

В порівнянні з традиційним мостовим перетворювачем частоти, використання МПЧ у електроприводі з СДПМ дає переваги в точності при визначенні положення ротору і, як наслідок, підвищення якості регулювання швидкістю у широкому діапазоні. Головною перевагою МПЧ є мінімізація нелінійних характеристик, основною з яких є "провали" напруги та струму, що призводить до їх несинусоїдальної форми. Як видно з отриманих результатів, поєднання МПЧ з методикою корекції оціночного положення ротору підвищує якість регулювання швидкості для електроприводів з СДПМ.

Список використаних джерел

1. Wu, R.A permanent magnet motor drive without a shaft sensor [Text] / R. Wu, G. Slemon // IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, no. 5, pp. 1005-1011, Sept./Oct. 1991.
2. Jansen, P. Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines [Text]/ P. Jansen, R. Lorenz // IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.31, no. 2, pp. 240-247, March/April 1995.
3. An HF Signal-Injection Based Observer for a Wide Speed Range Sensorless PM Motor Drives Including Zero Speed [Text]: European Power Electronics Conf. EPE Toulouse 2003 / [C. Silva and other].
4. Minimisation of Commutation Delays in Power Converters[Text]: European Power Electronics Conference. EPE Toulouse 2003 / [M. Bland and other].
5. Matrix converters: a technology review [Text] / P. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, A. Weinstein. // Industrial Electronics, IEEE Transactions page(s): 276-288 Volume: 49, Issue: 2Apr 2002.
6. Encoderless Position Control of Induction Machines [Text]: presented at EPE Conference, Graz, Austria, 2001/ [N. Teske and other].

Стаття надійшла до редакції 11.04.2016 р.

УДК 621.365.5

О.В. Трохименко, магістрант, **О.М. Юрченко**, д.т.н. (НТУУ «КПІ»)

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ВІД ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ «ІНДУКТОР – ТІЛО, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ»

O.V. Trokhymenko, O. M. Yurchenko (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF PERFORMANCE RESONANT CIRCUIT SYSTEM «INDUCTOR – HEATED OBJECT»

Проведено дослідження імпедансних характеристик послідовного резонансного контуру кола навантаження системи індукційного нагріву. Запропоновано алгоритм визначення меж зміни резонансної частоти і добротності коливального контуру при зміні температури об'єкта, що нагрівається, величини зазору між індуктором і об'єктом, числа витків і струму індуктора, номінальної частоти.

Ключові слова: індукційний нагрів; індуктор; частота; добротність; коливальний контур.

Проведено исследование импедансных характеристик последовательного резонансного контура цепи нагрузки системы индукционного нагрева. Предложен алгоритм определения границ изменения резонансной частоты и добротности колебательного контура при изменении температуры нагреваемого объекта, величины зазора между индуктором и объектом, числа витков и тока индуктора, номинальной частоты.

Ключевые слова: индукционный нагрев; индуктор; частота; добротность; колебательный контур.

A study of the characteristics of the impedance series resonant circuit of induction heating system circuit load. An algorithm for determining the boundaries of the resonant frequency and quality factor of the oscillatory circuit when the temperature of the heated object, the gap between the inductor and the object, and the number of turns of the inductor current nominal frequency.

Keywords: induction heating; inductor; frequency; quality factor; oscillatory circuit.

Вступ. В даний час височастотний індукційний нагрів активно застосовується в промисловості для широкого спектра технологічних операцій. Джерелом магнітного поля, що викликає нагрівання деталі, є індуктор. Утворена в результаті електромагнітної взаємодії з деталлю система «індуктор - об'єкт, що нагрівається» є для перетворювача комплексним активно-індуктивним навантаженням, індуктивний характер якого компенсується конденсатором, з утворенням послідовного резонансного контуру. Важливою особливістю систем індукційного нагріву є залежність електрофізичних властивостей деталі від її температури, тому в процесі нагрівання змінюється комплексний імпеданс системи «індуктор - об'єкт, що нагрівається», добротність і частота резонансного контуру. Крім того, ці величини залежать від конструктивних і електричних параметрів індукторної системи, що особливо яскраво виражено при нагріванні феромагнітних матеріалів.

