

Обзор полупроводниковых источников питания

для индукционного нагрева

В статье обсуждаются особенности наиболее популярных типов полупроводниковых источников питания, используемых для индукционного нагрева при операциях термообработки, включая прокат, ковку и экструзионную обработку.

Дон Л. Лавлесс
(Don L. Loveless)

Перевод
Юрий Болотовский
к. т. н.

eltech@ufacom.ru
Георгий Таназлы, к. т. н.

g_thanazly@mail.ru

Индукционный нагрев широко используется в различных технологиях обработки металлов — от пайки и плавки до термообработки и повторного нагрева.

Через индуктор при индукционном нагреве протекает переменный ток, создающий электромагнитное поле. Это поле наводит вихревые токи в заготовке, которая может представлять собой болванку, полосу, стержень, сляб или ленту. Вихревые токи вызывают нагрев в соответствии с эффектом Джоуля (I^2R).

Следовательно, наличие эффективного, надежного источника переменного тока или напряжения является важным фактором при подборе оборудования для любой технологии индукционного нагрева.

Достаточно подробный анализ современных полупроводниковых источников питания был произведен в [1], [4 — *добавлено при переводе*]. Индукционный нагрев и повторный нагрев перед прокатом, ковкой или экструзионной обработкой, однако, требует от источника питания характеристик, специфичных для этих технологических процессов. Это приводит к необходимости предъявления специальных требований при проектировании источников питания для индукционного нагрева.

Нагрузка при индукционном нагреве

Как элемент электрической цепи, любой индуктор может быть представлен как комбинация резистора и индуктивности. Величины сопротивления резистивного элемента и индуктивности индуктивного элемента индуктора являются нелинейными функциями различных параметров, таких как взаимное расположение индуктора и заготовки, свойств металла и частоты и т. д.

Электрическое сопротивление и магнитная проницаемость металлов являются нелинейными функциями температуры. Следовательно, во время цикла индукционного нагрева происходит изменение электрического сопротивления и магнитной проницаемости металла.

Кроме этого, при современной термообработке металлов часто требуется нагревать заготовки различных размеров в одном и том же индукторе. Изменения в производительности и свойствах металла, а также то, каким образом эти два процесса накла-

дываются друг на друга, тоже являются причинами изменения активного и реактивного сопротивлений индуктора. Это влияет на настройку и параметры нагрузки источника питания, что важно для определения поведения всех параметров индуктора для гарантированного обеспечения необходимой мощности и осуществления настроек индукционной системы для различных нагрузок и этапов нагрева.

Основные сведения об источниках питания

Источники питания для индукционного нагрева являются преобразователями частоты, которые запитываются от промышленной сети и обеспечивают на однофазном выходе частоту, необходимую для индукционного технологического процесса. Чаще всего источник питания является комбинацией выпрямителя и инвертора. Выпрямительная часть преобразует сетевой ток в постоянный, а инверторная осуществляет преобразование постоянного тока в однофазный переменный ток требуемой частоты.

Большое количество различных типов и моделей источников питания удовлетворяет требованиям индукционного нагрева при практически бесконечном многообразии его видов. Как говорилось выше, специальные случаи применения нагрева (прокат, ковка, экструзионная обработка и т. д.) определяют частоту, мощность и другие параметры, включающие напряжение на индукторе, ток, коэффициент мощности ($\cos \phi$) или добротность Q . Типичные технологии индукционного нагрева для обработки металла приведены на рис. 1 в координатах «мощность—частота».

Частота является очень важным параметром при индукционном нагреве, потому что она, прежде всего, определяет глубину проникновения тока и, следовательно, глубину нагрева. Частота также является важным параметром при проектировании источников питания для индукционного нагрева, так как силовые компоненты этих источников выбираются в зависимости от частоты, на которой они функционируют. Силовые цепи проектируются таким образом, чтобы обеспечить гарантированную работу их элементов на предельных для данного типа источников питания частотах.

Инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный, выполняется на полупроводниковых приборах, таких как тиристор или транзистор. Для больших мощностей и высоких частот обычно используются мощные тиристоры. Для низких мощностей и частот около 10 кГц применяют транзисторы, что определяется их способностью обеспечивать быструю коммутацию с малыми потерями. На рис. 2 в тех же координатах, что и на рис. 1, показаны различные сочетания мощности и частоты, которым наилучшим образом соответствуют тиристорные и транзисторные источники питания. Имеются большие области перекрытия, где могут использоваться оба типа приборов.

Мощность, требуемая для заданной индукционной технологии, зависит от производительности, диапазона температур нагрева, геометрии индукционной нагревательной системы и эффективности процессов нагрева. Нагрев концов стержня может требовать мощности всего 10 или 20 кВт [2]. Высокопроизводительный нагрев крупногабаритных заготовок, болванок или слябов производится на мощностях порядка мегаватт [3].

Структура источников питания

Упрощенная блок-схема, охватывающая подавляющее большинство источников питания для индукционного нагрева, приведена на рис. 3. Входным является трехфазное напряжение частотой 50 или 60 Гц, 220–575 В. Первый блок представляет собой выпрямитель. Он обеспечивает получение фиксиро-

ванного постоянного напряжения, изменяемого постоянного напряжения или изменяемого постоянного тока.

Второй блок представляет собой инвертор, который преобразует постоянный ток в однофазный переменный ток.

Третий блок является согласующим элементом, необходимым для преобразования выходных параметров источника питания до величин, необходимых для нормального функционирования индуктора.

Система управления сравнивает выходной сигнал источника питания с сигналом управляющего воздействия. Разница этих сигналов соответствующим образом обрабатывается для обеспечения необходимых значений выходного напряжения выпрямителя, частоты и/или фазы инвертора.

Два основных типа инверторов, используемых для подавляющего большинства технологических операций индукционного нагрева, представляют собой инвертор напряжения или инвертор тока с параллельным резонансным нагрузочным контуром.

Тиристорный инвертор напряжения

В инверторе напряжения обычно используются фильтровый конденсатор на входе и последовательно включенная нагрузочная цепь (упрощенная схема приведена на рис. 4). На частотах ниже 10 кГц обычно используются тиристорные инверторы. На частотах выше 10 кГц в качестве ключевых элементов используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) или MOSFET.

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. 4). 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 очередную тиристор, когда ток последовательно включенной нагрузки проходит через ноль. Ток нагрузки после этого протекает через встречно параллельные диоды (см. осциллограмму 2 на рис. 5).

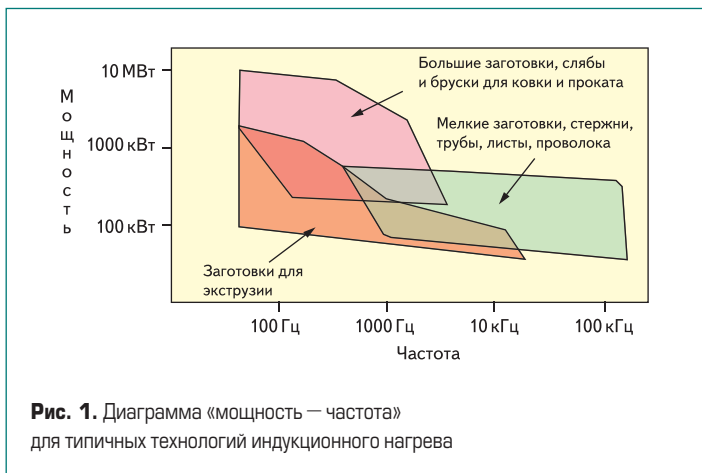


Рис. 1. Диаграмма «мощность – частота» для типичных технологий индукционного нагрева

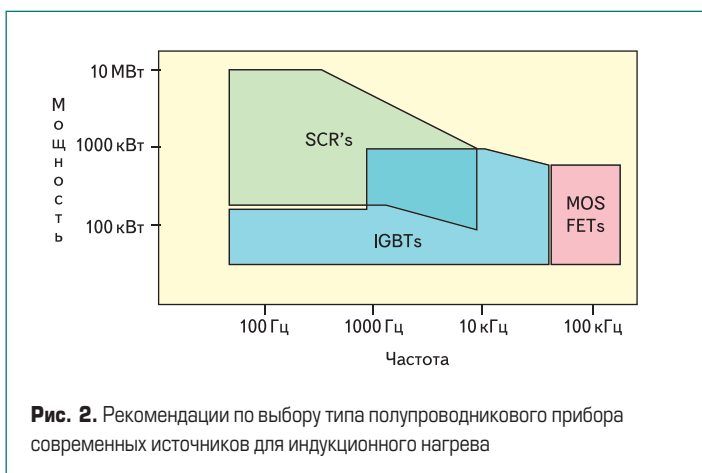


Рис. 2. Рекомендации по выбору типа полупроводникового прибора современных источников для индукционного нагрева

