

РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ

Г. С. Белоха, Д. И. Морозов

Донбасский государственный технический университет

Аннотация. Приведено исследование последовательного мостового резонансного инвертора для установок индукционного нагрева с стабилизацией мощности нагрузки. Рассмотрены режимы работы предлагаемого инвертора при управлении с постоянной частотой переключения. Приведены осциллограммы, подтверждающие стабилизацию мощности нагрузки при изменении активного и реактивного сопротивлений нагрузки, вызванных нагревом.

Ключевые слова: резонансный инвертор, индукционный нагрев, стабилизации мощности

Введение

Нагрев металла является одним из распространенных производственных процессов в металлургии и машиностроении, влияющим на технико-экономические показатели производства промышленных изделий. Выбор метода нагрева существенным образом влияет на технологичности производственных процессов.

Индукционный нагрев широко используется в промышленности благодаря его преимуществам, таким как безопасность, бесконтактность и эффективность по сравнению с другими классическими методами нагрева.

Электрическая энергия, подаваемая в катушку, преобразуется в тепловую энергию заготовки через электромагнитное поле без какого-либо физического соединения с заготовкой. Для получения желаемого уровня температуры на заготовке, нагрузка должна контролироваться посредством передаваемой ей электроэнергии. Высокочастотный индукционный нагрев применяется в различных технологических операциях, в том числе и для нагрева заготовок перед пластической деформацией (ковкой, штамповкой, прокаткой и т.д.). Для таких операций требуется высокая рабочая температура, для которой рабочая частота должна выбираться в зависимости от размера детали и ее параметров.

Для упрощения математического анализа используются электрические схемы замещения индуктора и заготовки, которые содержат активное и индуктивное сопротивления:

- последовательная схема замещения (рис.1а),
- параллельная схема замещения (рис.1б),
- трансформаторная (рис.1в).

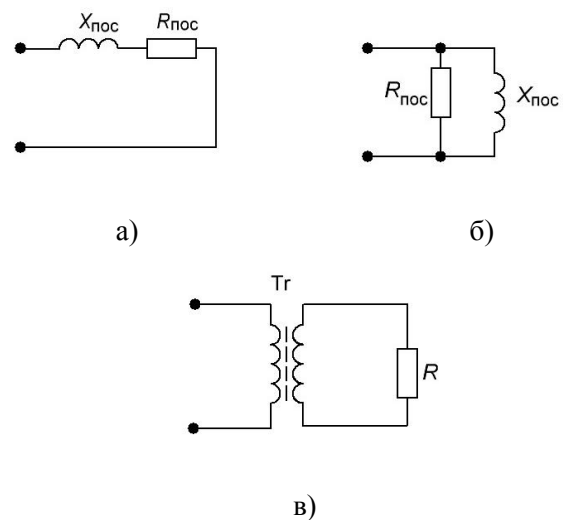


Рис.1. Схемы замещения :последовательная (а), параллельная (б) и трансформаторная (в)

В последовательной схеме замещения сопротивление $R_{\text{пос}}$ характеризует активную мощность, выделяемую в индукторе и в нагреваемом теле. Сопротивление $X_{\text{пос}}$ характеризует реактивную мощность. Значительную часть величины $X_{\text{пос}}$ составляет индуктивное сопротивление зазора. Соотношение между реактивным и активным сопротивлением системы индуктор - нагреваемое тело характеризуется добротностью системы Q или тангенсом угла между напряжением и током индуктора $\text{tg}\varphi$ и поэтому чем больше зазор, тем выше $\text{tg}\varphi$. Для индукционного нагрева обычно $\text{tg}\varphi = 4 \div 10$. Добротность определяется согласно выражению

$$Q = \text{tg}\varphi = \frac{R_{\text{пос}}}{X_{\text{пос}}}.$$

Параметры $R_{\text{пар}}$ и $X_{\text{пар}}$ в параллельной схеме замещения связаны с параметрами последовательной схемы $R_{\text{пос}}$ и $X_{\text{пос}}$ следующими соотношениями:

$$R_{noc} = R_{nap}(Q^2 + 1),$$

$$X_{noc} = \frac{X_{nap}(Q^2 + 1)}{Q^2}.$$

Трансформаторная схема замещения представляет собой однофазный трансформатор в котором учитывается магнитная связь между индуктором и нагреваемым телом.

