволяет поддерживать установившийся (или максимально возможный) коэффициент мощности инверторно-индукционной системы при переменной нагрузке. Параметры нагрузки инверторно-индукционной системы меняются в процессе нагрева загрузки, от начального состояния до значений температуры детали выше точки магнитных превращений (точки Кюри).

Работа инверторно-индукционной системы осуществляется следующим образом. Инверторно-индукционная система формирует в индукторе синусоидальный ток двойной частоты по отношению к частоте включения тиристора, фаза которого, в режиме максимальной мощности, соответствует совпадению частоты инвертора со второй гармоникой тока индуктора. Это состояние соответствует значению относительной рабочей частоты системы $f^* = 1,0$, где за базовую величину принято значение резонансной частоты контура нагрузки.

Датчики тока ДВТ и ДТН представляют собой ферритовые кольца диаметром 80–100 мм, на которых «в навал» (для уменьшения собственной, паразитной емкости) намотана вторичная обмотка, состоящая из 1000 витков медного провода. В первичной обмотке — шине инверторно-индукционной установки — протекает ток значительной величины: свыше 1000 А. Датчики тока выполняют функции

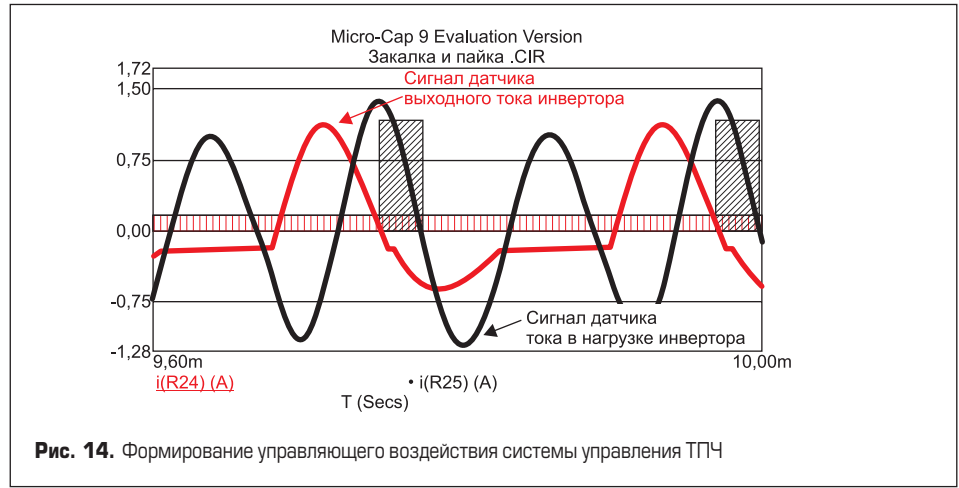


Рис. 14. Формирование управляющего воздействия системы управления ТПЧ

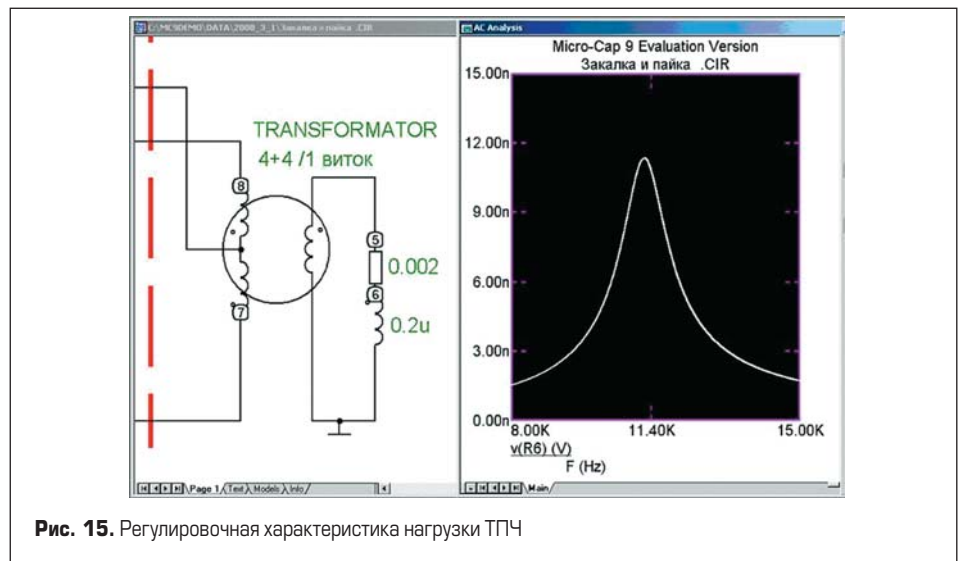


Рис. 15. Регулировочная характеристика нагрузки ТПЧ

трансформаторов тока, в которых информативным параметром является не величина, а фаза вторичного тока.

