

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.013>**БАГАТОШАРОВІ ІНДУКТОРИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОЇ
ТЕРМООБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ ЗЛИВКІВ ПРИ ПРЕСУВАННІ КАТАНКИ
ДЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ**

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

e-mail: yugoris@ukr.net

На основі розробленої математичної моделі проведено комп'ютерне (чисельне) моделювання електротеплових процесів в установці з багатошаровим індуктором, яка служить для нагрівання циліндричних алюмінієвих зливків (заготовок) перед пресуванням катанки, як основи для отримання із неї струмопровідних жил силових кабелів. Досліджувалися однофазний і трифазний багатошарові індуктори галетного типу, у результаті чого показано, що максимальне значення електричного ККД такої установки для обох індукторів забезпечує тришарова намотка їх водоохолоджуваною мідною трубкою прямокутного перерізу. Для обох індукторів отримано розподіли за радіусом і довжиною алюмінієвих заготовок об'ємної питомої потужності та питомої лінійної потужності тепловиділень від наведених у заготовках вихрових струмів. Для трифазного індуктора такі розподіли отримано за живлення його напругами з кутами фазового зсуву у 120 і 60 ел град. Досліджено також втрати у витках індукторів та їхній розподіл за довжиною і шарами обох індукторів. Бібл. 8, рис. 7, табл. 2.
Ключові слова: електротеплові процеси, індукційна термообробка, алюмінієві зливки, однофазні й трифазні багатошарові індуктори, комп'ютерне моделювання, ефективність електротермообробки.

Вступ. Останнім часом унаслідок значного дефіциту міді намітилась тенденція до більш широкого використання в електроенергетичній галузі струмопровідних виробів із алюмінію. Особливо це стосується кабельної продукції, включаючи силові кабелі на високу і надвисоку напруги [1, 2]. При виробництві високоякісної електротехнічної струмопровідникової продукції з алюмінію найбільш поширеним є використання алюмінієвих циліндричних зливків, з яких шляхом попередньої градієнтної термообробки (нагрівання) та подальшого пресування (екструзії) отримують прутки (катанку), як основу для виготовлення із нього багатодровових струмопровідних жил силових кабелів.

Для нагрівання алюмінієвих зливків (заготовок) існує два типи нагрівальних пристроїв: печі електроопору з повітряною циркуляцією та індукційні нагрівачі. Переважно для цього використовують другий тип пристроїв, а саме електроіндукційні установки промислової частоти. Це пов'язано з тим, що їхнє застосування дає змогу скоротити тривалість нагрівання зливка, зберегти чистоту нагрітого металу, знизити втрати на угар. Окрім того, площа, яку займає індукційна установка, значно менша, ніж піч опору, завдяки чому більш успішно вирішуються процеси автоматизації нагрівання та комплексної механізації подачі нагрітого зливка.

На підприємствах із виготовлення кабельної продукції широкого застосування набула установка для індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок, схема якої показана на рис. 1. Конструктивна будова установки описана в роботах [2, 3]. Основу її складає циліндричний



однофазний індуктор *1* довжиною 2,2 м, намотаний на азбестову трубу *2* в один шар мідною водоохолоджуваною трубкою. Призначення такої установки – нагрівати в безперервному режимі рухомі циліндричні алюмінієві заготовки *3* діаметром 178 мм і довжиною 438 мм кожна від температури доквілля (на вході установки) до температури $\sim 430^{\circ}\text{C}$ (на виході). Зовні індуктора знаходиться шихтований магнітопровід *4*.

Рух заготовок в індукторі носить циклічний характер, тобто заготовки переміщуються через зону нагрівання дискретно. Загальна тривалість кожного циклу становить ~ 60 с, яка складається із тривалості переміщення із заданою швидкістю ~ 3 м/хв усіх заготовок на довжину однієї заготовки (приблизно 9 с) і тривалості нерухомого (загальмованого) стану. Слід зазначити, що за вказаної довжини індуктора всередині його постійно знаходяться шість заготовок, дві з яких (крайні) у нерухомому положенні приблизно наполовину виступають за межі індуктора (див. рис. 1), а загальна довжина всіх заготовок складає $438 \times 6 = 2628$ мм. Таку установку інколи ще називають індукційним нагрівачем безперервної дії з дискретним рухом (переміщенням) заготовок.