При проектировании установки индукционного нагрева, как правило, задается активная мощность и напряжение на индукторе что позволяет сразу определить сопротивление R . Величина X непосредственно определяет значение емкости C , необходимой для компенсации реактивной мощности индуктора.

Для индукционного нагрева в большинстве случаев предлагается использовать резонансные инверторы (мостовые, полумостовые) с различными законами управления для регулирования и стабилизации тока, напряжения или мощности нагрузки [1].

С точки зрения эксплуатации индукционных установок возможны три способа регулирования:

- стабилизация напряжения на нагрузке U , режим применяется в установках для поверхностной закалки и нагревателях методического действия, в которых необходимо обеспечить повторяемость процесса нагрева периодически сменяемых заготовок;

- стабилизация тока звена постоянного тока на номинальном уровне, в этом режиме нагрузке передается максимальная мощность.

- стабилизация мощности нагрузки для равномерного нагрева заготовки.

Для обеспечения точного индукционного нагрева, необходимо точно и непрерывно регулировать мощность нагрузки.

Управление резонансными преобразователями при стабилизации мощности нагрузке осуществляется с переменной или постоянной частотой.

Недостатком использования методов с переменной частотой, является переменная рабочая частота инвертора, что вызывает проблемы с более сложной фильтрацией пульсаций выходного напряжения и оказывает влияние на значения параметров системы.

Вышеупомянутые проблемы можно решить, используя системы управления с постоянной частотой, где управление мощностью достигается путем изменения формы напряжения, приложенного к резонансной цепи (выходное напряжение инвертора) [2-5].

Цель работы – исследование резонансного инвертора напряжения для индукционного нагрева с регулированием и стабилизацией мощности нагрузки при управлении с фиксированной частотой.

Материал исследований

Схема предлагаемого резонансного инвертора (рис.2) представляет собой мостовой инвертор напряжения на IGBT транзисторах VT1 – VT4 с обратными диодами VD1-VD4, последовательный резонансный контур $R L C$, систему управления CY , датчики тока UA и напряжения UV на нагрузке.

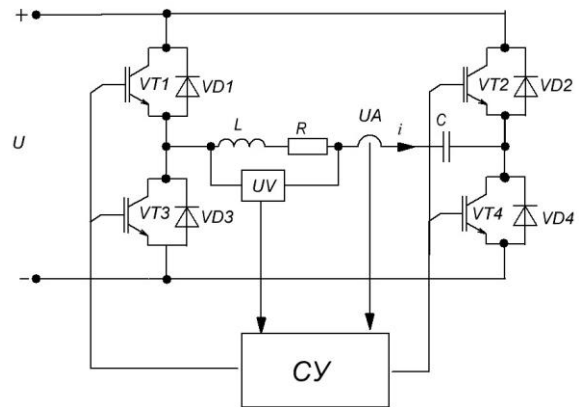


Рис. 2. Схема резонансного инвертора

В инверторе в качестве резонансного контура используется схема замещения индуктора и заготовки как последовательного соединения R и L . Емкость конденсатора C выбрана для обеспечения резонанса на частоте 1кГц согласно выражению:

$$C = \frac{1}{\omega^2 \cdot L},$$

где ω - резонансная частота.

Баланс напряжений на нагрузке описывается выражениями

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

где U – напряжение питания, u_C - напряжение на конденсаторе C .

Ток в нагрузочной цепи определяется как

$$i = \frac{1}{C} \int u_C dt.$$

Полное сопротивление нагрузочного цепи равно

$$z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что нагрузочная цепь имеет при $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ – активный характер, при $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ – индуктивный характер, а при $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ – емкостной.

