УДК 313.3

ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

–––––––

VOLTAGE INVERTER FOR SYSTEMS INDUCTION HEATING

Шишлин Денис Иванович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода,
Липецкий государственный технический университет
denis-shishlin@yandex.ru

Колесников Дмитрий Алексеевич
инженер,
Общество с ограниченной ответственностью «Генборг»

Аннотация. В статье рассматривается конструкция высокочастотного инвертора напряжения, схема его управления и разработка установки индукционного нагрева для придания ему более прочных свойств различным деталям. Представлены математические модели установки и результаты моделирования.

Ключевые слова: высокочастотный инвертор напряжения, индукционный нагрев, резонанс, математическая модель.

Shishlin Denis Ivanovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Drive,
Lipetsk State Technical University
denis-shishlin@yandex.ru

Kolesnikov Dmitry Alekseevich
Engineer,
Limited Liability Company «Genborg»

Annotation. The article discusses the design of a high-frequency voltage inverter, its control scheme and the development of an induction heating installation to give it more durable properties to various parts. Mathematical models of the installation and simulation results are presented.

Keywords: high-frequency voltage inverter, induction heating, resonance, mathematical model.

Нагревание материалов электрическими токами (индукционный нагрев), наводимыми переменным магнитным полем, применим для придания необходимой прочности деталям различных технологических механизмов (выходные концы валов двигателей, шарики подшипников и др.), которые воспринимают значительные механические нагрузки. Актуальной задачей является создание технологических установок на базе высокочастотных инверторов, обеспечивающих, с одной стороны, повышение прочности материалов деталей в соответствии с их функционалом (регулирование скин-слоя) [1] и, с другой стороны, надежность работы самой установки, в частности, во избежание повышенного нагрева индуктора. На стадии разработки подобных технологических объектов разновидностью экспериментальных исследований, направленных на наладку и бесперебойное их функционирование, является создание математических моделей установок. Важную роль играет не только подбор аппаратного и программного обеспечения высокочастотных резонансных инверторов, но и алгоритмизация их работы, направленная на обеспечение качества процесса обработки заготовок и подбор частоты резонанса.

Электропроводящая заготовка, металлическая или графитовая, помещается в *индуктор*, представляющий собой один или несколько витков медного провода. В индукторе с помощью специального генератора наводятся токи различной частоты (от десятка Гц до нескольких МГц), в результате чего вокруг индуктора возникает *электромагнитное поле*. Электромагнитное поле наводит в заготовке *вихревые токи*, которые разогревают заготовку.

Система «индуктор-заготовка» представляет собой *трансформатор* без сердечника, в котором индуктор является первичной обмоткой. Заготовка является своего рода вторичной обмоткой, замкнутой накоротко. Магнитный поток между обмотками замыкается по воздуху.

Установка разогревается в следствие вытеснения индуктируемых токов к ее поверхности (скин-эффект). Глубина скин-слоя Δ зависит от частоты излучения: чем выше частота, тем тоньше скин-слой. Также она зависит от относительной магнитной проницаемости μ материала заготовки:

$$\Delta = 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu\mu_0 \pi f}},$$

где μ_0 = 0,000001256 – магнитная постоянная, Гн/м; ρ – удельное электрическое сопротивление материала заготовки, Ом м/мм^2; f – частота электромагнитного поля, генерируемого индуктором, Гц.

Технологическая установка состоит из индуктора, высокочастотного трансформатора, конденсаторной батареи из параллельно включенных высоковольтных конденсаторов [2]. Принципиальная схема представляет последовательный LC контур с трансформатором (рис. 1).

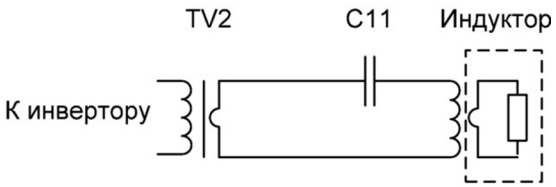

Рисунок 1 – Схема индукционной установки

LC-контур является нагрузкой для инвертора, собранного на высокочастотных полевых транзисторах, с низким импедансом. Для согласования применяются высокочастотные трансформаторы или дроссели. Согласующий дроссель, включенный в разрыв провода между инвертором и контуром, вместе с резонансным конденсатором образует LC-фильтр. Таким образом, отбирая небольшую часть емкости резонансного конденсатора, дроссель в малой степени влияет на частотную характеристику контура. Обычно такой дроссель выполняется на ферритовом сердечнике с воздушным зазором, изменяя величину которого, можно регулировать подводимую к индуктору мощность.

