

5. Пат. 86222 Україна, МПК В 23 К 37/00. Пристрій для очищення зварювальних аерозолів при наплавленні / О.С. Поважний, В.Л. Пілюшенко, Ю.В. Логвінов, С.Ю. Логвінов. – № u201304870; заявл. 16.04.13; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. – 4 с.

References:

1. Levchenko O.G. *Sposoby i sredstva lokalizatsii i neitralizatsii svarochnykh aerezolei*. Diss. dokt. techn. nauk [Ways and means of localization and neutralization of welding aerosols. Doct. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2002. 283 p. (Rus.)
2. Chigarev V.V. *Metallurgicheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki iznosostoikikh splavov poroshkovymi lentami*. Diss. dokt. techn. nauk [Metallurgical and process fundamentals of surface deposition of wear-resistance alloys with powder bands. Doct. tech. sci. diss.]. Moscow, 2001. 532 p. (Rus.)
3. Logvinov Iu.V. *Pristrii dlia ochishchennia tverdoi ta gazopodibnoi skladovikh zvariival'nikh aerezoliv pri naplavlenni* [Device for treating solid and gaseous components of aerosols during surfacing welding]. Patent UA, no. 19867, 2007. (Ukr.)
4. Logvinov Iu.V. *Pristrii dlia zamknutoi sistemi ulovliuvannia, fil'tratsii i neitralizatsii zvariival'nikh aerezoliv pri naplavlenni* [Closed system device for capturing, filtering and neutralizing welding aerosols when surfacing]. Patent UA, no. 19101, 2006. (Ukr.)
5. Povazhnyi O.S., Piliushenko V.L., Logvinov Iu.V., Logvinov S.Iu. *Pristrii dlia ochishchennia zvariival'nikh aerezoliv pri naplavlenni* [A device for cleaning of welding aerosols when surfacing]. Patent UA, no. 86222, 2013. (Ukr.)

Рецензент: В.Я. Зусин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.10.2016

УДК 621.341.572

© Малинов В.Л.¹, Савенко О.С.²

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В работе предложено схемное решение источника питания для установки индукционного нагрева. Разработанный источник питается от трехфазной сети и имеет малые искажения формы потребляемого тока. Характерной особенностью устройства является использование непосредственного преобразования трехфазного напряжения питающей сети в высокочастотное напряжение «накачки» выходной резонансной цепи с индуктором. Силовая часть преобразователя состоит из шести идентичных полупроводниковых диодно-транзисторных коммутаторов – по два на фазу. Система управления преобразователем обеспечивает формирование сетевых токов таким образом, что они пропорциональны мгновенным фазным напряжениям сети. Таким образом, по отношению к питающей сети разработанный источник представляет симметричную активную нагрузку.

Ключевые слова: индукционный нагрев, инвертор, непосредственный преобразователь, коэффициент мощности, индуктор.

Малинов В.Л., Савенко О.С. Джерело живлення установки індукційного нагріву.
В роботі запропоновано схемне рішення джерела живлення для установки індукційного нагріву. Розроблене джерело отримує живлення від трифазної мережі і

¹ д-р техн. наук, инспектор по материалам и сварке, ПИИ ООО «Бюро Веритас Украина»,
malinov.v.l@gmail.com

² специалист отдела техн. средств обучения, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, savenko-olja@yandex.ru

має малі спотворення форми споживаного струму. Характерною особливістю пристрою є використання безпосереднього перетворення трифазної напруги мережі живлення в високочастотну напругу «накачування» вихідного резонансного ланцюга з індуктором. Силова частина перетворювача складається з шести ідентичних напівпровідникових діодно-транзисторних комутаторів – по два на фазу. Система управління перетворювачем забезпечує формування мережесвих струмів таким чином, що вони пропорційні миттєвим фазним напругам мережі. Таким чином, по відношенню до мережі живлення розроблене джерело являє симетричне активне навантаження.

Ключові слова: індукційний нагрів, інвертор, безпосередній перетворювач, коефіцієнт потужності, індуктор.

