

УДК 621.314

ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Лебедев А.В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

Тел. +7 (834-2) 290608

Аннотация. В статье рассматриваются некоторые особенности выбора источников электропитания для индукционного нагрева

Ключевые слова: индукционный нагрев, источник тока, инвертор, стоимость.

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, такие как напряжение, ток, коэффициент мощности или добротность. 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, строится 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 ламповые генераторы имеют низкий коэффициент полезного действия (от 55 до 60%; у транзисторных инверторов КПД составляет 85-93%). Электронные лампы 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. 1 показаны в графической форме зоны использования тиристоров, транзисторов 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.

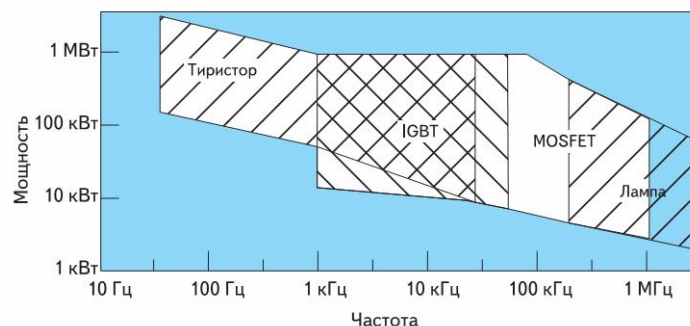


Рис. 1 Типы инверторов для индукционной термообработки.

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.

Упрощенная диаграмма, охватывающая почти все виды источников питания, приведена на рис. 2. 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.

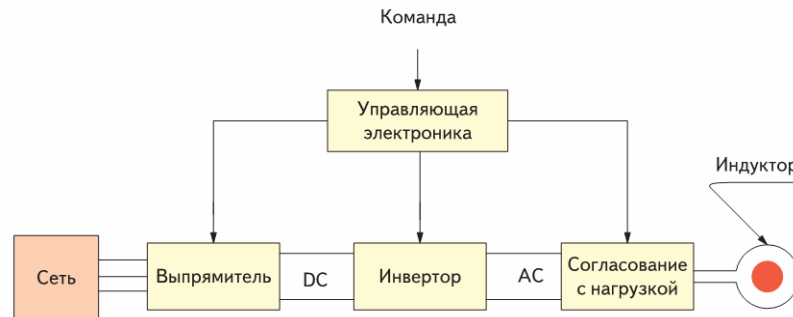


Рис. 2 Упрощенная диаграмма функционирования источников питания для индукционного нагрева

Конфигурации и типы инверторов

Наиболее распространенной конфигурацией инвертора является мостовая преобразовательная структура (рис. 3). 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.

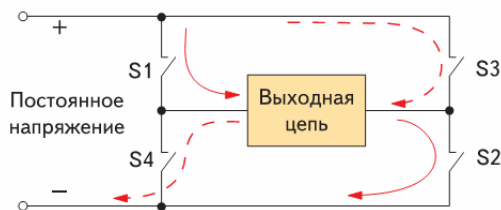


Рис. 3 Базовая схема мостового инвертора.

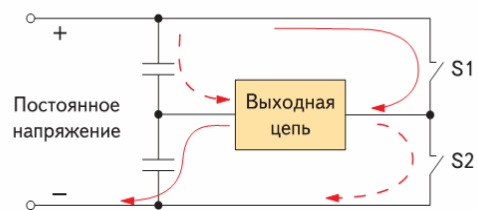


Рис. 4 Базовая схема полумостового инвертора

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. 3. Поочередная коммутация ключевых элементов обеспечивает протекание через выходную цепь переменного тока. Подключение источника постоянного тока (DC) ясно из рис. 4. Эта конфигурация используется вместо мостовой, когда требуется пониженное выходное напряжение или выходная мощность.

Инвертор напряжения характеризуется использованием фильтрующей емкости на входе инвертора и последовательно соединенной выходной цепью (как показано на упрощенной принципиальной схеме рис. 5). 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.

