

9. Zajharikov N.A. Heat-exchange processes in glass melting furnaces. Kyiv: Gostekhizdat, 1962. 246 p.
10. Tovazhnianskii L.L., Koshelnik V.M., Solovei V.V., Koshelnik A.V. Integrated energy-efficient thermal technologies in glass production. Harkov: NTU "HPI", 2008. 628 p.
11. Pilon L., Zhao G., Viskanta R. Three-dimensional flow and thermal structure in glass melting furnaces. Part I: Effect of the net heat flux distribution. *Glass Science and Technology*. 2002. Vol. 75, No. 2. P. 55–68.
12. Pilon L., Zhao G., Viskanta R. Three-dimensional flow and thermal structure in glass melting furnaces. Part II: Effect of batch and bubbles. *Glass Science and Technology*. 2002. Vol. 75, No. 3. P. 115–124.
13. Choudhary M.K. Three-dimensional mathematical model for flow and heat transfer in electric glass furnaces. *Heat Transfer Engineering*. 1985. Vol. 6, No. 4. P. 55–65.
14. Loitsianskii L.G. Mechanics of liquid and gases. Moskva: Nauka, 1978. 736 p.
15. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p.
16. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
17. The use of refractories for container glass furnaces. – Saint-Gobain SEFPRO, 2009. 27 p. – <http://www.sefpro.com/>

Надійшла 05.07.2018

Received 05.07.2018

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ З СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ПОТУЖНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ

Г.С. Белоха^{*}, канд. техн. наук, Д.І. Морозов^{**}, канд. техн. наук

Донбаський державний технічний університет,
м. Лисичанськ, пр. Перемоги, 84. 93100, Україна
e-mail:pointage13@gmail.com

Наведено резонансний інвертор напруги для індукційного нагрівання з стабілізацією потужності навантаження. Керування вихідною потужністю досягається за рахунок зміни форми напруги, що подається на резонансний контур. Запропонований принцип керування потужністю дає змогу інвертору працювати на резонансній частоті для всіх рівнів вихідної потужності. Керування температурою нагрівання здійснюється шляхом регулювання потужності навантаження резонансного інвертора. Наведено результати моделювання резонансного інвертора, а також спосіб визначення резонансних характеристик інвертора з використанням аналітичних розрахунків, заснованих на визначенні характеристик за першою гармонікою вихідної напруги. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: резонансний інвертор, індукційне нагрівання, стабілізація потужності.

Введення. Нагрівання металу є розповсюдженим технологічним процесом. Вибір методу нагрівання металу істотно впливає на якість нагрівання. Одним з його методів є індукційне нагрівання, яке широко використовується в промисловості завдяки його перевагам, таким як безпека нагріву, безконтактність й ефективність у порівнянні з іншими класичними методами. Електрична енергія, що подається в індуктор, перетворюється на теплову енергію заготівки через електромагнітне поле без будь-якого фізичного з'єднання з заготівкою. Для отримання бажаного рівня температури на заготівці параметри навантаження мають контролюватися за допомогою електроенергії, що їй передається.

Для індукційного нагрівання використовуються транзисторні або тиристорні резонансні інвертори [1], які за схемотехнікою можуть бути мостові, напівмостові з різними законами керування для забезпечення стабілізації параметрів навантаження, таких як напруга навантаження (для поверхневого гартування), струм навантаження (для максимального нагрівання) або потужність навантаження (для рівномірного нагрівання) [2, 3].

Високочастотне індукційне нагрівання застосовується у різних технологічних операціях, у тому числі й для нагрівання заготовок перед подальшою пластичною деформацією.

Для таких операцій потрібна висока робоча температура, для якої робоча частота має вибиратися залежно від розміру деталі та її параметрів.

Для якісного нагрівання заготовок потрібно контролювати їх температуру нагрівання [4]. Контроль температури заготовки фізично доцільніше проводити поза індуктором, тобто вимірювати температуру на його виході. Систему керування температурою заготовки необхідно будувати як систему регулювання температури на виході індуктора.

Об'єктом керування є система «джерело енергії – індуктор – рухома заготовка». Джерелом енергії в системі є резонансний інвертор. У феромагнітних матеріалах електричний опір і магнітна проникність залежать від температури. Отже, повний опір змінюється протягом циклу нагрівання. Через зміни повного опору зміниться потужність навантаження, що не бажано. Тому для якісного та рівномірного нагрівання як джерело живлення вибрано резонансний інвертор, який є інвертором напруги та працює в режимі джерела потужності з можливістю регулювання та стабілізації потужності в навантаженні.

Мета роботи – розробка резонансного інвертора зі стабілізацією потужності навантаження, який використовується в установці індукційного нагрівання для забезпечення необхідної температури заготовки та отримання його регульованих характеристик.

