

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В УСТАНОВЦІ ІНДУКЦІЙНОЇ ТЕРМООБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ ЗЛИВКІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІД ЧАС ПРЕСУВАННЯ КАТАНКИ ДЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

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

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
² ПАТ "ЗАВОДПІВДЕНКАБЕЛЬ",
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

e-mail: yugoris@ukr.net.

Представлено комп'ютерну математичну модель для дослідження електротеплових процесів в установці індукційної термообробки циліндричних алюмінієвих зливок (заготовок) під час пресування катанки для виготовлення алюмінієвого дроту для силових кабелів. Модель дає змогу визначити енергетично та технологічно доцільні електромагнітні й теплові режими індукційної термообробки зливок за заданої напруги на індукторі. Представлено результати дослідження типової установки для нагрівання алюмінієвих заготовок з метою їхнього подальшого пресування з використанням однофазного одношарового циліндричного індуктора, виготовленого із прямокутної мідної трубки. Отримано розподіли температури по довжині алюмінієвих заготовок, а також в поперечних перерізах заготовки на виході з індуктора. Незначна відмінність розрахованих електромагнітних і теплових параметрів від аналогічних параметрів діючої установки підтвердила адекватність розробленої моделі. Розглянуто шляхи підвищення ефективності установки індукційного нагрівання за рахунок оптимізації профілю витків одношарового індуктора. Визначено вплив товщини ближньої до заготовки стінки мідної трубки індуктора на ККД установки та показано, що оптимальна її товщина знаходиться на рівні глибини проникнення електромагнітного поля в метал. Досліджено також можливість використання трифазного електроживлення індуктора та показано, що в такому випадку найбільш доцільним є використання системи живлення з фазовим кутом між напругами у 60 ел. град. Бібл. 10, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: електротеплові процеси, індукційна термообробка, алюмінієві зливки, однофазне і трифазне живлення, комп'ютерне моделювання, ефективність електротермообробки, профіль витків індуктора.

Вступ. В останній час внаслідок значного дефіциту міді зростає використання в електроенергетичній галузі струмопровідних виробів із алюмінію. З цього металу нині виготовляють обвитки електричних машин і трансформаторів, струмопровідні жили повітряних ліній електропередавання та силових кабелів на всі рівні напруги від низьких до високих і надвисоких [1, 2]. Для цього, як правило, використовують технічно чистий алюміній, що має достатньо високі електропровідність та пластичність. Під час виробництва високоякісної електротехнічної струмопровідникової продукції з алюмінію найбільш поширеним є використання алюмінієвих циліндричних зливок, з яких шляхом попередньої градієнтної термообробки (нагрівання) та подальшого пресування (екструзії) отримують такий напівфабрикат як пруток або катанку для подальшого виготовлення багатодровових струмопровідних жил силових кабелів.

Задля підвищення якості вказаного пресування та зменшення при цьому механічних зусиль зазвичай використовують гаряче пресування, тобто перед пресуванням алюмінієвий зливок попередньо нагрівають. Частіше всього для такого нагрівання використовують електроіндукційні установки (печі) промислової частоти. При цьому застосовують одну із двох технологічних схем. Згідно з однією із них алюмінієвий зливок у вигляді циліндричного стовпа, отриманого під час лиття на металур-

© Жаркін А.Ф., Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Золотарьов В.В., Білянin Р.В., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0003-1668-4972>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-5053-5677>; **** <https://orcid.org/0000-0003-0928-011X> ;
***** <https://orcid.org/0000-0003-3781-6233>

гійному підприємстві, поміщають в індукційну установку, де його нагрівають до потрібної температури, а потім розрізають на мірні по довжині заготовки, які далі по черзі подають в контейнер гідравлічного преса. За іншою – алюмінієвий зливоч попередньо розрізають на мірні заготовки, довжина яких, як і в першому випадку, визначається технічними характеристиками преса та технологічними параметрами процесу пресування, а потім завантажують в індукційну установку в необхідній кількості для нагрівання, де вони рухаються по довжині установки (всередині циліндричного індуктора) зі швидкістю, яка забезпечує необхідну для пресування температуру заготовки на виході.

Дослідженню індукційного нагрівання алюмінієвих зливків з метою подальшої екструзії методом гарячої пластичної деформації присвячено значну кількість наукових праць, зокрема [3, 4]. Їхній аналіз показує, що для цього використовують однофазні або трифазні циліндричні індуктори, які живляться в основному від промислової мережі на частоті 50 Гц. Задля збільшення індуктивного зв'язку між індуктором і зливком часто використовують шихтований феромагнітний магнітопровід. Значну частину відомих наукових праць присвячено дослідженню електромагнітних і теплових процесів в таких системах з метою підвищення їхньої ефективності. Так, наприклад, в роботі [5] показано важливість вибору для цього необхідного профілю струмопроводу витків індуктора. В цій же роботі, а також в роботі [6] досліджувався вплив феромагнітного осердя на ККД індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок, де відзначено незначний вплив його на ефективність індукційної установки.

Значну кількість наукових праць присвячено особливостям індукційного нагрівання циліндричних металевих заготовок за допомогою трифазного індуктора. В роботі [3] на основі аналітичного розв'язання електромагнітної задачі отримано розподіл активної потужності по довжині феромагнітного циліндра. Показано, що між фазними секціями індуктора в металі заготовки (циліндра) виникають провали потужності, які залежать від фазового зсуву струмів в сусідніх секціях, зазору між індуктором і заготовкою та наявності магнітопроводу. Аналогічні дослідження проведено в роботі [7], де визначено електричні параметри трифазного шестисекційного циліндричного індуктора із заготовкою у вигляді феромагнітної циліндричної труби, де також акцентується увага на провалах потужності в заготовці на стиках фазних секцій індуктора.