Як правило, для живлення коливального контуру використовується мостова схема резонансного інвертора, особливістю роботи якої є введення системи фазового автопідстроювання частоти, параметри якої багато в чому визначаються такими параметрами коливального контуру, як резонансна частота, добротність, а також діапазони зміни цих величин в процесі нагрівання. У зв'язку з цим актуальною є задача дослідження і визначення залежностей параметрів коливального контуру від температури, конструктивних і електричних характеристик індукційної системи. Незважаючи на існування низки робіт, присвячених дослідженню імпедансних характеристик індукційної системи, питання розрахунку необхідних діапазонів підстроювання частоти і зміни добротності резонансного контуру залишаються не висвітленими. Рішення цього складного завдання є метою даної роботи, в якій розглянуто

випадок нагріву феромагнітних заготовок при послідовному з'єднанні компенсуючої ємності з індуктором.

Мета та завдання. Метою роботи є визначення залежності параметрів резонансного контура від характеристик системи. Завданням представленої статті є визначення меж зміни резонансної частоти і добротності коливального контура при зміні температури об'єкта, що нагрівається.

Математична модель системи «індуктор - об'єкт, що нагрівається». Систему «індуктор - об'єкт, що нагрівається» можна уявити еквівалентною схемою (рис. 1), яка може бути перетворена до послідовного з'єднання еквівалентної індуктивності L_E і еквівалентного активного опору R_E , імпеданс якої можна знайти за відомими формулами [1]:

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= R_E + j\omega L_E; \\ R_E &= R_i + R_d \frac{\omega^2 L_{ic}^2}{R_d^2 + \omega^2 (L_d + L_s + L_{ic})^2}; \\ L_{Eic} &= L \frac{R_d^2 + \omega^2 (L_d + L_s)(L_d + L_s + L_{ic})}{R_d^2 + \omega^2 (L_d + L_s + L_{ic})^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де ω - робоча частота, R_i - активний опір витків індуктора, L_{ic} - індуктивність зворотного замикання, L_s - індуктивність розсіювання, R_d , L_d - активний опір і індуктивний об'єкта, що нагрівається.

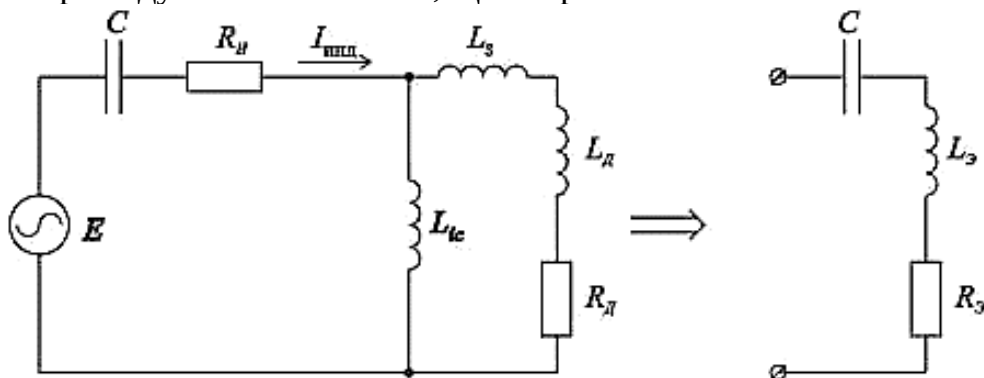


Рис. 1. Еквівалентна схема системи «індуктор - об'єкт, що нагрівається» при послідовному з'єднанні компенсуючого конденсатора з індуктором

Розрахунок температурних залежностей резонансної частоти і добротності послідовного коливального контуру для системи «індуктор – тіло, що нагрівається». При зміні температури деталі змінюються її електрофізичні характеристики, відповідно, змінюється глибина проникнення вихрових струмів в об'єкт, що нагрівається. Глибина проникнення, в свою чергу, визначає власну частоту і добротність резонансного контуру. Вказана обставина значно ускладнює розрахунок температурної залежності резонансної частоти і добротності, тому для їх розрахунку використані ітераційні обчислення. На рис. 2 показано запропонований алгоритм обчислення ємності компенсуючого конденсатора і залежності резонансної частоти і добротності від температури при постійному струмі індуктора. У блок-схемі алгоритму прийняті наступні