Електроживлення індуктора установки забезпечується підключенням його до лінійної напруги промислової електромережі 380 В частотою 50 Гц.

У роботі [3] проведено дослідження електротеплових процесів у такій установці з метою підвищення її ефективності шляхом вдосконалення конструкції індуктора установки та визначення доцільних варіантів його живлення. Для цього було розроблено математичну модель для чисельного (комп'ютерного) дослідження зазначених процесів за заданої напруги на індукторі з урахуванням розподілу густини струму в його витках. Модель реалізовано в програмному середовищі Comsol Multiphysics [4]. Адекватність моделі перевірялася на типовій промисловій установці, яка використовується на підприємстві ПАТ "ЗАВОДПІВДЕНКА-БЕЛЬ" (м. Харків) у технології виробництва струмопровідних жил для кабельної продукції. Розбіжність розрахованих електромагнітних параметрів і параметрів діючої установки не перевищила 5 %.

У зазначеній роботі на основі розробленої моделі визначено вплив профілю поперечного перерізу струмопроводу витків одношарового індуктора на ККД індукційної установки. Показано, що найбільше впливає на її ефективність ближня до заготовки стінка прямокутної мідної 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, усі стінки якої мають однакову товщину (2 мм).

Інший шлях зменшення втрат активної потужності в індукторі – використання багатошарових котушок [5]. Електричні втрати в багатошаровій котушці здебільшого залежать від її конструкції і в разі правильного вибору струмопровідних провідників та їхньої відповідній намотці можуть бути значно менші ніж в одношаровій котушці. Найбільший ефект від використання багатошарових котушок досягається в установках великої потужності, особливо за нагрівання металів з високою електропровідністю (міді, алюмінію).

Відомо два конструктивні рішення багатошарових індукторів (рис. 2) [5]. На рис. 2 а показана схема індуктора на основі декількох послідовно з'єднаних концентричних соленоїдів. Число шарів-соленоїдів зазвичай не перевищує трьох. Такі індуктори, як виявилось, мають низьку ремонтпридатність та часто мають електричний ККД менший ніж одношарові.

Упродовж останніх років перевагу надають багатошаровим індукторам, виконаним із послідовно з'єднаних секцій у вигляді галет (рис. 2 б). Число шарів у галеті може бути різним: від 3 і більше. Такі індуктори в разі правильного вибору перерізу струмопровідних провідників, за даними [6], мають достатньо високий ККД.

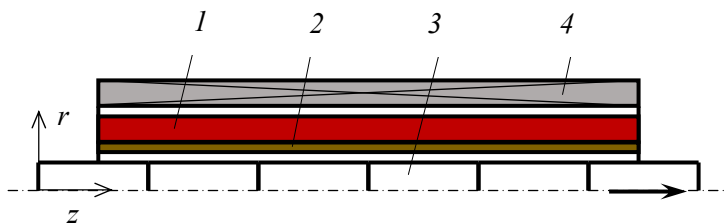


Рис. 1. Схема установки для індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок

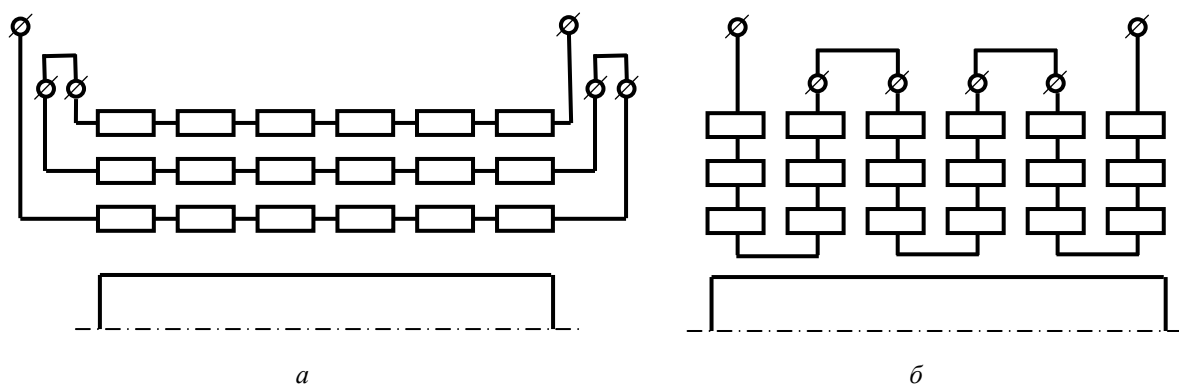


Рис. 2. Конструктивні рішення багат шарових індукторів: *a* – схема багат шарового індуктора на основі послідовно з'єднаних концентричних соленоїдів; *б* – схема індуктора, виконаного із послідовно з'єднаних секцій у вигляді галет

На основі проведених раніше досліджень було показано, що n -шарові індуктори можуть мати втрати в \sqrt{n} раз нижчі, ніж одношарові за тієї ж корисної потужності. Для цього товщина (висота) провідників за радіусом індуктора повинна дорівнювати $1,32\Delta/\sqrt{ng}$ [7], де Δ – глибина проникнення струму в метал провідника, g – коефіцієнт заповнення індуктора провідниками за довжиною.

Якщо число шарів 9–10, то втрати теоретично можуть бути в 3 рази менші ніж в одношаровому індукторі. Проте, оскільки ці дослідження виконувалися за достатньо грубих спрощень і припущень (у цих розрахунках не враховуються додаткові втрати внаслідок крайових ефектів, збільшення радіусу шарів та інші фактори), то реальні втрати в таких індукторах будуть більшими, а їхнє значення може бути визначено тільки в результаті чисельного моделювання.

Практична реалізація багат шарових індукторів з великим струмовим навантаженням потребує інтенсивного охолодження, зокрема водяного. Індуктор у такому випадку зазвичай виготовляють із водоохолоджуваної трубки, здебільшого з міді. Ураховуючи, що товщина стінки такої трубки з технологічного погляду її виготовлення має бути не менше 2 мм, а внутрішній розмір її за умови надійного охолодження технічною водою, як показує практичний досвід, повинен складати не менше 8 мм, то мінімально допустимий габаритний розмір поперечного перерізу мідної трубки має бути на рівні 12 мм. Це значення приблизно дорівнює оптимальному (обрахованому згідно з наведеним вище виразом) значенню для $n = 1$, тобто для одношарового індуктора. Для двошарового індуктора оптимальна товщина (висота) трубки приблизно складає 9 мм, а для індуктора із більшою кількістю шарів цей розмір стає ще меншим. Таким чином, виходячи з наведених міркувань, отримати багат шаровий індуктор з оптимальними товщинами водоохолоджуваної мідної трубки неможливо.

А втім, видається доцільним дослідити багат шарові індуктори та визначити можливість їхнього використання в установках індукційного нагрівання перед пресуванням алюмінієвих заготовок для підвищення їхньої ефективності. Отже, **метою цієї роботи** є визначення електричних втрат у багат шарових індукторах, а також визначення ККД установок із такими індукторами для індукційної термообробки алюмінієвих зливків при пресуванні катанки для силових кабелів. Дослідження цього питання виконувалося шляхом комп'ютерного моделювання електротеплових процесів у зазначеній установці з використанням розробленої та представленої в роботі [3] математичної моделі.