Задача представленого дослідження – шляхом комп'ютерного математичного моделювання визначити параметри процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок з метою подальшого підвищення його ефективності. Дослідження проводили на прикладі типової промислової установки, яка зокрема використовується на ПАТ "ЗАВОДПІВДЕНКАБЕЛЬ" (м. Харків) в технології виробництва струмопровідних жил для кабельної продукції [1]. Установка реалізує другу із згаданих вище технологічних схем індукційного нагрівання. Принципіальну схему установки показано на рис. 1.

Призначення такої установки – нагрівати в безперервному режимі циліндричні алюмінієві за-

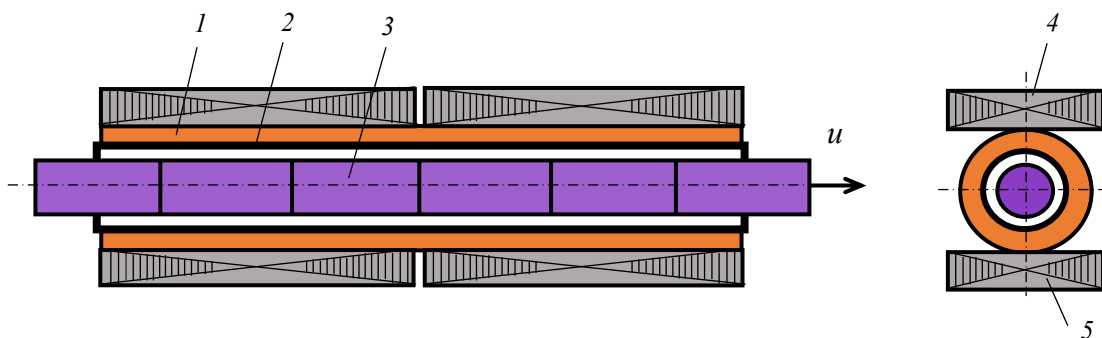


Рис. 1

готовки від температури довкілля (на вході установки) до температури $\sim 430^{\circ}\text{C}$ (на виході). Основу установки складає циліндричний індуктор 1 довжиною 2200 мм та внутрішнім діаметром 228 мм, намотаний в один шар мідною водоохолоджуваною прямокутною трубкою. Габаритні розміри поперечного перерізу трубки – 12×36 мм, товщина всіх чотирьох стінок однакова і складає 2 мм. Трубка індуктора намотана «на ребро», незважаючи на відомі рекомендації намотування таких індукторів на більшу сторону, що зменшує додаткові електричні втрати. Скоріш за все це було зумовлено під час проектування установки необхідністю скорочення довжини індуктора та забезпечення певної кількості його витків. Число витків індуктора – 154. Враховуючи досить значне струмове навантаження індуктора (робочий струм його складає більше 3,5 кА), для охолодження (відведення тепла) індуктор набрано із 22-х семивиткових одношарових секцій, які електрично з'єднані між собою послідовно, а

по воді – паралельно. Всередині індуктора знаходиться теплоізолююча азбестова труба 2 (товщина стінки 16 мм) з направляючими, по яким рухаються стиковані між собою алюмінієві мірні заготовки 3 діаметром 178 мм і довжиною 438 мм кожна. Зовні індуктора розміщено два магнітопроводи: верхній 4 і нижній 5.

Рух заготовок в індукторі носить циклічний характер. Загальна тривалість кожного циклу становить ~60 с, яка складається з тривалості переміщення із заданою швидкістю $u = 3$ м/хв всіх заготовок на довжину однієї заготовки (приблизно 9 с) і тривалості нерухомого (заторможеного) стану. Зазначимо, що за вказаної довжини індуктора всередині його постійно знаходяться шість заготовок, дві з яких (крайні) в нерухомому положенні наполовину виступають за межі індуктора (див. рис. 1). Електроживлення індуктора забезпечується підключенням його до лінійної напруги промислової електромережі ($U = 380$ В, частота $f = 50$ Гц). Таку установку інколи ще називають індукційним нагрівачем безперервної дії з дискретним перештовхуванням заготовок [3].

Розрахункове дослідження процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок в зазначеній установці раніше вже виконувалося за заданого струму та рівномірному його розподілі в поперечному перерізі індуктора [2]. Видається доцільним провести такі дослідження за заданої напруги на індукторі та реальному розподілі струму в витках індуктора із врахуванням ефекту витіснення струму в поперечному перерізі мідної трубки. Це дасть змогу окрім знайденого тепловиділення та розподілу температури в алюмінієвих заготовках більш точно визначити втрати в індукторі, а отже визначити електричний коефіцієнт корисної дії установки індукційного нагрівання. Такий підхід дає змогу дослідити та намітити шляхи подальшого підвищення ефективності зазначеної установки.

Мета роботи – на основі комп'ютерного математичного моделювання визначити параметри процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок (зливків) в технології виробництва алюмінієвого дроту для підвищення його ефективності шляхом вдосконалення конструкції індуктора установки та визначення доцільних варіантів його живлення.

Математична модель для дослідження електротеплових процесів. Формулювання моделі індукційного нагрівання проводилося за таких припущень.

1. Задля спрощення задачі циклічний процес руху стикованих між собою алюмінієвих заготовок всередині індуктора замінюється на безперервне переміщення їх з постійною усередненою швидкістю $u_{av} = l_{ing}/T$, де $T = l_{ing}/u + t_{stop}$ – тривалість циклу, l_{ing} – довжина заготовки, u – реальна швидкість заготовки в режимі переміщення, t_{stop} – тривалість нерухомого (стопорного) стану. У разі довжини кожної заготовки $l_{ing} = 438$ мм та тривалості циклу 60 с значення усередненої швидкості становить 7,3 мм/с (0,44 м/хв).

2. Два магнітопроводи прямокутного перерізу представлено одним коаксіальним шихтованим осердям із заданою магнітною проникністю. Кожний виток індуктора замикається сам на себе, тобто нехтується гвинтовою структурою індуктора. Все це дає змогу формулювати модель в осесиметричній постановці та використовувати циліндричну систему координат rOz , в якій струми в індукторі та заготовці мають єдину азимутальну просторову складову.

