

**С. Л. ЛАМАНОВ**, мол. науков. співр. Інститут електродинаміки НАН України, Київ;  
**Ю. В. ПЕРЕТЯТКО**, канд. техн. наук, доц. НТУУ «Київський політехнічний інститут»;  
**Р. В. БЕЛЯНІН**, начальник виробництва ПАТ «Завод «Південкабель», Харків.

### ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ІНДУКЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ПОСЛІДОВНИМ РЕЗОНАНСНИМ ОДНОКОМІРКОВИМ ІНВЕРТОРОМ

**Вступ.** У більшості сучасних установок індукційного нагрівання (УІН) первинних і вторинних металів використовують напівпровідникові послідовні резонансні інвертори, що забезпечують швидке і енергоефективне регулювання режимів електроживлення індукторів і відповідно технологічного навантаження. Для реалізації у ньому максимальної електричної потужності при високій комутаційній стійкості інвертора необхідно узгоджувати опір навантаження з вихідним хвильовим опором інвертора [1–6].

Напівмостові послідовні резонансні інвертори, які використовуються в УІН, при живленні від трифазної промислової мережі напругою  $\sim 380$  В і частотою 50 Гц мають вихідну напругу 200–250 В, а мостові інвертори – 400–500 В. Це значно ускладнює проблему узгодження хвильового опору інвертора з опором індукційного навантаження та змушує використовувати спеціальні трансформатори на підвищену нестандартну напругу, зокрема на 660 В. Такий підхід використовувався в розробках авторів статті промислових УІН потужністю до 630 кВт, з частотою струмів у навантаженні 2,4 кГц. Розробки впроваджено на ПАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків) та підприємстві "Армліт-Донбас" (м. Харцизьк, Донецької обл.), в установках індукційного нагрівання алюмінієвих, мідних та залізних сплавів.

Для узгодження параметрів промислових УІН у більшості випадків використовують електричні схеми з трансформаторами і автотрансформаторами на магнітопроводах, або автоконденсаторні схеми підключення навантаження. Кожна з таких схем має недоліки, які обмежують її використання [1–7]. Так, схеми УІН з низькочастотними трансформаторами і автотрансформаторами на магнітопроводах мають низькі ККД, значні масу, габарити та вартість. Крім цього, використання в схемах УІН автотрансформаторів ускладнює конструкцію струмопроводів, вимагає наявності відпайки в індукторах, виконання чого є не завжди можливим.

Наявність гальванічного зв'язку таких схем з мережею електроживлення вимагає використання в них додаткових заходів по забезпеченню електробезпеки персоналу. При чому в різних частинах індукторів таких УІН протікає різний струм, що ускладнює регулювання технологічних процесів індукційної обробки металів і металевих виробів. Автоконденсаторні схеми підключення індукційного навантаження мають значні масу, габарити і вартість через істотне збільшення (до 4-х разів) встановленої потужності конденсаторної батареї та не забезпечують гальванічної розв'язки навантаження від промислової мережі електроживлення напругою 380 В і частотою 50 Гц, через що захист обслуговуючого персоналу плавильної печі від ураження електричним струмом потребує додаткових заходів.

Указані вище недоліки засобів узгодження режимів в УІН можуть бути усунені при застосуванні в них регульованого магнітного зв'язку між контурами індукційного навантаження та напівпровідникового послідовного резонансного інвертора. Принципова схема одного з таких УІН приведена на рис. 1.

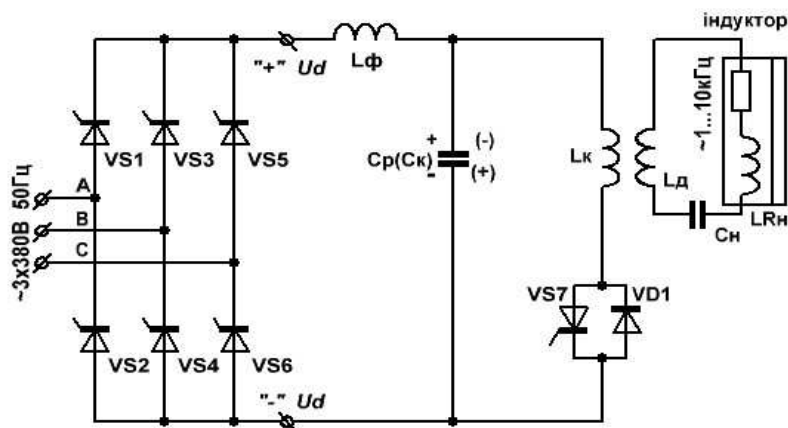


Рис. 1 Принципова схема УІН з регульованим магнітним зв'язком контурів навантаження та інвертора

