

Г. С. БЕЛОХА, канд. техн. наук, доц., Донбасский государственный технический университет, Лисичанск.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО СОВМЕСТИМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Введение. В промышленности широко применяется нагрев металла, выбор метода нагрева существенно влияет на его качество. Высокочастотный индукционный нагрев на базе полупроводниковых преобразователей применяется в различных технологических операциях, в том числе и для нагрева заготовок перед пластической деформацией (ковкой, штамповкой, прокаткой и т.д.).

По сравнению с другими видами нагрева индукционный нагрев обладает множеством преимуществ, таких как экономичность, бесконтактность, высокая интенсивность нагрева и возможность качественного и точного управления процессом нагрева заготовок.

При нагреве под пластическую деформацию необходимо поддерживать равномерную температуру нагрева. Высокая температура приводит к существенному изменению магнитной проницаемости, удельного сопротивления, что приводит к изменению полного сопротивления системы «индуктор–нагреваемое тело».

Устройства индукционного нагрева являются сложными техническими объектами, в которых происходят физические процессы, имеющие различную природу. Источник питания является одним из главных звеньев цепи. Наиболее эффективными источниками питания для устройств индукционного нагрева перед последующей пластической деформацией являются тиристорные и транзисторные преобразователи частоты. Транзисторные инверторы являются предпочтительными, поскольку имеется возможность выключения транзистора, не в нуле тока, а тогда, когда это необходимо. Использование резонансных инверторов с транзисторами и обратными диодами позволяет исключить бестоковые паузы тока нагрузки, что значительно улучшает гармонический состав выходного тока. Так же наличие обратных диодов позволяет исключить возможность возникновения перегрузок по напряжению.

Источники питания индукционного нагрева являются преобразователями частоты, которые преобразуют мощность питающей сети (50 Гц) в требуемую однофазную мощность на частоте, необходимой для процессов индукционного нагрева [1, 2].

Одной из основных задач силовой электроники является обеспечение электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей с питающей сетью переменного тока, международные и государственные стандарты жестко ограничивают эмиссию в сеть высших гармоник тока. Большинство современных потребителей электрической энергии являются нелинейными нагрузками, что приводит к искажению формы потребляемого из сети тока. Использование активных выпрямителей в составе преобразователей частоты для индукционного нагрева позволяет решить проблему электромагнитной совместимости.

Обобщенная схема преобразователей частоты представлена на рисунке 1. Она имеет входной выпрямитель, обеспечивающий необходимую постоянную величину выходного напряжения, фильтр для согласования работы, резонансный инвертор и нагрузку.

Возможны три способа регулирования параметров нагрузки:

– стабилизация напряжения на нагрузке;

– стабилизация тока звена постоянного тока на номинальном уровне, в этом режиме нагрузке передается максимальная мощность;

– стабилизация мощности нагрузки для равномерного нагрева заготовки.

Поскольку нагрев осуществляется перед пластической деформацией, то необходимо точно и непрерывно регулировать мощность нагрузки для равномерного нагрева заготовки.

Цель работы. Разработка преобразователя частоты электромагнитно совместимого с сетью для индукционного нагрева с регулированием и стабилизацией мощности нагрузки.

Материал и результаты исследований.

Функциональная схема предлагаемого преобразователя частоты представлена на рисунке 2.

Преобразователь частоты состоит из активного выпрямителя формирующего синусоидальные токи потребляемые из сети, обеспечивая электромагнитную совместимость преобразователя с сетью, звена постоянного напряжения, выходное напряжение которого обеспечивает питания резонансного инвертора, резонансного инвертора, преобразующего постоянный ток в однофазный высокочастотный переменный ток, нагрузки и системы управления.

