

Характеристики и параметры источников питания

для эффективного индукционного нагрева

Многообразие технологий индукционного нагрева определяет необходимость использования большого количества различных комбинаций источников питания, способов согласования с нагрузкой и мониторинга оборудования. В этой статье анализируются различные типы источников питания, используемых для установок индукционного нагрева.

**Дон Л. Лавлесс,
Рэй Л. Кук,
доктор Валерий И. Руднев**

**Перевод:
Юрий Болотовский**

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы

g_thanazly@mail.ru

Существуют оптимальные конструкции индукторов для каждой технологической операции индукционного нагрева. Кроме того, каждой технологической операции лучше всего соответствует конкретный тип источника питания. Рабочие характеристики источников питания должны быть согласованы с требованиями, предъявляемыми индуктором для получения желаемого режима нагрева. В статье дано описание особенностей различных источников питания, которое поможет разработчикам при выборе наилучшего типа источника для конкретной технологической операции индукционного нагрева.

Выбор источников питания для индукционного нагрева в зависимости от принципов их функционирования

Источники питания для индукционного нагрева являются преобразователями частоты, которые трансформируют напряжение питающей трехфазной сети со стандартной частотой в однофазное напряжение (или ток) с частотой, необходимой для выполнения конкретной технологической операции индукционного нагрева. Хотя для их обозначения часто применяют термины «конвертор», «инвертор», «генератор», как правило, источники питания представ-

ляют собой комбинацию этих устройств. Конверторная часть источника питания преобразует переменное сетевое напряжение (ток) в постоянное напряжение (ток), а инверторная или генераторная часть преобразует постоянное напряжение (ток) в однофазное переменное напряжение (ток) требуемой для индукционного нагрева частоты.

Большое количество типов и моделей источников питания разрабатывается таким образом, чтобы они оптимально соответствовали практически бесконечному многообразию потребностей, возникающих при индукционном нагреве. Специфика применения индукционного нагрева в каждом конкретном случае определяет частоту, мощность и другие параметры или добротность. График областей типичного применения индукционного нагрева в зависимости от частоты и требуемой мощности приведен на рис. 1.

Частота является очень важным параметром индукционного нагрева, так как она напрямую определяет глубину проникновения тока в заготовку и, как следствие, глубину и геометрию нагреваемого слоя. Таким образом, при проектировании элементов источников питания в первую очередь должна быть определена рабочая частота. Компоненты источников питания должны быть спроектированы для функционирования с соответствующими ограничениями, обеспечивающими высокую надежность их работы на требуемой частоте.

Инверторная схема, которая преобразует постоянный ток в переменный, построена на полупроводниковых ключевых элементах, таких как тиристоры и транзисторы. Для больших мощностей и низких частот чаще всего используются мощные тиристоры. Для низких мощностей и частот выше 25 кГц используются транзисторы, поскольку они могут переключаться с высокими скоростями и малыми потерями.

Генераторы на электронных лампах были широко распространены в течение многих лет в устройствах, работающих на частотах выше 300 кГц. Однако лампы генераторы имеют низкий коэффициент полезного действия (от 55 до 60%; у транзисторных инверторов КПД составляет 85–93%). Электронные лам-

