

Радиоэлектроника

УДК 621.372.632:621.365.5

Н. Т. ИСЕМБЕРГЕНОВ, А. Ж. САГЫНДЫКОВА, А.М. НАУХАН

(Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан)

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Аннотация

Преобразователи частоты для индукционного нагрева металла этой технологии с низкой стоимостью, высоким коэффициентом полезного действия, малым весом и габаритами. Они обеспечивают требуемый диапазон регулирования частоты ПЧ, выбор минимального количества силовых транзисторов, минимальные установленные мощности. Разработан и изготовлен опытный образец преобразователя частоты и индуктор мощности. Произведены экспериментальные исследования и испытания опытного образца преобразователя частоты для индукционного нагрева металла в реальных условиях.

Ключевые слова: преобразователи частоты, индукционный нагрев, транзисторный модуль, симисторы, трехфазный выпрямитель, инвертор.

Тірек сөздер: жиілікті түрлендіргіш, индукциялық қыздыру, транзистор модулы, симисторлар, үшфазалы түзеткіш, инвертор.

Keywords: frequency converters, induction heating, transistor module, triacs, three-phase rectifier, inverter.

Преобразователи частоты (ПЧ) для индукционного нагрева металла состоят IGBT или MOSFET транзисторных модулей, соединенные в определенной конфигурации с драйверами управления. При этом они имеют защиту от токов короткого замыкания, перегрузок и защиту от превышения температуры.

В настоящее время применение ПЧ для индукционного нагрева металла в промышленности Казахстана практически отсутствует, так как удельная стоимость существующих зарубежных аналогов очень высока, поэтому массовое внедрение их невыгодно. Следует разрабатывать свои технологии с низкой стоимостью, высоким коэффициентом полезного действия, малым весом и габаритами.

Преобразователи частоты могут быть применены в следующих технологиях:

- для индукционного нагрева металлов с целью штамповки,
- для плавки металлов в индукционных плавильных тигельных печах,
- для индукционного нагрева металлов с целью горячей объемной закалки,
- для индукционного нагрева нефти в трубопроводах и цистернах,
- для индукционной сушки зерна, нагрева жидких сред, сушка древесины и покрытий и получения молочного порошка.

Основными задачами и целями является создание технологии производства ПЧ, которые должны: обеспечивать требуемый диапазон регулирования частоты ПЧ, выбор минимального количества силовых транзисторов, иметь высокий КПД и низкие цены, минимальные установленные мощности всего ПЧ или отдельных его элементов при тех же заданных параметрах технологии нагрева.

На рисунке 1 представлена схема преобразователя частоты, которая состоит из входных симисторов 1, трехфазного выпрямителя 2 и инвертора 3. Особенностью инвертора является то, что он выполнен на двух транзисторах. Трехфазный выпрямитель преобразовывает переменное напряжение сети в постоянное, а инвертор постоянный ток преобразовывает в переменное напряжение повышенной частоты. Индуктор - электрическую энергию высокой частоты преобразовывает в тепловую энергию, а трансформатор понижает напряжение до необходимой величины.

Выпрямитель и инвертор представлен как преобразователь частоты. Выходной трансформатор применяется для согласования параметров индуктора с заготовкой с параметрами высокочастотного инвертора. При этом массогабаритные размеры трансформатора уменьшает в несколько раз. Входные симисторы 1 предназначены не только для бесконтактного включения преобразователя частоты в сеть, но и для регулирования входного напряжения. Дело в том, что при эксплуатации индукционного нагревателя через каждые несколько минут надо преобразователь частоты отключать от сети, так как нагретый металл (заготовка) следует вынимать из индуктора и передавать для штамповки. Далее новую заготовку вставлять в индуктор и включать преобразователь частоты в сеть. Полумостовой инвертор, образованный IGBT транзисторами T_1 и T_2 (рисунок 1), подключен к источнику напряжения постоянного тока, конденсаторы C_n (нижний и верхний) предназначены для разделения напряжения питания на две равные части. Конденсатор C в выходной цепи инвертора предназначен для улучшения качества выходного напряжения и для того, чтобы добиться последовательного резонанса.