3. Для алюмінієвих заготовок враховуються нелінійні залежності електропровідності, теплопровідності та питомої теплоємності від температури.

Розрахункову область для дослідження мультифізичних процесів за індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок представлено на рис. 2. Вона включає підобласті мідних трубок Ω_1 , кількість яких визначається числом витків індуктора, а також підобласті теплоізолюючої труби Ω_2 , алюмінієвих заготовок Ω_3 , шихтованого магнітопроводу Ω_4 та навколишнього повітряного простору Ω_5 .

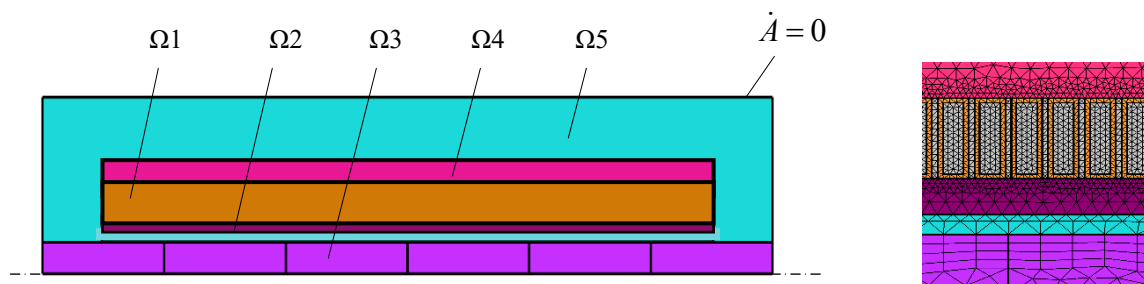


Рис. 2

Електромагнітна задача. Вважається, що до багатовиткового індуктора прикладена напруга U . По всім виткам індуктора протікає однаковий струм I , значення та розподіл густини якого по поперечному перерізу кожного витка є невідомими та визначаються в результаті розв'язання електромагнітної задачі.

Електромагнітні процеси в системі «індуктор-заготовка» у випадку живлення індуктора від джерела напруги та врахування реального поперечного перерізу витків індуктора описуються системою інтегро-диференціальних рівнянь відносно невідомих значень струму в індукторі \dot{I} , прикладеної до кожного з витків індуктора електричної напруги \dot{U}_i та комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу, який в циліндричній системі координат має єдину просторову складову \dot{A}_φ (далі \dot{A}). Рівняння зазначеної системи для різних підобластей розрахункової області мають наступний вигляд:

– для підобласті алюмінієвих заготовок

$$j\omega\sigma(T)\dot{A} + \nabla \times ((\mu_0)^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0; \quad (1)$$

– для підобласті магнітопроводу

$$\nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0; \quad (2)$$

– для підобластей азбестової труби та навколишнього простору

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0; \quad (3)$$

– для підобластей витків індуктора

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) + j\omega\sigma\dot{A} = \sigma\dot{U}_i / (2\pi r), \quad i = 1 \dots N; \quad (4)$$

$$\sigma\dot{U}_i = \frac{\dot{I} + j\omega\sigma \int_{S_i} \dot{A} dS_i}{\int_{S_i} (1 / (2\pi r)) dS_i}, \quad i = 1 \dots N; \quad (5)$$

$$\dot{I}_i = \int_{S_i} (-j\omega\sigma\dot{A} + \sigma\dot{U}_i / (2\pi r)) dS_i, \quad i = 1 \dots N; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \dot{U}_i = \dot{U}; \quad \dot{I}_i = \sqrt{2}\dot{I}, \quad i = 1 \dots N, \quad (7, 8)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; σ – питома електропровідність матеріалу; T – температура; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – відносна магнітна проникність; j – уявна одиниця; r – поточна радіальна координата; S_i – площа поперечного перерізу i -того витка індуктора; N – кількість витків індуктора.

Граничними умовами для цієї електромагнітної задачі є умова симетрії на осі Oz та умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях всієї розрахункової області ($\dot{A} = 0$).

Теплова задача. Стаціонарна теплова задача розв'язувалася лише для підобластей алюмінієвих заготовок, теплоізолюючої труби та повітряного проміжку між ними. Задача розв'язувалася відносно невідомого розподілу температури T у відповідності з наступними рівняннями:

– в підобласті алюмінієвих заготовок

$$\rho(T)C_p(T)\mathbf{u}\nabla T - \nabla \cdot (\lambda(T)\nabla T) = Q; \quad (9)$$

– в підобластях азбестової труби та повітряного проміжку

$$\nabla \cdot (\lambda(T)\nabla T) = 0, \quad (10)$$

де ρ , C_p , λ – залежні від температури густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу; $\mathbf{u} = (0, u_{av})$ – швидкість руху заготовок; Q – питома потужність внутрішніх джерел тепла в заготовках, яка визначається формулою

$$Q = 0,5 j \dot{J} / \sigma(T) = 0,5 \cdot \omega^2 \sigma(T) (\dot{A} \dot{A}^*), \quad (11)$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma(T)\dot{A}$ – густина наведеного (вихрового) струму; \dot{A} – комплексно-спряжена величина магнітного потенціалу.

Для теплової задачі приймалися наступні граничні умови:

– на осі симетрії гранична умова Неймана $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$;

– на вхідній (за напрямом руху) торцевій поверхні заготовки задавалася температура оточуючого середовища ($T = T_0$);

– на границі між індуктором та азбестовою трубою задавалася температура $T=40^\circ\text{C}$, що пов'язано з наявністю водяного охолодження витків;

– на всіх інших зовнішніх поверхнях розрахункової області теплової задачі задавалися умови конвективного та променевого теплообміну з навколишнім середовищем

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k(T - T_0) + \xi \sigma_B (T^4 - T_0^4), \quad (12)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі; ξ – відносна випромінювальна здатність поверхні; $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ – постійна Стефана-Больцмана; T_0 – температура навколишнього середовища; n – вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Взаємопов'язані електромагнітна та теплова задачі сумісно розв'язувалися методом скінчених елементів у програмному середовищі Comsol Multiphysics [8].