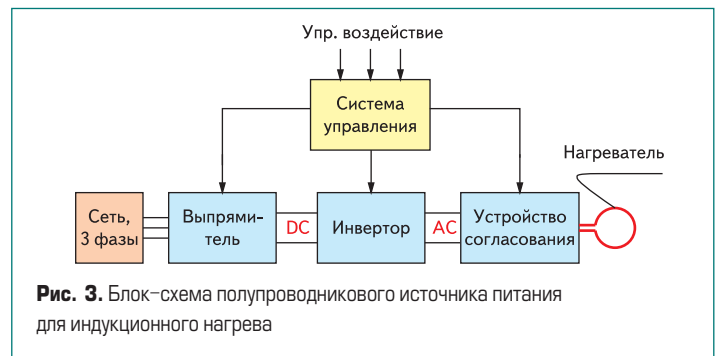


Рис. 3. Блок-схема полупроводникового источника питания для индукционного нагрева

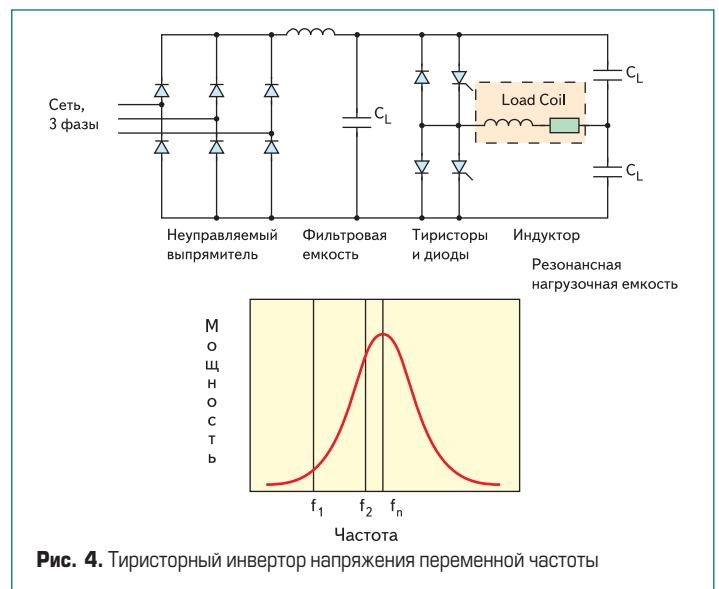


Рис. 4. Тиристорный инвертор напряжения переменной частоты

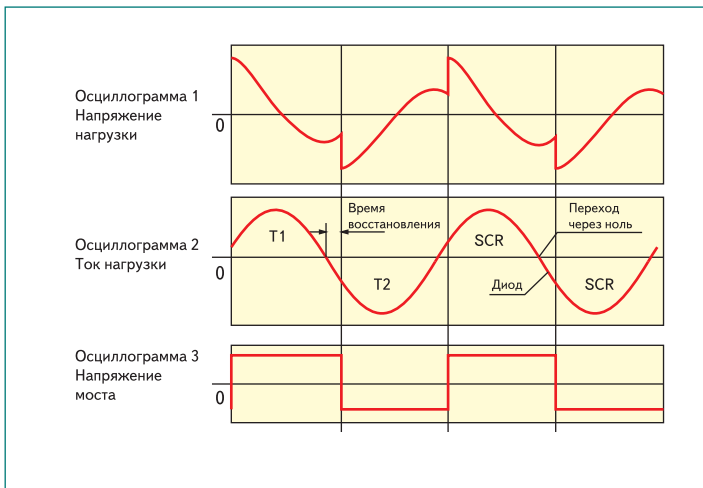


Рис. 5. Осциллограммы напряжений и токов инвертора напряжения на частотах ниже резонансной

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. Это показано на графике зависимости мощности от частоты на рис. 4.