Высокочастотный трансформатор может работать как на параллельный контур, так и последовательный. В первом случае трансформатор сильно повлияет на резонансную частоту контура. Во втором случае последовательный контур в резонансном режиме будет потреблять максимум мощности с пустым индуктором (без нагрузки), т.к. при резонансе напряжений реактивное сопротивление LC-цепи стремится к нулю, а активное сопротивление в таких цепях, как правило, очень мало. Конструктивно согласующий трансформатор выполняется на нескольких ферритовых кольцах и надевается на провод индуктора.

При правильной настройке генератора, его частота должна совпадать с резонансной частотой выходного контура, либо может быть немного выше резонансной. В этом случае ключи питающего преобразователя работают в наиболее благоприятном режиме. Не желательно допускать ситуации, когда частота переключений инвертора будет ниже резонансной, т.е. сопротивление будет иметь емкостной характер.

С изменением массы или материала нагреваемого тела резонансная частота колебательного контура меняется. Для подстройки применяются различные методы: переключение емкости конденсаторной батареи, автоматическая подстройка частоты, ручная регулировка частоты, автогенераторы.

При достижении определенной температуры материала (точка Кюри) материал теряет магнитные свойства, в следствие чего резонансная частота контура резко меняется, а также увеличивается толщина скин-слоя. Выбирая элементы контура следует учитывать, что при резонансе в контуре достигаются токи и напряжения большой амплитуды, которые могут превышать токи и напряжения питающей сети в десятки раз. Индуктор следует изготавливать из медного провода или трубки достаточного сечения. Даже при небольшой мощности (порядка 200–500 Вт) индуктор начинает сильно нагреваться под действием собственного поля. Для отвода тепла обычно применяется водное охлаждение, тогда индуктор делается из медной трубки.

В качестве контурных конденсаторов выбраны высоковольтные конденсаторы для создания достаточной реактивной мощности. Батарею конденсаторов следует располагать в непосредственной близости к индуктору и использовать для ее монтажа короткие провода.

Для микроконтроллера, который обладает широким функциональным спектром и богатой периферией, во избежание его выхода из строя, требуется гальванически развязать сигнал управления от силовых ключей. Следующее требование заключается в быстродействии передачи сигнала управления, которое должно составлять не менее 450 кГц.

Схема управления состоит из триггера Шмидта, оптрона, драйвера и развязывающего трансформатора.

На выводах контроллера имеет место слабый токовый сигнал, требующий усиления, чтобы этого тока хватило на открытие и закрытие транзистора. Для этого применяют триггеры. Гальванической развязкой между контроллером и драйвером служит оптрон.

Драйверы усиливают выходной сигнал, идущий через развязывающий трансформатор на высоковольтные транзисторы. Сам трансформатор защищает драйверы от короткого замыкания силового ключа.

Для программирования микроконтроллеров использовалось специализированное программное обеспечение, а также программный пакет Matlab Simulink, позволяющий создать и компилировать созданный проект в программный код на языках C и C++ для технологических контроллеров различных производителей и серий. Для использования этой возможности необходимо произвести установку надстройки, содержащей пакет поддержки устройств.

На рисунке 2 представлена модель инвертора индукционной установки с мостовым инвертирующим звеном в среде Matlab Simulink, которая уже настроена на резонанс. На рисунке 3 приведены

измерения тока на выходе инвертора (верхний график), измерения напряжения на индукторе (средний график) и ток, протекающий в индукторе (нижний график). Общая схема инвертора на базе микроконтроллера представлена на рисунке 4.

Представленная технологическая установка позволяет осуществлять индукционный нагрев малогабаритных деталей (валов, шариков и роликов подшипников, ручного инструмента для металлообработки и т.п.).

Силовая часть представлена силовыми высокочастотными полевыми транзисторами. В ходе натурных экспериментов установка работала без сбоев и перегревания индуктора.

