

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.005>**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕНОСУ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В УСТАНОВЦІ ІНДУКЦІЙНОЇ ТЕРМООБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ АЛЮМІНІЄВИХ ЗАГОТОВОК З ТРИФАЗНИМ ІНДУКТОРОМ**

А.Ф. Жаркін^{1*}, акад. НАН України, **Ю.М. Гориславець**^{1**}, докт. техн. наук,
О.І. Глухенький^{1***}, канд. техн. наук, **Р.В. Білянin**^{2****}, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: gai56@ied.org.ua

2 – ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ",
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

Для запропонованого конструктивного варіанта трифазного індуктора установки індукційної термообробки циліндричних алюмінієвих заготовок, яка використовується в технології виробництва струмопровідних жил силових кабелів перед пресуванням катанки, з використанням розробленої математичної моделі електротеплових процесів досліджено перенос активної потужності між фазними секціями індуктора та по довжині заготовок, що виникає внаслідок індуктивного зв'язку між фазними обмотками. Встановлено, що для крайніх фазних секцій індуктора характерна відсутність балансу між спожитою з мережі живлення активною потужністю та сумарними тепловиділеннями у фазній секції та відповідній їй частині алюмінієвої заготовки, за умови, що для центральної фазної секції та індуктора в цілому цей баланс виконується. Отримано розподіл за довжиною та радіусом індукційної установки осьової складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля, який підтверджує наявність переносу активної потужності між суміжними секціями трифазного індуктора та свідчить про його відсутність вздовж алюмінієвих заготовок (по вторинній стороні системи). Встановлено, що перенос активної потужності між секціями індуктора практично не впливає на нагрівання алюмінієвих заготовок. Визначено, що негативним наслідком переносу активної потужності між секціями трифазного індуктора є нерівномірне навантаження фаз електричної мережі. Запропоновано раціональну схему живлення трифазного тришарового індуктора від трифазної промислової електромережі, яка забезпечує максимально можливу енергоефективність індукційної установки за мінімальної нерівномірності навантаження фаз електромережі. Бібл. 9, рис. 6, табл.

Ключові слова: індукційна термообробка, алюмінієві заготовки, трифазний індуктор, комп'ютерне моделювання, електротеплові процеси, перенос активної потужності.

Вступ. Нині в технології виробництва струмопровідних алюмінієвих жил для кабельної продукції при нагріванні циліндричних алюмінієвих заготовок перед пресуванням катанки часто використовують індукційні нагрівачі безперервної дії у вигляді однофазного одношарового індуктора промислової частоти, виготовленого із водоохолоджуваної рівнотовщинної прямокутної мідної трубки [1]. Зазначені установки індукційного нагрівання мають відносно низьку енергоефективність зі значенням електричного ККД менше 40 % та, оскільки вони є значним з невисоким коефіцієнтом потужності однофазним навантаженням, погано узгоджуються з трифазною промисловою електромережею.

Визначення шляхів підвищення енергоефективності процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок можливе за рахунок математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних та теплових процесів, яке шляхом виконання варіантних розрахунків дає змогу оцінити раціональність того чи іншого конструктивного виконання індуктора. У роботі [2] представлено розроблену математичну модель для дослідження електротеплових



процесів у системі «індуктор – алюмінієва заготовка», яка має суттєві відмінності стосовно існуючих математичних моделей [3–5]. До особливостей та переваг розробленої моделі належить визначення параметрів індукційного нагрівання заготовок залежно від підведеної до індуктора електричної напруги з урахуванням реального розподілу густини струму по перетину витків індуктора та залежності електротеплових характеристик матеріалів від температури. Такий підхід дає змогу безпосередньо узгоджувати кількість витків індуктора з напругою живлення електромережі та, окрім знайденого тепловиділення та розподілу температури в алюмінієвих заготовках, точно визначати величину та розподіл втрат в індукторі.

У роботах [2, 6] на основі розробленої математичної моделі досліджено можливості підвищення енергоефективності індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок за рахунок зміни профілю поперечного перерізу струмопроводу витків одношарового індуктора та використання в конструкції індуктора з багатошаровою намоткою. Проведені дослідження показали, що ефективність індукційного нагрівання може бути суттєво підвищена як за рахунок збільшення товщини ближньої до заготовки стінки мідної трубки одношарового індуктора, так і завдяки використанню в конструкції індуктора багатошарової обмотки, яка виготовлена з рівнотовщинної трубки. У роботі [6] показано, що трифазне виконання багатошарового індуктора дозволяє не тільки покращити енергетичну ефективність індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок у порівнянні з існуючим однофазним одношаровим індуктором [1], а й забезпечити практично рівномірне навантаження трифазної промислової електромережі при безпосередньому підключенні до її номінальної (стандартної) напруги.