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 ϕ (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%.

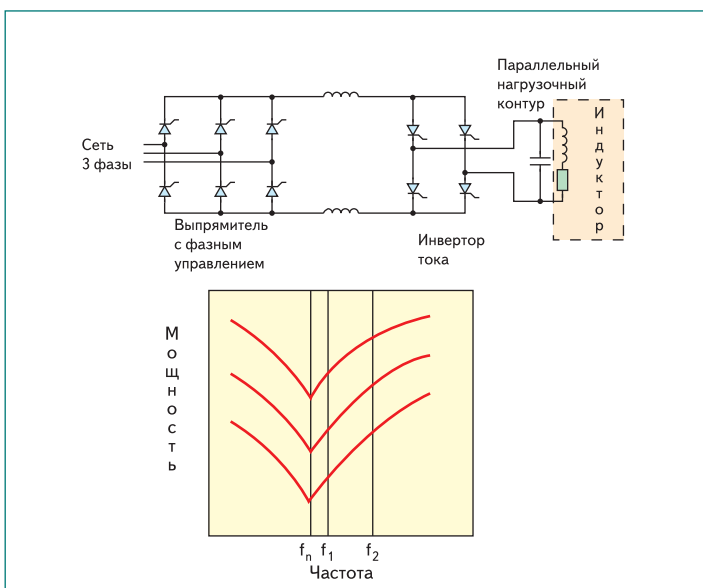


Рис. 7. Источник питания на базе тиристорного инвертора тока

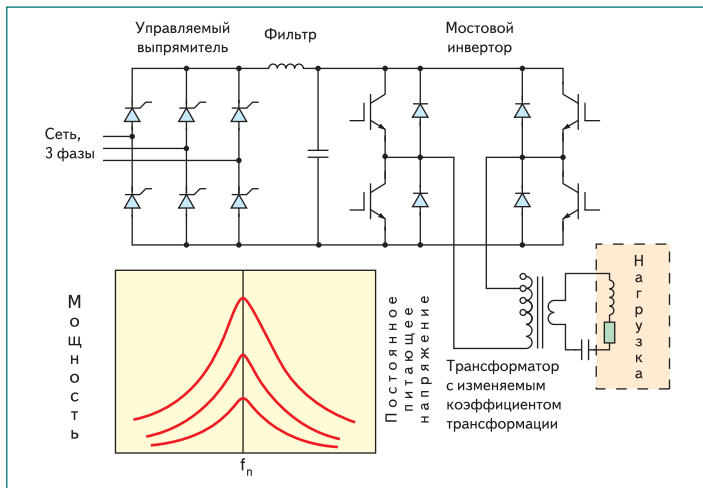


Рис. 6. Источник питания на базе транзисторного инвертора напряжения

Транзисторные инверторы напряжения

Транзисторы не требуют для своего функционирования восстановления запирающих свойств, и, следовательно, они могут эффективно работать на частотах выше резонансной частоты нагрузки. Упрощенная схема мостового транзисторного инвертора с выходным трансформатором приведена на рис. 6.

Работает этот инвертор всегда строго на резонансной частоте последовательной нагрузочной цепи, при этом диоды вообще не горят или время их горения очень мало, а транзисторы коммутируются, когда ток через них близок к нулю. Этот режим работы обеспечивает минимальные коммутационные потери и максимальный КПД инвертора.

Работа на резонансной частоте означает, что коэффициент мощности нагрузки всегда равен 1 и при этом от источника постоянного входного напряжения в нагрузку передается максимальная мощность. Для регулировки выходной мощности в этом случае необходимо использовать регулировку входного напряжения инвертора. Это демонстрируется на гра-

фике зависимости выходной мощности от частоты (см. рис. 6) при постоянной резонансной рабочей частоте.

Управляемый выпрямитель, как это показано на рис. 6, обычно используется для преобразования переменного сетевого напряжения в изменяемое постоянное напряжение. Такие источники питания используются, когда требуется выходная мощность от 400 кВт до 1,5 МВт.