В ферромагнитных материалах, электрическое сопротивление и магнитная проницаемость зависят от температуры. Таким образом, полное сопротивление цепи изменяется в течение цикла нагрева. Из-за изменения полного сопротивления изменится мощность нагрузки, что не желательно. Поэтому предложено построение системы управления при стабилизации мощности нагрузки с постоянной частотой переключения вентилей, управление мощностью достигается путем изменения формы напряжения, приложенного к резонансной цепи.

Транзисторы резонансного инвертора поочередно открываются с заданным алгоритмом управления. На выходе инвертора при этом образуется прямоугольной формы переменное напряжение, с амплитудой близкой к значению напряжения питания инверторного моста. Под его воздействием возникают резонансные колебания в контуре.

На транзисторы VT1 и VT4 подаются импульсы с постоянной частотой равной частоте резонанса и длительностью, а на транзисторы VT2 и VT3 подаются импульсы с различной длительности для реализации изменения формы напряжения.

Инвертор имеет три режима работы.

I режим: транзисторы VT1 и VT4 открыты, к нагрузке прикладывается напряжение питания (рис. 3.а).

II режим работы: транзисторы VT2 и VT3 открыты к нагрузке прикладывается обратное напряжение питания (рис 3.б).

Инвертор дополнительно имеет III режим работы при котором выходное напряжение равно нулю при формировании отрицательной полуволны резонансного тока (на все транзисторы поданы импульсы на открытие). Если добротность контура достаточно высока, то резонансный ток продолжает протекать (рис. 3 в).

Таким образом при регулировании длительность выключенного состояния поддерживается

заданная мощность нагрузки при изменении параметров нагрузки.

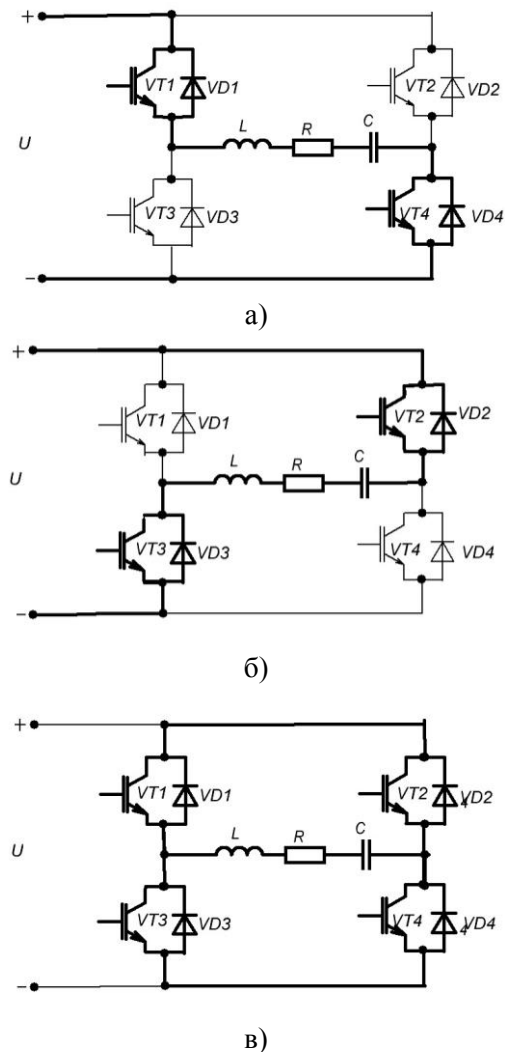


Рис. 3. Режимы работы резонансного инвертора
а) режим I, б) режим II, в) режим III

На рисунке 4 показана диаграмма режимов работы. На ней представлено выходное напряжение инвертора и отмечено чередование режимов работы.