Під час побудови розрахункової сітки (див. рис. 2) враховувалася глибина проникнення електромагнітного поля $\Delta = 1 / \sqrt{\pi \mu_0 \mu_r \sigma f}$ в мідні витки індуктора ($\Delta_{Cu} = 9,6 \text{ мм}$) та в алюмінієві заготовки ($\Delta_{Al} = 11 \dots 13 \text{ мм}$). В підобластях мідних витків розмір елементів сітки обмежувався половиною глибини проникнення поля в мідь. В підобласті алюмінієвих заготовок розрахункова сітка з боку індуктора має чотири приграничні шари з товщиною кожного не більше половини глибини проникнення поля в алюміній.

Вихідні дані для розрахунків. Фізичні характеристики матеріалів під час розрахунків приймалися згідно з наступними міркуваннями. Враховуючи водяне охолодження індуктора, вважалось, що питома електропровідність мідних витків не залежить від температури. Її значення приймалося рівним $5,5 \cdot 10^7 \text{ См}/\text{м}$, що відповідає температурі 40°C . Шихтований магнітопровід індуктора вважався ненасиченим, його відносна магнітна проникність прийнята постійною $\mu_r = 1000$.

Коефіцієнт теплопровідності азбестової труби приймався таким, що дорівнює $0,26 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В першому наближенні передачу тепла через повітряний проміжок між алюмінієвими заготовками та азбестовою трубою моделювали за допомогою введення ефективного значення коефіцієнта теплопровідності повітря $0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, що приблизно на порядок перевищує його молекулярне значення.

Температурні залежності густини $\rho(T)$, питомої теплоємності $C_p(T)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ та коефіцієнта електропровідності $\sigma(T)$ алюмінію приймалися у відповідності до даних, наведених для алюмінію в Бібліотеці матеріалів програми Comsol Multiphysics.

Результати моделювання промислової установки індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок. У відповідності до представленої математичної моделі було виконано розрахунок процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок в установці, яка використовується в ПАТ "ЗАВОД-ПВДЕНКАБЕЛЬ" в технології виробництва струмопровідних жил для кабельної продукції.

Нижче в табл. 1 наведено основні розрахункові параметри нагрівання алюмінієвих заготовок до середньої температура заготовки на виході індуктора приблизно 430°C для двох випадків, а саме, за наявності в установці концентричного шихтованого магнітопроводу навколо індуктора (п. 1) та за його відсутності (п. 2).

Таблиця 1

№ п	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$P, \text{ кВт}$	$\cos\phi$	$T_{av}, ^\circ\text{C}$	$P_{Al}, \text{ кВт}$	$P_{Cu}, \text{ кВт}$	$P_h, \text{ кВт}$	$\eta_e, \%$	$\eta_h, \%$	$\eta, \%$
1	400	3555	536,4	0,377	432,6	209,5	326,9	3,81	39,05	98,2	38,35
2	400	3717	541,4	0,364	436,3	211,5	329,9	3,87	39,07	98,2	38,36

У табл. 1: U, I, P – відповідно напруга живлення, струм та активна потужність індуктора; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності електромагнітної системи; T_{av} – середня температура заготовки на виході індуктора; P_{Al} та P_{Cu} – тепловиділення від наведених струмів в алюмінієвих заготовках та електричні втрати в мідних витках індуктора; P_h – загальні теплові втрати з поверхні заготовок; $\eta_e = P_{Al}/(P_{Al} + P_{Cu})$, $\eta_h = (P_{Al} - P_h)/P_{Al}$ та $\eta = \eta_e \eta_h = (P_{Al} - P_h)/(P_{Al} + P_{Cu})$ – відповідно електричний, тепловий та загальний ККД системи індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок.

Отримання в результаті розрахунку за прикладеної до індуктора напруги $U = 400$ В значень температури T_{av} , близьких до 430 °С, що приблизно відповідає параметрам індукційного нагрівання на діючій установці за $U = 380$ В, свідчить в цілому про достатню адекватність розробленої математичної моделі.

Як впливає із даних табл. 1, наявність шихтованого магнітопроводу в системі не суттєво впливає на її електромагнітні параметри. Так, повний електричний опір установки $Z = U/I$ збільшується всього на 4,6 %, а коефіцієнт потужності – на 3,6 %. Крім того, несуттєва різниця в значеннях T_{av} (менше 1%) за наявності та відсутності в установці індукційного нагрівання кільцевого магнітопроводу навколо індуктора вказує на його в цілому незначний вплив на процес нагрівання алюмінієвих заготовок в циліндричному індукторі на промисловій частоті. Цей результат також підтверджує прийнятність заміни двох окремих магнітопроводів прямокутного перерізу одним суцільним коаксіальним, що дало можливість сформулювати математичну модель індукційного нагрівання в осесиметричній постановці.

Установка індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок до температури 430 °С в існуючому конструктивному виконанні має досить низький електричний та загальний ККД (менше 40%) за достатньо високого теплового ККД (біля 98%).

Розрахунковий розподіл температури у разі індукційного нагрівання заготовок представлено на рис. 3. На рис. 3 *а* наведено розподіл температури вздовж поверхні (крива 1) та осі (крива 2) заготовок. Як видно з рисунка, через нагрівання температура по довжині індуктора зростає практично лінійно. За заданого технологічного режиму індукційного нагрівання різниця температури між поверхнею та центром (віссю) по всій довжині заготовок не перевищує 30 °С, що знаходиться в межах допустимого. Відомо, що зазначеною межею збільшення швидкості нагрівання є значення внутрішнього температурного перепаду в перерізі зливка, яке для чистого алюмінію складає $60-80$ °С [9].