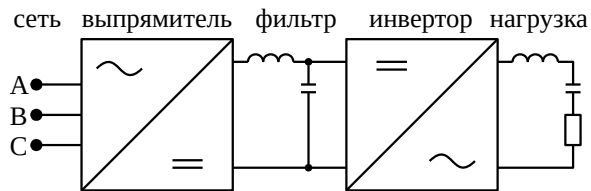


Рис. 1 Схема преобразователя частоты для индукционного нагрева

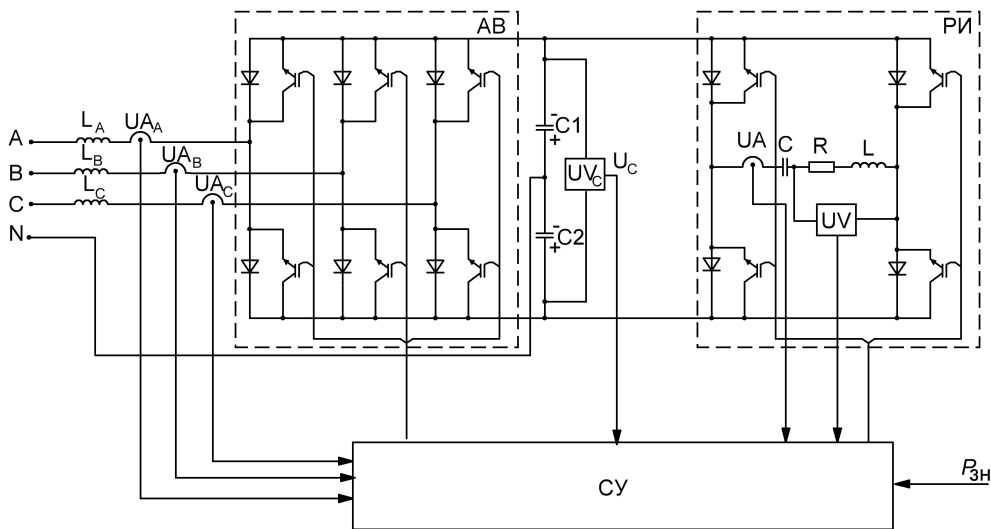


Рис. 2 Функциональная схема преобразователя частоты

Активный выпрямитель (АВ) представляет собой трехфазной мостовой выпрямитель на IGBT транзисторах с обратными диодами. Выход транзисторного моста подключен к последовательно соединенным конденсаторам $C1$ и $C2$, точка соединения которых подключена к нейтрале сети. При этом входы активного выпрямителя через формирующие дроссели L_A, L_B, L_C и датчики потребляемых из сети токов U_{Aa}, U_{Ab}, U_{Ac} подключены к фазам питающей сети. На выходе емкостного накопителя напряжение не имеет пульсаций, что позволяет обеспечить стабильность напряжения питания для резонансного инвертора.

Объединение выхода активного выпрямителя с емкостным накопителем и резонансным инвертором позволяет осуществить раздельное и независимое управление процессами формирования мощности в нагрузке и качеством потребляемого из сети тока.

Индуктор и заготовка заменяется электрической схемой замещения в виде последовательного соединения активного сопротивления R и индуктивного L , учитывающих параметры индуктора и заготовки. Емкость C в нагрузочном контуре выбирается для обеспечения резонанса.

Резонансный инвертор (ПИ) представляет собой мостовой инвертор напряжения на IGBT транзисторах с обратными диодами, последовательный резонансный контур RLC , систему управления $СУ$, датчики тока UA и напряжения UV на нагрузке.

В ферромагнитных материалах, электрическое сопротивление и магнитная проницаемость зависит от температуры. Таким образом, полное сопротивление цепи изменяется в течение цикла нагрева. Для качественного нагрева необходимо постоянство мощности подводимой к нагрузке. Система управления резонансным инвертором осуществляет стабилизацию и регулирование мощности нагрузки путем изменения формы напряжения, приложенного к резонансной цепи (выходное напряжение инвертора).

Система управления $СУ$ обеспечивает формирование потребляемых из сети токов синусоидальной формы и стабилизацию мощности P_n нагрузки во всем диапазоне ее регулирования.

Контроль активной мощности осуществляется регулятором мощности, входящим в состав $СУ$. Мощность нагрузки измеряется с помощью датчиков тока UA и напряжения UV . Транзисторы резонансного инвертора поочередно открываются с заданным алгоритмом управления при постоянной частоте переключения. На выходе инвертора при этом образуется прямоугольной формы переменное напряжение с амплитудой близкой к значению напряжения питания инверторного моста. Под его воздействием возникает резонансные колебания в контуре. Управление активным выпрямителем релейное, что обеспечивает высокое качество формируемых токов. Точность воспроизведения (отслеживания) сигнала задания будет определяться шириной петли гистерезиса релейных регуляторов.

Работа активного выпрямителя на примере фазы A описывается следующими выражениями [3]:

$$i_{A3} - i_A = \Delta i_A,$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + U_{C2} \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \left| \frac{di_A}{dt} \right| > 0, i_{A3} > 0,$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - U_{C1} \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \left| \frac{di_A}{dt} \right| < 0, i_{A3} > 0,$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - U_{C1} \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \left| \frac{di_A}{dt} \right| > 0, i_{A3} < 0,$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + U_{C2} \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \left| \frac{di_A}{dt} \right| < 0, i_{A3} < 0,$$

где U_{C1} , U_{C2} – напряжения на конденсаторах; u_A – мгновенное значение фазного напряжения; i_{A3} , i_A , – токи задания и действительное их значения в фазе; L_A – индуктивность фазного дросселя; R_A – активное сопротивление фазного дросселя; $2a$ – ширина петли гистерезиса релейных регуляторов.