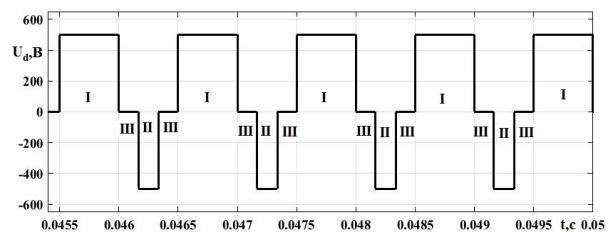


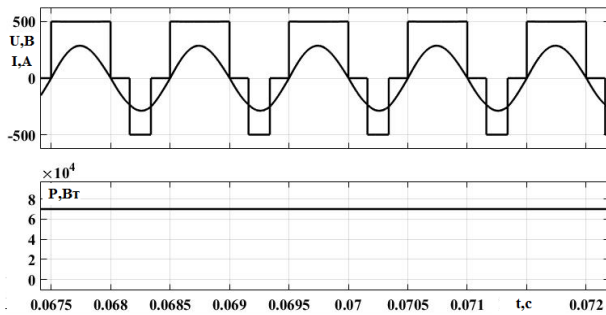
Рис. 4. Диаграмма режимов работы

Контроль активной мощности осуществляется регулятором мощности. Мощность нагрузки измеряется с помощью датчиков тока UA в нагрузке и напряжения UV на ней.

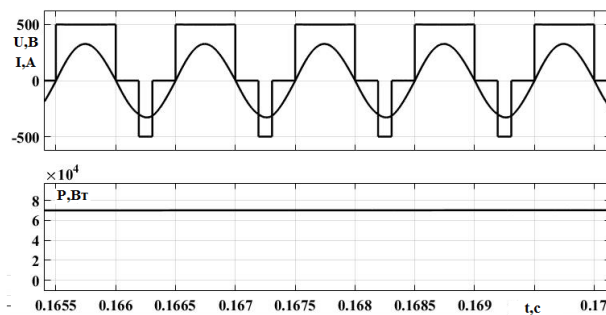
Исследования резонансного инвертора проводились на цифровой модели в пакете MatLab.

При моделировании приняты следующие допущения: идеальный входной источник постоянного напряжения, идеальные силовые ключи.

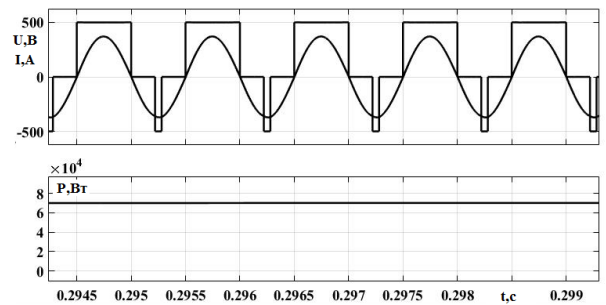
На рисунке 5 представлены фрагменты осциллограмм напряжения на выходе инвертора, ток в нагрузке и мощность нагрузки при $R=1,5$ Ом (рис. 5а), $R=1,7$ Ом (рис. 5б), $R=2$ Ом (рис. 5в) при той же мощности нагрузки ($P=70$ кВт).



а)



б)



в)

Рис. 5. Работа резонансного инвертора при $R=1,5$ Ом (а), $R=1,7$ Ом (б), $R=2$ Ом (в)

Как видно из осциллограмм при изменении сопротивления изменяется длительность отрицательного участка выходного напряжения. При этом мощность нагрузки остается неизменной. Ток в нагрузочной цепи синусоидальный и синфазный выходному напряжению цепи, что свидетельствует о наличии в цепи резонанса.

На рисунке 6 представлен весь процесс стабилизации мощности нагрузки при изменении активного сопротивления нагрузки (с 1,5 Ом до 2 Ом) в процессе нагрева. В начальный момент времени и в моменты изменения сопротивлений происходит переходной процесс длительностью менее 0,03 с.