Особливістю даної схеми є те, що енергія від резонансного інвертора передається в індуктор через додатково введений регульований повітряний магнітний зв'язок між комутуючою індуктивністю  $L_K$  власного резонансного контуру інвертора та контуром навантаження через введену додаткову індуктивність  $L_D$ . Такий зв'язок можливо використовувати безпосередньо між  $L_K$  та  $L_H$  без використання  $L_D$ .

**Обговорення результатів дослідження.** Тривалий час особливості гальванічної розв'язки та регульованого узгодження режимів контурів навантаження та напівпровідникового інвертора навантаження шляхом створення регульованого повітряного магнітного зв'язку між такими контурами практично не досліджувались. Використання сучасних пакетів прикладних програм *COMSOL Multiphysics* і *MATLAB Simulink* дозволяє розробити необхідні математичні моделі та дослідити на них особливості використання запропонованого в роботі [8] пристрою узгодження і гальванічної розв'язки режимів навантаження та інвертора. У роботі проводився аналіз режимів в контурах електричної схеми напівпровідникового послідовного резонансного однокоміркового інвертора, який забезпечував електроживлення індуктора при різних опорах навантаження. Досліджувалась залежність характеристик навантаження від значення його електричного опору та від ступеню магнітного зв'язку між комутуючою індуктивністю  $L_K$  резонансного контуру послідовного резонансного однокоміркового інвертора та додатковою індуктивністю  $L_D$  контуру навантаження.

На рис. 2 приведено електричну схему УІН в програмному середовищі *MATLAB Simulink*, яку було розроблено для визначення параметричних взаємних залежностей характеристик інвертора та індукційного навантаження.

