

# РАЗРАБОТКА ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

Викторович В.В., Михлюк А.Е.

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси  
по механизации сельского хозяйства

В рамках выполнения Государственной программы по импортозамещению в Республиканском унитарном предприятии «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства» (РУП «НПЦ НАНБ по механизации с/х» разработаны и осваивается производство транзисторных преобразователей частоты номинальной мощностью до 250 кВт частотой преобразования  $2,4 \div 10$  кГц для питания установок индукционного нагрева.

Источники питания для индукционного нагрева (рис. 1) 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.

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.

Устройство согласования необходимо 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 напряжения инвертора.

Два основных типа инверторов, используемых для подавляющего большинства технологических



Рис. 1 — Блок-схема полупроводникового источника питания для индукционного нагрева

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

операций индукционного нагрева, представляет собой инвертор напряжения или инвертор тока с параллельным или последовательным резонансным нагрузочным контуром.

Для обеспечения необходимого времени восстановления тиристорный инвертор напряжения всегда работает на частотах ниже резонансной частоты нагрузки. Когда частота коммутации ти-

ристоров 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 тиристорных инверторного моста.

Упрощенная схема силовой части разработанного транзисторного генератора показана на рис. 2.

Отметим ее основные особенности по сравнению с традиционными решениями.

Из схемы исключен силовой контактор, поскольку при мощностях порядка 100÷250 кВт его включение – выключение приводит к существенным вибрациям, что снижает общую надежность

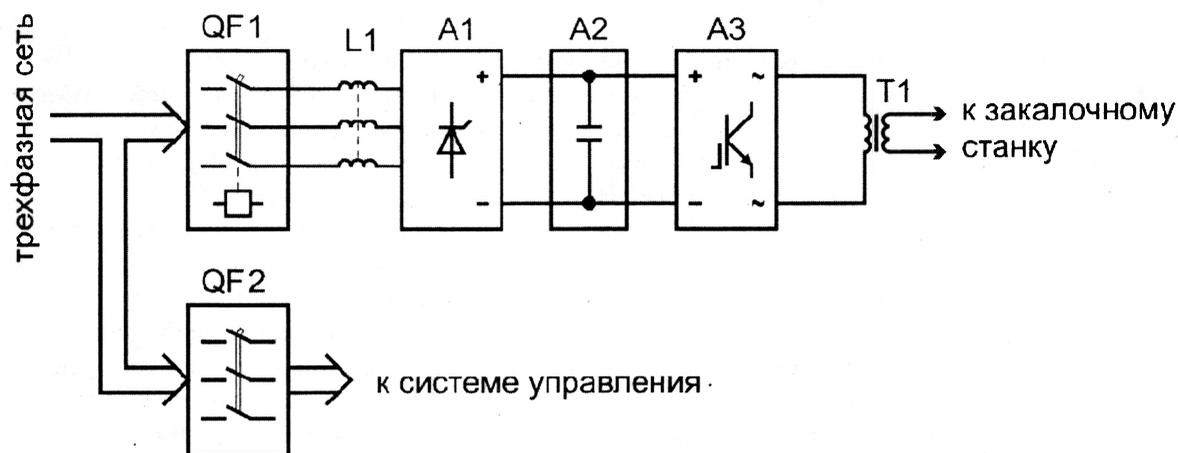


Рис. 2. Упрощенная схема силовой части транзисторного генератора

Последнее обстоятельство, равно как и необходимость в громоздких и дорогостоящих коммутирующих устройствах является основным недостатком тиристорных инверторов напряжения.

Недостатком тиристорных инверторов тока является обязательное наличие на выходе выпрямительного моста сглаживающего дросселя большой величины и возможность регулирования только по входному напряжению инвертора. Основная область использования тиристорных инверторов тока — мощные источники питания до 4 МВт.

Транзисторные инверторы отличаются тем, что их ключи IGBT или MOSFET не требуют для своего функционирования восстановления запирающих свойств и следовательно могут эффективно работать на практически любой частоте относительно резонансной частоты нагрузки. Работа на резонансной частоте означает, что коэффициент мощности нагрузки равен 1 и при этом в нагрузку передается максимальная мощность. Регулировка может быть осуществляться как по входному напряжению инвертора так и по частоте.

Таким образом, транзисторные генераторы следует признать наиболее подходящими для питания установок индукционного нагрева и в перспективе они неизбежно будут вытеснять тиристорные генераторы.