позначення: t_n - найменша температура, прирівнюється до температури навколишнього середовища, t_s - найбільша температура, Δt - приріст температури, $f_{ном}$ - номінальна частота (резонансна частота контуру при $t = t_n$), $I_{стаб}$ - стабілізована амплітуда струму, що протікає через індуктор, f - поточне значення частоти, $f_0(t)$ - резонансна частота при заданій температурі, ε - найбільша абсолютна похибка обчислення частоти, Q - добротність резонансного контуру.

На рис. 3 показані залежності резонансної частоти і добротності від температури, отримані в результаті обчислень за алгоритмом (рис. 2). Залежності побудовані для індуктора з числом витків $W = 5$ і геометричними розмірами $D = 0,1$ м, $l = 0,1$ м, при величині зазору між витками індуктора і нагрівальною деталлю $h = 5$ мм, при $f_{ном} = 10$ кГц і $I_{стаб} = 1$ кА.

Аналіз отриманих в результаті розрахунку залежностей (рис. 3) показує, що при температурі поблизу точки Кюрі спостерігається стрибкоподібна зміна частоти і добротності системи. У разі зміни геометричних і електричних параметрів системи «індуктор – деталь, що нагрівається» якісний характер залежностей зберігається. На практиці температурні залежності характеризуються більш плавним переходом через точку Кюрі, оскільки в розрахунках не враховуються динамічні зміни теплофізичних властивостей матеріалів.

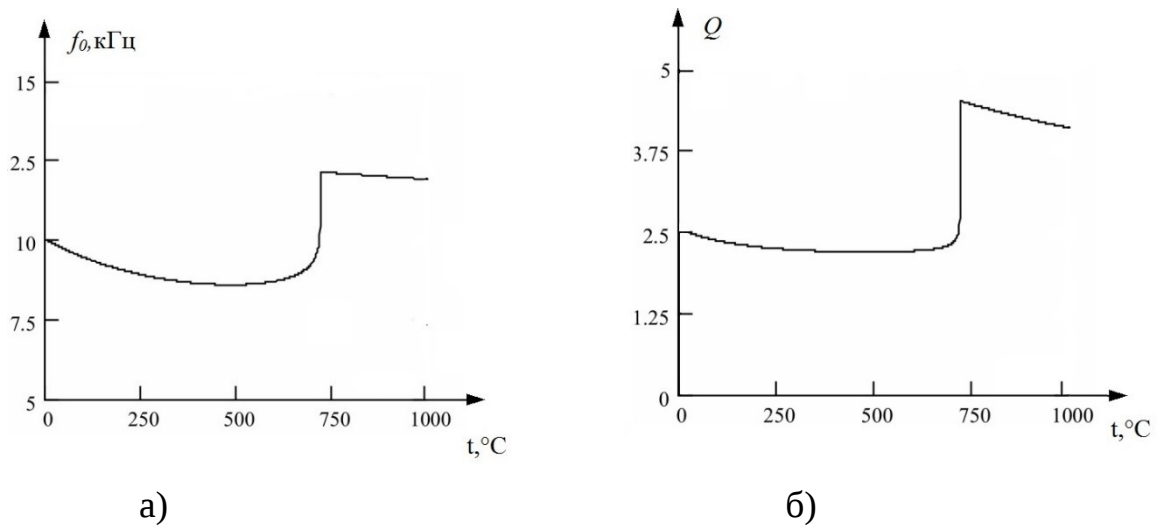
Рис. 2. Алгоритм обчислення температурних залежностей резонансної частоти і добротності коливального контуру при фіксованих значеннях $I_{стаб}$, $f_{ном}$, h і W 

Рис. 3. Температурна залежність:

а) резонансної частоти; б) добротності коливального контуру

Залежність діапазонів підстроювання частоти і зміни добротності від конструктивних і електричних параметрів системи «Індуктор - тіло, що нагрівається». Підстроювання резонансної частоти коливального контуру в процесі нагрівання відбувається автоматично, тому для практичних розрахунків важливо визначення не стільки залежностей підлаштовуватися параметрів від температури, скільки граничний діапазон їх зміни [2]. Ці параметри, як показує практика, істотно залежать від конструктивних і електричних параметрів системи «індуктор - об'єкт, що нагрівається», зокрема від величини зазору між індуктором і деталлю, що визначає потік розсіювання, від струму індуктора, номінальної частоти в початкових умовах.