Для обеспечения работоспособности источника питания в целом, необходимо выполнение условия сохранения баланса мощности

$$P = kP_n, \quad (1)$$

где $P = \frac{3}{2} U_m I_m$ – мощность, потребляемая из сети; P_n – мощность нагрузки; k – коэффициент, учитывающий потери в источнике питания.

Формирование токов, потребляемых из сети, при которых выполняется условие (1), осуществляется замыканием системы по напряжению U_C конденсаторов.

Амплитуда фазного тока определяется из (1) как

$$I_m = \frac{2kP_n}{3U_m},$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения сети.

Баланс напряжений на нагрузке описывается выражениями

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

где U_C – напряжение питания РИ ($U_C = U_{C1} + U_{C2}$), u_C – напряжение на конденсаторе C .

Ток в нагрузочной цепи определяется как

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

На рисунке 3 показаны результаты моделирования предлагаемого преобразователя частоты. Представлены диаграммы входных токов и напряжений, напряжения на выходе активного выпрямителя, которое является питающим напряжением резонансного инвертора, и мощность нагрузки (рис. 3а). Показана реакция на изменение (уменьшение) сопротивления в нагрузке, которое возникает в процессе нагрева, в момент времени $t = 0,125$ с. Анализ осциллограммы показывает, что потребляемые из сети токи имеют синусоидальную форму при отсутствии фазового сдвига между напряжениями и токами ($\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$). Выходное напряжение постоянно, мощность не изменяется при изменении сопротивления.

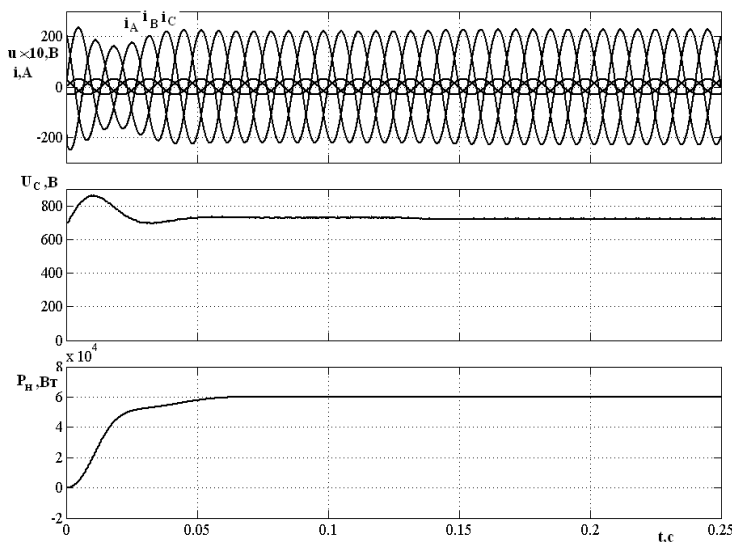


Рис. 3 Осциллограммы работы преобразователя частоты

На рисунке 4 показаны фрагменты осциллограмм тока в нагрузке и напряжения на выходе инвертора до изменения сопротивления (рис. 4а) и после изменения его (рис. 4б).

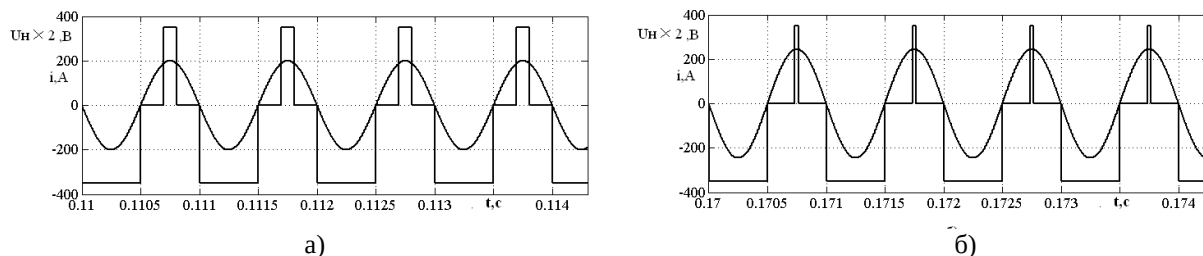


Рис. 4 Осциллограммы тока напряжения в нагрузке до (а) и после (б) изменения сопротивления

На рисунке 5 показано регулирование мощности нагрузки.