установки. При этом, чтобы сохранить традиционный порядок включения и обеспечить безопасность обслуживания используется вводной автоматический выключатель QF1 с независимым расцепителем, а для питания системы управления используется дифференциальный автомат QF2. В системе выпрямитель A1 инвертор A3 обязательно наличие емкостного фильтра A2, при этом для ограничения импульсов тока традиционно используется сглаживающий дроссель на выходе выпрямителя. В схеме на рис. 3 этот дроссель отсутствует, его функцию выполняет сетевой трехфазный дроссель L1. При этом одновременно последний решает проблему защиты питающей сети от помех со стороны генератора и ограничения тока короткого замыкания при пробое элементов выпрямителя.

Выпрямитель A1 и инвертор A3 выполняются по традиционным схемам: трехфазная мостовая (полууправляемая или полностью управляемая) и однофазная мостовая соответственно.

Разработка конструкции преобразователей средней и большой мощности является сложнейшей задачей, требующей тщательного подхода к анализу распределенных параметров конструкции. Одним из наиболее сложных в проектировании узлов силовых конверторов является звено

постоянного тока, содержащее силовые шины и блок конденсаторов. Этот узел до сих пор во многом определяет надежность, габариты и стоимость всего изделия. Несмотря на разработку новых технологий конденсаторов (например, пленочных МКР/МРР) и многочисленные попытки проектирования так называемых «матричных» конвертеров, осуществляющих прямое двунаправленное преобразование энергии от сети к потребителю, электролитические конденсаторы еще достаточно долго будут востребованы рынком.

10–25 тыс;

– широкий температурный диапазон применения от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ .

Высокая индукция насыщения и проникаемость сердечников обеспечивают значительную индуктивность обмоток трансформатора даже при малом количестве витков провода.

Благодаря тороидальной форме и малому количеству витков утечка индуктивности небольшая, что обеспечивает малую амплитуду выбросов напряжения при закрывании транзисторов инвертора.

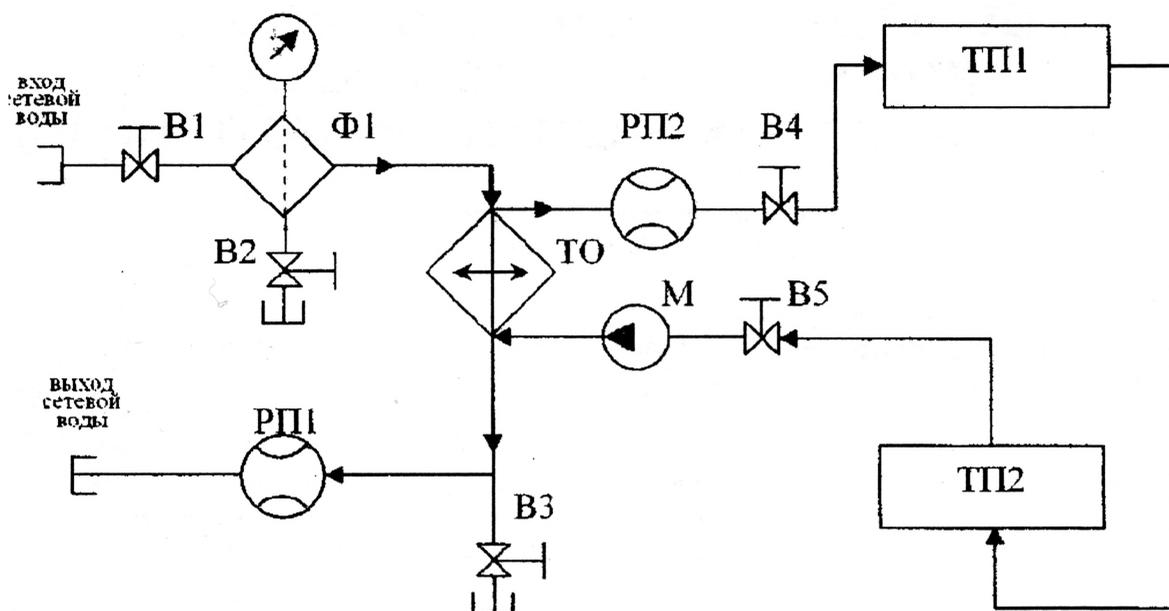


Рис. 3. Схема блока охлаждения V1–V5 — регулировочные вентили; Ф1 — входной сетевой фильтр; ТО — пластинчатый теплообменник; РП1, РП2 — реле протока; Н — насос; ТП1, ТП2 — охлаждаемые модули

При выборе конденсаторов для данного применения необходимо рассчитать среднеквадратичное значение тока пульсаций, определить суммарное значение емкости и рабочего напряжения, обеспечивающих безопасное функционирование преобразователя с учетом нагрузочных и тепловых режимов, а также колебаний напряжения питания.