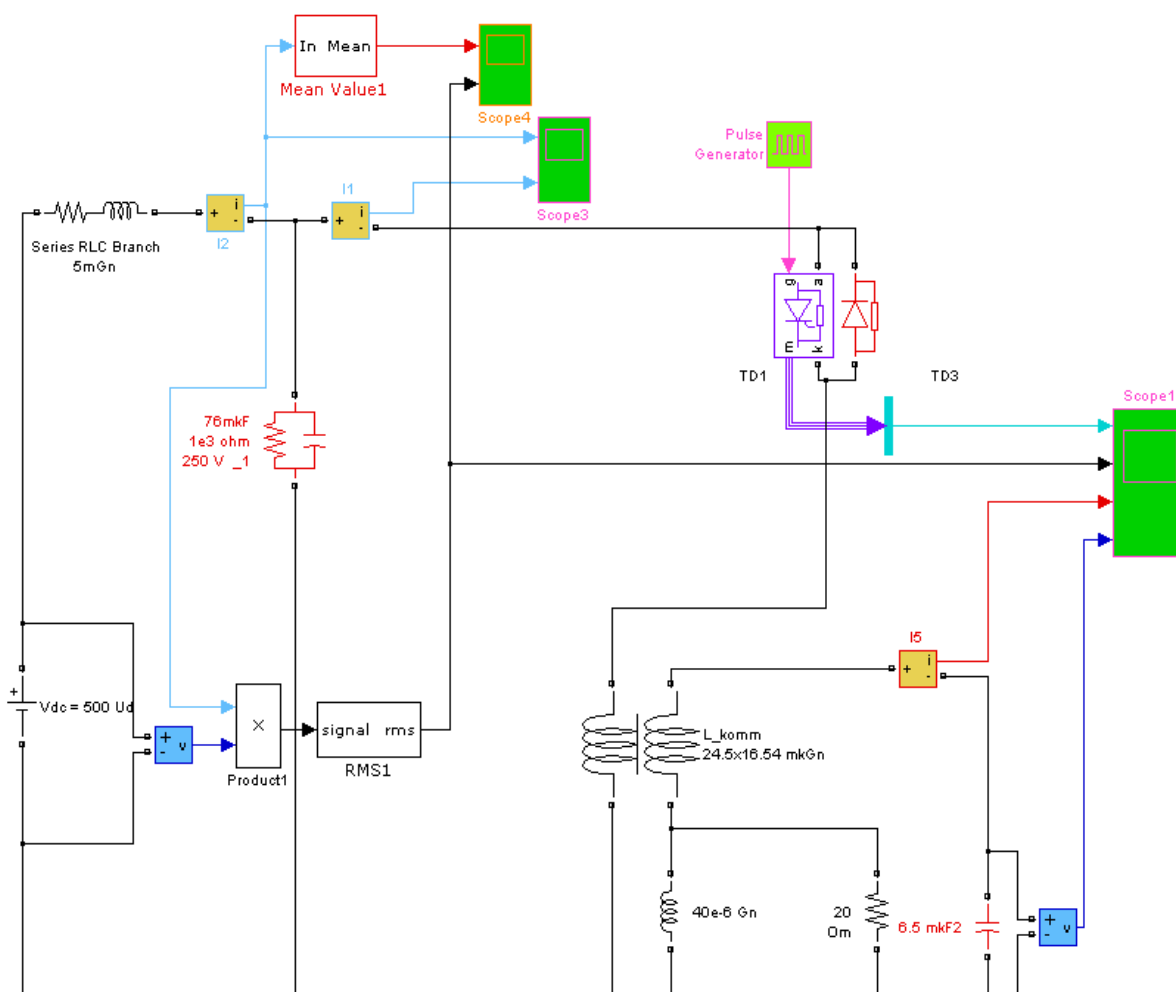


Рис. 2 Електрична схема УІН в програмі *MATLAB Simulink*

Параметри елементів схеми вказано безпосередньо на рис. 2. Період генератора Pulse становив 580 мкс. Випрямляч змінного струму було замінено на джерело ідеальної електрорушійної сили 500 В, яка імітувала вихідну напругу напівпровідникового трифазного випрямляча за схемою Ларіонова, включеного у промисловій трифазній мережі 380 В частотою 50 Гц.

На рис. 3 приведено фотографію конструкції реальних магнітозв'язаних котушок  $L_K$  та  $L_D$ , які були закріплені в конструкції діючої індукційної установки з напівпровідниковим послідовним резонансним однокомірковим інвертором, який забезпечував електроживлення індуктора при різних опорах металеві сировини, що нагрівалась.

Дані про індуктивність та взаємодуктивність котушок  $L_K$  і  $L_D$ , необхідні для аналізу схеми на рис. 2, було отримано на основі розрахунку просторового розподілу електромагнітного поля біля цих котушок, проведеного з використанням відомого пакету прикладних програм *COMSOL Multiphysics*.



Рис. 3 Фотографія конструкції магнітозв'язаних котушок  $L_K$  та  $L_D$

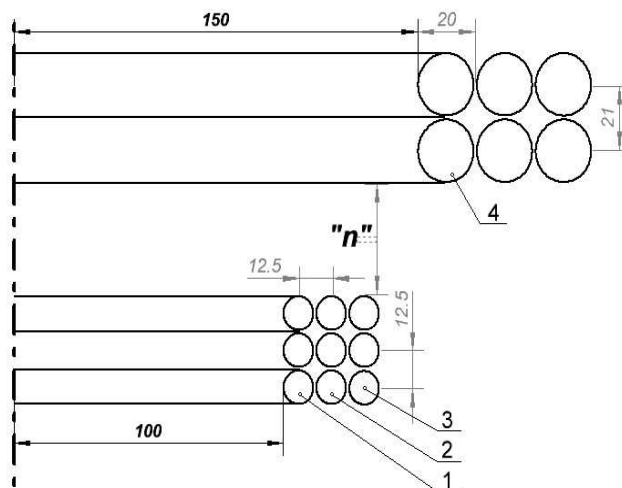


Рис. 4 Конструкція магнітозв'язаних котушок  $L_K$  та  $L_D$

Вхідні дані для розрахунку значень індуктивності та взаємодуктивності котушок  $L_K$  і  $L_D$  в програмі *COMSOL Multiphysics* наведено на рис. 4.

Скріншот результатів розрахунку магнітного поля магнітозв'язаних котушок  $L_K$  та  $L_D$  в програмі *COMSOL Multiphysics* для варіанту " $n$ "=20 мм наведено на рис. 5.