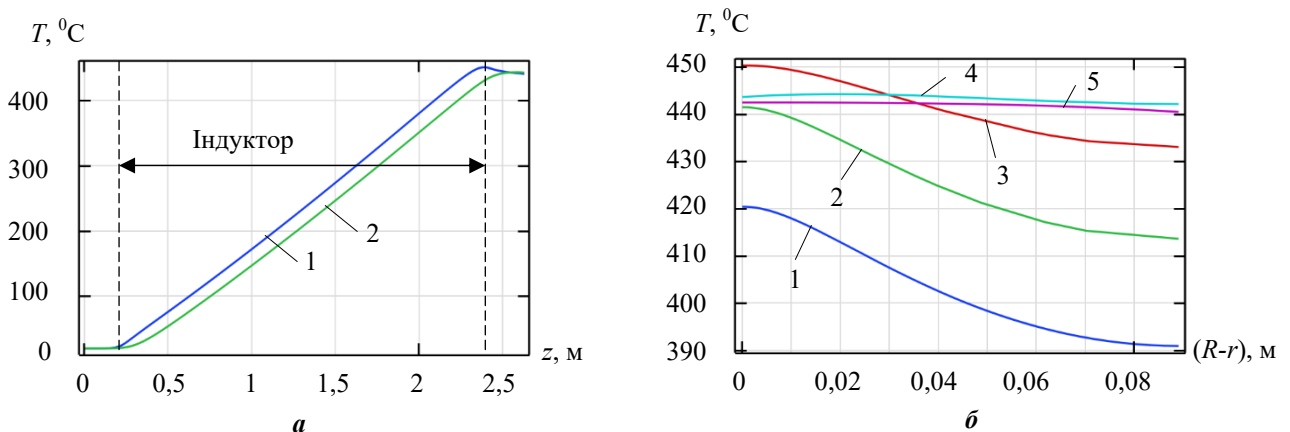


Рис. 3

На рис. 3, *б* показано розподіл температури по радіусу для п'яти поперечних перерізів заготовки на виході індуктора, де R – радіус заготовки. Криві 1 та 5 відповідно представляють розподіл температури заднього та переднього торців по ходу заготовки, криві 2, 3 та 4 – розподіл температури по ходу заготовки в перерізах, що ділять заготовку на чотири рівні частини. Як видно з наведених кривих, розподіл температури по радіусу в об'ємі заготовки за межами індуктора поступово стає практично рівномірним. По цим кривим можна зробити висновок, що розглянута індукційна установка забезпечує градієнтний нагрів заготовки по довжині, який за даними, наприклад [10], необхідний для збільшення швидкості пресування алюмінієвих заготовок.

Підвищення ефективності установки індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок. Надалі, з метою підвищення енергоефективності процесу індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок за рахунок вдосконалення конструкції індуктора установки розрахунковим шляхом за допомо-

гою розробленої математичної моделі досліджувалися питання раціонального вибору конфігурації поперечного перерізу витка індуктора, порівнювалися варіанти однофазного та трифазного живлення індуктора.

Вибір конфігурації поперечного перерізу витка індуктора. Вибір конфігурації поперечного перерізу (профілю) витка індуктора здійснювався шляхом виконання варіантних розрахунків електротеплової задачі у разі зміни товщини мідної стінки витка індуктора з боку алюмінієвої заготовки. Під час моделювання незмінними залишалися число витків індуктора, габаритні розміри індуктора та поперечного перерізу витка, а також усереднена швидкість переміщення алюмінієвих заготовок. Значення середньої по об'єму заготовки температури на виході індуктора (430°C) забезпечувалося за рахунок підбору необхідної напруги живлення індуктора.

На рис. 4 представлено залежності від товщини внутрішньої стінки витка a втрат в індукторі P_{Cu} , тепловиділень в алюмінієвих заготовках P_{Al} , електричного коефіцієнта корисної дії η_e та значення напруги U , що забезпечує нагрів заготовки на виході індуктора до середньої температури $T_{av} = 430^{\circ}\text{C}$. Як видно з цього рисунка, зі збільшенням товщини стінки втрати в індукторі спочатку суттєво зменшуються, потім стабілізуються на мінімальному рівні, а далі починають навіть дещо збільшуватися. Залежність тепловиділень в алюмінієвих заготовках від товщини a є значно слабшою та спостерігається лише за мінімальних товщинах, за яких задля забезпечення необхідної температури заготовки потрібно незначне підвищення напруги живлення. В цілому для розглянутого діапазону значень товщини a (від 2 до 20 мм) відхилення від середньої напруги 386,5 В становить $\pm 3,5\%$.