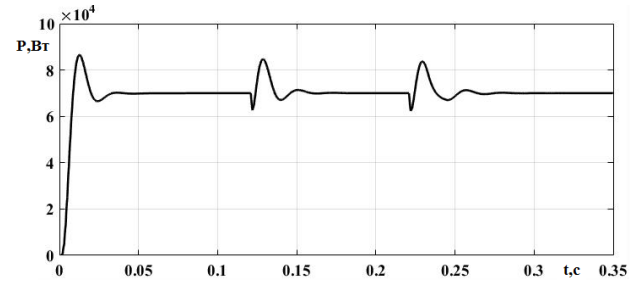


Рис. 6. Процесс стабилизации мощности нагрузки

Качество формируемого тока нагрузки, т.е. уровень содержания гармоник в кривой тока, оценим коэффициентом гармонических составляющих THD:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{\max}} (I_h)^2}{I_1^2}},$$

где I_h – гармоническая составляющая тока; I_1 – основная гармоника тока; h – номер гармоники, $h_{\max}$ согласно ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004 равно 40 [6].

На рисунке 7 представлен спектр тока нагрузки. THD составляет менее 2%, что удовлетворяет требованиям международных стандартов.

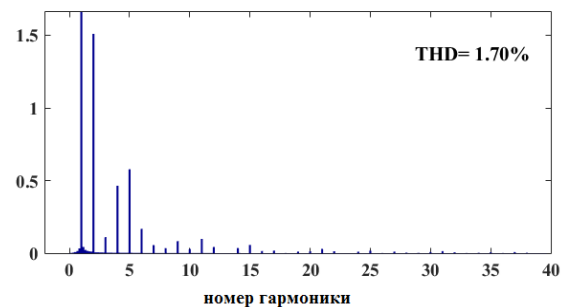


Рис. 7. Спектр тока нагрузки

В процессе нагрева изменяется не только активное сопротивление, но и индуктивное.

На рис. 8 показана реакция на изменение полного сопротивления нагрузки. Поскольку система управления настроена на резонансную частоту для определенного значения индуктивности, то при ее изменении (увеличении) выход

ной контур будет иметь индуктивный характер, а при уменьшении - емкостной, это скажется на опережении (рис.8.а) или отставании (рис.8.в) тока нагрузки от выходного напряжения инвертора. На рис. 8.б показан случай резонанса.