Особливості використання трифазних індукторів для термообробки циліндричних струмопровідних заготовок розглядались та досліджувались в роботах [7–9]. Так, у роботі [7] було розглянуто питання проектування та експлуатації систем індукційного нагрівання металу промислової частоти. Наведено особливості використання як однофазних, так і трифазних індукторів. Стверджується, що підключення потужних однофазних індукторів до трифазної мережі є небажаним або взагалі неприпустимим. Підкреслюється, що посправжньому енергоефективний технологічний комплекс індукційного нагрівання під обробку металу тиском можливо спроектувати тільки з урахуванням його системи електрозабезпечення.

У монографії [8] наголошується, що загальною проблемою для трифазних індукційних нагрівачів промислової частоти все ж залишається нерівномірність розподілу спожитої активної потужності за фазами мережі живлення, яка виникає внаслідок зміни електрофізичних властивостей навантаження при нагріванні та здебільшого внаслідок взаємного впливу фазних секцій. Зазначається, що за рахунок індуктивного зв'язку між сусідніми секціями відбувається перенос спожитої потужності, який і призводить до нерівномірного навантаження фаз мережі. Нерівномірність за реактивною її складовою може бути скомпенсована конденсаторами. Різниця ж в активній потужності призводить до перекосу напруги мережі та додаткових втрат. У роботі представлено результати досліджень по розподілу та переносу активної потужності, які отримано з використанням аналітичних методів розрахунку при заданих однакових модулях струму в фазних секціях. Підкреслюється, що дана постановка є спрощеною, оскільки на практиці задану трифазну систему складають не струми, а напруги. Але аналіз за такого підходу є більш складним та вимагає застосування чисельних методів.

У роботі [9] представлено комбіновану трикомпонентну математичну модель та програмне забезпечення комплексного математичного моделювання режимів індукційного нагрівання циліндричних заготовок, що дозволяють керувати перерозподілом потужності в трифазних індукційних нагрівачах. Зокрема, у роботі показано, що активна потужність у навантаженні суттєво залежить від фазового зсуву струмів у сусідніх фазних секціях індукційного нагрівача. Отримані з врахуванням заданої напруги та з застосуванням

чисельних методів результати не узгоджуються з висновком авторів монографії [8], що потужність в ділянках завантаження в кожній із секцій при зміні фазового зсуву практично не змінюється.

Наявність протиріч викликає питання та породжує додатковий теоретичний та практичний інтерес до дослідження перерозподілу потужності між фазними секціями та по довжині заготовок у трифазних індукційних нагрівачах. Отже, **метою цієї роботи** є дослідження процесу переносу активної потужності в установці індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок з трифазним індуктором. Вивчення цього питання виконувалося шляхом комп'ютерного моделювання електротеплових процесів з використанням розробленої і представленої в роботі [2] математичної моделі.

Методика дослідження. Дослідження переносу активної потужності в трифазній установці індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок виконувалося на прикладі запропонованого та розглянутого в роботі [6] конструктивного варіанта трифазного індуктора з тришаровою намоткою. Кожна фазна секція такого індуктора складається з 126 витків, які розподілені по 42 витки в кожному шарі. За умов живлення кожної фазної секції напругою $U_i = 380$ В та усередненої швидкості руху заготовок 7,3 мм/с зазначена кількість витків забезпечує на виході індуктора необхідну середню температуру алюмінієвих заготовок ~ 430 °С. Індуктор намотано рівнотовщинною мідною трубкою шириною 15 мм та висотою 12 мм з товщиною стінок 2 мм. Зазор між витками по довжині складає приблизно 2,5 мм, між шарами – 3 мм. Фазні секції по довжині індуктора розміщуються без додаткового проміжку (впритул). У запропонованому трифазному індукторі зберігається загальна довжина 2200 мм та внутрішній діаметр 228 мм існуючого однофазного індуктора, що використовується в технології індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок на ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ" (м. Харків) при виробництві струмопровідних жил для кабельної продукції [1]. Діаметр алюмінієвих заготовок становить 178 мм, загальна довжина розміщених в індукторі шістьох заготовок – 2628 мм.

Ескіз розрахункової області двовимірної осесиметричної електротеплової задачі для дослідження переносу активної потужності в установці індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок з трифазним індуктором представлено на рис. 1. На ескізі фазні секції індуктора позначені заштрихованими підобластями та пронумеровані за напрямком руху алюмінієвих заготовок. Для можливості визначення внеску кожної секції індуктора в нагрівання алюмінієвих заготовок їхній загальний об'єм поділено по границях фазних секцій індуктора на три окремі підобласті. Фазні секції та відповідні їм підобласті алюмінієвих заготовок для наочності виділені однаковим кольором. Моделювання виконувалося за наявності спільного для всього індуктора циліндричного магнітопроводу.

Методика розрахункового дослідження процесу переносу активної потужності в установці індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок з трифазним індуктором полягала у порівнянні значень спожитої з електромережі кожною секцією індуктора активної потужності P_{si} ($i = 1, 2, 3$), сумарних $P_{\Sigma i}$ і окремих джоулевих втрат у мідних витках кожної фазної секції P_{cui} та потужності тепловиділень від наведених струмів у відповідній їй частині алюмінієвих заготовок P_{Ali} ($P_{\Sigma i} = P_{cui} + P_{Ali}$).