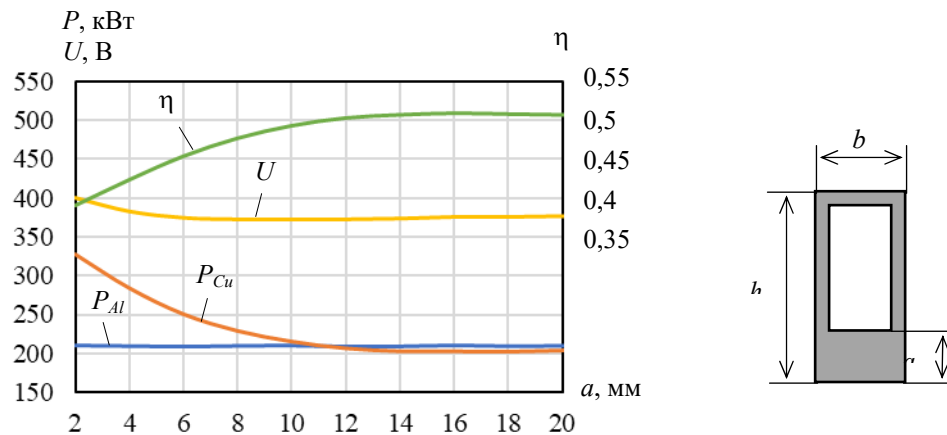


Рис. 4

Електричний ККД індуктора досягає свого максимуму $\eta_e = 50,9\%$ за товщини внутрішньої стінки $a = 16$ мм, що у відносних одиницях по відношенню до глибини проникнення електромагнітного поля в мідь ($\Delta_{Cu} = 9,6$ мм) становить $a^* = 1,67$. Отримане значення дуже близьке до відомого з літератури [3] оптимального значення товщини стінки, яке визначається як $a_{opt} = \pi\Delta_{Cu}/2 = 15$ мм. Подальше зростання товщини внутрішньої стінки витка індуктора призводить до незначного зменшення електричного ККД, тобто є нераціональним. Таким чином, тільки за рахунок збільшення товщини внутрішньої стінки витка індуктора за збереження його габаритних розмірів можливе збільшення електричного ККД індукційного нагрівання в 1,3 рази ($50,9/39,1$). З практичної точки зору, виходячи з міркувань економного використання міді та незначного зростання електричного ККД за $a > 10$ мм, оптимальною (раціональною) товщиною внутрішньої стінки витка у відносних одиницях можна вважати $a^* = 1$.

На рис. 5 додатково показано розрахункову залежність електричного ККД індукційного нагрівання від зміни одного з габаритних розмірів витка, а саме його висоти h . Варіантні розрахунки виконувалися для витка з товщиною стінки $a = 10$ мм у разі зміни його висоти від 16 до 36 мм.

Як видно з наведеного рисунка, зменшення загальної висоти витка супроводжується (крім економії міді) деяким незначним підвищенням електричного ККД індуктора. Максимальне значення електричного ККД $\eta_e = 49,9\%$ досягається за висоти витка $h = 20$ мм. За цієї висоти, ширини $b = 12$ мм та товщини мідної стінки $a = 10$ мм внутрішній переріз витка по воді становить 8×8 мм, чого достатньо для охолодження індуктора. Площа поперечного перерізу по міді такого витка становить 176 мм², що співпадає з аналогічною площею вихідного (типового) витка з габаритними розмірами 12×36 мм та товщиною стінок 2 мм. Таким чином, за рахунок зміни профілю поперечного перерізу

витка за збереження витрати міді на індуктор значення електричного ККД установки для індукційного нагрівання може бути збільшено з 39,1% до 49,9%.

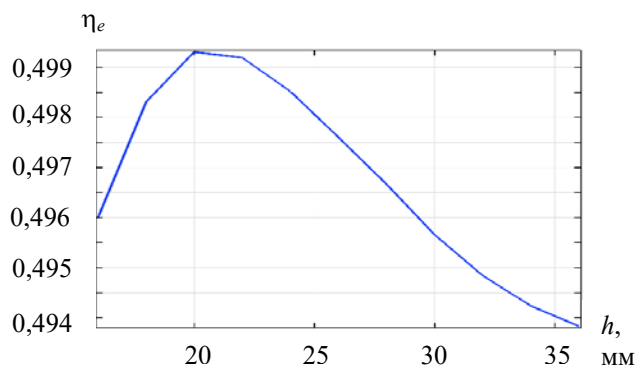


Рис. 5

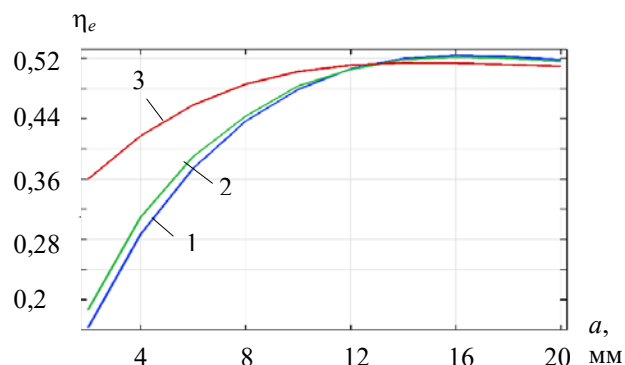


Рис. 6

Використання біметалевих витків індуктора. Відомим є технічне рішення, коли для підвищення енергоефективності індукційного нагрівання пропонується виконувати провідники витків індуктора біметалевими. Внутрішня (ближня до заготовки) стінка таких витків виконується з міді. Інші стінки, що формують канал для охолоджуючої води, пропонується виготовляти з металу з високим електричним опором або з феромагнітного матеріалу [3]. На рис. 6 показано розрахункові залежності електричного ККД індуктора з такими провідниками від товщини внутрішньої мідної стінки a витка, що має канал для води розміром 8×8 мм, а три інші стінки якого виконано з немагнітної нержавіючої сталі (крива 1), конструкційної вуглецевої сталі (крива 2) та міді (крива 3) відповідно. Товщина цих стінок, як і раніше, становила 2 мм, при цьому зберігалася ширина витка $b = 12$ мм, а загальна висота витка h була більшою товщини a на 10 мм. Під час моделювання питома електропровідність нержавіючої сталі становила $1 \cdot 10^6$ См/м, конструкційної сталі – $1,12 \cdot 10^7$ См/м. Для конструкційної феромагнітної сталі задавалося стале значення відносної магнітної проникності $\mu_r = 400$.

Отримані результати не підтвердили можливість суттєвого підвищення електричного ККД індукційного нагрівання у разі використання біметалевих витків індуктора. Для товщин внутрішньої мідної стінки $a < 13$ мм ($a^* < 1,35$) монолітний мідний виток взагалі забезпечує суттєво кращі енергетичні показники, ніж біметалеві, і тільки в діапазоні $a^* = 1,35 \dots 1,67$ незначну перевагу мають біметалеві витки. Однак збільшення максимального значення η_e всього на 1% (з 51 до 52%) навряд чи компенсує технологічні складності виготовлення таких провідників.