Для мощностей ниже 400 кВт управление транзисторными источниками напряжения осуществляется за счет изменения частоты, так же как это делается в тиристорных инверторах напряжения.

Инверторы тока

Инверторы тока отличаются использованием регулируемого источника питания постоянного напряжения, последовательно с которым включаются дроссель большой величины и инверторный мост, имеющий на выходе параллельный резонансный нагрузочный контур, как показано на упрощенной схеме на рис. 7.

Тиристорные инверторы тока при индукционном нагреве обычно используются на час-

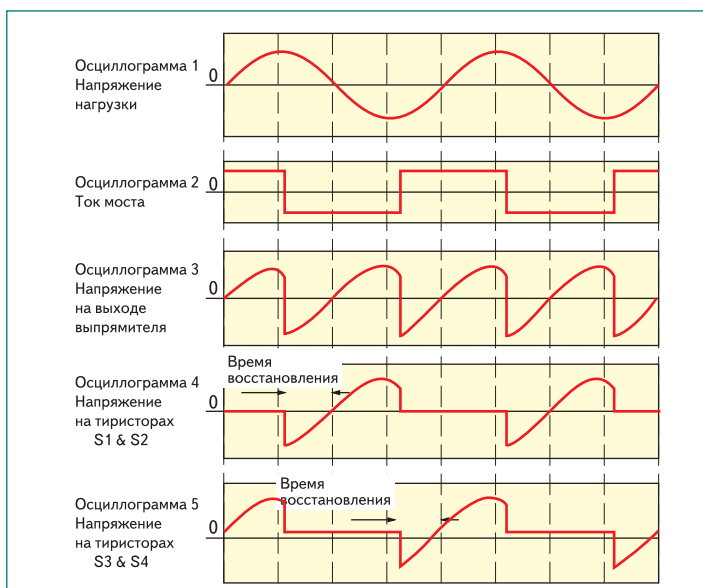


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений инвертора тока на частотах выше резонансной

татах до 10 кГц и мощностях от 20 кВт до 4 МВт. При использовании тиристорных инверторов тока должны работать на частотах выше резонансной частоты параллельного нагрузочного контура. Как это проиллюстрировано на рис. 8, напряжение на мосту (осциллограмма 1) имеет синусоидальную форму, а ток через мост (осциллограмма 2) прямоугольную.

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} (осциллограмма 3) 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 осциллограммах 4 и 5 рис. 8; время, когда эти напряжения отрицательны, предоставляется тиристорам для восстановления запирающих свойств.

Регулировка мощности осуществляется фазным управлением выпрямителя для получе-

ния изменяемого постоянного напряжения на входе инверторного моста. Частота коммутаций тиристорных инверторов 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 высокооборотную нагрузку.

Заключение

Для индукционного нагрева перед прокатом, ковкой и экструзионными технологиями используются два основных типа источников питания: инвертор тока и инвертор напряжения. Между этими типами источников питания есть существенные различия. Каждый из них имеет стойких приверженцев среди производителей оборудования, и оба типа широко распространены в термообработке в ме-

таллообработывающей промышленности. Они обеспечивают диапазон мощностей от 25 кВт до 10 МВт.

Транзисторные источники питания получили широкое распространение сравнительно недавно и эффективны с экономической точки зрения на частотах выше 10 кГц.

Ожидается, что оба типа источников питания и в дальнейшем будут разрабатываться на тиристорах для больших мощностей и частот до 12 кГц.

В данной работе достаточно кратко описываются особенности современных полупроводниковых источников питания, используемых при термообработке металлов. Некоторые уникальные процессы имеют различную специфику.

Литература

1. Loveless D. L., Cook R. L., Rudnev V. I. Power Supplies for Induction Heat Treating // Industrial Heating. June, 1995.
2. Rudnev V. I., Cook R. L.. Bar End Heating // Forging. Winter, 1995.
3. Inductoheat Bulletin: Bar Heating. 1994.
4. Лавлесс Д. Л., Кук Р. Л., Руднев В. И. Характеристики и параметры источников питания для эффективного индукционного нагрева // Силловая электроника. 2007. № 1.