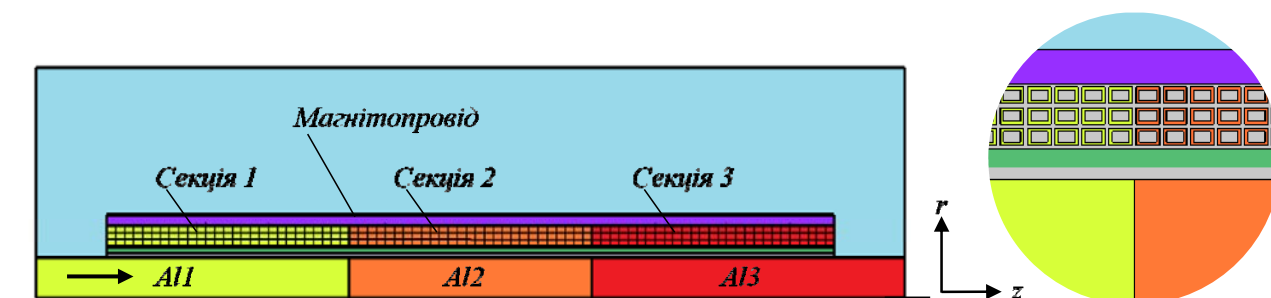


Рис. 1. Ескіз розрахункової області електротеплової задачі

Результати дослідження. На рис. 2 окремо для кожної фазної секції (а-в) та індуктора в цілому (г) залежно від кута фазового зсуву α між напругами, що живлять послідовні фазні секції індуктора, представлено розрахункові значення спожитої з електромережі активної потужності P_s , сумарних P_{Σ} та окремих джоулевих тепловиділень у мідних витках фазних секцій P_{Cu} та у відповідних їм частинах алюмінієвих заготовок P_{Al} . На рис. 2 г значення кожної потужності для індуктора в цілому визначались як сума відповідних значень для кожної секції: $P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3}$; $P_{Al} = P_{Al1} + P_{Al2} + P_{Al3}$; $P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Cu3}$; $P_{\Sigma} = P_{\Sigma1} + P_{\Sigma2} + P_{\Sigma3}$.

Як видно з наведених рисунків, для крайніх фазних секцій практично у всьому діапазоні зміни кутів α за виключенням 0 та 180 ел. град. характерна відсутність балансу між спожитою з мережі живлення активною потужністю та сумарними тепловиділеннями у фазній секції та відповідній їй частині алюмінієвої заготовки. Водночас для середньої фазної секції та індуктора в цілому (рис. 2 б, г) цей баланс виконується при всіх значеннях кута α .