V.L. Malinov, O.S. Savenko. Power supply for induction heating. The induction heating process is put into effect through an inductor with high current flowing in its winding. The part to be heated is placed in the inductor magnetic field and can be represented by an equivalent transformer secondary shorted one-turn winding, the inductor being the primary winding of this transformer. The inductor is often powered by a resonance converter fed from the mains through a rectifier. The rectifier (e.g. six-pulse diode bridge), and the smoothing capacitor at its output results in a distortion of the current consumed from the mains (that is its non-linear harmonic distortion coefficient increase) and in the reduction of the induction heating converter power factor. To reduce non-linear harmonic distortion coefficient of the input current, power supplies are used in conjunction with passive harmonic filters or with parallel active power filters. Due to the introduction of the standards normalizing the emission of high-order harmonic currents by technical means, the task of creating power supplies with high power factor and with minimal distortion of input currents is becoming relevant. The article proposes a circuit solution of power supply for induction heating. The designed power supply is powered from a three-phase mains and has a small distortion of the input current wave shape. A characteristic feature of the power supply is the use of direct conversion of a three-phase mains voltage into a high frequency voltage, which is then used for «pumping» the output resonant circuit with the inductor. The power part of the proposed converter consists of six identical semiconductor diode-transistor switches – two per a phase. Converter control system ensures the formation of the mains currents so that they are proportional to the corresponding instantaneous phase voltages. Thus, the designed power supply presents a symmetrical and purely active load in relation to the mains.

Keywords: induction heating, an inverter, direct converter, power factor, inductor.

Постановка проблеми. Индукционный нагрев в настоящее время получил широкое распространение в различных отраслях промышленности и в быту. Нагрев токами высокой частоты используется при сварке, пайке, поверхностном упрочнении, термообработке и прочих задачах нагрева проводящих изделий [1-3].

Поскольку при индукционном нагреве за счёт возникающих МГД-усилий происходит интенсивное перемешивание жидкого металла, вплоть до удержания его в подвешенном состоянии в воздухе или защитном газе, этот способ используется для получения сверхчистых сплавов (левитационная плавка) [4].

Процесс нагрева реализуют с помощью индуктора, в обмотке которого протекает высокочастотный ток. Нагреваемая деталь помещается в его магнитное поле и может быть представлена эквивалентным короткозамкнутым витком вторичной обмотки трансформатора, первичной обмоткой которого является индуктор.

Анализ последних исследований и публикаций. Питание индуктора зачастую обеспечивается резонансным преобразователем, который может быть построен с использованием мощных генераторных ламп [5] или силовых транзисторов [6-8]. Этот преобразователь получает питание от промышленной сети через выпрямитель.

Наличие выпрямителя (например, 6-пульсного моста), а также сглаживающего конденсатора на его выходе ведет к искажению формы потребляемого от сети тока (увеличению его ко-

эффициента нелинейных искажений) и снижению коэффициента мощности источника для индукционного нагрева. Для снижения коэффициента нелинейных искажений потребляемого тока совместно с источниками применяются пассивные фильтры высших гармоник или силовые параллельные активные фильтры [9].

Цель статьи. В связи с введением стандартов, нормирующих эмиссию высших гармоник тока техническими средствами, актуальной становится задача создания источников питания с повышенным коэффициентом мощности, имеющих незначительные искажения формы потребляемого тока.

Изложение основного материала. Авторами предложен вариант источника питания для установки индукционного нагрева, схема силовой части которого приведена на рисунке.