Датчик ДВТ повторяет фазу выходного тока инвертора, а датчик ДТН регистрирует фазу тока в нагрузке инвертора, имеющего почти синусоидальную форму на частоте, близкой к резонансу. В датчиках регистрируются моменты перехода фазы соответствующего тока через нулевое значение.

Канал управления рабочей частотой ТПЧ содержит два входных усилителя-ограничителя с дифференцирующими цепочками на выходе, R-S триггер с интегрирующей цепочкой на выходе, дифференциальный уси-

литель с управляемым напряжением формирователем импульсов. Эти элементы — типовые для схем электроники.

Работает канал управления следующим образом. При нестационарной во времени нагрузке индуктора, характерной для процессов закалки и пайки, наблюдается относительный сдвиг фазы токов в датчиках ДТИ и ДТН. Из сигналов этих датчиков формируются фронты импульсов, соответствующих моменту перехода через нуль тока тиристора инвертора и следующего за ним периода тока контура нагрузки. Эти импульсы поступают на входы R-S триггера, вызывая его переключение с рабочей частотой инвертора. Коэффици-

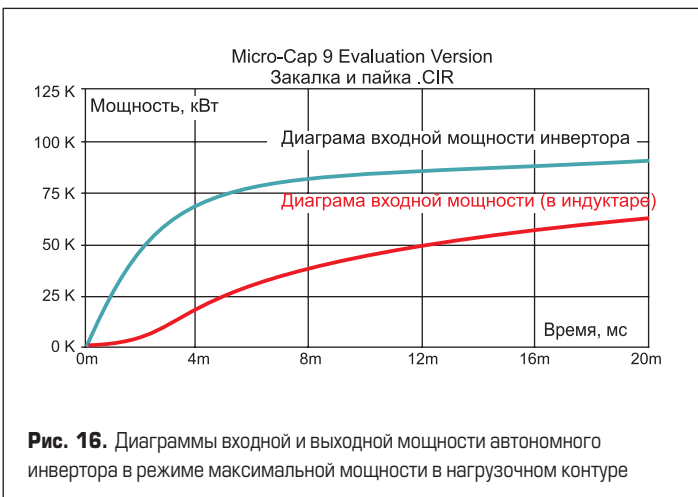


Рис. 16. Диаграммы входной и выходной мощности автономного инвертора в режиме максимальной мощности в нагрузочном контуре

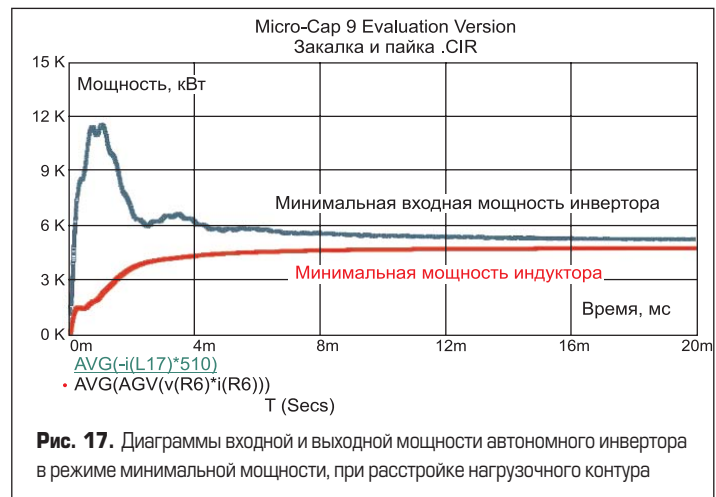


Рис. 17. Диаграммы входной и выходной мощности автономного инвертора в режиме минимальной мощности, при расстройке нагрузочного контура

