

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЧАСТОТНО-ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ

Виходячи із енергетичних показників перетворювача частоти, обґрунтований спосіб регулювання потужності в електротехнології індукційного нагріву з'єднань деталей.

Исходя из энергетических показателей преобразователя частоты, обоснован способ регулирования мощности в электротехнологии индукционного нагрева соединений деталей.

Proceeding from energy indicators of frequency converters the way of power regulation in details connections induction heating electrotechnologies is substantiated.

В електротехнології індукційного нагріву управління температурним полем виробу, що нагрівається, здійснюють шляхом створення необхідних значень параметрів струму в індукторі. Йдеться про силу струму, його частоту, форму. Ці параметри можуть бути стабільними або змінюватись у часі в процесі нагріву. Параметри регулюються джерелами живлення індукційних установок [1]. В якості джерел живлення установок середньочастотного діапазону використовують перетворювачі частоти. В системах індукційного нагріву широко використовують дволанкові напівпровідникові перетворювачі частоти, що містять випрямляч і автономний інвертор. Ці складові містять в своїй структурі напівпровідникові прилади (тиристори, силові транзистори), що працюють у ключових режимах і, відповідно, мають нелінійні вольт-амперні характеристики. Струм, що споживається із мережі живлення, містить вищі гармонічні складові, які знижують енергетичні показники перетворювача частоти. Ступінь викривлення споживаного струму залежить від способу управління перетворювачем. Відомо, що в нерегульованих випрямлячах викривлення струму незначне. При цьому регулювання потужності здійснюється шляхом управління інвертором перетворювача [1].

Стаття присвячена аналізу можливих способів регулювання потужності в одній із технологій індукційного нагріву (демонтаж з'єднань циліндричних поверхонь деталей машин, виконаних посадкою з натягом). Особливості цієї технології нагріву викладено, наприклад, в [2]. В статті обґрунтована доцільність використання одного із розглянутих способів регулювання, виходячи із умови забезпечення високих енергетичних показників перетворювача частоти.

Зміна сили струму в індукторі приводить до зміни рівня вихрових струмів, варіації значень питомої поверхневої потужності, інтенсивності дії джерел тепла, розташованих на поверхні втулки. Якщо силу струму змінювати в процесі нагріву деталі, то така зміна може істотно вплинути на характер нагріву і значною мірою визначити картину температурного поля. Найпростішим способом управління є зміна тривалості протікання струму через індуктор, тобто йдеться про формування пауз струму $t_{\text{п}}$ (рис. 1,б). В інтервалі пауз теплові процеси в тілі, що нагрівається, розвиваються за умови відсутності джерел тепла на його поверхні. Недолік таких систем полягає в необхідності введення в елект-

ричну схему джерела живлення додаткових елементів, що забезпечують комутацію струму індуктора. Зокрема, тут можуть бути використані напівпровідникові ключові пристрої. У більш простому варіанті задача може бути вирішена шляхом вдосконалення системи управління джерела живлення.