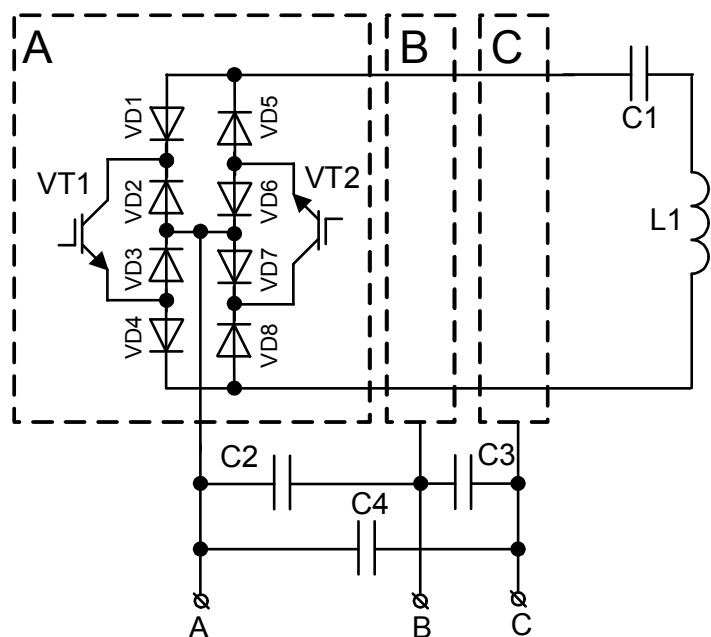


Рисунок – Схема силовой части источника для индукционного нагрева

Основой источника является преобразователь, выполненный из шести идентичных полупроводниковых диодно-транзисторных коммутаторов – по два на фазу.

Индуктор может быть подключен непосредственно (как показано на рисунке) либо через согласующий высокочастотный трансформатор, если в этом есть необходимость.

Диодно-транзисторные коммутаторы преобразователя позволяют подключать выводы резонансного контура $L1C1$ к любым двум фазам сети, при этом управлять полярностью напряжения, приложенного к контуру.

Управление преобразователем – широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с несущей частотой, равной удвоенной резонансной частоте последовательного контура $L1C1$. При этом группы, обеспечивающие положительную ($VD5...VD8$, $VT2$ для фазы A) и отрицательную ($VD1...VD4$, $VT1$ для фазы A) полярности выходного напряжения, работают поочередно. Кратность частот – это обязательное условие, обеспечивающее максимально эффективную «накачку» резонансного контура $L1C1$.

Поскольку выходной ток преобразователя (ток индуктора) имеет близкую к синусоидальной форму с высокой частотой, предварительный расчет скважностей управляющих импульсов весьма затруднен. Поэтому для формирования корректных сетевых токов, моменты переключения (закрытия) силовых ключей определяются из условия пропорциональности заряда, извлеченного из питающей сети с начала периода переключения, соответствующему фазному напряжению. При этом коэффициент пропорциональности устанавливается в соответствии с требуемой выходной мощностью источника. Такой подход позволяет обеспечить качественное формирование потребляемого от сети тока в условиях быстроизменяющегося тока индуктора.

Так как напряжение на конденсаторе резонансного контура $C1$ при работе преобразова-

теля значительно превышает напряжение сети, для защиты полупроводниковых элементов преобразователя реализован специальный алгоритм коммутации: во-первых, исключаются ситуации, когда все силовые транзисторы закрыты (это необходимо для недопущения разрыва цепи с индуктивностью), во-вторых, перед сменой полярности тока резонансный контур закорачивается (это достигается открытием «положительного» и «отрицательного» ключа в одной фазе, например VT1 и VT2, при закрытых ключах остальных двух фаз) для обеспечения двунаправленного пути для протекания тока индуктора. Для обеспечения второго условия частота переключения поддерживается несколько выше удвоенной резонансной частоты контура L1C1, т.е. работа идет при активно-индуктивном характере нагрузки преобразователя.

Выключение источника производится также путем закорачивания резонансного контура и только после ожидания полного рассеивания накопленной в нем энергии в элементах силовой электрической цепи.

Поскольку сетевой ток преобразователя представляет собой последовательность импульсов, для предотвращения проникновения высокочастотных помех в сеть установлены конденсаторы C2...C4.

Силовая часть предложенного источника может быть выполнена на шести силовых модулях IXYS VUI 30-12N1, содержащих по четыре диода и одному IGBT, включенными так, как элементы VD1...VD4, VT1 на рисунке. Применение этих модулей позволит получить максимальную выходную мощность 15...20 кВт при питании от трехфазной сети напряжением 380 В.

В предлагаемом источнике ток одновременно проходит через два транзистора и четыре диода. Поэтому потери мощности в предложенной схеме сопоставимы с потерями в источнике с трехфазным 6-пульсным диодным выпрямителем и мостовым инвертором на четырех транзисторах, но энергоэффективность предлагаемого источника выше из-за значительного уменьшения коэффициента нелинейных искажений потребляемого от сети тока.