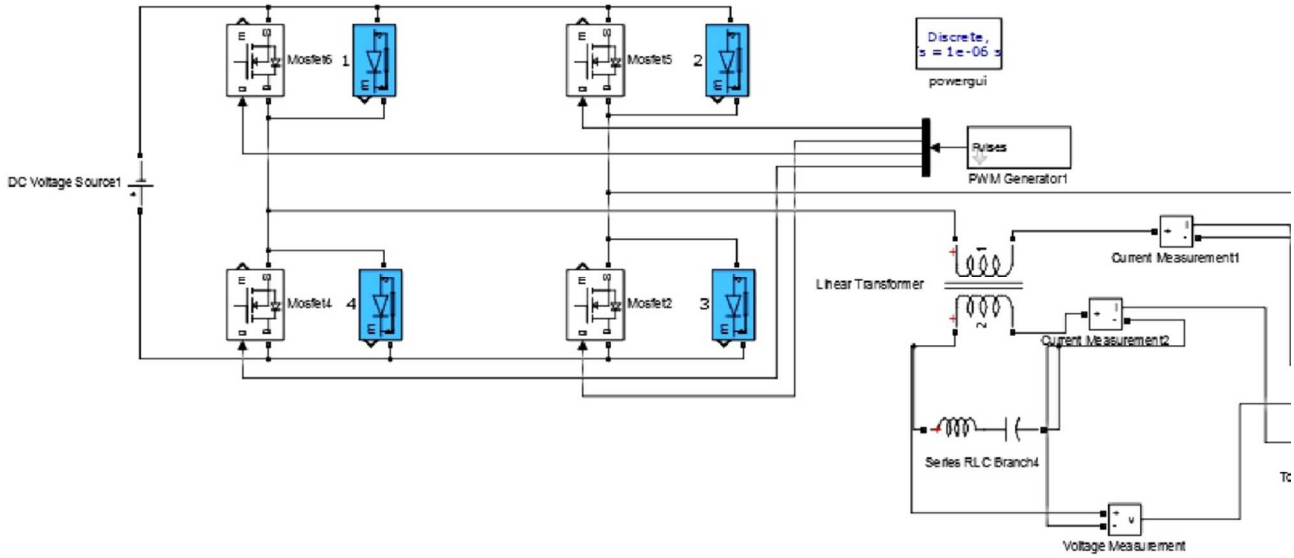

Рисунок 2 – Модель инвертора индукционной установки с мостовым инвертирующим звеном

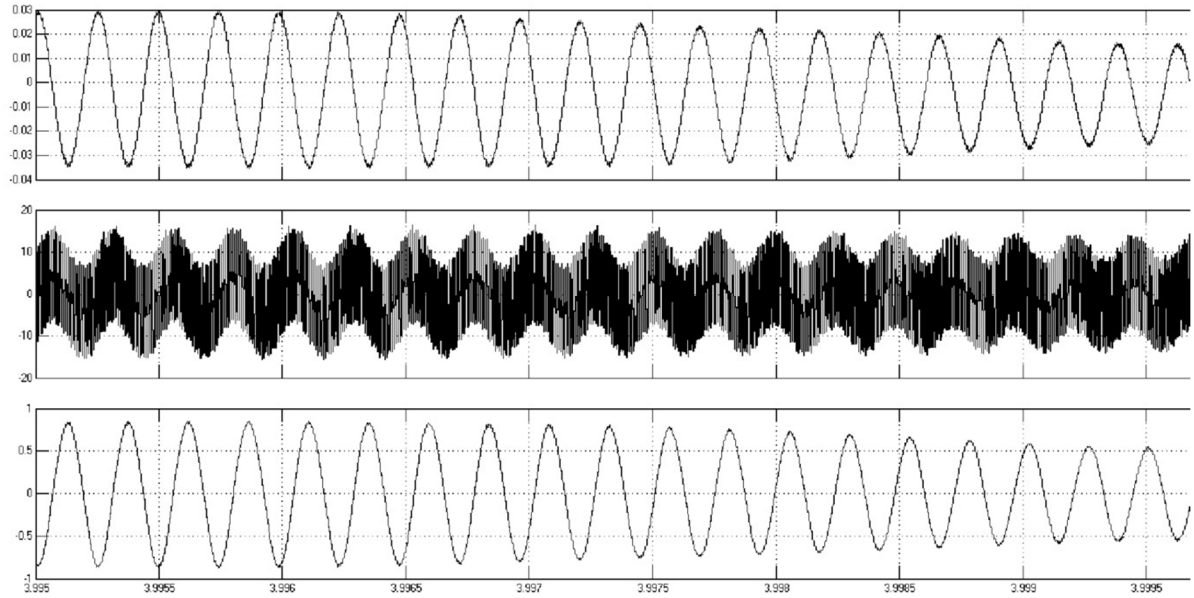

Рисунок 3 – Графики напряжения и тока

Схема управления инвертором спроектирована на базе микроконтроллера с широким спектром выходных частот. Микроконтроллер запрограммирован на выходную резонансную частоту.