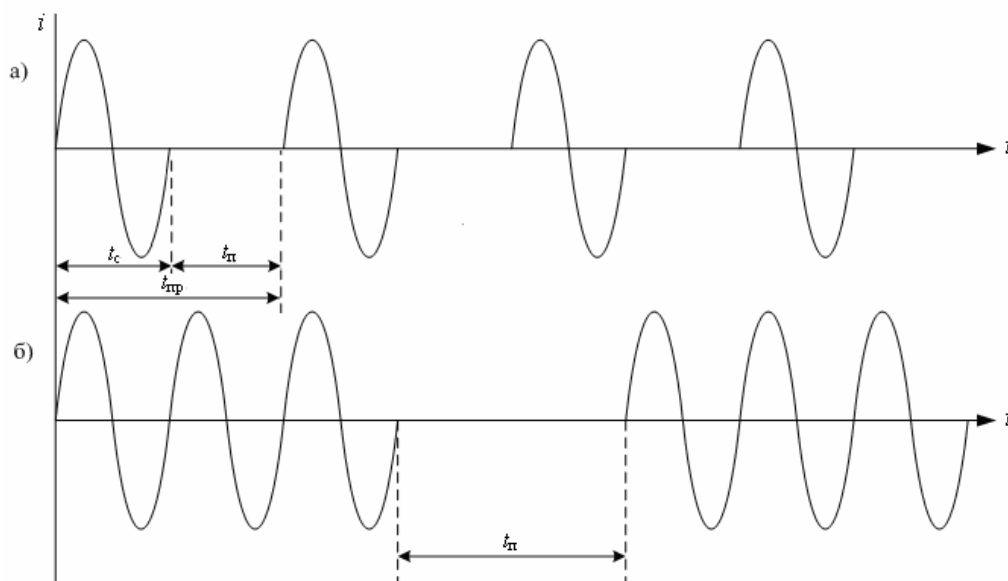


Рис. 1. Частотно-імпульсне (а) і дискретне (б) регулювання струму в індукторі

Інший відомий спосіб управління полягає в безперервному (плавному) регулюванні сили струму в індукторі. Цей спосіб має певні переваги по відношенню до дискретного регулювання, бо при цьому існують можливості для більш точного відтворення необхідної картини температурного поля. Безперервне регулювання струму пов'язане з плавною зміною напруги на індукторі. Це може бути досягнуто шляхом застосування регуляторів змінної напруги, або шляхом використання перетворювачів частоти з такими функціями. В обох випадках має місце ускладнення силової схеми джерела живлення, або алгоритмів його управління, що не завжди достатньо просто реалізується.

Іншим параметром, що має істотний вплив на інтенсивність джерел тепла, діючих у виробі на глибині проникнення вихрових струмів в метал, є частота синусоїдального струму індуктора. Зміну глибини проникнення струму углиб втулки слід розглядати як зміну положення джерел тепла відносно зовнішньої поверхні виробу. Зміна частоти струму приводить до зміни питомої поверхневої потужності нагріву, пропорційної показнику поглинання енергії. Тому слід чекати, що зміна частоти синусоїдального струму істотно впливатиме на картину температурного поля втулки, що нагрівається. В практиці індукційного нагріву використовують системи, що забезпечують дискретну зміну частоти синусоїдального струму [3]. Проте такі системи складні в реалізації, оскільки зміна частоти джерела живлення вимагає зміни резонансної частоти паралельного коливального контуру, створеного індуктором і батареєю компенсуючих конденсаторів. З цієї ж причини практично не використовується безперервне (плавне) регулювання частоти струму. В практиці індукційного нагріву матеріалу використовують також пристрої з імпульсною формою струму індуктора [4,5].

Найбільш просто реалізується синусоїдальна форма імпульсів [4] (рис. 1,а). Це досягається завдяки відмові від використання паралельного коливального контуру в навантаженні перетворювача частоти і переходу до використання послідовного резонансного контуру. Таким чином, йдеться про послідовні резонансні інвертори. Важливо, що регулювання частоти слідування імпульсів струму в індукторі (частотно-імпульсне регулювання) здійснюється простою зміною частоти слідування імпульсів управління, що подаються на силові напівпровідникові прилади. При цьому немає необхідності в зміні параметрів послідовного коливального контуру. При реалізації простого варіанту несиметричного послідовного резонансного інвертора з одним ключовим елементом забезпечується мінімальне число силових елементів в схемі, спрощується його система управління (рис.2). Оскільки існує можливість регулювання потужності нагріву зміною частоти слідування імпульсів синусоїдальної форми, напругу на виході випрямляча такого перетворювача не змінюють і, отже, його енергетичні показники (коефіцієнт потужності, зсуву) залишаються високими.