Выводы

Применение предложенного источника позволяет повысить энергоэффективность установок индукционного нагрева за счет снижения потребляемого от сети тока, устранения необходимости установки фильтров высших гармоник и улучшения массогабаритных показателей системы.

Список использованных источников:

1. The domestic induction heating appliance: An overview of recent research / J. Acero, J.M. Burdio, L.A. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J.R. Garcia, F. Monterde, P. Hernandez, S. Llorente, I. Garde // Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (24-28 February 2008). – 2008. – Pp. 651-657.
2. Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating / I. Millan, J.M. Burdio, J. Acero, O. Lucia, S. Llorente // IET Power Electronics. – 2011. – Vol. 4, iss. 5. – Pp. 587-592.
3. A versatile power electronics test-bench architecture applied to domestic induction heating / O. Lucia, L.A. Barragan, J.M. Burdio, O. Jiménez, D. Navarro, I. Urriza // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, no. 3. – Pp. 998-1007.
4. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / А.А. Фогель; под ред. А.Н. Шамова. – Л. : Машиностроение, 1989. – 79 с.
5. Васильев А.С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева / А.С. Васильев. – Л. : Машиностроение, 1990. – 80 с.
6. Khemakhem A.Z. An improved LLC resonant inverter for induction heating applications / A.Z. Khemakhem, F. Kourda // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM) (3-6 November 2014). – 2014. – Pp. 1-7.
7. Peram S. Full Bridge Resonant Inverter For Induction Heating Applications / S. Peram, V. Ramesh, J. Sri Ranganayakulu // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2013. – Vol. 3, iss. 1. – Pp. 66-73.
8. Khemakhem A.Z. An Improved Transformer for LLC Resonant Inverter for Induction Heating Applications / A.Z. Khemakhem, H. Belloumi, F. Kourda // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2016. – Vol. 7, № 2. – Pp. 476-483.

9. Power Quality Improvement for Three Phase Current Source Induction Heating Systems / A.R. Namadmalan, S.H. Fathi, J.S. Moghani, S.H. Sadeghi // 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (21-23 June 2011). – 2011. – Pp. 2580-2584.

References:

1. Acero J., Burdio J.M., Barragan L.A., Navarro, Alonso R., Garcia J.R., Monterde F., Hernandez P., Llorente S., Garde I. The domestic induction heating appliance: An overview of recent research [Abstracts of 23-d Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition]. 2008, pp. 651-657.
2. Millan I., Burdio J.M., Acero J., Lucia O., Llorente S. Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating. *IET Power Electronics*, 2011, vol. 4, pp. 587-592.
3. Lucia O., Barragan L.A., Burdio J.M., Jiménez O., Navarro D., Urriza I. A versatile power electronics test-bench architecture applied to domestic induction heating. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 998-1007.
4. Fogel' A.A. *Induktsionnyi metod uderzhaniiia zhidkikh metallov vo vzveshennom sostoianii* [Induction method of retaining the liquid metal in suspension]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 79 p. (Rus.)
5. Vasil'ev A.S. *Lampovye generatory dlia vysokochastotnogo nagreva* [Tube generators for high-frequency heating]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 80 p. (Rus.)
6. Khemakhem A.Z., Kourda F. An improved LLC resonant inverter for induction heating applications [Abstracts of International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)]. 2014, pp. 1-7.
7. Peram S., Ramesh V., Sri Ranganayakulu J. Full Bridge Resonant Inverter For Induction Heating Applications. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, vol. 3, iss. 1, pp. 66-73.
8. Khemakhem A.Z., Belloumi H., Kourda F. An Improved Transformer for LLC Resonant Inverter for Induction Heating Applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 476-483.
9. Namadmalan A.R., Fathi S.H., Moghani J.S., Sadeghi S.H. Power Quality Improvement for Three Phase Current Source Induction Heating Systems [Abstracts of 6-th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications]. 2011, pp. 2580-2584.

Рецензент: В.Н. Матвиенко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.10.2016