циент заполнения импульсов на выходе R-S триггера, при определенном порядке его переключения, пропорционален коэффициенту мощности контура нагрузки инверторно-индукционной системы. Выход R-S триггера подключен на неинвертирующий вход дифференциального усилителя системы управления. На другой, инвертирующий вход дифференциального усилителя подается напряжение, которое выполняет функцию «уставки фазы». Разность сигналов (текущего сигнала фазы и уставки) после дифференциального усилителя поступает во входную цепь канала управления частотой инверторно-индукционной системы — управляемого напряжением генератора и формирователя импульсов управления.

На рис. 14 приведены сигналы датчика выходного тока инвертора (ДИ) и датчика тока нагрузки (ДТН). Ниже их показана форма выходных импульсов R-S триггера и постоянная составляющая напряжения на выходе его интегрирующей цепи — уср. Подобные осциллограммы справедливы для различных относительных частот f^* нагрузочного контура, по отношению к рабочей частоте инвертора.

Выходной ток несимметричного инвертора имеет несинусоидальную форму, обусловленную наличием «паузы». Изменением длительности интервала паузы регулируется выходная частота и мощность ТПЧ. При этом происходит расстройка частоты колебательного контура нагрузки и основной гармоники выходного тока тиристорного инвертора. Регулировочная характеристика выходной мощности автономного инвертора определяется АЧХ нагрузочного контура, которая в свою очередь представлена на рис. 15.

Возможный диапазон регулирования мощности инвертора можно определить по диаграммам, приведенным на рис. 16 и рис. 17. При этом учитываются потери в тиристоре, диоде и трансформаторе на рабочей частоте. Особенностью управления частотой инвертора является сохранение повышенного КПД, определяемого отношением выходной и входной мощности.

Индукционный комплекс для закалки и напайки режущего инструмента

Индукционный комплекс, показанный на рис. 18, предназначен для закалки и пайки небольших изделий — резцов, сверл, он применяется для обработки различного инструмента из твердосплавной, быстрорежущей, углеродистой стали. Комплекс используется также для отпайки твердосплавных накладок, при их утилизации. Область его применения — специализированное производство металлообрабатывающего инструмента, а также инструментальное обеспечение собственных нужд промышленных предприятий.

Питание аналогичных индукционных комплексов обычно осуществлялось от высокочастотных генераторов типа ЛЗ-2-67 или ВЧИ-63/0,44 (ламповых генераторов ЛЗВУ — Ленинградского завода высокочастотных установок), имеющих значительные габариты, требующих

большого времени на подготовку к работе и невысокую эксплуатационную надежность. Кроме того, высокая рабочая частота ламповых установок (66–440 кГц) оказывает вредное влияние на обслуживающий персонал. Еще раз повторим, что ламповые генераторы сложно применять в автоматических установках.

Использование тиристорного преобразователя обеспечивает безопасность условий труда, мгновенную готовность комплекса к работе, уменьшение его габаритов. Размещение источника питания индукционного комплекса в непосредственной близости от нагревательного поста уменьшает потери высокочастотной энергии и повышает КПД установки, что, в конечном итоге, приводит к лучшему использованию установленной мощности оборудования.

Индукционный комплекс состоит из ТПЧ и нагревательной установки с индуктором, понижающим трансформатором и батареей компенсирующих конденсаторов. ТПЧ мощностью 63 кВт и рабочей частотой 18 кГц обеспечивает глубину закалки 1–2 мм.

Индуктор охватывает нагреваемое изделие, в частности резец из стали 35 с наконечником из твердосплавного материала Т15 или ВК8 с таблеткой припоя на медной или латунной основе. Напайка резцов различного размера, как правило, осуществляется в одном индукторе, при необходимости нагревательный пост комплектуется набором сменных индукторов. Водоохлаждаемый одновитковый индуктор нагревательного поста крепится на выходных