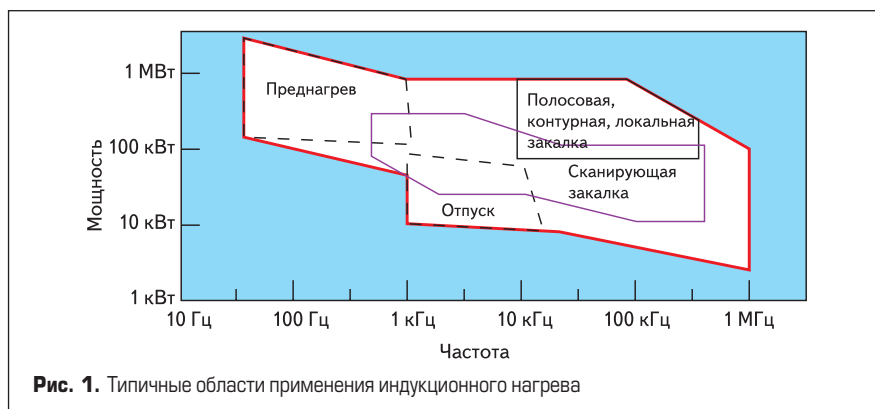


Рис. 1. Типичные области применения индукционного нагрева

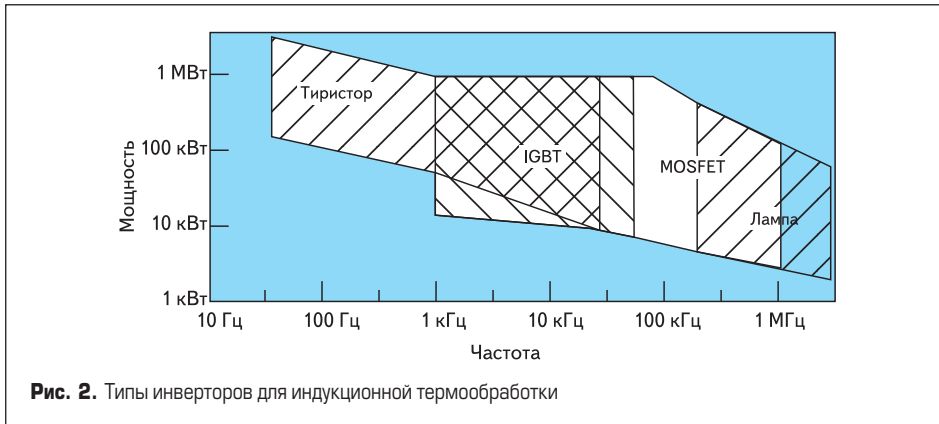


Рис. 2. Типы инверторов для индукционной термообработки

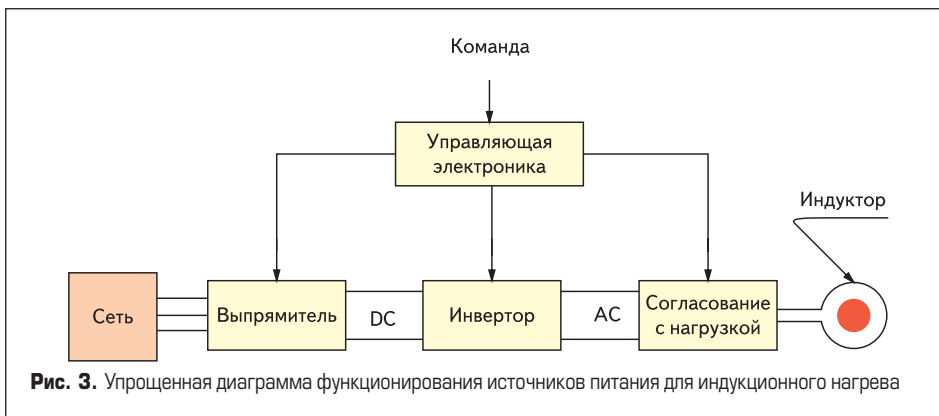


Рис. 3. Упрощенная диаграмма функционирования источников питания для индукционного нагрева

пы характеризуются ограниченным сроком работы (обычно от 2000 до 4000 часов) и являются дорогостоящими элементами генератора. Высокие рабочие напряжения (около 10 000 В) требуют для эксплуатации ламп повышенных мер безопасности (характерным для работы транзисторов в инверторах является напряжение 1000 В или менее). Эта отрицательная особенность вакуумных ламп привела к резкому увеличению использования транзисторных источников питания для индукционного нагрева на частотах менее 1 МГц.

На рис. 2 показаны в графической форме зоны использования тиристорных, транзисторных и электронных ламп в зависимости от различных комбинаций мощности и частоты. Как видно из рисунка, существуют зоны, в которых может использоваться несколько типов ключевых элементов.

Мощность, необходимая для конкретного процесса индукционного нагрева, зависит от объема нагреваемого металла, степени нагрева и эффективности процесса. Небольшие области, нагреваемые на малую глубину, могут потребовать малой мощности (1–2 кВт), в то время как для нагрева быстро перемещающейся в индукторе стальной полосы до температуры выше точки Кюри может потребоваться мощность, исчисляемая мегаваттами.

Геометрия заготовки и индуктора, а также электрические свойства нагреваемого материала определяют напряжение, ток и коэффициент мощности индуктора. Определять эти параметры необходимо для согласования выхода источника питания с индуктором. Большинство источников питания системы индукционного нагрева соответствуют диапазону параметров применяемых инверторов.