Трифазне живлення індуктора. За розглянутого однофазного виконання індуктора установка індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок є значним (з невисоким коефіцієнтом потужності) несиметричним навантаженням для трифазної промислової мережі, що вимагає його під'єднання до неї з використанням симетрично-компенсуючого пристрою. Задля забезпечення електромагнітної сумісності індукційної установки з електричною мережею розглянуто можливість використання трифазного індуктора з відповідним живленням його від трифазної мережі. Розрахунки трифазного варіанта індуктора виконувалися зі збереженням загальної довжини та кількості витків однофазного індуктора $N = 154$, які були розбиті на три окремі котушки (секції) без додаткового проміжку (зазору) між ними з кількістю витків по ходу заготовки $N_1 = N_3 = 51$ та $N_2 = 52$. Як і у попередніх випадках, розглядався мідний виток з товщиною стінки $a = 10$ мм та загальною висотою поперечного перерізу $h = 20$ мм.

Нижче в табл. 2 наведено основні розрахункові параметри індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок до температури $T_{av} = 430$ °С для однофазного (п. 1) та чотирьох варіантів трифазного (п.п. 2-5) живлення індукторів з однаковим перерізом витка та однаковою їхню загальною кількістю. У рядку п. 2 цієї таблиці наведено розрахункові параметри для симетричного живлення індуктора, тобто за фазового кута між напругами секцій 120 ел. град. та прямого чергування фаз ($\psi = +120$ ел. град.), п. 3 – за 120 ел. град. та зворотному чергуванні фаз ($\psi = -120$ ел. град.), п. 4 – за 60 ел. град. і прямому чергуванні ($\psi = +60$ ел. град.) та п. 5 – за 60 ел. град. і зворотному чергуванні фаз трифазної напруги ($\psi = -60$ ел. град.). У цій таблиці параметри з цифровими індексами відносяться до окремих секцій індуктора (нумерація секцій по ходу руху заготовок), а без індексів – до індуктора в цілому.

Таблиця 2

№ п	Ψ , ел.град	U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	P , кВт	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$	η_e , %
1	–	369	3540	–	–	411	–	–	411	0,315	–	–	50,8
2	+120	123	3824	3650	3583	150,9	142,8	136,4	430,1	0,32	0,32	0,31	48,8
3	-120	123	3831	3649	3580	135,6	142,9	151,6	430,1	0,29	0,32	0,34	48,8
4	+60	123	3752	3501	3507	147,3	136,3	133,5	417,1	0,32	0,32	0,31	50,1
5	-60	123	3758	3499	3504	132,6	136,5	148,1	417,2	0,29	0,32	0,34	50,1

Аналізуючи отримані результати, в першу чергу слід зазначити, що, як і слід було очікувати, максимальне значення ККД установки досягається у випадку однофазного індуктора (п.1 табл. 2), а мінімальне – для трифазного індуктора у випадку живлення його від симетричної системи напруги (пп. 2 і 3). Проте навіть у випадку розміщення фазних секцій індуктора впритул одна до одної в осьовому напрямі (зазвичай секції розміщують з проміжками між собою) та збереженні суцільного по довжині магнітопроводу зниження електричного ККД установки для трифазного індуктора відбувається всього на 2% в порівнянні з однофазним. Для нагрівання заготовок до приблизно однакової температури за трифазного живлення розбитого на три секції однофазного індуктора значення напруги кожної фази повинно бути зменшено в три рази по відношенню до однофазного. Струмове навантаження на фазу при цьому залишається приблизно на тому самому рівні. Його нерівномірність по фазам незначна (в межах 6%). Дещо більша вона у випадку живлення індуктора від системи напруг з фазовим кутом $\psi = 60$ ел. град.

Доцільно тут також відзначити прояв відомого в електротехніці явища – переносу активної потужності в таких системах з однієї крайньої фази в іншу за рахунок різних значень коефіцієнтів взаємної індуктивності секцій, які залежать від кутів зсуву між струмами в кожній секції. Це наглядно демонструють дані цієї таблиці, де видно як змінюються значення активної потужності в крайніх секціях індуктора у разі зміни порядку чергування фаз, що їх живлять.

Важливим також питанням за трифазного живлення індукційної установки є розподіл температури заготовок по довжині індуктора в залежності від системи живлення. Розрахунки показують, що незважаючи на різний розподіл активної потужності по секціям порядок чергування фаз практично

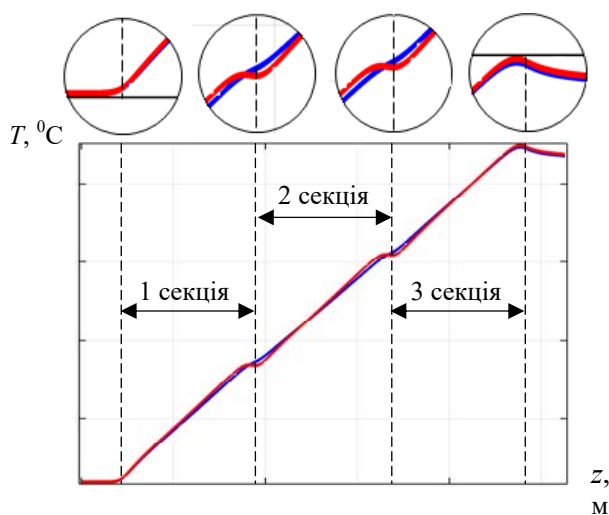


Рис. 7

Висновки. Розроблено математичну модель для чисельного дослідження електротеплових процесів в установці індукційної термообробки (нагрівання) рухомих циліндричних алюмінієвих зливків (заготовок) за заданої напруги на індукторі з врахуванням розподілу густини струму в його витках. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Розбіжність розрахованих електромагнітних параметрів і параметрів діючої установки не перевищила 5%.