На рис. 4 наведені графічні залежності екстремальних значень резонансної частоти і добротності коливального контуру від величини зазору між індуктором і деталлю, отримані в результаті розрахунку за алгоритмом (рис. 2) при різних значеннях $I_{стаб}$.

З наведених результатів видно, що з ростом зазору діапазон підстроювання частоти зменшується, а кордони частотного діапазону наближаються до номінальної резонансної частоти. Це пояснюється істотним збільшенням індуктивності розсіювання, при якому зміна індуктивності деталі L_d вже не робить помітного впливу на еквівалентну індуктивність всієї системи. Варто зазначити, що при проектуванні індуктора прагнуть максимально зменшити зазор, так як це дозволяє зменшити необхідну потужність резонансного конденсатора. Залежність діапазону підстроювання частоти від струму індуктора обумовлена зменшенням магнітної проникності сталі з ростом напруженості поля індуктора. Верхня межа резонансної частоти залежить від струму індуктора, не дивлячись на те, що в області температур вище точки Кюрі $\mu = 1$. Це можна пояснити зміною резонансної ємності за умовою збереження

колишньої номінальної резонансної частоти (10 кГц), аналогічним чином пояснюється зростання добротності зі збільшенням зазору: при $h = 0$ добротність не змінюється і дорівнює одиниці, так як індуктивність індукційної системи майже повністю визначається індуктивністю деталі L_D .

Добротність може бути виражена в вигляді:

$$Q = \frac{L_D^2 + (L_D + L_s)(L_D + L_s + L_{ic})}{L_D L_{ic}},$$

Зазвичай L_{ic} набагато більше L_D , тоді

$$Q = \frac{L_D + L_s}{L_D} = 1 + \frac{L_s}{L_D}. \quad (2)$$

Іншим важливим завданням є дослідження зміни характеристик резонансного контуру при варіюванні кількості витків індуктора. На рис. 5 наведені графічні залежності границь підстроювання резонансної частоти коливального контуру і добротності від кількості витків індуктора при $h = 0,5$ см.