Результати моделювання установки з однофазним багат шаровим індуктором. Як і раніше [3], при моделюванні багат шарового індуктора було прийнято, що його довжина складає 2200 мм, а внутрішній діаметр – 228 мм. Живлення індуктора здійснюється напругою 380 В. Загальна кількість витків індуктора N , яка рівномірно розбивалася на n шарів, у кожному випадку підбиралася такою, щоб за заданої напруги забезпечити температуру алюмінієвих заготовок на виході ~ 430 °С. Товщина стінок прямокутної мідної трубки витків

індуктора приймалась однаковою та рівною 2 мм. Габаритна висота h трубки витка для всіх варіантів приймалась мінімально можливою, тобто 12 мм, а ширина b за такої умови вибиралася такою, щоб усі витки були рівномірно розміщені за довжиною індуктора із зазором (на ізоляцію) приблизно 2 мм між провідниками.

У табл. 1 представлено розрахункові значення електричних параметрів однофазних двошарового ($n = 2$), тришарового ($n = 3$) і чотиришарового ($n = 4$) індукторів, отриманих для установки із зовнішнім магнітопроводом і у його відсутності. У ній позначено: I – ефективне значення струму в індукторі, P – активна потужність установки, P_{Al} – потужність тепловиділення в алюмінієвих заготовках, P_{Cu} – втрати в індукторі, $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності електромагнітної системи установки, η_e – електричний ККД установки.

Таблиця 1

n	$b \times h$, мм	N	I , А	P , кВт	P_{Al} , кВт	P_{Cu} , кВт	$\cos\varphi$	η_e	Примітка
2	28×12	146	3798	707,7	216,4	484,3	0,319	0,447	З магнітопр.
			4003	727,9	220,2	507,7	0,317	0,434	Без магнітопр.
3	48×12	132	4143	657,3	206,5	450,8	0,272	0,458	З магнітопр.
			4415	684	212,3	471,7	0,267	0,450	Без магнітопр.
4	71×12	120	4486	633,2	195,6	437,6	0,244	0,447	З магнітопр.
			4838	661,9	203,3	458,6	0,237	0,443	Без магнітопр.

Ураховуючи, що ККД одношарового однофазного індуктора, намотаного «на ребро» прямокутною рівнотовщинною мідною трубкою, типової індукційної установки (як було показано в роботі [3]), приблизно складає 0,39, виходить, що багатошарова намотка індуктора «пластом» (більшою стороною трубки до заготовки) підвищує ефективність індуктора. Це підтверджує відомі рекомендації з намотки обмоток електрообладнання, зокрема силових трансформаторів, згідно з якими в обмотках, в яких превалює осьовий напрям магнітного поля розсіювання, необхідно розміщувати прямокутний провід таким чином, щоб більший розмір його поперечного перерізу знаходився в осьовому напрямі котушки, тобто необхідно мотати такий провід «пластом» («плашмя» рос. мовою) [8]. Проте здебільшого цього не дотримуються через неможливість розміщення на заданій довжині необхідної кількості витків одношарового індуктора. Як впливає з табл. 1, цю проблему може вирішити багатошарова намотка. Згідно з даними цієї таблиці максимальний електричний ККД у такому випадку (для прийнятої типової установки) має тришаровий індуктор. Його використання дає змогу підвищити ефективність індукційної установки приблизно на 18 %.

Водночас коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) електромагнітної системи «індуктор-заготовка» зі зростанням кількості шарів намотки індуктора послідовно зменшується зі значення 0,364 для одношарового індуктора до 0,272 для тришарового індуктора. Як наслідок, за сталої напруги живлення також зменшується загальна кількість витків індуктора N , яка необхідна для забезпечення заданої температури алюмінієвих заготовок на виході. Отримані дані ще раз підтверджують висновок про те, що вплив зовнішнього шихтованого магнітопроводу на ККД та коефіцієнт потужності установки незначний.

Для тришарового однофазного індуктора на рис. 3 показано розподіл за радіусом та довжиною заготовок об'ємної питомої потужності Q_V тепловиділень від наведених в заготовках вихрових струмів, яка визначалася за результатами розрахунків відповідно до виразу

$$Q_V = 0,5J\dot{J}^* / \sigma(T),$$

де $\sigma(T)$ – залежна від температури T питома електропровідність матеріалу заготовки (алюмінію), J та \dot{J}^* – комплексна та комплексно-спряжена амплітуди єдиної азимутальної складової густини електричного струму.