Производственные площади, конструктивные особенности оборудования и его расположение являются важными факторами, определяющими требования к установкам индукционного нагрева. Например, в высокоавтоматизированных установках с несколькими постами для заправки и отпуска заготовок большим преимуществом обладает компактная блочная конструкция транзисторного источника питания, содержащая трансформатор для согласования с нагрузкой и компенсирующие конденсаторы. С другой стороны, для установок, требующих большого расстояния между источником питания и индуктором, нагревательная станция или блок согласования с нагрузкой должны быть отделены от преобразовательной части источника питания и расположены в нагрузочном посту в непосредственной близости от индуктора.

Понимание принципов функционирования различных схем источников питания, используемых для индукционного нагрева, необходимо при выборе наилучшей схемы для конкретного технологического процесса или оценки пригодности ее использования в конкретном процессе. Упрощенная диаграмма, охватывающая почти все виды источников питания, приведена на рис. 3. На вход обычно подается трехфазное напряжение от 220 до 575 В частотой 50 (60) Гц. Первый блок называется конвертером переменного тока в постоянный или выпрямителем. Этот блок может обеспечивать фиксированное постоянное напряжение, регулируемое постоянное напряжение или регулируемый постоянный ток. Второй блок называется инвертором или генератором и предназначен для преобразования постоянного тока в однофазный переменный ток. Третий блок называется блоком согласования и предназначен для приведения напряжения на выходе инвертора к величине, необходимой для эффективного функционирования индуктора. Блок управления сравнивает сигнал с выхода системы с управляющим сигналом и регулирует выходное напряжение выпрямителя, фазу или частоту инвертора, тем самым обеспечивая подходящий режим нагрева.

Конфигурации и типы инверторов

Наиболее распространенной конфигурацией инвертора является мостовая преобразовательная структура (рис. 4). Ее часто называют мост «Н», так как она состоит из четырех плеч, которые содержат ключевые элементы (тиристоры или транзисторы). Выход располагается на перекладине буквы «Н» (диагональ моста), так что при разомкнутых ключах S1 и S2 ток течет справа налево. Когда ключи S1 и S2 замкнуты, а ключи S3 и S4 разомкнуты, ток течет в противоположном направлении слева направо. Поскольку этот процесс повторяется, происходит генерирование переменного тока, частота которого определяется скоростью переключения вентилялей.

Так называемый полумостовой инвертор состоит только из двух ключевых элементов и двух фильтрующих конденсаторов. Выходная цепь подключается между общими точками ключевых элементов и конденсаторов, как это показано на рис. 5. Поочередная коммутация ключевых элементов обеспечивает протекание через выходную цепь переменного тока. Подключение источника постоянного тока (DC) ясно из рис. 5. Эта конфигурация используется вместо мостовой, когда требуется пониженное выходное напряжение или выходная мощность.