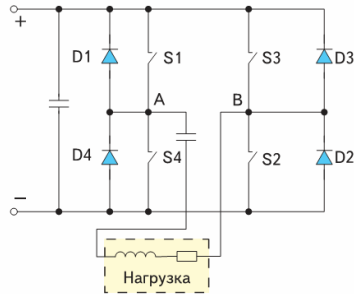


Рис. 5 Инвертор напряжения с последовательно включенной нагрузкой

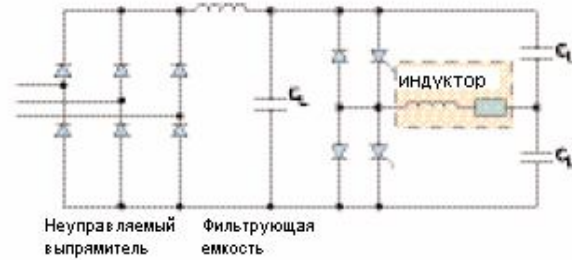


Рис. 6 Тиристорный инвертор напряжения переменной частоты

Для индукционного нагрева больших слябов, полос или болванок обычно требуются низкая частота и высокая мощность. Низкая частота обеспечивает большую глубину проникновения вихревых токов в заготовку. Большая глубина проникновения позволяет уменьшить время цикла нагрева и сделать более интенсивным прогрев сердцевины заготовки, улучшая однородность распределения температур. Тиристоры способны работать как ключи на высоких напряжениях и очень больших токах, но они требуют приложения обратного напряжения для обеспечения требуемого времени восстановления запирающих свойств. Это время восстановления, необходимое для нормальной работы тиристоров, обычно увеличивается для мощных тиристоров, рассчитанных на большие токи, и уменьшается для маломощных тиристоров. Отсюда следует, что чем ниже рабочая частота, тем выше мощность, которая может быть реализована с применением тиристоров.

В низкочастотных инверторах напряжения обычно используются полумостовые инверторные структуры (рис. 6). Тиристоры включаются поочередно, сначала в одном плече моста, потом во втором. Включение тиристоров в определенное время осуществляется за счет системы управления, которая обеспечивает подачу импульсов управления на очередной тиристор, когда ток последовательно включенной нагрузки проходит через ноль. Ток нагрузки после этого протекает через встречно параллельные диоды (рис. 7).

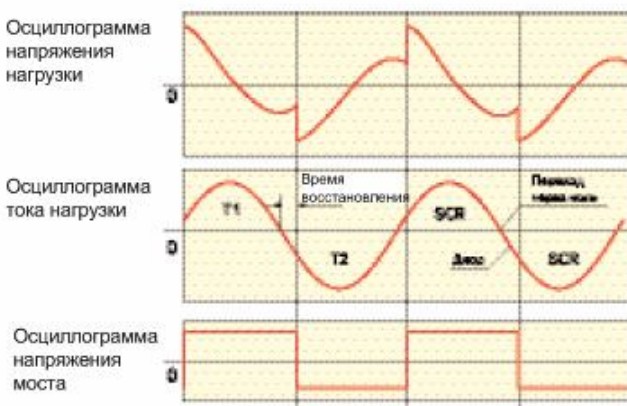


Рис. 7 Осциллограммы напряжений и токов инвертора напряжения на частотах ниже резонансной

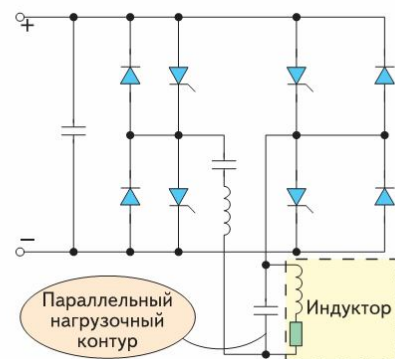


Рис. 8 Инвертор напряжения с последовательно включенным параллельным нагрузочным контуром

Для обеспечения необходимого времени восстановления тиристорный инвертор напряжения всегда работает на частотах ниже резонансной частоты нагрузки. Когда частота коммутации тиристоров много меньше резонансной, полное сопротивление нагрузки велико и выходная мощность мала. Когда частота коммутации становится близкой к резонансной, полное сопротивление нагрузки уменьшается и выходная мощность возрастает. Управление выходной мощностью в этом случае осуществляется за счет изменения частоты работы тиристорного инверторного моста. В данном случае нет необходимости в регулировке выходной мощности по входному напряжению инвертора. Это позволяет использовать неуправляемый мостовой выпрямитель, что, в свою очередь, обеспечивает высокий входной косинус (до 0,95) инвертора при питании от сети во всем диапазоне изменения выходных мощностей инвертора. КПД источников питания этого типа более 90%, а для низкочастотных мощных источников питания – до 95%.