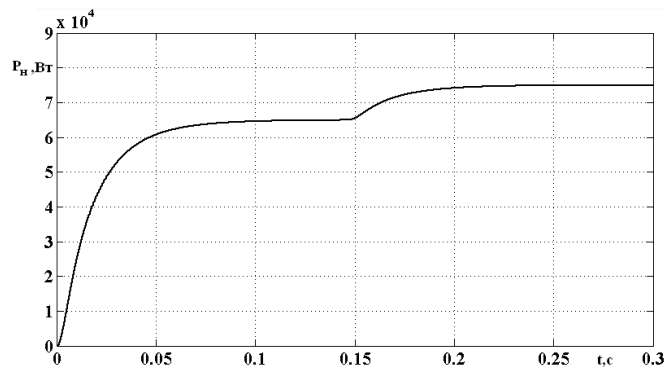


Рис. 5 Регулирование мощности

Для оценки качества потребляемого тока из сети и качество формирования тока нагрузки показаны спектры фазного тока и тока нагрузки, на рис. 6. THD составляет менее 2%, что удовлетворяет требованиям международных стандартов.

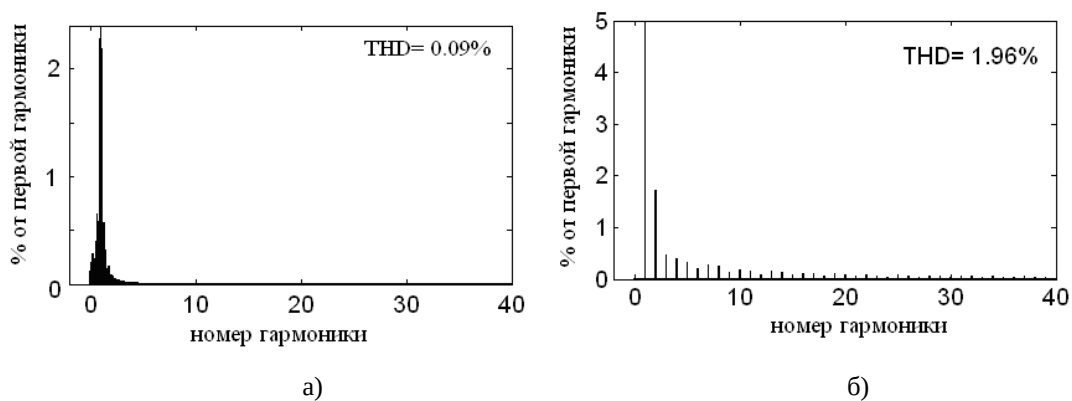


Рис. 6 Спектры фазного тока (а) и тока нагрузки (б)

Выводы. Предложен преобразователь частоты электромагнитно совместимый с сетью для индукционного нагрева перед пластической деформацией. Регулирование и стабилизация мощности в котором достигается путем изменения формы напряжения, приложенного к резонансной цепи. Релейный принцип управления активным выпрямителем позволил потреблять из сети синусоидальные токи.

Проведенные исследование подтвердили возможность стабилизации мощности нагрузки при изменении сопротивления нагрузки, при этом выходной ток синусоидальный, THD составляет менее 2%.

Список литературы: 1. Fujita H., Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz voltage-source inverter for induction melting applications / H. Akagi, H. Fujita // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 279-286, March/April 1996. 2. Burdio, J. M. Comparison of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters / Burdio, J. M. Barbosa, P. M. Lee, F. C. // *Center for Power Electronics System in CPES power electronics seminar by Center for Power Electronics Systems*; 2000, 182-187 pp. 3. Самчелеев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. / Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха // *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. - №36(1009). – С.317-321.

Bibliography (transliterated): 1. Fujita H. and Akagi H. “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, March/April 1996. 2. Burdio J. M. Barbosa J. M. and Lee F. C. “Comparison of Fixed-Frequency Control Strategies for ZVS DC/DC Series Resonant Converters”. *Center for Power Electronics System in CPES, power electronics seminar by Center for Power Electronics Systems*; 2000, 182-187 pp. 3. Samcheleev Ju.P., V.G. Drjuchin and G.S. Beloha. “Universal'nyj vysokojeffektivnyj istochnik pitaniya dlja jelektroprivodov postojannogo i peremennogo toka” *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»*. *Zbirnik naukovih prac'*. Serija: *Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika*. No 36(1009), 2013.317-321. Print.

Поступила 21.05.2017