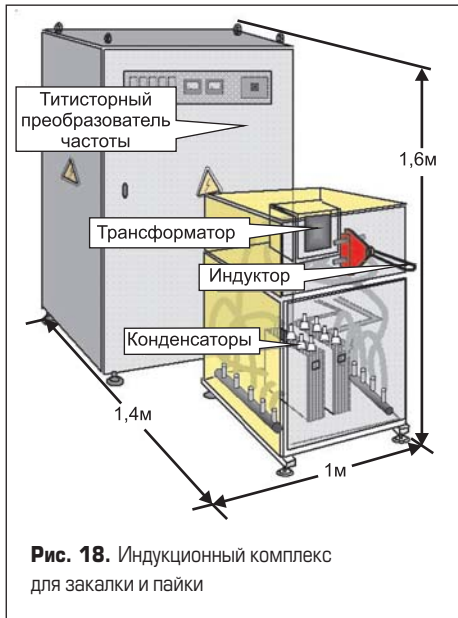


Рис. 18. Индукционный комплекс для закалки и пайки

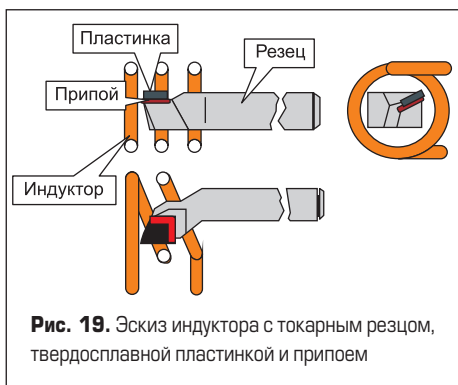


Рис. 19. Эскиз индуктора с токарным резцом, твердосплавной пластиной и припоем

клеммах высокочастотного трансформатора с ферритовым сердечником. С целью электробезопасности обслуживание индуктор заземлен.

На рис. 19 показан эскиз токарного резца и твердосплавной пластинки, подготовленной для напайки, которые помещены в кольцевой индуктор. Время пайки составляет 10–15 с, в зависимости от размера и материала твердосплавной накладки и резца. Оператор производит включение и выключение установки. Выход ТПЧ на рабочий режим и режим выключения осуществляется автоматически.

Технические параметры тиристорного индукционного комплекса для пайки небольших изделий приведены в таблице 2.

Таблица 2

Время технологического цикла (нагрев+закалка+ замена изделия), мин	0,5–1
Температура нагрева, °С	800–1200
Глубина закалки, мм	1–2
Выходная мощность, кВт	63
Рабочая частота, кГц	18–22
Сердечник выходного трансформатора	Феррит
Реактивная мощность компенсирующей батареи конденсаторов, кВАр	700–1000
Расход охлаждающей воды	
Тиристорный преобразователь частоты, м ² /ч	1
Нагревательный пост и индуктор, м ² /ч	1

В тиристорном преобразователе частоты используются блокировки превышения допустимой величины потребляемого тока, повышения температуры полупроводниковых элементов и других аномальных режимов. В необходимых случаях приводится в действие быстродействующая система аварийной защиты.

Резонансная нагрузка тиристорного преобразователя частоты — индукционный нагревательный пост — позволяет применить в системе регулирования мощности частотный способ управления. Регулированием выходной частоты тиристорного источника питания осуществляется изменение рабочих режимов при термообработке. Контроль длительности и качества нагрева производится визуально.

Закалочная установка повышенной мощности

Индукционный комплекс повышенной мощности (до 125 кВт) обеспечивает закалку венца зубчатых шестерен. В системе регулирования мощности также применен частотный способ управления нагревом. Регулирование выходной частоты позволяет настроить рабочие режимы ТПЧ.

Технические требования на закалку заготовки венца шестерни следующие: высокочастотная закалка осуществляется для рабочих поверхностей, изготавливаемых из стали 45ХН;

поверхность калился ТВЧ в готовой детали после шлифовки; твердость закаленного слоя HRC=52...58, во впадине HRC=50; глубина закаленного слоя 3–5 мм, во впадине — не менее 2 мм; при закалке торцов обода под впадинами зубьев до 7 мм допускается падение твердости до HRC=40. Трещины и другие дефекты не допускаются.

Индуктор подключается непосредственно к выходным клеммам выходного закалочного трансформатора. Номинальная мощность трансформатора при частоте 2400 Гц составляет 800 кВА, на рабочих частотах 8–10 кГц она соответственно снижается на 25–45%, КПД — 75%.