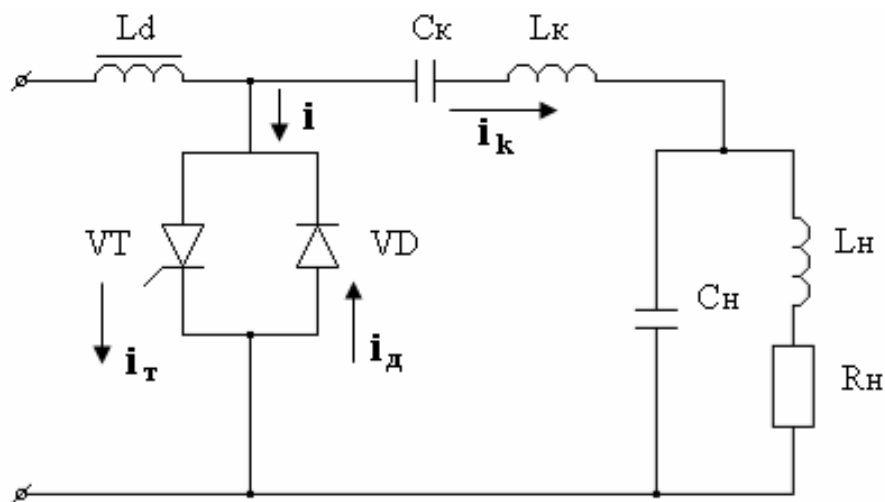


Рис.2. Несиметричний послідовний резонансний інвертор

Навантаження інвертора представлено паралельним коливальним контуром $L_n C_n R_n$. Комутуючі елементи $L_k C_k$ сумісно з контуром $L_n C_n R_n$ складають електричний ланцюг, що зумовлює коливальний процес струму i_k , що протікає через комутуючі елементи. Тиристор VT та зворотний діод VD створюють замкнуте коло для коливального процесу. Реактор L_d слугує для згладжування вхідного струму інвертора. Струм i , що протікає через напівпровідникові елементи, містить дві складові, зумовлені протіканням струму, через тиристор $VT(i_T)$ та діод $VD(i_D)$ ($i = i_T - i_D$):

$$\begin{aligned}
 i_T &= I_T \sin \omega t & 0 \leq t \leq \pi / \omega; \\
 i_D &= I_D \sin(\omega t - \pi) & \pi / \omega \leq t \leq 2\pi / \omega; \\
 i_k &= 0 & 2\pi / \omega \leq t \leq 2\pi / \omega_k,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де, I_T, I_d - амплітудні значення струму через тиристор та діод; ω, ω_k - кутові частоти вільних коливань струму в контурі інвертора та слідування імпульсів управління тиристора інвертора відповідно.

Амплітудні значення струмів через тиристор та діод відрізняються ($I_T > I_d$). Це зумовлено затуханням коливань в контурі завдяки наявності активного опору R_n .

По своїй суті, формування різнополярних імпульсів струму, що мають форму, близьку до синусоїдальної (при частотно-імпульсному регулюванні), мало відрізняється від розглянутого дискретного регулювання струму шляхом формування пауз струму (рис. 1,б).

Відмінність полягає в тому, що число коливальних процесів у варіантах, що зіставляються, може бути різним. Відрізняються також підходи до практичної реалізації вказаних способів регулювання.

Недолік послідовного резонансного інвертора, що не містить паралельного коливального контуру в навантаженні, полягає в збільшенні ступеня завантаження напівпровідникового приладу по струму. Відсутність паралельного коливального контуру призводить до того, що струм, який протікає через індуктор, для більшості схемних рішень рівний струму напівпровідникового приладу. Тому при значних струмах індуктора струми вентилів великі. Проте при цьому існує і позитивний чинник, що полягає в зниженні рівня напруги на напівпровідниковому приладі. Якщо врахувати, що демонтаж циліндричних посадок здійснюється при порівняно невеликих потужностях (одиниці і десятки кВт), то слід чекати, що необхідні значення струму в індукторі досягатимуть рівня сотень ампер, що цілком прийнятно для сучасних напівпровідникових приладів. Таким чином, вказаний недолік в розглянутих умовах нагріву не є таким важливим і спосіб управління процесом нагріву, який полягає в зміні частоти слідування імпульсів, представляється з точки зору автора найбільш прийнятним.

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок: управління процесом індукційного нагріву при демонтажі циліндричних з'єднань може здійснюватися шляхом використання традиційних методів зміни параметрів струму індуктора. Цим методам властиві певні переваги і недоліки. При необхідності введення такого управління доцільно орієнтуватися на варіант, що передбачає зміну частоти слідування імпульсів струму.

Розгляд варіанту потребує забезпечення можливості моделювання теплового процесу при імпульсній дії джерел тепла на поверхні втулки.