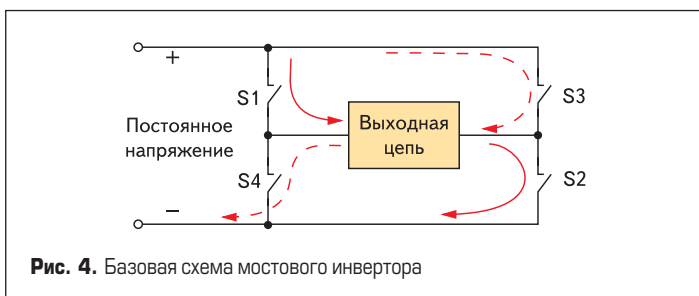


Рис. 4. Базовая схема мостового инвертора

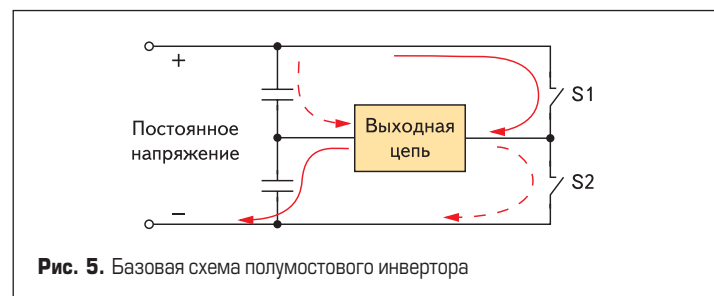


Рис. 5. Базовая схема полумостового инвертора

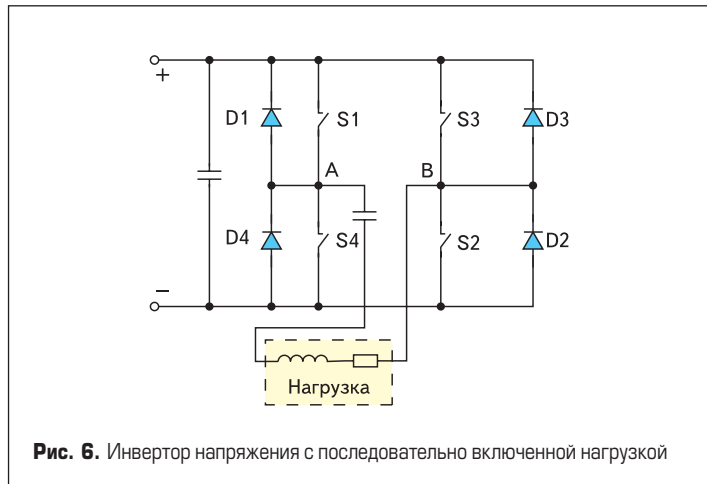


Рис. 6. Инвертор напряжения с последовательно включенной нагрузкой

Вообще говоря, существует два основных типа инверторов: инвертор тока и инвертор напряжения.

Инвертор напряжения с простой последовательной нагрузкой

Инвертор напряжения характеризуется использованием фильтрующей емкости на входе инвертора и последовательно соединенной выходной цепью (как показано на упрощенной принципиальной схеме рис. 6). К инверторам напряжения относится, например, источник питания Inductoheat Starpower 6 [1], используемый при индукционном нагреве для генерирования рабочих частот от 90 Гц до 1 МГц и выше. Тиристоры могут использоваться для коммутации тока на частотах ниже 10 кГц. На частотах от 10 до 50 кГц обычно используются IGBT-транзисторы. На частотах выше 50 кГц из-за высокой скорости коммутации предпочтительны транзисторы MOSFET.

Транзисторам не требуется время на восстановление запирающих свойств, и поэтому они могут работать на резонансной частоте. Работа при резонансе означает, что коэффициент мощности выходной цепи равен единице и максимальная мощность передается из цепи постоянного напряжения (тока) в нагрузку. Для управления мощностью в этом случае применяется регулируемый источник постоянного напряжения. Семейство источников питания для индукционного нагрева LSS, выпускаемых фирмой Lepel Corp., является примером такого типа источников питания и работает на резонансе с управлением мощности за счет регулирования по входной цепи постоянного напряжения (тока), которое осуществляется специальным регулятором [2].

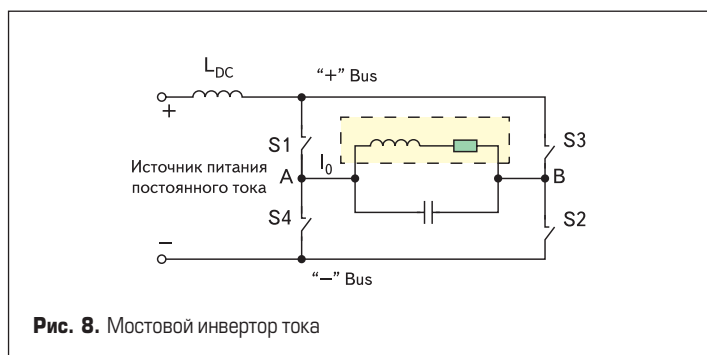


Рис. 8. Мостовой инвертор тока

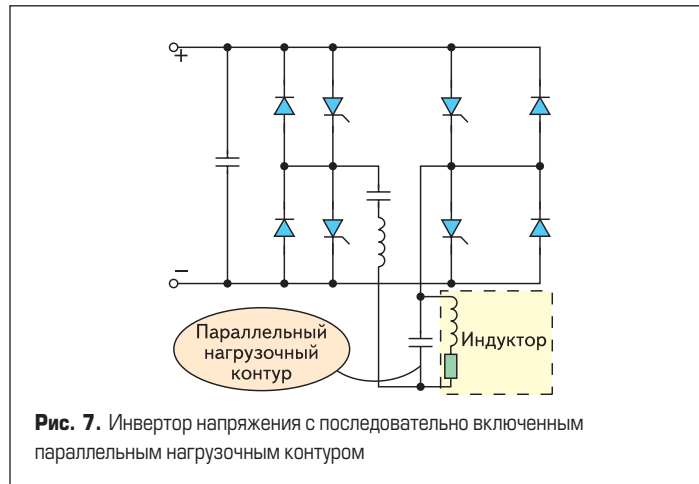


Рис. 7. Инвертор напряжения с последовательно включенным параллельным нагрузочным контуром