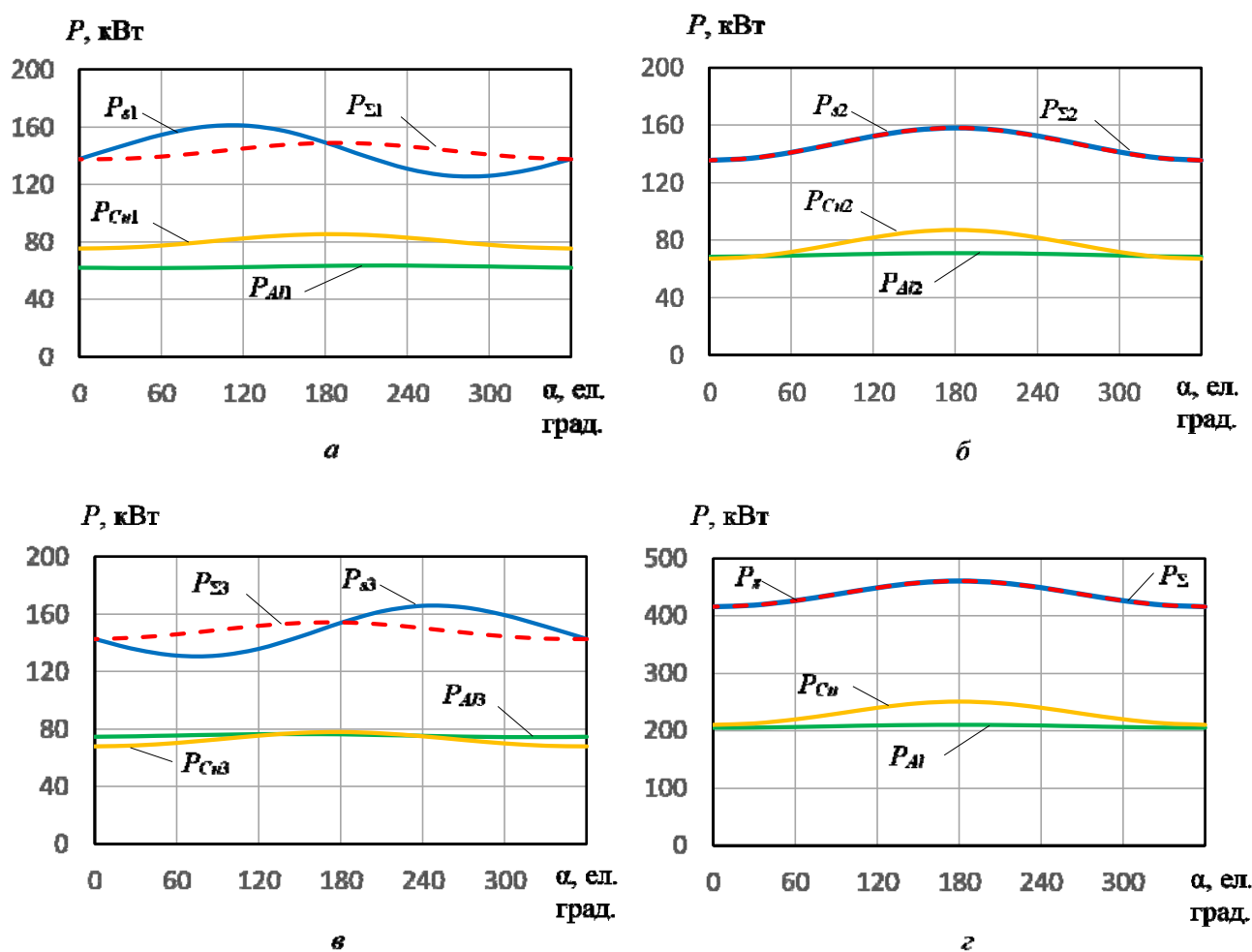


Рис. 2. Розрахункові значення для кожної фазної секції (а-в) та індуктора в цілому (г) спожитої з електромережі активної потужності P_s , сумарних P_{Σ} та окремих джоулевих тепловиділень у мідних витках фазних секцій P_{Cu} та у відповідних їм частинах алюмінієвих заготовок P_{Al}

Такі результати можна пояснити наявністю в трифазному індукторі явища переносу активної потужності, яке виникає в ньому внаслідок індуктивного зв'язку між фазними секціями. Симетричне розміщення середньої секції індуктора по відношенню до крайніх забезпечує однаковість коефіцієнтів взаємної індуктивності між середньою та крайніми секціями. При однакових кутах фазового зсуву між напругами, що живлять окремі фазні секції індуктора, відбувається передавання практично однакової величини активної потужності з однієї крайньої секції індуктора до середньої та з середньої до іншої крайньої секції. Внаслідок цього в кінцевому рахунку спостерігається передавання активної потужності між крайніми секціями при балансі спожитої та витраченої потужності для

середньої секції, хоча безпосередній індуктивний зв'язок між крайніми секціями практично відсутній внаслідок значної відстані між ними.

Перенос активної потужності в трифазному індукторі в осьовому напрямі за результатами розрахунку електромагнітної задачі може бути проілюстрований за допомогою дійсної частини z -складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля

$$Q_z = 0,5 \operatorname{Re}(j\omega \dot{A} \dot{H}_r^*), \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi\nu$ – кругова частота; $\dot{A}$ – комплексна амплітуда єдиної азимутальної складової векторного магнітного потенціалу; $\dot{H}_r^*$ – комплексно-спряжена амплітуда r -складової напруженості магнітного поля, що виникає в трифазному індукторі в зонах стиків фазних секцій. Розподіл значень вектора Q_z за довжиною та радіусом індукційної установки, які отримано для кута фазового зсуву між напругами $\alpha = 90$ ел. град., представлено відповідно на рис. 3 а та б.

На рис. 3 а представлено розподіл значень Q_z для умовної поздовжньої лінії з радіусом $R_{12} = 0,1275$ м, що пролягає між внутрішнім та середнім шаром тришарового трифазного індуктора. Отриманий розподіл вектора Q_z підтверджує наявність переносу активної потужності між суміжними фазними секціями трифазного індуктора, що призводить до передавання активної потужності між крайніми секціями. З наведеного рисунка видно, що осьова складова потоку енергії електромагнітного поля присутня лише в крайових зонах фазних секцій. Максимальні значення z -складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля досягаються в площині стиків фазних секцій.

Розподіл по радіусу дійсної частини z -складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля в площині стику між першою та другою фазними секціями представлено на рис. 3 б. Виходячи з розподілу значень вектора Q_z , перенос активної потужності в осьовому напрямі в основному локалізовано в просторі між циліндричною алюмінієвою заготовкою та магнітопроводом індуктора (по первинній стороні електромагнітної системи).

Інтегральне значення активної потужності, що переноситься між фазними ділянками індукційної установки, може бути визначено шляхом інтегрування вектора Q_z по поверхні площини стику між фазними секціями у відповідності з виразом

$$P_z = 2\pi \int_0^{R_M} Q_z \cdot r dr, \quad (2)$$

де R_M – внутрішній радіус магнітопроводу.