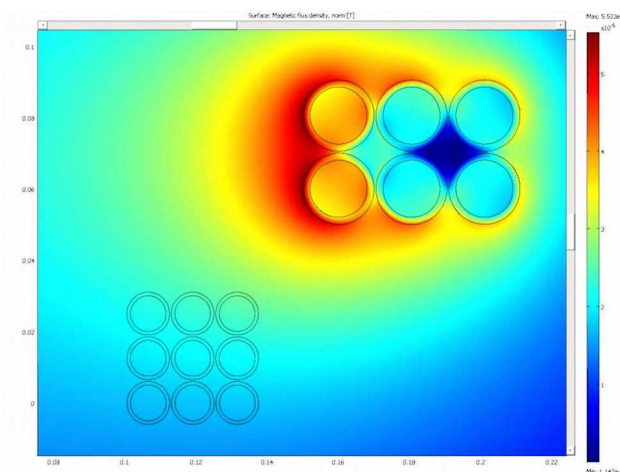


Рис. 5 Розподіл магнітного поля біля магнітозв'язаних котушок  $L_K$  та  $L_D$

Індуктивності котушок  $L_K$  та  $L_D$  не залежать від їх взаємного розташування і становлять:  $L_K = 24,5$  мкГн, та  $L_D = 16,4$  мкГн.

Результати розрахунку взаємодуктивності  $L_{B3}$  котушок  $L_K$  та  $L_D$  при різних значеннях відстані " $n$ " між котушками на рис. 4, які отримано з використанням програми *COMSOL Multiphysics*, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Взаємодуктивність  $L_{B3}$  котушок  $L_K$  та  $L_D$

" $n$ ", мм	20	40	60	80
$L_{B3}$ , мкГн	6,96	5,75	4,7	3,83

Розрахунки режимів в контурах електричної схеми, приведеної на рис. 2, виконано при відстанях між котушками  $L_K$  і  $L_D$  "n" = 20, 40, 60, 80 мм та змінненні активного опору навантаження  $R_H$  від 5 до 50 Ом .

Результати розрахунків зведено в графіки, які наведено на рис. 6 та 7.

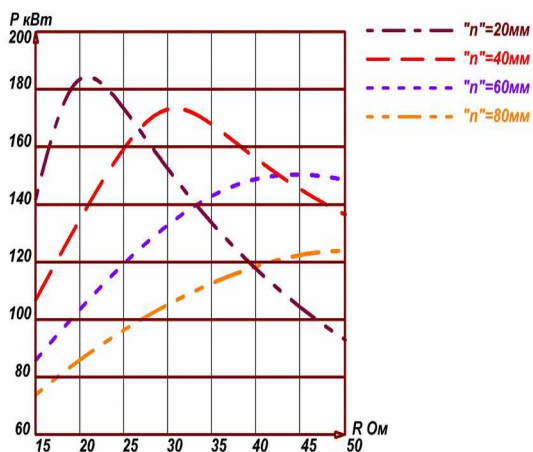


Рис. 6 Залежність потужності інвертора від опору навантаження  $R_H$  при різних відстанях між котушками  $L_K$  та  $L_D$

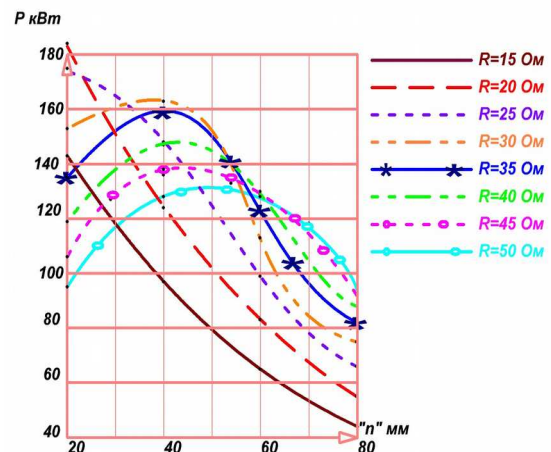


Рис. 7 Залежність потужності інвертора від відстані між котушками  $L_K$  і  $L_D$  при різних значеннях опору навантаження  $R_H$

**Висновки.** 1. Графіки на рис. 6 і 7 підтверджують залежність вхідної потужності напівпровідникового однокоміркового послідовного резонансного інвертора від опору навантаження та можливість регулювання цієї потужності зміненням відстані між котушками  $L_K$  і  $L_D$  при всіх значеннях опору навантаження  $R_H$ .

Такий підхід також забезпечує надійну гальванічну розв'язку навантаження від промислової мережі електроживлення, а змінення відстані між котушками  $L_K$  та  $L_D$  забезпечує регулювання режимів навантаження.