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. 8). 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 характеризуются использованием источника регулируемого

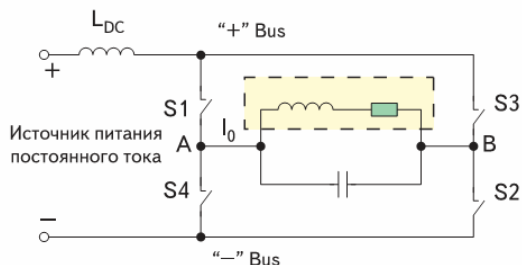


Рис. 9 Мостовой инвертор тока

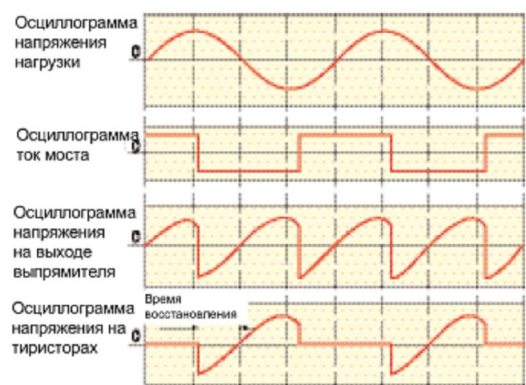


Рис. 10 Осциллограммы токов и напряжений инвертора тока на частотах выше резонансной

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. 9). 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].

Проведя сопоставление с рассмотренным выше инвертором напряжения, подчеркнем, что в инверторе тока напряжение на мосту имеет синусоидальную форму, а ток через мост прямоугольную. Напряжение на выходе выпрямителя после фильтрации дросселем большой величины L_{DC} (рис. 10) напоминает выходное напряжение неуправляемого выпрямителя. Это напряжение отрицательно от момента времени коммутации тиристора до момента, пока напряжение на нагрузке не станет равным 0. Рассматриваемое время должно быть достаточно большим, для того чтобы обеспечить необходимое время восстановления запирающих свойств тиристора. Напряжения на тиристорах показаны на рис. 10; время, когда эти напряжения отрицательны, предоставляется тиристорам для восстановления запирающих свойств. Регулировка мощности осуществляется фазным управлением выпрямителя для получения изменяемого постоянного напряжения на входе инверторного моста. Частота коммутаций тиристоров инвертора также делается переменной, что позволяет осуществлять частотное регулирование выходной мощности наряду с регулированием по входному напряжению преобразовательного моста. Это согласует требуемый высокий коэффициент мощности, потребляемой от сети, с уровнем мощности, который при регулировании всегда меньше, чем номинальная выходная мощность. Инвертор тока обычно непосредственно подключается к параллельному нагрузочному контуру без выходного трансформатора. Это делает инверторы такого типа особенно подходящими для работы на высокочастотную нагрузку.

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 восстановления запирающих свойств. В этом случае инвертор может работать на частоте резонанса параллельного нагрузочного колебательного контура (рис. 11). Когда транзисторы T1 и T2 открыты, а T3 и T4 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].

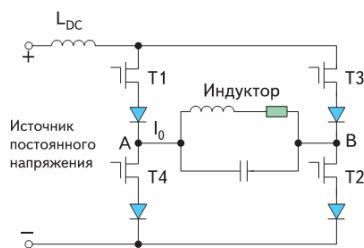


Рис. 11 Транзисторный мостовой инвертор тока

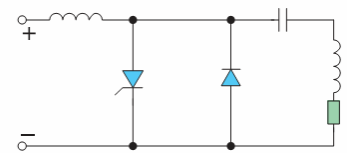


Рис. 12 Инвертор тока типа чоппер

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. На рис. 12 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 нерегулируемый источник постоянного напряжения.

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 нагрузке, 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.

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. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. / R. W. Erickson, D. Maksimovic / University of Colorado, Boulder / Publisher: Kluwer Academic Publishers, 2001
7. Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева/ Бондаренко Д.П., Дзлиев СВ., Патанов Д.А.// Изв. ТЭТУ. – 1996. – Вып. 497. – С.98-110.
8. Общие проблемы снижения коммутационных потерь в инверторах напряжения / Д.А. Патанов // Журнал "Схемотехника" №7, 2001г.
9. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications /11. Kifune, Y. Hatanaka, M. Nakaoka // IEE Proc. – Elcctr Power Appl. Vol. 151, No 1, January 2004. – p. 19.