Индукционная закалка шестерен осуществляется после интенсивного нагрева ТВЧ и охлаждения изделий в воде, масле или другой закалочной жидкости. В процессе закалки в поверхностном слое нужной толщины происходят структурные превращения металла, обуславливающие его повышенную твердость, предотвращающую истирание поверхности, в сочетании с термически исходной структурой сердцевины.

Нагревательный пост применяется при закалке ТВЧ зубчатых шестерен большого модуля, применяемых в тепловозостроении (модуль M=10, число зубьев z=75). Электропитание ТВЧ подобных индукционных установок ранее осуществлялось от высокочастотного лампового генератора. Генератор имел значительный вес и габариты, требовал много времени на подготовку к работе и имел невысокую эксплуатационную надежность.

Разработанный тиристорный закалочный комплекс обеспечивает повышение производительности труда, улучшает условия труда персонала, обслуживающего установку, его можно быстро подготовить к работе. Комплекс занимает меньшую производственную площадь. Размещение источника питания индукционного комплекса в непосредственной близости от нагревательного поста уменьшает потери высокочастотной энергии, что приводит и к уменьшению затрат электрической энергии.

Автоматизированный комплекс включает в себя: тиристорный преобразователь частоты; закалочный трансформатор; индуктор с водяным спреером. Закалочный индуктор подключен к выходным клеммам модифицированного закалочного трансформатора. В настоящее время выпускаемые отечественной

промышленностью высокочастотные трансформаторы полностью соответствуют условиям применения в закалочных установках с ТПЧ. Время одного цикла обработки составляет 10–15 с. Оператор производит включение/выключение установки и поворот обрабатываемой шестерни. Технические характеристики закалочного комплекса приведены в таблице 3.

На рис. 20 показана диаграмма управляющего воздействия U_{cp} канала регулирования при изменении относительной частоты f^* , где за базовую величину принято напряжение на датчике фазы, соответствующее резонансной частоте инверторно-индукционной системы. Таким образом, относительная частота управления f^* определяется по отношению к резонансной частоте колебательного контура нагрузки.

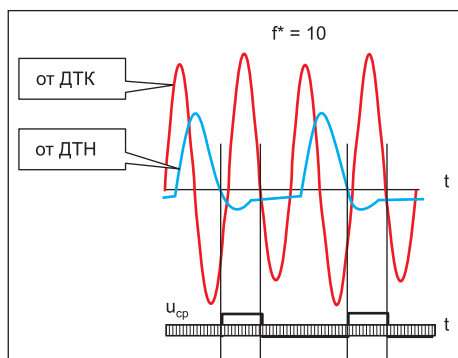


Рис. 20. Временная диаграмма формирования управляющего воздействия от сигналов датчиков системы регулирования ТПЧ

Статическая характеристика устройства управления ТПЧ, при изменении относительной рабочей частоты, показана на рис. 21. При работе канала регулирования частота импульсов управления тиристором инвертора от формирователя импульсов изменяется таким образом, чтобы в токе нагрузки инверторно-индукционной системы поддерживалась установленная фаза колебаний.

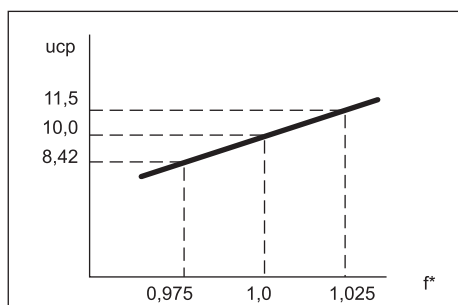


Рис. 21. Статическая характеристика системы регулирования ТПЧ

Использованный способ управления инверторно-индукционной системой позволяет эффективно поддерживать установленную фазу тока нагрузки по отношению к фазе тока инвертора, соответствующей максимальной или установленной мощности при различной нагрузке индуктора. При начальной фазировке сигналов датчиков тока ТПЧ в выходном сигнале канала регулирования частоты устанавливаются максимальный коэффициент заполнения.

Регулирование мощности закалочной установки осуществляется по косвенному параметру — коэффициенту мощности нагрузочного контура. Действие системы регулирования обеспечивает поддержание установленного коэффициента мощности нагрузочного контура с погрешностью около 5%. Уменьшение выходной мощности, во время технологических перерывов, производится рассогласованием собственной частоты нагрузочного контура и рабочей частоты. При этом целесообразно поддерживать индуктивный коэффициент мощности нагрузочного колебательного контура.