Инвертор напряжения с последовательно включенным параллельным нагрузочным контуром

Популярной разновидностью инвертора напряжения для индукционного нагрева является инвертор с коммутирующими индуктивностью и емкостью, включенными в диагональ моста. Нагрузочный параллельный контур при этом включается последовательно с коммутирующими элементами (рис. 7). Параметры коммутирующих индуктивности и емкости выбираются так, чтобы резонансная частота была выше частоты, на которой инвертор с нагрузкой, настроенные на эту частоту, работали с минимально допустимым током моста, позволяющим выделять на нагрузке необходимую мощность.

Очень важной особенностью этого типа инверторов является то, что последовательная цепь коммутирующих элементов отделяет мост от нагрузки. Такое построение схемы защищает инвертор от аварий в нагрузочной цепи, вызванных короткими замыканиями или дугообразованием, а также неправильным согласованием инвертора с нагрузкой, что делает эту схему одной из самых устойчивых среди тиристорных источников питания, применяемых для индукционного нагрева. Вторая особенность этой схемы реализуется при настройке коммутирующих элементов на третью гармонику. Источник питания в этом случае способен обеспечивать выделение полной мощности в параллельном нагрузочном контуре либо на основной частоте, либо на ее третьей гармонике.

Схемы инвертора напряжения с коммутирующими индуктивностью и емкостью, включенными в диагональ моста, используются,

например, в семействе источников питания типа Inductoheat Statipower 5 [3] и выполняются на тиристорах в качестве силовых ключей и нерегулируемом источнике питания постоянного напряжения. Регулирование выходной мощности достигается изменением рабочей частоты инвертора по отношению к резонансной частоте параллельного нагрузочного контура.

Инверторы тока

Инверторы тока характеризуются использованием источника регулируемого напряжения с последовательно включенным дросселем на входе. Этот дроссель обычно обладает большой индуктивностью и присоединяется на вход инверторного моста, на выходе которого включен параллельный резонансный нагрузочный контур (упрощенная силовая принципиальная схема приведена на рис. 8). Выпускается большое количество моделей инверторов тока, которые обеспечивают работу индукционных установок в диапазоне частот от 90 Гц до 1 МГц. Тиристоры обычно используются на частотах до 10 кГц, а транзисторы — на более высоких частотах.

В случае, когда в качестве силовых ключей используются тиристоры, инвертор тока должен работать на частоте выше той, что является резонансной для параллельного нагрузочного контура. Семейства источников питания для индукционного нагрева TG и TC производства Radyne Ltd. выполнены по этой схеме и эксплуатируются с 1970 года [4].

Для инверторов тока, работающих на частотах выше 10 кГц, благодаря своим низким потерям при переключениях в качестве силовых ключей используются транзисторы, которым не требуется время для восстанов-

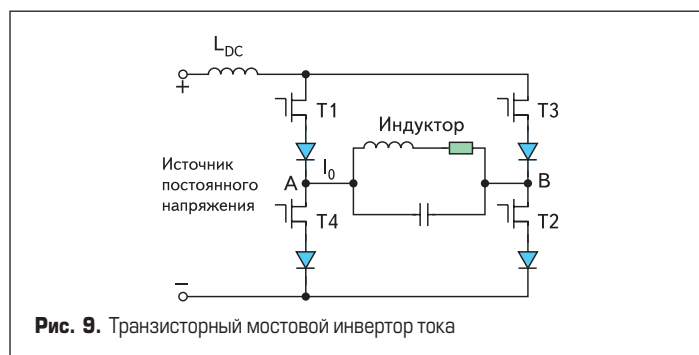
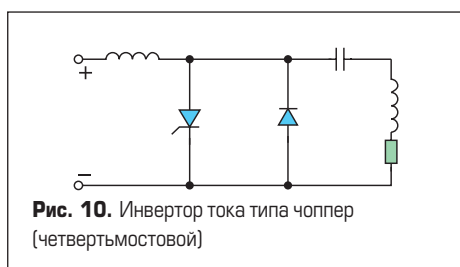