Змінюючи межі інтегрування у відповідності з виразом (2) може бути визначена також частка інтегральної активної потужності, що передається через той чи інший відрізок

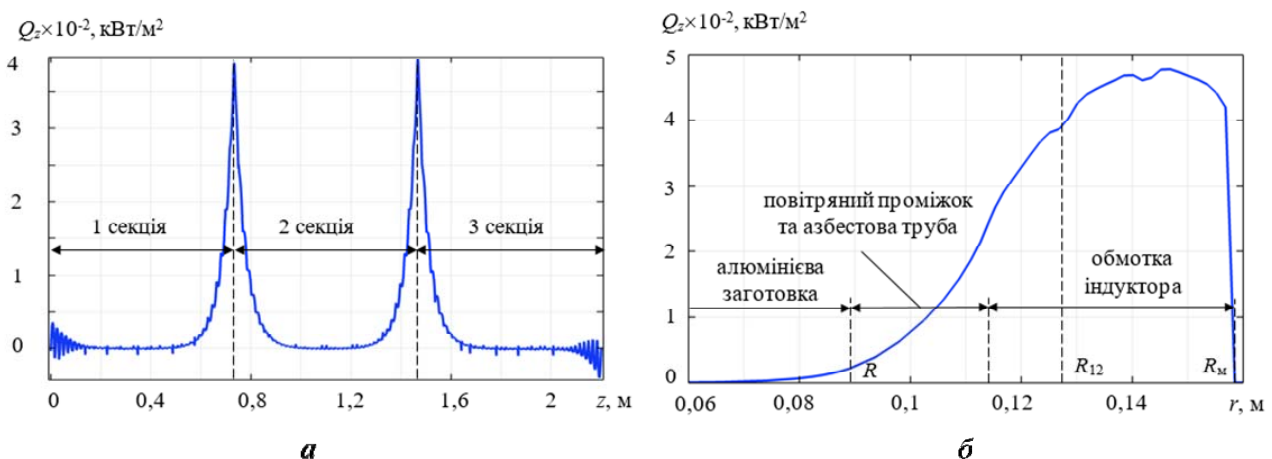


Рис. 3. Розподіл значень дійсної частини z -складової вектору густини потоку енергії електромагнітного поля для умовної поздовжньої лінії з радіусом $R_{12}=0,1275$ м (а) та в площині стику між першою та другою фазними секціями (б)

межі між фазними ділянками. Так, при інтегруванні по радіусу в межах об'єму алюмінієвої заготовки (від 0 до R) було визначено, що перенос активної потужності в зазначених межах становить менше 1 % від загальної активної потужності, що передається в осьовому напрямі між фазними ділянками індукційної установки.

Таким чином, переносом активної потужності в алюмінієвих заготовках (по вторинній стороні системи) в установках для індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок з трифазним індуктором можна нехтувати, враховуючи його незначну величину.

Напрямок передавання спожитої з мережі активної потужності та її величина в трифазному індукторі залежить від значення кута фазового зсуву α між напругами живлення фазних секцій індуктора. На рис. 4 для крайніх секцій представлено залежність від кута α різниці між спожитою з мережі живлення активною потужністю та сумарними тепловиділеннями в секції та відповідній їй частині алюмінієвої заготовки $\Delta P_{si} = P_{si} - P_{\Sigma i}$. При прямому чергуванні фаз (в діапазоні кутів α від 0 до 180 ел. град.), коли напруга першої секції індуктора за напрямком руху завантаження буде випереджати напругу другої секції, яка в свою чергу буде випереджати напругу третьої секції, отримано однакові за величиною позитивні значення зазначеної різниці для першої фази та негативні для третьої фази, що свідчить про часткову компенсацію джоулевих тепловиділень у витках третьої фазної секції та відповідній їй частині алюмінієвих заготовок за рахунок спожитої потужності з першої фази мережі живлення. У діапазоні кутів від 180 до 360 ел. град. (зворотне чергування фаз) навпаки активна потужність на часткову компенсацію тепловиділень в першій секції індуктора споживається з третьої фази мережі. Максимальні значення переносу активної потужності виникають при кутах α у 90 та 270 ел. град.

Аналізуючи представлені на рис. 2 результати, можна зробити висновок, що перенос

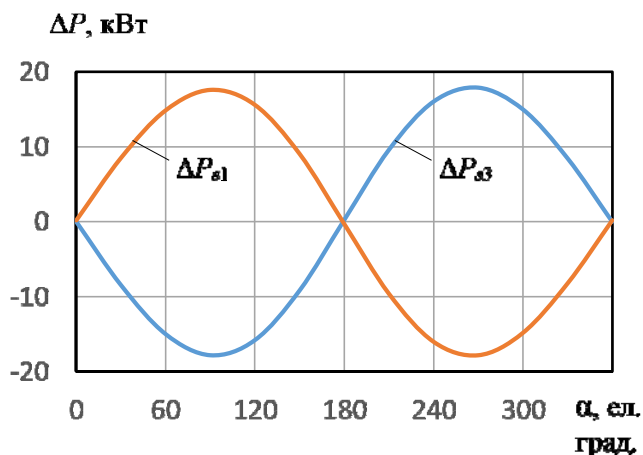


Рис. 4. Різниця між спожитою з мережі активною потужністю та сумарними тепловиділеннями для крайніх фазних секцій індуктора