Управление электротехническим комплексом в режиме максимальной мощности является экстремальным, так как минимизирует время нагрева. Временные диаграммы изменения коэффициента мощности электротермической нагрузки приведены на рис. 22.

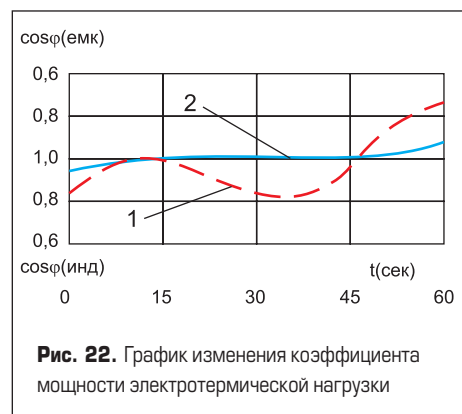


Рис. 22. График изменения коэффициента мощности электротермической нагрузки

Первая кривая на рис. 22 соответствует нагреву с постоянной рабочей частотой (как в ЛГ или МГ), а вторая кривая показывает изменение коэффициента мощности электротермической нагрузки при работе канала регулирования рабочей частоты. Применение системы регулирования сокращает время нагрева примерно в 2 раза. Результаты длительного применения описанного устройства управления показали его эффективность, обусловленную уменьшением времени нагрева детали.

Поверхностный эффект протекания тока ВЧ

Все материалы, проводящие ток, нагреваются индукционным методом в магнитном поле катушки индуктивности — индуктора. Эффект нагрева возрастает с ростом напряженности электромагнитного поля и зависит от свойств материала детали и расстояния от индуктора, которое при закалке должно быть минимально возможным. Наведенный в изделии ток индуктора создает собственное, противоположное основному, поле, что предотвращает дальнейшее проникновение поля индуктора в глубину металлического изделия. По этой причине вихревые токи имеют максимальную величину в области, близкой к поверхности нагреваемого тела. В общем случае, при индукционном нагреве металлических тел проявляется также гистерезис. Однако при реальной напряженности действующего магнитного поля ($H \approx 5 \times 10^4$ А/м) доля гистерезисных потерь при нагреве незначительна.

Таблица 3

Потребляемая мощность, кВт	125
Рабочая частота, кГц	8-10
Способ закалки	Периодический
Перемещение изделия	Осуществляет оператор
Температура нагрева, °С	1100–1200
Реактивная мощность конденсаторной батареи, кВАр	950–1200
Расход охлаждающей воды	
Тиристорный преобразователь частоты, м ³ /ч	1
Закалочная установка со спреером, м ³ /ч	1,5

Таким образом, индукционный нагрев при закалке изделий полезным образом использует поверхностный эффект переменного тока (скин-эффект), который существенно проявляется на высокой частоте. Высокая плотность тока обеспечивает нагрев изделия до высокой температуры в течение небольшого времени. Градиент (перепад) температуры в поперечном сечении изделия получается высоким, что обеспечивает при быстром охлаждении его в воде или масле, главным образом, поверхностную закалку изделия. Отметим, что поверхностный эффект используется не только на ВЧ, но и на промышленной частоте 50 Гц (60 Гц в США и Японии), например в установках попутного подогрева нефти в магистральных нефтепроводах. Внутри трубы большого диаметра прокладывается отдельный провод-индуктор, подключаемый между фазой промышленной сети и стальной трубой. Глубина проникновения тока в сталь на этой частоте составляет 5 мм, что соизмеримо с толщиной стенки трубопровода. Джоулево тепло выделяется, согласно эффекту близости, на внутренней поверхности трубопровода, уменьшая гидродинамическое сопротивление вязких нефтепродуктов при перекачке. Это уменьшает требуемую мощность насосных станций.

Поверхностный эффект, по-видимому, также определил стандартную частоту переменного тока 400 Гц, компромиссную с точки зрения уменьшения массо-габаритных показателей и увеличения удельных потерь электроэнергии в медных и алюминиевых проводниках и магнитных сердечниках электрических двигателей, трансформаторов, дросселей, коммутационной аппаратуры агрегатов авиационного электрооборудования.