2. При використанні представленого методу узгодження інвертора з навантаженням не потрібно додаткових засобів, а лише реалізацію магнітного зв'язку між контурами навантаження та резонансного інвертора. Такий регульований магнітний зв'язок можливо реалізувати на всіх частотах резонансного інвертора.

Описаний метод гальванічної розв'язки та узгодження інвертора з індукційним навантаженням впроваджено в установках індукційного нагрівання металів під закалку і пластичну деформацію та в установках плавлення чорних і кольорових металів при використанні резонансних інверторів потужністю 30, 100, 200, 320 і 630 кВт, формуючих у навантаженнях струмів частотою від 2,4 до 22 кГц.

**Список літератури:** 1. Лавлес Д.Л. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева // Силовая электроника. - 2007. - №4. 2. Дзливев С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве //Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (АРИН-2005)". Материалы международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург, 2005. - С 193-200. 3.Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / Е.И. Беркович, Г.В. Ивенский, Ю.С. Иоффе, В.В. Моргунов-2-е изд. перераб и доп. - 1983. -208с. 4. Гусев Ю.М., Белкин А.К., Шуляк А.А., Рогинская Л.Э. / Согласование тиристорного преобразователя частоты с нагрузкой. // Технічна електродинаміка. - Спец випуск 1998, №2, Т2. – С. 23-26. 5. Казанцев В.Г., Рогинская Л.Э. Анализ способов автоподстройки частоты автономных инверторов, нагруженных на колебательный контур. Электротехника — 1994. -№10- С. 17-20. 6. Белкин А.К., Костюкова Т.П., Рогинская Л.Э., Шуляк А.А. Тиристорные преобразователи частоты - М.: Энергоатомиздат — 2000. - 263с: ил. 7. Саратовский А.Н. Особенности способов согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной нагрузкой - Сборник научных работ студентов Донбасского Государственного Технического Университета, Вып. 3 Ч. II, - г. Алчевск, 2010, - С.143-150. 8. Ламанов С.Л. Патент № 64098 «Інвертор для індукційного нагріву металів» Ламанов С.Л та ін. Опубл. 25.10.2011; Бюл. №20.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lavel, D.L., Obzor poluprovodnikovyyih istochnikov pitaniya dlya induktsionnogo nagreva // Silovaya elektronika. - 2007. - №4. Print. 2. Dzljev, S.V., Printsipy postroeniya sistem pitaniya ustanovok induktsionnoy zakalki zubchatyih kolev pri dvuchastotnom nagreve // Aktualnyye problemy teorii i praktiki induktsionnogo nagreva (ARIN-2005)". Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. - Sankt-Peterburg, 2005. - 193-200. Print. 3. Tiristoriye preobrazovateli povyishennoy chastoty dlya elektrotehnologicheskikh ustanovok / E.I. Berkovich, G.V. Ivenskiy, Yu.S. Ioffe, V.V. Morgun-2-e izd. pererab i dop. - 1983. -208. Print. 4. Gusev Yu.M., Belkin A.K., Shulyak A.A., Roginskaya L.E. / Soglasovanie tiristorного preobrazovatelya chastoty s nagruzkoj. // TehnIchna elektrodinamika. - Spets vyipusk 1998, №2, T2. – 23-26. Print. 5. Kazantsev V.G., Roginskaya L.E. Analiz sposobov avtopodstroyki chastoty avtonomnyih invertorov, nagruzhennyih na kolebatelnyiy kontur. Elektrotehnika — 1994. -№10 - 17-20. Print. 6. Belkin A.K., Kostyukova T.P., Roginskaya L.E., Shulyak A.A. Tiristoriye preobrazovateli chastoty - M.: Energoatomizdat — 2000. - 263 Print. 7. Saratovskiy A.N. Osobennosti sposobov soglasovaniya tiristorного preobrazovatelya chastoty s induktsionnoy nagruzkoj - Sbornik nauchnyih rabot studentov Donbasskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta, Vyip. 3 Ch. II, - g. Alchevsk, 2010, - S.143-150. Print. 8. Lamanov S.L. Patent № 64098 «Invertor dlya induktsionnogo nagrivu metaliv» Lamanov S.L ta In. Opubl. 25.10.2011; Byul. №20.

Надійшла (received) 31.08.2015