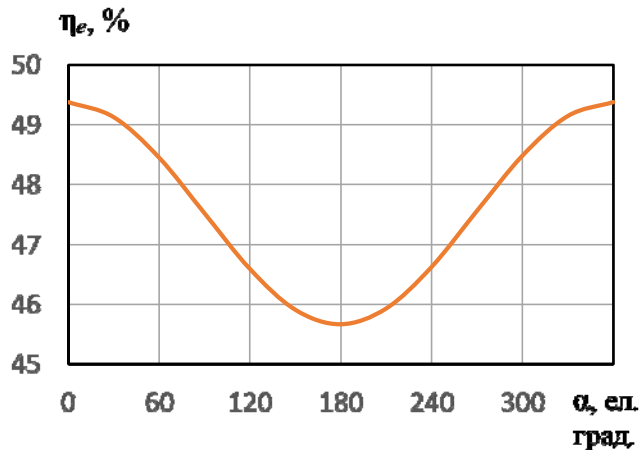


Рис. 4. ККД індуктора

активної потужності між фазними секціями індуктора практично не впливає на нагрівання алюмінієвих заготовок. Величина джоулевих тепловиділень в алюмінієвих заготовках на відміну від значень перенесеної активної потужності між фазними секціями практично не залежить від кута фазового зсуву α між напругами живлення трифазного індуктора, що робить неможливим керування нагрівом заготовок за рахунок цього фактору.

Водночас у трифазному індукторі є досить помітним вплив кута фазового зсуву α на рівень джоулевих втрат у витках фазних секцій, що суттєво позначається на його енергетичних показниках. Залежність електричного ККД трифазного індуктора в цілому $\eta_e = P_{Al} / P_s$ від кута α представлено на рис. 5. Максимальні значення ККД отримано при $\alpha = 0$, мінімальні – при 180 ел. град. При цьому різниця між цими значеннями становить близько 4 %.

З результатів, представлених на рис. 2, звертає на себе увагу послідовне збільшення джоулевих тепловиділень у відповідних фазним секціям частинах алюмінієвих заготовок, які для першої частини становлять приблизно 63 кВт, другої – 70 кВт, третьої – 75 кВт. Таке зростання тепловиділень пов'язано зі

зменшенням питомої електропровідності алюмінію з $\sigma = 3,7e7$ См/м при 20°C до $\sigma = 1,3e7$ См/м при 450°C в процесі нагрівання заготовок за напрямком руху в індукторі. У цьому легко пересвідчитися, розв'язуючи електромагнітну задачу без врахування залежності значень питомої електропровідності алюмінію σ від температури. При заданому однаковому для всього об'єму заготовок значенні $\sigma = 2e7$ См/м, яке відповідає питомій електропровідності алюмінію при температурі 227°C (500 К), у всіх трьох фазних частинах заготовок виникають приблизно однакові тепловиділення величиною у 69,5 кВт.

Негативним наслідком переносу активної потужності між фазними секціями трифазного індуктора є нерівномірне навантаження електричної мережі. На рис. 6 для кожної секції індуктора залежно від кута фазового зсуву між напругами у відсотках по відношенню до усередненого значення представлено нерівномірність споживання активної потужності $\Delta P_i = (P_{si} - P_{av}) / P_{av}$, де $P_{av} = P_s/3$. Суцільними кривими на рисунку представлено результати, що отримано з врахуванням залежності питомої електропровідності від температури, пунктирними – при заданому однаковому для всього об'єму заготовок значенні $\sigma = 2e7$ См/м. Криві 1 відповідають першій фазній секції індуктора, криві 2 – другій, криві 3 – третій.

Споживання середньої секції індуктора є близьким до усередненого значення спожитої з мережі активної потужності. Відносне максимальне відхилення від P_{av} не перевищує 3 %, в той час як для крайніх секцій індуктора нерівномірність споживання може сягати до 15 % від усередненого значення спожитої активної потужності. З наведеного рисунка випливає, що при заданому однаковому для всього об'єму заготовок значенні питомої електропровідності алюмінію (пунктирні криві) порядок чергування фаз мережі при живленні секцій індуктора не впливає на нерівномірність споживання активної потужності. Водночас з врахуванням збільшення джоулевих тепловиділень в завантаженні за рахунок зменшення питомої електропровідності алюмінію при нагріванні (суцільні криві), для зменшення нерівномірності споживання активної потужності при живленні секцій стає важливим вибір прямого чергування фаз трифазної мережі, за якого активна потужність на часткову компенсацію тепловиділень в третій секції індуктора споживається з першої секції.