Для формирования положительного полупериода напряжения на выходе инвертора открывается транзистор T_1 , а транзистор T_2 закрыт, при этом постоянный ток от источника напряжения будет протекать через транзистор T_1 и первичную обмотку трансформатора.

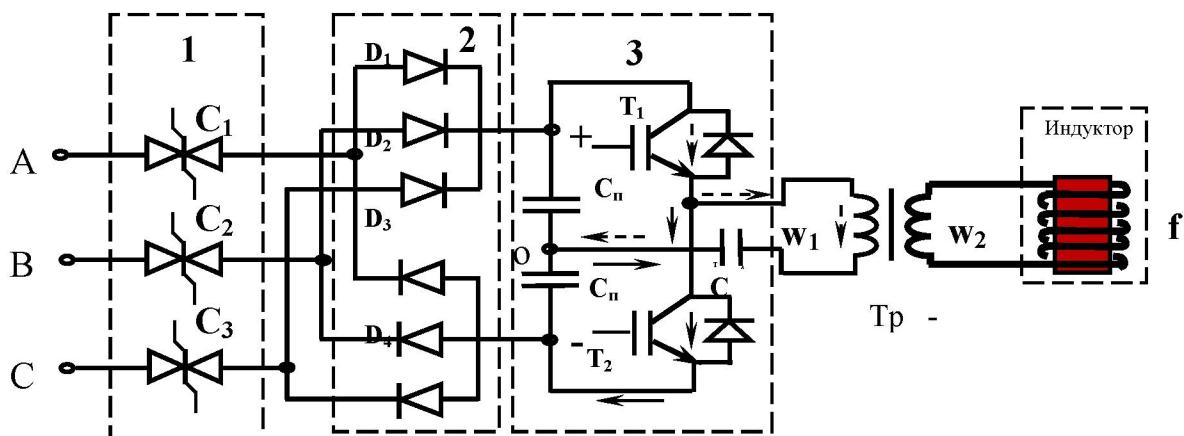


Рисунок 1 – Электрическая схема преобразователя частоты индукционного нагревателя при трехфазном питании

Для формирования отрицательного полупериода на выходе инвертора открывается транзистор T_2 , а транзистор T_1 закрывается, при этом постоянный ток от источника напряжения будет протекать через транзисторы T_2 и первичную обмотку трансформатора в обратном направлении.

Таким образом, происходит формирование ступенчатого напряжения на выходе инвертора. Следует отметить, что частота ступенчатого напряжения на индукторе определяется частотой коммутации транзисторов и может достичь десятки килогерц.

Такой режим работы инвертора с минимальным количеством силовых транзисторов позволит повысить частотный диапазон тока на индукторе и улучшить их энергетические показатели, а также повышает надежность и снижает себестоимость оборудования.

К выходу симисторов включена мостовая схема трехфазного выпрямителя 2 (рисунок 1). Как известно мостовая схема трехфазного выпрямителя обеспечивает наименьшую пульсацию выходного напряжения.

В мостовой схеме трехфазного выпрямителя неуправляемые диоды $D_1 - D_6 - D_3 - D_2 - D_5 - D_4$ открываются последовательно со сдвигом на 60° , причем диоды D_1, D_3 и D_5 открываются в положительные, а диоды D_6, D_2 и D_4 – в отрицательные полупериоды фазных напряжений. Интервал проводимости каждого диода равен 120° , в каждый момент времени открыты два диода (по одному в плече моста) и напряжение на нагрузке определяется разностью фазных напряжений, т. е. линейным напряжением. Среднее значение напряжения на нагрузке при синусоидальном напряжении сети имеет следующий вид,

$$U_{cp} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha = 1,35 U_n \cos \alpha = 2,34 U_\phi \cos \alpha$$

где $U_n = \sqrt{3} U_\phi$ – действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Разработан и изготовлен опытный образец преобразователя частоты и индуктор мощностью 6 кВт с частотой от 2 до 20 кГц при питании от одного или трехфазного напряжения. Были произведены экспериментальные исследования и испытания опытного образца преобразователя частоты для индукционного нагрева металла в реальных условиях.