На рис 3 а зображено розподіл Q_V за радіусом у п'яти поперечних перерізах, що проходять через стики окремих заготовок (див. рис. 1), де R – радіус заготовки. Нумерація крих, яка зростає в напрямку руху заготовок в індукторі, відповідає нумерації стиків, познач

чених на рис. 3 б. Як видно з наведених на рис. 3 а кривих, потужність тепловиділення в заготовках за довжиною індуктора є суттєво нерівномірною. Під час руху заготовок унаслідок зменшення питомої електропровідності алюмінію у випадку нагрівання з одного боку дещо зменшується значення Q_V на поверхні заготовок (за $r = R$), а з іншого – завдяки збільшенню проникнення електромагнітного поля за $r < R$ значення Q_V у середині заготовки збільшується.

Розподіл за довжиною заготовок потужності Q_V на поверхні заготовок показано на рис 3 б. На цьому ж рисунку також наведено розподіл за довжиною питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках Q_L . Вона визначалася шляхом перемноження радіальної складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля через бічну поверхню заготовок на її периметр відповідно до виразу

$$Q_L = 0,5 \operatorname{Re}(j\omega \dot{A} \dot{H}_z^*) \cdot 2\pi R,$$

де $\omega = 2\pi\nu$ – кругова частота, \dot{A} – комплексна амплітуда єдиної азимутальної складової векторного магнітного потенціалу, \dot{H}_z^* – комплексно-спряжена амплітуда z -складової (за довжиною індуктора) напруженості магнітного поля.

Незважаючи на доволі суттєву нерівномірність розподілу тепловиділень, температура заготовок у тришаровому однофазному індукторі за довжиною індуктора зростає практично лінійно, і її розподіл майже нічим не відрізняється від розподілу температури в разі нагрівання заготовок в одношаровому однофазному індукторі, отриманого в попередній роботі [3].

Результати моделювання електротеплових процесів в установці з трифазним багатшаровим індуктором. Аналогічні дослідження процесу нагрівання рухомих алюмінієвих заготовок виконувалися також для індукційної установки з трифазним багатшаровим індуктором. Досліджувалися тришарова, чотиришарова і п'ятишарова намотки індуктора за живлення трьох однакових фазних секцій напругою 380 В із фазовим зсувом ψ між сусідніми секціями 120 і 60 ел. град. Моделювання виконувалося за наявності спільного для всього індуктора циліндричного магнітопровода. Всі три секції індуктора розміщалися без додаткового проміжку між собою. Двошарова намотка індуктора не розглядалася, оскільки для того, щоб розмістити три фазні секції з такою намоткою на заданій довжині в разі їхнього живлення зазначеною напругою, необхідно використати мідну трубку, ширина якої значно менша 12 мм.

Електричні параметри індукційної установки з трифазним багатшаровим індуктором, отримані в результаті проведеного моделювання, представлено в табл. 2. Через N_s по-