Так, при живленні секцій індуктора від трифазної мережі лінійною напругою з діючим значенням $U_i = 380$ В у разі прямого чергування фаз з кутом $\alpha = 60$ ел. град. спожита активна потужність по секціях складає 154,5 кВт, 140,8 кВт та 131 кВт з максимальним відхиленням від усередненого значення 8,7 %, а у випадку зворотного чергування фаз з кутом $\alpha = 300$ (-60) ел. град. – відповідно 125,9 кВт, 141,2 кВт та 159,3 кВт з максимальним відхиленням 12,1 %. Аналогічна ситуація з вибором порядку чергування фаз спостерігається і при кутах $\alpha = \pm 120$ ел. град. Але, враховуючи більш високі значення електричного ККД (див. рис. 5), несиметрична система лінійної напруги з кутом зсуву фаз $\alpha = 60$ ел. град. є більш раціональною.

Визначені значення спожитої активної потужності кожної секції у разі підключення індуктора до лінійної напруги ще не дають повного уявлення про нерівномірність завантаження активною потужністю фаз трифазної електромережі. Для визначення останнього розглянемо та порівняємо між собою два варіанти підключення трифазного індукційного нагрівача циліндричних алюмінієвих заготовок до мережі з кутами між напругами на секціях індуктора $\alpha = 60$ ел. град. і $\alpha = -60$ ел. град. Перший варіант живлення нагрівача можна отримати при «вивернутій» середній секції індуктора та підключенні його

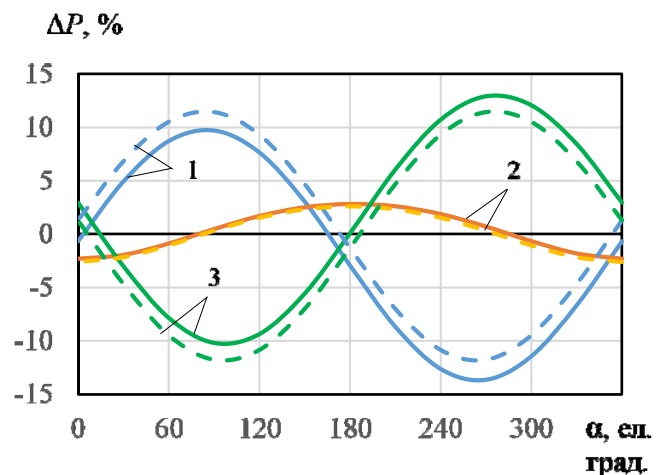


Рис. 6. Нерівномірність споживання активної потужності фазними секціями

до лінійних напруг трифазної мережі зі зворотним чергуванням її фаз. Другий варіант також можна отримати при «вивернутій» середній секції індуктора, але при підключенні його до лінійних напруг трифазної мережі з прямим чергуванням фаз.

Розподіл навантажень фаз електромережі активною потужністю P_i , що споживається трифазним індуктором, з їхнім відносним відхиленням від усередненого значення P_{av} для розглянутих схем підключення секцій представлено в таблиці.

α , ел. град.	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	P , кВт	P_{av} , кВт	ΔP_1 , %	ΔP_2 , %	ΔP_3 , %
+ 60	154,1	136,3	135,9	426,3	142,1	8,4	- 4,1	- 4,4
- 60	154,4	124,3	147,6	426,3	142,1	8,7	- 12,4	3,9

З наведеної таблиці видно, що навантаження фаз електромережі активною потужністю, як і споживання активної потужності секціями індуктора є більш рівномірним у разі прямого чергування напруг індуктора з кутом зсуву фаз між ними $\alpha = 60$ ел. град. Таким чином, для живлення трифазного тришарового індуктора для термообробки алюмінієвих заготовок при пресуванні катанки для силових кабелів можна рекомендувати несиметричну трифазну систему лінійної напруги з кутом зсуву фаз $\alpha = 60$ ел. град.

Висновки. Досліджено перенос активної потужності в установці індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок з трифазним індуктором в осьовому напрямі. Установлено, що перенос активної потужності між фазними секціями індуктора практично не впливає на нагрівання алюмінієвих заготовок.

Негативним наслідком переносу активної потужності між фазними секціями індуктора є нерівномірне навантаження фаз електричної мережі, яке може сягати до 15 % від усередненого значення спожитої індуктором активної потужності.

Для живлення трифазного тришарового індуктора, якого рекомендовано для термообробки алюмінієвих заготовок при пресуванні катанки для силових кабелів, слід використати несиметричну трифазну систему живлення з кутом зсуву фаз між напругами на секціях індуктора у 60 ел. град., яка забезпечує електричний ККД індуктора на рівні 48,5 % при максимальному відхиленні навантаження фаз електричної мережі активною потужністю 8,4 % від усередненого значення.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Забезпечення ефективного функціонування та розвитку розподіленої енергетики в Україні з використанням технологій мікромереж (шифр: РЕЖИМ-3)», № державної реєстрації 0125U000609, відомчого цільового замовлення НАН України та фінансовано з коштів державного бюджету (КПКВК 6541030).