Рис. 9. Транзисторный мостовой инвертор тока

ления запирающих свойств. В этом случае инвертор может работать на частоте резонанса параллельного нагрузочного колебательного контура (рис. 9). Когда транзисторы Т1 и Т2 открыты, а Т3 и Т4 закрыты, входное напряжение равно напряжению на нагрузке, а напряжение на транзисторах равно нулю. Переключения при нулевом напряжении минимизируют коммутационные потери в транзисторах и, следовательно, позволяют поднять частоту инвертирования. При совпадении частоты инвертирования с частотой собственных колебаний параллельного нагрузочного контура (частотное регулирование мощности не применяется) выходная мощность должна изменяться регулированием входного тока инвертора. Это достигается использованием одного из типов регулируемых источников постоянного напряжения, описанных ранее. Например, один из таких источников Statitron 3, который производится фирмой Inducto Elphiac (Бельгия), реализован на MOSFET-транзисторах, которые устанавливаются в инверторе тока. Источник обеспечивает работу на частотах от 15 до 600 кГц при мощности до 1 МВт [5].



В инверторах другого типа, которые широко используются для индукционного нагрева на частотах от 10 до 30 кГц, применяется только один тиристор (или несколько включенных последовательно). Такой инвертор называется чоппером или четвертьмостом (в России также применяется термин «ячейковый инвертор» — *прим. переводчиков*). На рис. 10 показана упрощенная силовая схема чоппера. Эта схема относится к инверторам тока, так как на ее входе последовательно с источником питания устанавливается дроссель большой величины. В отличие от традиционных мостовых схем, чоппер применяется с последовательным подключением выходных нагрузочных цепей. Когда тиристор включен, ток течет от источника постоянного напряжения через дроссель большой величины и через последовательно включенный с нагрузкой компенсирующий конденсатор, перезаряжающийся через индуктор. Первая полуволна протекающего через нагрузку тока формируется во время горения тиристора, вторая полуволна — во время горения диода. Форма результирующего тока нагрузки близка к синусоидальной. Именно частота определяет глубину проникновения вихревых токов в деталь при индукционном нагреве. Изменение рабочей частоты инвертора позволяет регулировать выходную мощность и, следовательно, использовать регулируемый источник постоянного напряжения. Источники питания типа Inductoheat

Uniform 9 и Uniscan, используемые для питания закалочных установок, реализованы именно на этом типе инвертора [6–9].

Экономические аспекты

При рассмотрении пригодности каждого типа источников питания для индукционного нагрева принимаются во внимание начальная стоимость, стоимость эксплуатации или общая эффективность, надежность, ремонтпригодность, гибкость при настройке, потребность в охлаждающей жидкости и электрический КПД.

Начальная стоимость важна, но не является решающим фактором. При выборе типа инвертора необходимо учитывать другие функциональные требования. Вообще говоря, источник питания типа чоппер имеет самую низкую цену. Для мощностей ниже 250 кВт при желании получить наименьшую цену следует выбирать инвертор напряжения с последовательной резонансной нагрузкой. Инвертор тока имеет низкую цену за киловатт при высоких мощностях и низких частотах. Более дорогим обычно является инвертор напряжения с последовательно включенным параллельным нагрузочным контуром. В нем используется наибольшее количество силовых элементов на киловатт выходной мощности, чем в каком бы то ни было другом типе инверторов при соответствующих выходных частотах. Тем не менее, этот инвертор является наиболее устойчивым и гибким в эксплуатации с различными индукционными установками.

Стоимость эксплуатации, которая часто определяется общим КПД, также принимается к рассмотрению. Современные полупроводниковые источники питания для индукционного нагрева, однако, имеют достаточно высокий КПД, сравнимый с КПД машинных генераторов и их ламповых предшественников. Большинство источников питания имеют КПД от 85% до 93% при работе на номинальной выходной мощности. КПД, который рассматривается здесь, определяется как мощность на выходных шинах преобразователя, отнесенная к входной мощности и, следовательно, в ряде случаев, не включает мощность, теряемую в выходном согласующем трансформаторе и компенсирующих емкостях.