Планируется разработать схему управления, которая будет автоматически подстраиваться под резонанс установки, чтобы минимизировать время подготовки для монтажа дополнительных элементов для силовой части схемы, а также довести установку до промышленного образца и внедрить в производство на машиностроительных предприятиях, изготавливающих оборудование (электродвигатели, насосы и др.) для нефтегазодобывающей отрасли.

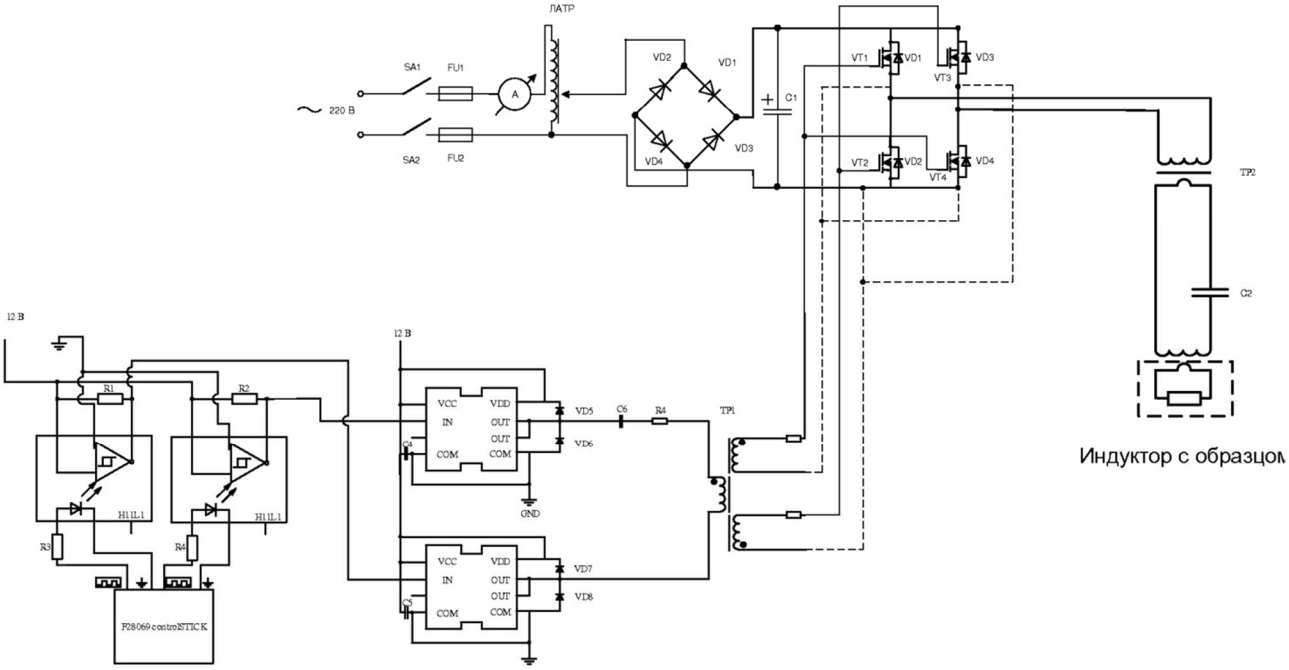

Рисунок 4 – Общая схема инвертора на базе микроконтроллера

Литература:

1. Мещеряков В.Н., Титов С.С., Безденежных Д.В. Разработка и исследование системы управления индуктором для электротехнических комплексов по симметричному индукционному нагреву металлоизделий шарообразной формы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 2. – С. 43–50.

2. Мещеряков В.Н., Колесников Д.А. Алгоритм управления высокочастотным преобразователем для систем с индукционным нагревом // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : ТГТУ, 2017. – С. 217–218.

References:

1. Meshcheryakov V.N., Titov S.S., Bezdenezhnykh D.V. Development and research of an inductor control system for electrical complexes for symmetrical induction heating of spherical metal products // Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University. – 2017. – № 2. – P. 43–50.

2. Mescheryakov V.N., Kolesnikov D.A. Control algorithm of a high-frequency converter for systems with induction heating // Energy saving and efficiency in technical systems. Materials of the IV International Scientific and Technical Conference of Students, Young scientists and specialists. – Tambov : TSTU, 2017. – P. 217–218.