1. Золотарев В.М., Щерба М.А., Гурин А.Г., Супруновская Н.И., Чопов Е.Ю., Обозный А.Л. Электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ. К.: При формат, 2017. 594 с.
2. Жаркін А.Ф., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І., Золотарьов В.В., Білянin Р.В. Моделювання електротеплових процесів в установці індукційної термообробки алюмінієвих зливків і визначення шляхів підвищення її ефективності при пресуванні катанки для силових кабелів. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 6. С. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2023/06/081>
3. Nemkov V., Goldstein R. Design Principles for Induction Heating and Hardening in Handbook of Metallurgical Process Design. Marcel Dekker. 2004. P. 591–641.
4. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Рашепкин А.П. Энергетические параметры трехфазных цилиндрических индукторов. *Технічна електродинаміка*. 1996. №6. С. 55–58.
5. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. 2013. 550 с.
6. Жаркін А.Ф., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І., Білянin Р.В. Багатошарові індуктори для установки індукційної термообробки алюмінієвих зливків при пресуванні катанки для силових кабелів. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2024. Вип. 68. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.013>
7. Зимин Л.С., Егизарян А.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию. *Вестн. Самар. гос. ун-та. Сер. Технические науки*. 2015. №3 (47). С. 128–134.
8. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 271 с.

9. Кузнецов Е.В. Управление перераспределением мощности в трехфазных индукционных нагревателях. *Вестник КрасГАУ*. 2007. № 3. С. 230–236.

RESEARCH OF ACTIVE POWER TRANSFER IN AN INSTALLATION FOR INDUCTION HEAT TREATMENT OF CYLINDRICAL ALUMINUM BILLETS WITH A THREE-PHASE INDUCTOR

A.F. Zharkin¹, Yu.M. Goryslavets¹, O.I. Gluhenky¹, R.V. Bilyanin²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: gai56@ied.org.ua

2 – YUZHicable WORKS, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

For the proposed design variant of a three-phase inductor of a device for induction heat treatment of cylindrical aluminum billets, which is used in the technology of production of conductive cores of power cables before pressing of wire rod, using the developed mathematical model of electrothermal processes, the process of active power transfer between phase sections and along the length of the billets, which occurs in the inductor due to inductive coupling between phase windings, has been investigated. It was established that the side phase sections of the inductor are characterized by the lack of balance between the active power consumed from the power supply network and the total heat dissipation in the phase section and the corresponding part of the aluminum billet, while this balance is fulfilled for the central phase section and the inductor as a whole. The distribution along the length and radius of the induction installation of the axial component of the electromagnetic field energy flux density vector was obtained, which confirms the presence of active power transfer between adjacent phase sections of the three-phase inductor and indicates its absence along the aluminum billets (on the secondary side of the system). It was established that the transfer of active power between the phase sections of the inductor has practically no effect on the heating of the aluminum billets. It was determined that the negative consequence of the transfer of active power between the phase sections of the three-phase inductor is the uneven load of the phases of the electrical network. A rational power supply scheme for a three-phase three-layer inductor from a three-phase industrial electrical network is proposed, which provides the maximum possible energy efficiency of the induction installation with minimal unevenness of the phases load of the electrical network. Ref. 9, fig. 6, table.

Key words: induction heat treatment, aluminum billets, three-phase inductor, computer modeling, electrothermal processes, active power transfer.

1. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Guryn A.G., Suprunovskaya N.Y., Chopov E.Yu., Obozny A.L. Electrotechnological complex for the production of cable systems for a voltage of up to 400 kV. K.: Pri format. 2017. 594 p. (Rus)
2. Zharkin A.F., Goryslavets Yu.M., Gluhenky O.I., Zolotaryov V.V., Bilyanin R.V. Modeling of electrothermal processes in the installation of induction heat treatment of aluminum ingots and determination of ways to increase its efficiency when pressing wire rod for power cables. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2023. No 6. Pp. 81–91. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023/06/081>
3. Nemkov V., Goldstein R. Design Principles for Induction Heating and Hardening in Handbook of Metallurgical Process Design. Marcel Dekker. 2004. Pp. 591–641.
4. Vishtak P.A., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Energy parameters of three-phase cylindrical inductors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1996. No 6. Pp. 55–58. (Rus)
5. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Cables with polymer insulation for ultra-high voltage. K.: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. 550 p. (Rus)
6. Zharkin A.F., Goryslavets Yu.M., Gluhenky O.I., Bilyanin R.V. Multilayer inductors for induction heat treatment installation of aluminum castings when pressing rods for power cables. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akaddemii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2024. Issue 68. Pp. 13–21. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.013>
7. Zimin L., Yeghiazaryan A. Features of induction heating for the deformation. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seria Tekhnicheskie Nauki*. 2015. No 3 (47). Pp. 128–134. (Rus)
8. Nemkov V.S., Demidovych V.B. Theory and calculation of induction heating devices. L.: Energoatomizdat, 1988. 271 p. (Rus)
9. Kuznetsov E.V. Control of power redistribution in three-phase induction heaters. *Vestnik KrasGAU*. 2007. No 3. Pp. 203–236. (Rus)

Надійшла: 18.02.2025

Прийнята: 03.04.2025

Submitted: 18.02.2025

Accepted: 03.04.2025