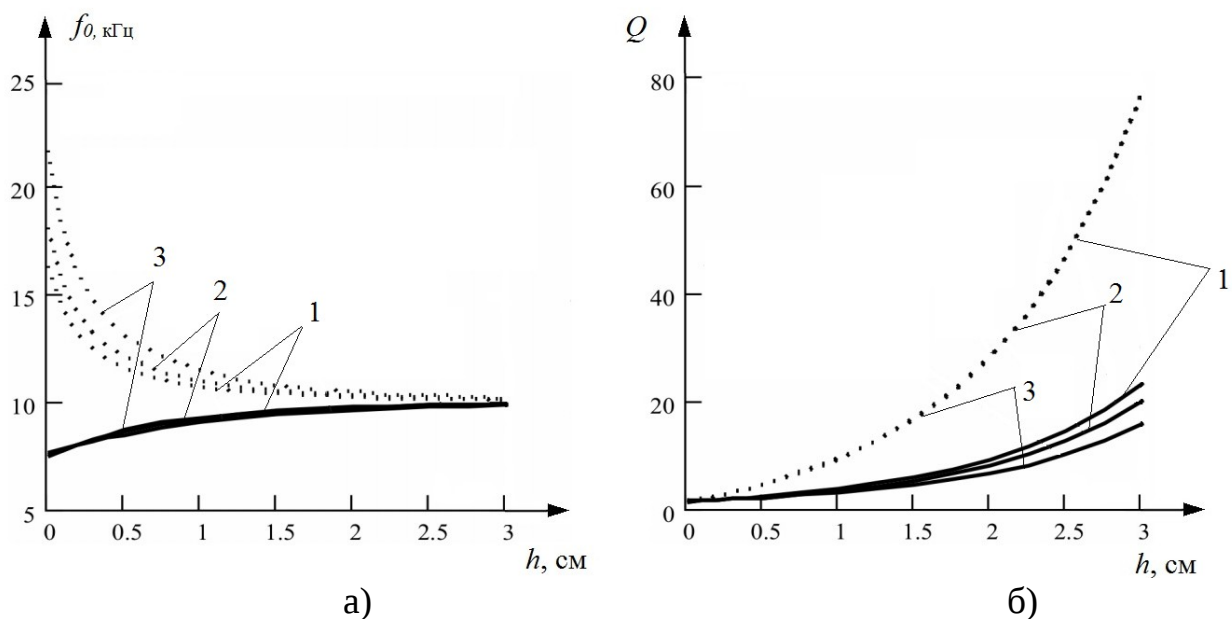


Рис. 4. Залежність діапазону зміни: а) резонансної частоти; б) добротності коливального контуру від величини зазору між індуктором і деталлю при різних значеннях $I_{\text{стаб}}$ і при $W = 5$, $D = 0,1$ м, $l = 0,1$ м, $f_{\text{ном}} = 10$ кГц :
1 - $I_{\text{стаб}} = 1500$ А, 2 - $I_{\text{стаб}} = 1000$ А, 3 - $I_{\text{стаб}} = 500$ А

Характеристики (рис. 5, б) при малому кількості витків індуктора можуть бути неточні, оскільки збільшується магнітний потік розсіювання. Можна відзначити загальну тенденцію звуження діапазону підстроювання частоти зі збільшенням щільності намотування витків індуктора, що приводить до зростання напруженості магнітного поля в індуктор. В цьому випадку нагрів відбувається при набагато менших значеннях магнітної проникності, відповідно зменшується і діапазон її зміни. Хоча з цього не впливає, що необхідно

прагнути до максимального збільшення щільності намотування витків, так як це призводить до збільшенню напруги на резонансному конденсаторі.