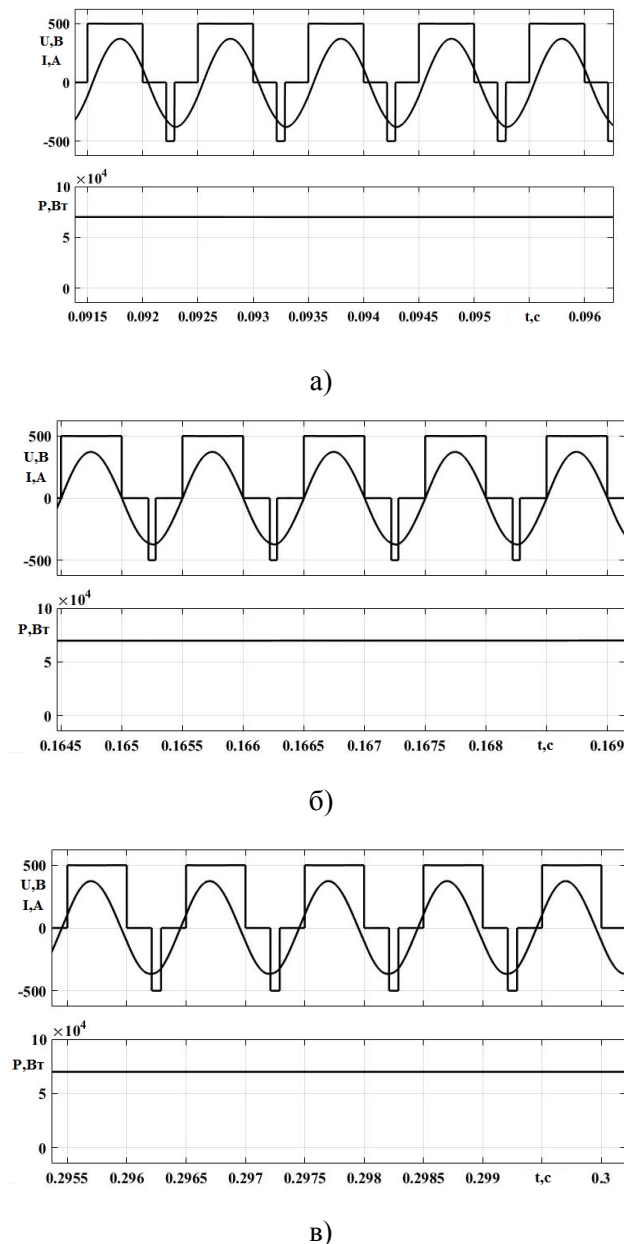


Рис. 8. Работа резонансного инвертора при

а) $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, б) $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, в) $\omega L < \frac{1}{\omega C}$

При изменении полного сопротивления стабилизация мощности нагрузке также не изменяется (рис.9).

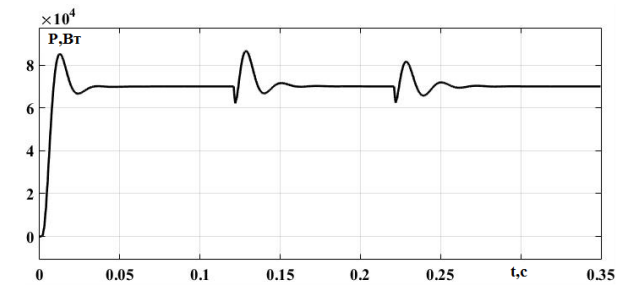


Рис. 9. Процесс стабилизации мощности нагрузки

На рисунке 10 показано регулирование мощности нагрузки.

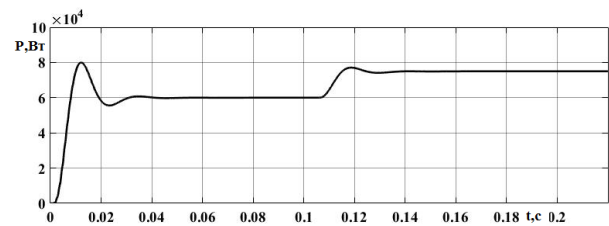


Рис. 10 Регулирование мощности нагрузки

Выводы

Предложен резонансный инвертор напряжения с регулированием и стабилизацией мощности, в котором управление мощностью достигается путем изменения формы напряжения, приложенного к резонансной цепи (выходное напряжение инвертора). Управление инвертором осуществляется при постоянной частоте, что упрощает схемную реализацию.

Проведенные исследование подтвердили возможность стабилизации мощности нагрузки при изменении как активного, так и полного сопротивления нагрузки.

Выходной ток имеет синусоидальную форму, коэффициент гармонических искажений которого составляет менее 2%.

Список использованной литературы

1. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. Ч.1 [Текст] / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
2. Comparison of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters Burdio, J. M. [Text] / Barbosa, P. M. / Lee, F. C. / Center for Power Electronics System sin CPES power electronics seminar by Center for Power Electronics Systems; 2000, 182–187 pp.
3. Burdio, J. M., Canales, F., Barbosa, P. M., Lee, F. C.: A Comparison Study of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters [Text] // Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC), 2001, 427–432 pp.

4. Земан, С. К. Анализ импульсно-модуляционных способов регулирования последовательного резонансного инвертора [Текст] / С. К. Земан, А. Осипов, А. Юшков // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 86–90.

5. H. Fujita, H. Akagi, / Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz voltage-source inverter for induction melting applications [Text] // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 279–286, March/April 1996.

6. Електромагнітна сумісність. Частина 3–12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-12:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-12:2009 : – [Действительный 01.04.2012]. – Киев, 2012. – 38с.

References

1. Zinovev, G. S. (1999) Fundamentals of power electronics Part 1 [Osnovy silovoy elektroniki: Uchebnik. Ch.1] Novosibirsk, NGTU, 199 p.