Матеріали досліджень. Функціональна схема запропонованого резонансного інвертора та його системи керування показана на рис. 1. Інвертор є мостовим інвертором напруги на IGBT транзисторах VT1...VT4 зі зворотними діодами VD1...VD4. Така силова схема була вибрана за рахунок можливості реалізації вихідної потужності більш ніж 100 кВт [5, 6].

Навантаженням резонансного інвертора є індуктор та заготовка, які представлені електричною схемою заміщення у вигляді послідовного з'єднання еквівалентних активного опору R та індуктивності L , що враховують параметри індуктора та заготовки. Ємність C у контурі навантаження вибирається для забезпечення резонансу на частоті $f=1$ кГц.

Керування резонансними перетворювачами можна здійснювати зі змінною або постійною частотою перемиканням вентилів. Оскільки головним недоліком методів зі змінною частотою є змінна робоча частота інвертора, що вимагає більш складної фільтрації пульсацій вихідної напруги і впливає на визначення параметрів системи, то керування запропонованим інвертором відбувається з постійною частотою.

На транзистори VT1 та VT4 подаються імпульси з постійною частотою, рівною частоті резонансу, і незмінною тривалістю, а на транзистори VT2 та VT3 – імпульси різної тривалості для реалізації зміни форми напруги. На виході інвертора при цьому утворюється прямокутна форма змінної напруги з амплітудою, близькою до значення напруги живлення інвертора. Під впливом вихідної напруги виникають резонансні коливання в контурі навантаження.

Вихідна напруга інвертора згідно з режимами його роботи

$$U = \begin{cases} E & \text{при } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{при } \pi < \omega t < \pi + \alpha \text{ и } 2\pi - \alpha < \omega t < 2\pi, \\ -E & \text{при } \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (1)$$

де α – кут комутації; E – напруга живлення інвертора; $\omega=2\pi f$ – резонансна частота.

Для забезпечення необхідного розподілу температури у рухомій в індукторі заготовці динаміка задання на температуру має відповідати динаміці її реальної зміни. Сигнал не можна подати в систему стрибком, це може призвести до роботи резонансного інвертора з максимальною потужністю, що спричинить відхилення температури на ділянках заготовки від необхідних значень – локальне перегрівання або локальне збільшення градієнта температури.

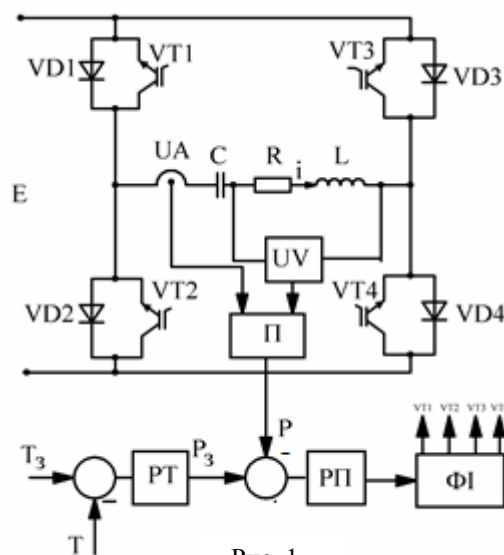


Рис. 1

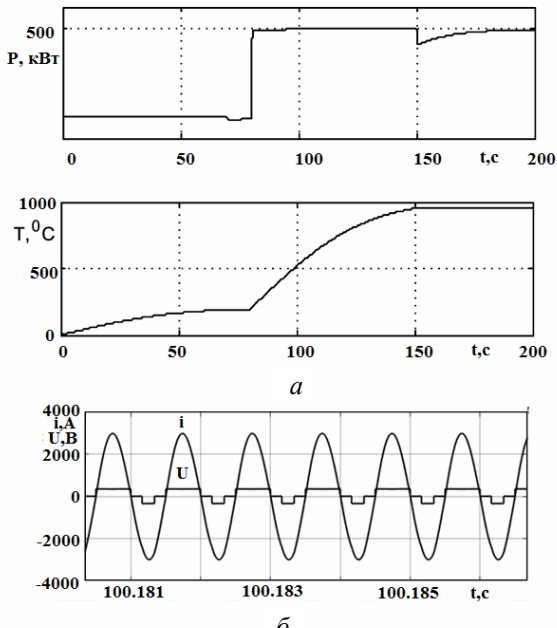


Рис. 2

подається на формувач імпульсів (ФІ).

Вимірювання активної потужності P на навантаженні відбувається способом інтегрування миттєвої потужності за період резонансного процесу ($T_p=1/f$)

$$P = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u i dt, \quad (2)$$

де u – миттєве значення напруги навантаження; i – миттєве значення струму в навантаженні.