На рисунке 2 представлен процесс индукционного нагрева металлической заготовки диаметром 44 мм и длиной 80 мм. В начале процесса индукционного нагрева металл неравномерно нагревался, т.е. в середине заготовки температура была ниже, чем по краям. Это означало, что глубина проникновения электромагнитной волны незначительна, поэтому следует выбрать меньшую частоту тока, однако при этом увеличится время нагрева металла. Время нагрева металла преобразователем частоты до температуры 600-650 градусов по Цельсию составила 3,5 минуты при частоте 8 кГц и при частоте 10 кГц - 2.41 минуты (рисунок 3). При этом транзисторы не перегревались, что требуется по условиям эксплуатации.



Рисунок 2 – Индукционный нагреватель в период испытания

Результаты испытания показали, что созданный индукционный нагреватель работоспособен, прошел успешное испытание, и система охлаждения индуктора работала исправно. Процесс индукционного нагрева металла можно осуществить до нужной температуры.

При разработке технической документации для изготовления лабораторного образца преобразователя частоты и выборе транзисторных JGBT модулей основное внимание было уделено топологии силовых шин модуля и способам подключения электрических цепей и отвода тепла. Даже при использовании самых современных чипов конструкция мощных ключевых модулей имеет чрезвычайно большое значение для обеспечения надежности и эффективности. Распределенные характеристики проводимости и значения паразитных индуктивностей шин связи и выводов должны иметь минимальное значение для уменьшения потерь и снижения уровня переходных перенапряжений.



Рисунок 3 – Процесс индукционного нагрева металла до температуры 731°C

На рисунке 4 представлена осциллограмма напряжения на выходе инвертора без конденсатора в первичной цепи трансформатора. Как видно из графика, осциллограмма напряжения имеет колебательный характер, это значит, что транзисторы работают в активном режиме. При этом они будут нагреваться и в конечном счете выйдут из строя. Чтобы транзисторов перевести в ключевой режим, надо включать последовательно конденсатор С в выходной цепи инвертора, улучшить качество выходного напряжения и добиться последовательного резонанса.

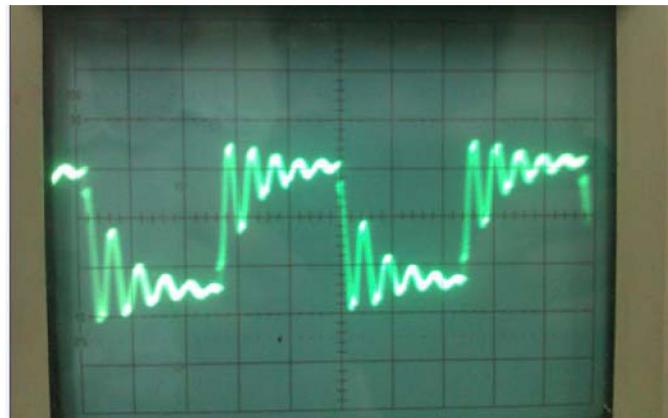


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения на выходе инвертора без конденсатора в первичной цепи трансформатора

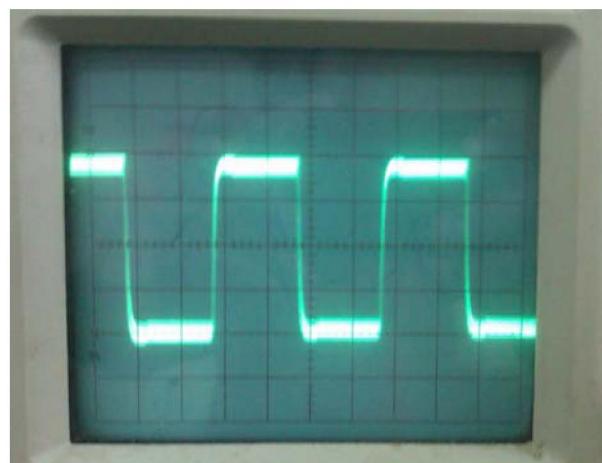


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения на выходе инвертора с конденсатором в первичной цепи трансформатора