Согласующий трансформатор Т1 — повышающий, с коэффициентом трансформации 1,55. Трансформатор разработан совместно с институтом металловедения Академии наук Украины. Его особенностью является использование ленточного сердечника из нанокристаллических сплавов, что дает следующие преимущества:

- низкие удельные потери 50–60 мВт/ч против 180 мВт/ч у ферритовых магнитопроводов;
- высокая рабочая индукция (до 1,1 Т);
- высокая импульсная проникаемость, не менее

В настоящее время ведется разработка транзисторного генератора на 66 кГц, что актуально для замены ламповых генераторов.

Разработаны и изготовлены также ряд инверторных источников питания гальванических ванн. Их особенностью является использование более простой полумостовой схемы инвертора.

Для эффективного охлаждения активных элементов преобразователей разработан двухконтурный блок охлаждения на базе неразборного теплообменника пластинчатого типа. В первичный контур блока охлаждения, через регенерируемый проточный фильтр пористостью 100 мкм, подается техническая вода из зациклированной системы технического водоснабжения предприятия. Температура воды на входе в блок охлаждения не должна превышать  $+25^{\circ}\text{C}$ . В качестве теплоносителя во вторичном контуре блока используется водный

раствор этиленгликоля. Функционально вторичный контур предназначен для охлаждения транзисторов инвертора и магнитопровода согласующего трансформатора. Наивысшая температура воды на входе из охлаждаемого устройства не выше +60°C, что не ухудшает рабочие режимы как силовых транзисторов, так и трансформатора. Расчетная тепловая мощность блока охлаждения не менее 15 кВт. Гидравлическая схема блока охлаждения представлена на рис. 3.

Датчики температуры (реле максимально допустимой температуры) установлены непосредственно на охлаждаемых модулях.

Использование современных принципов конструирования преобразовательных устройств (разработка документации производится посредством программы 3D графики «КОМПАС») позволяет значительно снизить массогабаритные показатели, сократить сроки разработки и изготовления преобразовательного оборудования.

## **ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА РУП «МАЗ»**

*Гурченко П.С., Михлюк А.И., Летунович В.Е.  
Минский автомобильный завод*

**Введение.** Термическая обработка деталей и изделий нестандартной формы и размеров всегда вызывала определенные трудности, связанные прежде всего с их размерами. Для термической обработки таких деталей автомобилей, как полуось, разжимной кулак, вал стабилизатора тележки заднего моста и другие, имеющие хотя бы один размер, значительно отличающийся от других, требуется специальное оборудование, приспособления. В условиях современного производства при выпуске широкой номенклатуры продукции крайне нецелесообразно и экономически невыгодно использовать специальное термическое печное оборудование. Поэтому индукционная термическая обработка таких деталей и изделий, а это в первую очередь длинномерные, зачастую является наиболее выгодной с технической и экономической стороны.

Проблема термообработки данного типа изделий заключается не в оригинальности технологических режимов. В данном случае технология, тип индукционного нагрева, вид упрочняемой поверхности не являются оригинальными. Главным отличием этих разработок является конструкция оборудования, связанная с размерами детали или изделия.

На РУП «МАЗ» накоплен определенный опыт использования индукционного нагрева и конструирования устройств для термообработки длинномерных изделий. Все разработанные и внедренные установки для длинномерных деталей

можно разбить на две большие группы — установки для индукционной закалки деталей и установки индукционного нагрева изделий.

**Индукционная закалка длинномерных деталей.** Разработан и внедрен ряд установок ТВЧ для закалки длинномерных деталей, в частности полуось автомобиля, картер заднего моста, направляющие станин металлорежущих станков. Так полуоси ведущего моста автомобилей МАЗ всех типоразмеров изготавливают из сталей 40Х, 40ХН, 35ХГСА и подвергают поверхностной индукционной закалке непрерывно-последовательным способом на специальной установке. Для выполнения закалки полуосей была модернизирована установка ТВЧ конструкции АЗЛК. В результате модернизации удалось увеличить длину закаливаемых деталей до 1200 мм. В процессе работы на установке строго соблюдают отлаженные режимы закалки и охлаждения. При этом режимы нагрева контролируют по электрическим параметрам преобразователя, а режим охлаждения — по давлению и температуре охлаждающей воды, подаваемой на спрейер. Нагрев выполняют двухвитковым индуктором от преобразователя частоты ППЧВ-250/2400, мощностью 250 кВт и частотой 2400 Гц. Охлаждение при закалке осуществляют специальным спрейером, закрепленным к нижнему витку индуктора. Контроль позволяет соблюдать отлаженные параметры закалки: толщину закаленного слоя 5,0–8,0 мм по всей длине и твердость поверхности 50–54 HRC. На