Згідно з алгоритмом розрахунку інтегратор визначення потужності за виразом (2) щоперіоду обнуляється, а значення при цьому до обнулення передається в пристрій фіксації. Так, значення потужності відстає від реального значення на один період. З огляду на те, що T_p на декілька порядків менше технологічних сталих часу, вимірювання потужності в системі регулювання температури можна вважати безінерційним.

За результатами дослідження резонансного інвертора на рис. 2 а представлено процес роботи резонансного інвертора при двох значеннях температури нагрівання заготовок, які відповідають потужності в навантаженні 100 та 500 кВт. З осцилограм видно, що при заданій потужності навантаження заготовка нагрівається до температури задання. На момент часу $t=80$ с задання на температуру змінюється, при цьому регулятор температури дає нове значення для потужності навантаження.

На рис. 2 б показано роботу інвертора на RL навантаження у разі потужності 500 кВт у навантаженні, представлено струм навантаження і вихідна напруга інвертора у разі наявності резонансу в колі. Однією з характеристик інверторів є регульовальні характеристики. У процесі роботи резонансний інвертор регулює потужність згідно з програмою нагрівання та стабілізує її на заданому рівні при зміні опорного навантаження, яке виникає при нагріванні.

Для визначення регульовальної характеристики треба провести розрахунок за першою гармонікою вихідної напруги. Оскільки вихідна напруга має прямокутну форму, то у разі розкладу в ряд Фур'є амплітуда першої гармоніки вихідної напруги має вид

$$U_{m1} = \frac{4E}{\pi}. \quad (3)$$

Регулювання за принципом дії здійснюється шляхом змінення тривалості імпульсу негативної півхвилі вихідної напруги, а у позитивній півхвилі тривалість імпульсу постійна. З урахуванням цього вираз (3) має вид

$$U_{m1} = \frac{4E}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Амплітуда першої гармоніки струму з урахуванням (4) має вид

$$I_m = \frac{4E}{\pi Z} \cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{4E}{\pi R} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \cos \varphi, \quad (5)$$

де φ – кут зсуву між струмом та напругою навантаження; Z – повний опір навантаження ($Z=R/\cos\varphi$).

Активна потужність визначається за виразом

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (6)$$

Для отримання регулювальної характеристики замінимо кут регулювання α на відносну тривалість імпульсу за період

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha}{\pi}. \quad (7)$$

Вираз (6) з урахуванням (5) та (7) набуде виду

$$P = \frac{8E^2}{\pi^2 R} \cos^4 \frac{\alpha}{2} \cos^2 \varphi. \quad (8)$$

Стосовно максимального значення активної потужності навантаження регулювальна характеристика має вид

$$P^* = \cos^4 \left(\frac{\pi}{2} (\gamma - 1) \right) \cos^2 \varphi. \quad (9)$$

На рис. 3 наведено сімейство регулювальних характеристик у разі регулювання потужності навантаження для декількох значень $\cos\varphi$ (1 – $\cos\varphi=1$, 2 – $\cos\varphi=\pi/6$, 3 – $\cos\varphi=\pi/4$), які отримано згідно з виразом (9). Оскільки позитивна півхвиля напруги не змінює тривалості, то γ може змінюватися від 0,5 до 1.

Згідно з графіком залежності зі зростанням зсуву між напругою та струмом, активна потужність зменшується, бо збільшується повний опір навантаження. Максимальне значення потужності в навантаженні буде при $\gamma=1$.

Згідно з системою керування інвертор працює в режимі стабілізації потужності навантаження. Для цього виразимо амплітуду вихідного струму через потужність навантаження:

$$I_m = \frac{\pi P}{2E \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} (\gamma - 1) \right) \cos \varphi}. \quad (10)$$

У відносних одиницях вираз (10) має вид

$$I^* = \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} (\gamma - 1) \right) \cos \varphi}. \quad (11)$$

Графічно регулювальні характеристики згідно з (11) представлено на рис. 4 (1 – $\cos\varphi=1$, 2 – $\cos\varphi=\pi/6$, 3 – $\cos\varphi=\pi/4$). Найбільше значення струму буде тоді, коли кут керування буде максимальним, тобто вихідна напруга буде рівною нулю на інтервалі від π до 2π . Чим більший зсув між напругою та струмом, тим більший струм у навантаженні.

Висновки: Розроблено джерело потужності з регулюванням температури нагрівання заготовки та отримано осцилограми його роботи, які підтвердили роботу резонансного інвертора в режимі джерела потужності з регулювання температури нагрівання.

Отримано аналітичні вирази для одержання регулювальних характеристик – залежність потужності навантаження від відносної тривалості імпульсу вихідної напруги інвертора у разі регулювання потужності навантаження, а також залежність відносної амплітуди струму у разі стабілізації потужності навантаження.