В радиотехнике, в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), применяемых в телефонии и средствах беспроводной связи, для уменьшения отрицательного влияния поверхностного эффекта в проводниках используется специальное выполнение (транспозиция) проводов, называемое литцендратом (Litzendraht — нем.). Этот прием используется и в проводах для диапазона высокочастотного индукционного нагрева.

В индукционных установках для закалки и пайки ТВЧ выбор рабочей частоты очень важен, он должен быть определен геометрическими размерами нагреваемого тела, глубиной проникновения тока, требуемой температурой нагрева и т. д. Особенно отметим вопросы конструирования индуктора, где в полной мере проявляется искусство инженера. Электрический и термический КПД маловитковых закалочных индукторов невелики. Случается, что индукционные комплексы эксплуатируются при рабочих настройках, когда высокочастотная закалочная установка потребляет максимальную мощность, при «пустом» индукторе.

Для омического (активного) сопротивления на низкой частоте протекающий ток совпадает по фазе с напряжением (фазовый угол сдвига равен нулю), поэтому расчет цепей переменного тока с омическими сопротивлениями можно провести по формулам, аналогичным для цепей постоянного тока. По мере повышения

частоты начинает проявляться поверхностный эффект, при котором сопротивление проводника увеличивается, так как происходит вытеснение тока к поверхности проводника. Этот эффект, как указывалось, характерен уменьшением глубины проникновения тока, обычно обозначаемой Δ . Величина Δ равна такому расстоянию от поверхности проводника, на котором плотность тока составляет 37% от плотности тока на его поверхности. Существенно, что, хотя сопротивление проводника увеличивается с ростом частоты, оно остается активным: ток и напряжение в проводнике совпадают по фазе. При протекании тока высокой частоты в слое проводника толщиной Δ выделяется 86,5% от всей выделяемой энергии. При высокочастотной индукционной закалке и пайке кроме поверхностного эффекта проявляется также эффект близости.

Закалка небольших или, напротив, массивных изделий отличается тем, что в первом случае нагрев ТВЧ и охлаждение детали осуществляется на полную глубину, а во втором происходит нагрев и быстрое охлаждение поверхности изделия, с сохранением относительно холодной сердцевины. Закалка и пайка — типовые технологические процессы современного промышленного производства, критерием оценки которых являются повторяемость результатов, минимизация затрат, экологичность и безопасность.

Согласно всему изложенному, очевидна важность рассмотрения поверхностного эффекта в индукционных установках повышенной частоты. С одной стороны, этот эффект вреден, если рассматривать увеличение потерь в проводниках тока, коммутирующих дросселя переменного тока, трансформаторах, мощных резисторах, конденсаторах высокочастотной установки. К примеру, корпус силовых конденсаторов высокочастотных установок (свыше 8000 Гц) выполняется не из стали, а из дорогостоящей латуни. С другой стороны, увеличение рабочей частоты и соответственно активного сопротивления нагрузки в закалочных установках ТВЧ ведет к увеличению эффективности действия индуктора. Отметим также, что магнитные параметры всех проводников тока (магнитных и немагнитных) существенно зависят от температуры.

Индукционные вихревые токи изменяют распределение тока в нагреваемой детали. Рабочая частота комплексов индукционного нагрева определяется геометрическими размерами детали и технологией нагрева, при закалке она должна быть выше, чем при сквозном нагреве. С понижением частоты поля глубина проникновения тока, напротив, увеличивается. Индукционная закалка характеризуется большой удельной мощностью, выделяемой при нагреве, но детали значительного размера ограничивают допустимую скорость нагрева. Известно, что теплоперепад для конструкционных сталей не должен превышать величины 100 °С. К сожалению, контролировать эту величину трудно, и нарушения выявляются только на заключительном этапе контроля качества закалки.