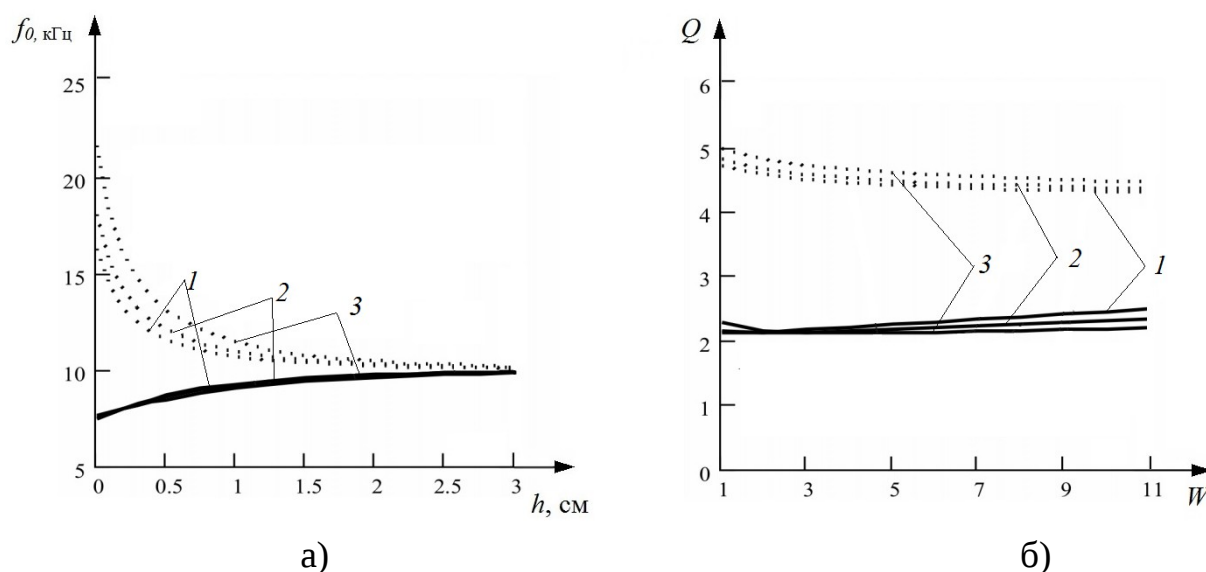


Рис. 5. Залежність границь зміни: а) резонансної частоти; б) добротності коливального контуру від кількості витків індуктора при різних значеннях $I_{\text{стаб}}$ і при $h = 0,01$ м, $D = 0,1$ м, $l = 0,1$ м, $f_{\text{ном}} = 10$ кГц :

1 - $I_{\text{стаб}}=1500$ А, 2 - $I_{\text{стаб}}=1000$ А, 3 - $I_{\text{стаб}}=500$ А

Висновки

Запропонований алгоритм визначення меж зміни резонансної частоти і добротності коливального контуру дозволяє визначити параметри контуру при зміні температури об'єкта, що нагрівається при фіксованих значеннях величини зазору між індуктором і об'єктом, числа витків і струму індуктора, номінальною частоти.

На основі алгоритму отримано залежності границь діапазонів зміни власної частоти і добротності контуру від конструктивних і електричних параметрів системи «індуктор – тіло, що нагрівається». Встановлено, що з ростом величини зазору між індуктором і деталлю і збільшенням числа витків при умові постійних номінальної резонансної частоти діапазон зміни частоти звужується до нуля. Максимум зміни резонансної частоти отриманий при нульовій величині зазору між індуктором і об'єктом. Встановлено значне збільшення добротності коливального контуру з ростом величини зазору і номінальної резонансної частоти.

Список використаних джерел

1. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагрева [Текст] / А. Е. Слухоцкий. - М.: Энергоиздат, -1981, - 325 с.

2. Юрченко, О.М. Високочастотні транзисторні перетворювачі для високоефективних систем електроживлення технологічних установок [Текст] / О.М. Юрченко, М.М. Юрченко, В.Я. Гуцалюк та ін. // Праці ІЕД НАНУ. Випуск 38– 2014 – С. 137–145.

3. Осипов, А.В. Системы высокочастотного индукционного нагрева заготовок перед пластической деформацией [Текст] / А.В. Осипов // Автореф. дис. ... к.т.н. – Томск, 2004. – 18 с

4. Ромаш, Э.М. Высокочастотные транзисторные преобразователи [Текст] / Э.М. Ромаш, Ю.И. Драбович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с

5. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. - Л., Энергия, 1974. - 264с., ил.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2016 р.

УДК 621.314.5:621.36

Трохименко О.В., магістрант, **Юрченко О.М.**, д.т.н. (НТУУ «КПІ»)

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ НА НЕЛІНІЙНИЙ ІНДУКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНИЙ КОНТУР

Trokhymenko O., Yurchenko O. (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

FEATURES WORK RESONANT VOLTAGE INVERTERS ON THE NONLINEAR INDUCTOR-CAPACITOR HEATING

Наводиться імітаційна модель резонансного симетричного інвертора з навантаженням в діагоналі моста, призначеного для індукційного нагріву. Розглянуто способи узгодження вихідних параметрів інвертора з параметрами навантажувального нелінійного індукторно-конденсаторного модуля. Пропонується уточнена схема заміщення індуктора.

Ключові слова: індукційний нагрів; інвертор напруги; індуктор; індукторно-конденсаторний модуль; імітаційна модель.

Приводится имитационная модель резонансного симметричного инвертора с нагрузкой в диагонали моста, предназначенного для индукционного нагрева. Рассмотрены способы согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного нелинейного индукторно - конденсаторного модуля. Предлагается уточненная схема замещения индуктора.

Ключевые слова: индукционный нагрев; инвертор напряжения; индуктор; индукторно-конденсаторный модуль; имитационная модель.

An simulation model symmetric resonant inverter with a load of diagonal bridge designed for induction heating. The methods of coordination inverter output parameters with the parameters of nonlinear load inductor-capacitor module. The scheme proposed replacing the inductor.