Такі дослідження виконано в роботі [2]. У процесі регулювання змінюється інтервал паузи струму t_n (рис.1). Це дозволяє змінювати середнє значення питомої поверхневої потужності за період слідування імпульсів $t_{np} = t_c + t_n$. Зрозуміло, що при цьому змінюється загальна (за період t_{np}) інтенсивність дії джерел тепла. Проаналізуємо теплові процеси, що протікають при зміні співвідношення t_c / t_n . Розрахунку підлягає значення різниці температур в зоні з'єднання де-

талей ΔT . Рис. 3 ілюструє таку залежність у випадку, коли на інтервалі t_c значення нагріву залишається незмінним. При цьому частота імпульсного синусоїдального струму $f = 2400$ Гц, а товщина втулки $\Delta_g = 0,015$ м.

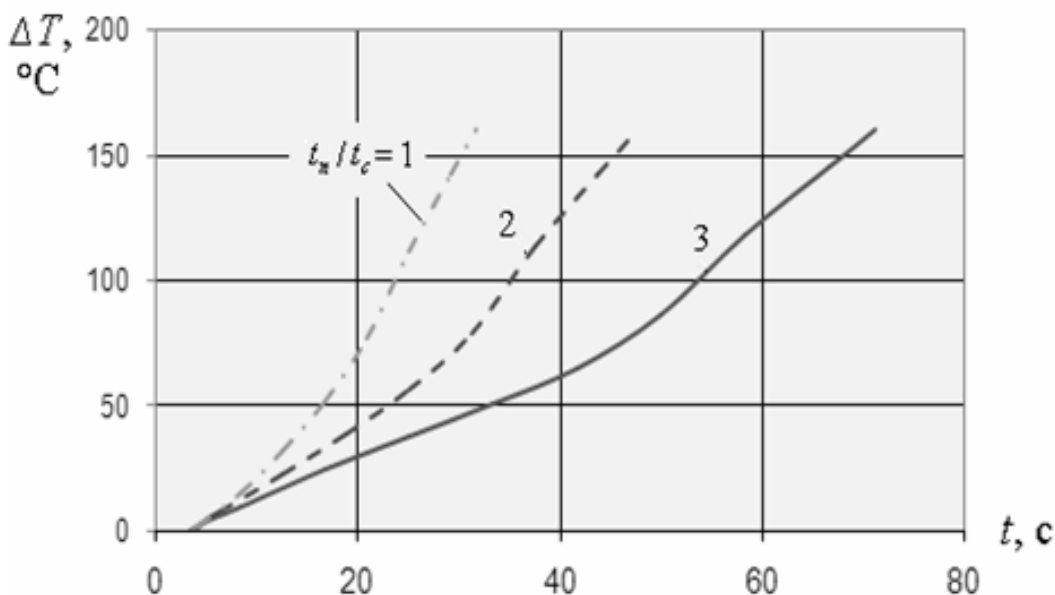


Рис. 3. Залежність $\Delta T(t)$ при імпульсному струмі індуктора

Із рисунка видно, що при підвищенні частоти слідування синусоїдальних імпульсів струму ($f_c = \frac{1}{t_{np}}$) швидкість наростання ΔT збільшується, що свідчить про принципову можливість управління температурним режимом теплового процесу шляхом зміни цієї частоти. Звернемо увагу на те, що зміна f_{np} відбувається виключно за рахунок зміни t_n . Технічна реалізація зміни паузи між синусоїдальними імпульсами струму в перетворювачах частоти не викликає ускладнень.

Список літератури

1. Тиристорные преобразователи высокой частоты / [Е.И. Беркович, Г.В. Ивенский, Ю.С. Иоффе, А.Т. Матчак, В.В. Моргун]. - Л.: Энергия, 1978.
2. Выпанасенко Н.С. Математична модель для аналізу теплових процесів індукційного нагрівання циліндричних з'єднань сталевих деталей/ Н.С. Выпанасенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. -2009.- Вип. № 2. - С. 60-65.
3. Рыскин С.Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности/ Рыскин С.Е. – Л.: Машиностроение, 1979. – 64 с.
4. Выпанасенко С.И. Автономные инверторы с умножением частоты/ С.И. Выпанасенко //Техническая электродинамика. -1992. - № 6.–С. 23-31.
5. Выпанасенко С.И. Автономные инверторы с совмещенными функциями силовых элементов/ С.И. Выпанасенко //Техническая электродинамика. -1993. - № 4.–С. 24-27.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесарев В.В.
Надійшла до редакції 20.10.10*