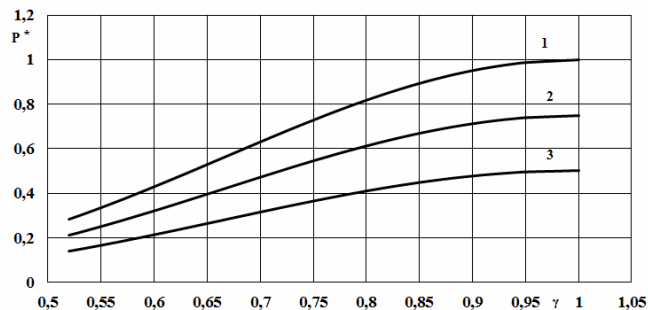


Рис. 3

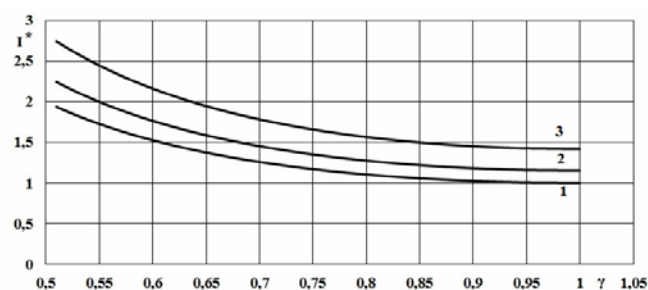


Рис. 4

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Ч.1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 199 с.
2. Burdio J.M. Barbosa P.M., Lee F.C. Comparison of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters. *Center for Power Electronics System sin CPES power electronics seminar by Center for Power Electronics Systems*. 2000. Pp 182–187.
3. Lucia O., Maussio P., Dede E.J., Burdio J. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 61 (n 5). Pp. 2509–2520.
4. Рапопорт Э.Я., Пleshivtseva Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. Москва: Наука, 2012. 309 с.
5. Белоха Г.С., Морозов Д.И. Резонансный инвертор для индукционного нагрева с регулированием мощности нагрузки. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2017. Вып. № 25(101). С. 132–138.
6. Белоха Г.С. Электромагнитно совместимый преобразователь частоты для индукционного нагрева. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Вип. №27(1249). С. 365–368.

УДК 621.314

Г.С. Белоха, канд. техн. наук, **Д.И. Морозов**, канд. техн. наук

Донбасский государственный технический университет,

г. Лисичанск, пр. Победы, 84. 93100, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ

Представлен резонансный инвертор напряжения для индукционного нагрева, который работает при стабилизации мощности нагрузки. Управление выходной мощностью достигается за счет изменения формы напряжения, подаваемого на резонансный контур. Предложенный принцип управления мощностью позволяет инвертору работать при резонансной частоте для всех уровней выходной мощности. Управление температурой нагрева осуществляется путем регулирования мощности нагрузки резонансного инвертора. Представлены результаты моделирования, а также способ определения резонансных характеристик инвертора с использованием аналитических расчетов, основанных на расчете характеристик по первой гармонике напряжения. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: резонансный инвертор, индукционный нагрев, стабилизация мощности.

H.S. Bielokha, D.I. Morozov

Donbass State Technical University,

Lysychansk, Peremohy ave., 84, 93100, Ukraine

INVESTIGATION OF THE RESONANT INVERTER FOR INDUCTION HEATING WITH STABILIZATION OF THE LOAD POWER

Presents voltage source inverter for induction heating applications, which is characterized by the power control based. The output 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 to the resonance frequency for all output-power levels. Control of the heating temperature is performed by controlling the resonance inverter power load. The simulation results of are presented. The way of determining the resonant inverter properties by using analytical calculations based on the inverter output voltage distribution on the first harmonic of is presented. Referenses 6, figures 4.

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

1. Zinovev G.S. Fundamentals of power electronics. Part 1. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 1999. 199 p. (Rus).
2. Burdio J.M. Barbosa P.M. Lee F.C. Comparison of fixed-frequency control strategies for ZVS DC/DC series resonant converters. *Center for Power Electronics System sin CPES power electronics seminar by Center for Power Electronics Systems*. 2000. P 182–187.
3. Lucia O., Maussio P., Dede E.J., Burdio J. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 61 (n5). Pp. 2509–2520.
4. Rapoport E. Ya., Pleshivtseva Yu. E. Optimum control of temperature modes of induction heating. Moscow: Nauka, 2012. 309 p. (Rus)
5. Beloha G.S., Morozov D.I. Resonance inverter for induction heating with stabilization of the load power. *Elektrotehnicheskie i kompyuternye sistemyi*. 2017. №25(101). P. 132–138. (Rus)
6. Beloha. G. S. Electromagnetically compatible frequency converter for induction heating. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskiy politehnicniy institut»*. Harkiv: NTU «HPI», 2017. №27(1249). P. 365–368. (Rus)

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018