Визначено вплив профілю струмопроводу витків одношарового індуктора на ефективність індукційної установки. Встановлено, що найбільший вплив на її ефективність вчиняє ближня до заго-

товки стінки трубки індуктора. Оптимальна (раціональна) товщина її знаходиться на рівні глибини проникнення електромагнітного поля в метал. Використання індуктора з таким струмопроводом дає змогу приблизно на 30% підвищити ККД типової установки, що має індуктор, виготовлений із мідної трубки, всі стінки якої мають однакову товщину.

Використання трифазного індуктора для індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих заготовок дає можливість практично забезпечити електромагнітну сумісність індукційної установки з електричною мережею живлення. Живлення такого індуктора від трифазної системи напруги з фазовим кутом між напругами у 60 ел. град. дає змогу отримати фактично рівномірний нагрів заготовок у разі зменшення ККД установки всього на 2% у порівнянні з однофазним індуктором.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E (шифр: РЕЖИМ-2)» (№ держреєстрації 0123U100769), КПКВК 6541230.

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. 594с.
2. 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.
3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 271 с.
4. Nemkov V., Demidovich V., Rastvorova I., Chmilenko F., Sitko P., M'Liki Mohamed Amin. Energy-efficient induction heating of aluminium billets. *Proceedings of XVII congress UIE-2012*. St. Petersburg, 21-25 May 2012. Pp. 394-399.
5. Краснорудский В.А., Умушкина А.А., Попова А.Н. Исследование распределения магнитного поля в индукторах с многослойными обмотками. *Научный альманах. Технические науки*. 2016. № 11-2(25). С. 163-166. DOI: <https://doi.org/10.17117/na.2016.11.02.163>
6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электро-тепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. *Технічна електродинаміка*. 2013. №2. С. 10-18.
7. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Энергетические параметры трехфазных цилиндрических индукторов. *Технічна електродинаміка*. 1996. №6. С. 55-58.
8. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> (дата доступу 25.07.2023).
9. Егизарян А.С., Зимин Л.С. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов. *Вестник Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Технические науки*. 2016. № 2 (50). С. 203-207.
10. Шафман Л.А., Непомнящий Е.М., Стерник Ю.Л. Оптимальные параметры прессования алюминиевых сплавов. *Цветные металлы*. 1968. №12. С. 69-72.

SIMULATION OF ELECTRO-THERMAL PROCESSES IN THE INSTALLATION OF INDUCTION HEAT TREATMENT OF ALUMINUM CASTINGS AND DETERMINATION OF WAYS TO INCREASE ITS EFFICIENCY WHEN PRESSING WIRE ROD FOR POWER CABLES

A.F. Zharkin¹, Yu.M. Goryslavets¹, O.I. Gluhenky¹, V.V. Zolotaryov², R.V. Belyanin²

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

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: yugoris@ukr.net.

²YUZHicable WORKS, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine.

A computer mathematical model is presented for the study of electrothermal processes in the installation of induction heat treatment of cylindrical aluminum ingots during pressing of wire rod for the manufacture of aluminum wire for power cables. The model makes it possible to determine energetically and technologically appropriate electromagnetic and thermal modes of induction heat treatment of ingots at a given voltage on the inductor. The results of the study of a typical installation for heating aluminum blanks for the purpose of their subsequent pressing using a single-phase single-layer cylindrical inductor made of a rectangular copper tube are presented. Temperature distributions along the length of the aluminum blanks, as well as in the cross-sections of the billets at the output of the inductor, were obtained. A slight difference in the calculated electromagnetic and thermal parameters from the similar parameters of the operating installation confirmed the adequacy of the developed model. Ways to increase the efficiency of the induction heating installation by optimizing the profile of the inductor turns are considered. The influence of the thickness of the wall of the copper tube of the inductor close to the workpiece on the efficiency of the installation was determined and it was

shown that its optimal thickness is at the level of the depth of penetration of the electromagnetic field into the metal. The possibility of using a three-phase power supply of the inductor was also investigated and it was shown that in this case it is most appropriate to use a phase angle shift between voltages of 60 el. degree. References 10, tables 2, figures 7.

Key words: electro-thermal processes, induction heat treatment, aluminum ingots, single-phase and three-phase power supply, computer modeling, efficiency of electro-heat treatment, profile of inductor turns.

1. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Guryin A.G., Suprunovskaya N.Y., Chopov E.Yu., Obozny A.L. Electro-technological complex for the production of cable systems for a voltage of up to 400 kV. Kyiv: Pri format, 2017. 594 p. (Rus)
2. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Cables with polymer insulation for ultra-high voltage. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
3. Nemkov V.S., Demidovych V.B. Theory and calculation of induction heating devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 271 p. (Rus)
4. Nemkov V., Demidovich V., Rastvorova I., Chmilenko F., Sitko P., M'Liki Mohamed Amin. Energy-efficient induction heating of aluminum billets. *Proceedings of XVII congress UIE-2012*. St. Petersburg, May 21-25, 2012. Pp. 394-399.
5. Krasnorudsky V.A., Umushkina A.A., Popova A.N. Investigation of magnetic field distribution in inductors with multilayer windings. *Nauchnyi almanakh. Tekhnicheskie nauki*. 2016. No 11-2(25). Pp. 163-166. DOI: <https://doi.org/10.17117/na.2016.11.02.163>. (Rus)
6. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Ushakov V.I. Computer modeling of electrothermal processes and thermomechanical stress during induction heating of moving copper ingots. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10-18. (Rus)
7. 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)
8. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> (accessed date 25.07.2023).
9. Egiazaryan A.S., Zimin L.S. Features of induction heating of aluminum alloys. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seria Tekhnicheskie Nauki*. 2016. No 2 (50). Pp. 203-207. (Rus)
10. Shafman L.A., Nepomnyashchy E.M., Sternik Yu.L. Optimal parameters for pressing aluminum alloys. *Tsvetnye metaly*. 1968. No 12. Pp. 69-72. (Rus)

Надійшла 16.08.2023
Остаточний варіант 11.09.2023