На рисунке 5 представлена осциллограмма напряжения на выходе инвертора при конденсаторе в первичной цепи трансформатора. Как видно из графика, напряжение на выходе инвертора имеет прямоугольную форму, это значит, что транзисторы работают в режиме ключа, при этом они не будут нагреваться. Кроме того, подбирая экспериментальный путем значение конденсатора С можно не только улучшить качество выходного напряжения, но добиться последовательного резонанса. При резонансе активная мощность инвертора будет передаваться индуктору, т.е. заготовке для нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Куваильдин А. Б. Индукционный нагреватель ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 188 с.
- 2 Многоступенчатый транзисторный инвертор (варианты). № 60621: Авторское свидетельство на предпоптент. Комитет по правам интеллектуальной собственности министерства юстиции РК. – Бюл. № 9 от 15.07.2009 г.
- 3 Преобразователь частоты на двух транзисторах для электротехнологии // XIV Междунар. конф. «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты». – Крым: Алушта, 2012.
- 4 Безтрансформаторный инвертор (варианты). № 73453: Авторское свидетельство на патент. Комитет по правам интеллектуальной собственности министерства юстиции РК. – Бюл. № 3 от 15.03.2012.

REFERENCES

- 1 Kuval'din A. B. Indukcionnyj nagrevatel' ferromagnitnoj stali. M.: Jenergo-atomizdat, 1988. 188s.
- 2 Mnogostupenchatyj tranzistornyj invertor (variandy). № 60621: Avtorskoe svidetel'stvo na predpoptent. Komitet po pravam intellektual'noj sobstvennosti ministerstva justicij RK. Bjul. № 9 ot 15.07.2009 g.
- 3 Preobrazovatel' chastoty na dvuh tranzistorah dlja jelektrotehnologii. XIV Mezh-dunar. konf. «Jelektromehanika, Jelektrotehnologii, Jelektrotehnicheskie Materialy i Komponenty». Krym: Alushta, 2012.
- 4 Beztransformatornyj invertor (variandy). № 73453: Avtorskoe svidetel'stvo na patent. Komitet po pravam intellektual'noj sobstvennosti ministerstva justicij RK. Bjul. № 3 ot 15.03.2012.

Резюме

H. T. Исембергенов, А. Ж. Сагындыкова

(К. И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы)

ИНДУКЦИОНДЫ МЕТАЛДЫ ҚЫЗДЫРУ УШІН ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШ

Металды индукционды қыздыру үшін арзан тұратын пайдалы эсер коэффициенті жоғары габариті және салмағы аз жиілік түрлендіріштер қолданылады. Олар жиілік түрлендіріштердің диапазонын реттеуге, күптік транзисторлардың минималды санын таңдауға және орнатылған минималды қуаттарды қамтамасыз етеді. Жиілік түрлендіріш пен индуктордың тәжірибелік үлгісі дайындалған. Индукционды металды қыздыру үшін жиілік түрлендіріштің эксперименталдық зерттеулері жүргізілген.

Тірек сөздер: жиілікті түрлендіріш, индукциялық қыздыру, транзистор модулы, симисторлар, үшфазалы түзеткіш, инвертор.

Summary

N. T. Issembergenov, A. Zh. Sagyndikova

(Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan)

TRANSISTOR FREQUENCY CONVERTERS FOR INDUCTION HEATING OF METALS

Frequency converters for induction heating of metal it is technologies with the low cost, high efficiency, small weight and dimensions. They provide the trekbuyemy range of regulation of frequency of PCh, a choice of minimalkmy number of power transistors, the minimum rated capacities. Optytkny obkrazets of the converter of frequency and the inductor мощності is developed and made. Pilot studies and tests of a prototype of the converter of frequency are made for induction heating of metal in actual practice

Keywords: frequency converters, induction heating, transistor module, triacs, three-phase rectifier, inverter.

Поступила 24.01.2014г.