2. Burdio, J. M., Canales, F., Barbosa, P. M., Lee, F. C. (2000) Comparison of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters, Center for Power Electronics Systems in, Annual power electronics seminar, CPES 182–187 pp.

3. Burdio, J. M., Canales, F., Barbosa, P. M., Lee, F. C. (2001) A Comparison Study of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters, in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC), 427–432 pp.

3. Zeman, S. K., Osipov A., Yushkov A. (2007) Analysis of pulse-modulation methods for regulating a serial resonant inverter [Analiz impulsno-modulyatsionnykh sposobov regulirovaniya posledovatel'nogo rezonansnogo invertora] Silovaya elektronika. № 4, 86–90 pp.

5. Fujita, H., Akagi, H., (1996) Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz voltage-source inverter for induction melting applications, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 279–286.

6. Elektromagnitna sumisnist. Chastina 3–12. Normi. Normi na harmoniki strumu, stvoreni obladnanniam iz nominalnim vhidnim strumom siloyu ponad 16 A ta do 75 A vklyuchno na fazu, pidklyuchenim do nizkovoltnih elektroposta-chalnih sistem zagalnoyi prznachenosti [Electromagnetic compatibility. Part 3–12. Norms. Standards for current harmonics created by equipment with a nominal input current of more than 16 A and 75 A inclusive for the phase connected to low-voltage general-purpose electrical supply systems] (IEC 61000-3-12:2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-12:2009 : – [Deystvitelnyiy 01.04.2012], Kiev, 2012, 38p.

RESONANCE INVERTER FOR INDUCTION HEATING WITH STABILIZATION OF THE LOAD POWER

H. S. Bielokha, D. I. Morozov

Donbass State Technical University

Abstract. This paper presents voltage source inverter for induction heating applications, which is characterized by the power control based on of fixed-frequency. Induction heating is an important enabling technology. Induction heating technology is nowadays the heating technology of choice in many applications due to its advantages regarding efficiency, fast heating, safety and accurate control. The output power stage of the proposed converter consists of a single-phase voltage inverter using four IGBTs. The power control is achieved by varying the shape of the voltage up applied to the resonant circuit. This power control strategy allows the inverter to work close to the resonance frequency for all output-power levels. The control principles of the pro-posed method are described in detail and its validity is verified through simulated results. The inverter system is designed and the simulation is done using Matlab. The simulation results of are presented. The process of load power stabilization is demonstrated when both active and full load resistance changes. The output current has a sinusoidal form, the harmonic distortion factor of which is less than 2%. With this circuit, an important improvement of the inverter efficiency is expected at high-frequency working conditions.

Key words: resonant inverter, induction heating, power stabilization.

РЕЗОНАНСНИЙ ІНВЕРТОР ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ З РЕГУЛЮВАННЯМ ПОТУЖНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ

Г. С. Белоха, Д. І. Морозов

Донбаський державний технічний університет

Анотація. Наведено дослідження послідовного мостового резонансного інвертора для установок індукційного нагріву з стабілізацією потужності навантаження. Розглянуто режими роботи пропонованого інвертора при керуванні з постійною частотою перемикання. Наведено осцилограми, що підтверджують стабілізацію потужності навантаження при зміні активного і реактивного опорів навантаження, викликаних нагріванням.

Ключові слова: резонансний інвертор, індукційний нагрів, стабілізація потужності.

Получено 15.04.2017



Белоха Галина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета Просп. Победы, 84, Лисичанск, Украина.

E-mail: galin.1303@mail.ru

Halyna Bielokha, PhD. of Science, assistant professor of the Department automation and electromechanical systems, Dondas State Technical University, Peremogu ave., 84, Lisichansk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-4277-367X



Морозов Дмитрий Иванович кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета Просп. Победы, 84, Лисичанск, Украина, E-mail: dimorozov2@yandex.ua

Dmitry Morozov, PhD. of Science, assistant professor, Head of the Department automation and electromechanical systems, Dondas State Technical University, Peremogu ave., 84, Lisichansk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-4018-4054