Измерения и уточнения КПД могут быть произведены многими путями и с различными результатами. В одном из предельных случаев при расчете КПД учитываются только потери в инверторе. В другом предельном случае рассматривается отношение выходной мощности, определяемой по теплу, выделяемому в нагрузку, к входной мощности всей системы, потребляемой от сети. Этот метод включает потери в индукторе, которые могут быть относительно велики, что в результате приводит к низкому расчетному КПД системы. Поэтому важно знать, какая часть системы индукционного нагрева рассматривается при определении КПД, проводимом при сравнении различных типов источников питания.

Надежность и ремонтпригодность

Надежность, ремонтпригодность и устойчивость к возмущениям на входе и выходе источников питания в большей степени зависят от силовых компонентов и системы управления, чем от типа применяемого источника питания. Без проведения детального анализа источника питания очень сложно определить его надежность. Без этого анализа наилучшие рекомендации по надежности оборудования сводятся к оценке репутации производителя, к оценке количества лет, в течение которых производитель выпускает оборудование, и количеству эксплуатируемого оборудования. На ремонтпригодность оказывают влияние многие особенности конструкции источников питания, включая уровень самодиагностики, доступность элементов для осмотра и измерения и простоту замены и перемещения элементов и блоков. Когда силовые элементы, их блоки и панели управления заменяются без дополнительной регулировки или модификации, поиск неисправностей и ремонт могут быть легко и быстро осуществлены даже обслуживающим персоналом с минимальным уровнем квалификации. Система самодиагностики может оказать значительную помощь при обнаружении локальных повреждений в источниках питания. Однако включение в схему системы диагностики, которая также может быть повреждена, отрицательно влияет на надежность схемы в целом, и поэтому необходимо, чтобы уровень диагностики дефектов соответствовал надежности источников питания. Очень надежная конструкция источника питания должна содержать только основные аварийные индикаторы, в то время как менее надежные конструкции должны быть оборудованы более серьезной системой диагностики для ускорения процесса ремонта — даже несмотря на то, что это приводит к уменьшению общей надежности.

Гибкость или способность источника питания функционировать при изменении параметров нагрузки или при других возмущениях в некоторых случаях тоже является важной характеристикой (рис. 11). Если установка для



Рис. 11. Многоцелевой источник питания для индукционного нагрева Unipower UP-12 с частотой 30 кГц и мощностью от 25 до 100 кВт



Рис. 12. Установка Inductoheat для закалки стыка колеса, обеспечивающая постоянную скорость вращения

индукционного нагрева является многоцелевой, как, например, сканирующая закалочная установка, используемая на производстве, способность согласования с большим количеством индукторов на более чем одной частоте зачастую является привлекательной, а иногда даже необходимой. В этом случае рекомендуется двухчастотный источник пи-

тания с универсальной системой согласования, включающей как трансформатор с отпайками, так и батарею конденсаторов, способные функционировать на двух частотах. Относительно новые транзисторные источники питания с внешним переключением отпаек трансформатора также обладают хорошими характеристиками при достаточно

малых размерах, небольшом весе и минимальной потребности в охлаждающей воде, что позволяет легко их перемещать и использовать в различных установках индукционного нагрева.

На рис.12. показана установка Inductoheat для закалки стыка колеса, обеспечивающая постоянную скорость вращения. Система содержит два 300-киловаттных 25-килогерцовых источника питания типа Statipower для закалки дорожки, два 300-киловаттных 25-килогерцовых блока для локальной закалки оснований и одну 50-киловаттную 10-килогерцовую установку для отжига резьбы.

К сожалению, в рамках одной журнальной статьи нельзя охватить все многообразие особенностей индукционного нагрева. Существует большое количество уникальных процессов, которые формируют специфические требования.

Литература

1. Inductoheat Bulletin: Statipower 6. 1991.
2. General Presentation of Activity of Lepel Corp. 1990.
3. Inductoheat Bulletin: Statipower 5, 1991.
4. General Presentation of Activity of Radyne Ltd. UK. 1990.
5. General Presentation of Activity of Elphiac. Belgium. 1990.
6. Inductoheat Bulletin: Unipower 9. 1991.
7. Inductoheat Bulletin: Uniscan-I. 1991.
8. Inductoheat Bulletin: Uniscan-II. 1992.
9. Inductoheat Bulletin: Uniscan-IV. 1992.
10. Inductoheat Bulletin: Unipower 12. 1993.