Определение полезной мощности, передаваемой детали при нагреве, производится на ос-

нове известных кривых теплоемкости металлов (энтальпии), показанных на рис. 23. По заданной температуре нагрева T (°С) определяется q_0 (кВт × ч/т) — удельный расход электроэнергии. По производительности нагрева Q (кг/ч) рассчитывается полезная мощность, передаваемая детали: $P = q_0 \times Q$ (кВт). Приведем пример расчета требуемой мощности источника питания ТВЧ по теплоемкости нагреваемого металла при пайке пластинок на резцы — 160 кВт × ч/т × 0,1 т/ч = 18 кВт.

Продолжительность одного цикла работы источника питания установки индукционного нагрева может быть длительной (непрерывной) и повторно-кратковременной (периодической) — этот признак, в частности, отличает индукционные комплексы централизованного и местного питания. Важной характеристикой условий работы электротехнического устройства является продолжительность включения (ПВ) относительно величины тепловой постоянной источника питания. Время установления теплового режима критично к нагреву элементов ТПЧ характеризуется сравнительно небольшим значением тепловой постоянной относительно длительности включенного состояния.

Особенности рассматриваемых источников питания — значительные перерывы в работе, связанные с установкой и заменой обрабатываемых деталей. Следовательно, для них характерна малая величина ПВ. Обычно величина ПВ для ТПЧ при периодической закалке не превышает 10–20%.



Рис. 23. Диаграмма удельного расхода электроэнергии при нагреве металлических изделий

Для описанного применения тиристорные источники питания в индукционных нагревательных комплексах успешно заменяют ВЧ-установки с ламповым генератором, прослужившим 25 лет и более. Технические характеристики многих ТПЧ в установках для пайки и закалки устарели, и их эксплуатация становится невыгодной. В настоящее время современные тиристорные индукционные установки решают практически все проблемы технологических процессов пайки и закалки деталей [12–15].

Параметры высокочастотных установок улучшаются, в основном, за счет совершенствования технических характеристик закалочных трансформаторов, что расширяет области их использования. Например, инверторно-индукционные системы с ТПЧ 30 кВт × 22 кГц применяются при закалке ножовочного полотна, изготавливаемого из легированной мар-

ганцем углеродистой стали. Ранее закалка проводилась в соляной ванне, с длительностью технологического цикла свыше 1 часа. Процесс был ручным, грязным и опасным. Теперь закалка производится в проходном индукторе от тиристорного источника питания. Время закалки одного полотна составляет 4–5 с. Применение прогрессивной закалки позволило повысить работоспособность инструмента на 30%. При распиловке стандартного образца ножовочное полотно «работало» 60 мин, а после закалки ТВЧ сохраняет стойкость более 80 мин. Кроме того, полотно сохраняет мягкую сердцевину, чего нельзя достигнуть в соляной ванне.

Автоматизированные комплексы с тиристорными преобразователями частоты эффективно заменяют также электромашинные генераторы равной мощности и одинаковой частоты в высокочастотных установках для индукционного нагрева металлов.

Автор благодарит профессора С. В. Шапиро и инженера И. Ф. Антонова за содействие и консультации по материалам данной статьи.

Выводы

1. Из возможных направлений проектирования источников питания для установок индукционного нагрева, централизованного или индивидуального, для технологий пайки и закалки наибольшее развитие получили установки ТВЧ второго типа.
2. Для диапазона рабочих частот 5–22 кГц в установках ТВЧ для закалки и пайки металлических изделий эффективно применение тиристорных преобразователей повышенной частоты, которые обеспечивают широкий диапазон регулирования

рабочей частоты. Рассмотренная система управления инвертором, основанная на фазовом сдвиге сигналов датчика тока инвертора и датчика нагрузки, стабилизирует коэффициент мощности нагрузки при изменении рабочей частоты тиристорного инвертора.

3. При закалке и пайке, во время технологических перерывов в работе тиристорных установок с нерегулируемым источником питания, вызванных, например, заменой изделия, целесообразно снижать частоту управления или выключать инвертор. ■

Литература

1. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
3. 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.
4. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
5. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.

6. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.
7. Головин Г. И. Пионер высокочастотной техники. (Жизнь и деятельность В. П. Володина). М.: Связь, 1970.
8. Зинин Ю. М., Лобанов А. В. Система управления инверторно-индукционной установкой // Датчики и системы. 2008. № 5 (108).
9. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
10. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
11. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
12. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
13. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
14. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью // Силовая электроника. 2008. № 1.
15. www.power-e.ru