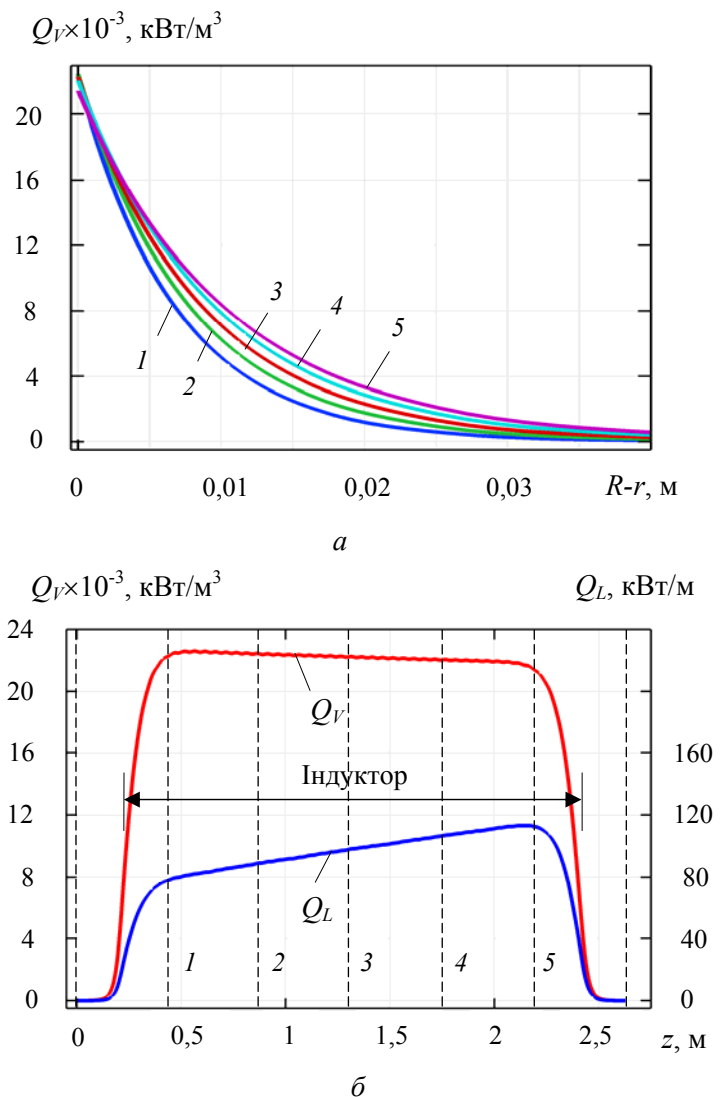


Рис. 3. Розподіл за радіусом (а) та довжиною (б) заготовок об'ємної питомої потужності Q_V тепловиділень від наведених в заготовках вихрових струмів

значено число витків у кожній фазній секції індуктора (однакове для всіх трьох секцій). Параметри з цифровими індексами в ній відносяться до окремих секцій індуктора (нумерація секцій за рухом заготовок), а без індексів – до індуктора в цілому.

Таблиця 2

n	$b \times h$, мм	N_s	ψ , ел.гр	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	P , кВт	P_{Al} , кВт	P_{Cu} , кВт	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$	η_e
3	15×12	126	120	1564	1538	1482	131	152	165	448	208	240	0,221	0,260	0,293	0,466
			60	1520	1449	1442	126	141	159	426	206	220	0,219	0,256	0,291	0,484
4	24×12	112	120	1786	1762	1691	137	169	184	489	209	280	0,202	0,252	0,286	0,427
			60	1722	1634	1628	128	149	172	449	205	244	0,196	0,239	0,279	0,457
5	35×12	100	120	2055	2029	1926	152	201	216	568	211	357	0,194	0,261	0,295	0,371
			60	1960	1843	1837	134	163	194	492	206	286	0,180	0,232	0,279	0,418

З табл. 2 видно, що, як і у випадку однофазного індуктора, максимальний електричний ККД установка має за тришарової намотки індуктора. Порівняно з однофазним одношаровим індуктором типової установки перехід на трифазний тришаровий індуктор дає змогу підвищити її ефективність залежно від системи живлення (кута ψ) на (19-24) %. Ба більше, трифазне виконання багатошарового індуктора за енергетичною ефективністю має навіть деяку перевагу над однофазним багатошаровим індуктором. Так, для тришарових індукторів із магнітопроводом у першому випадку за кутів $\psi = 60$ ел. град. та $\psi = 120$ ел. град. значення ККД відповідно складає 48,4 та 46,6 %, а для другого випадку – 45,8 %.

Таким чином, багатошарове трифазне виконання індуктора дає змогу не тільки покращити енергетичну ефективність індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок порівняно з наявним однофазним одношаровим індуктором, а й забезпечити практично рівномірне навантаження трифазної промислової електромережі за безпосереднього підключення до її номінальної (стандартної) напруги.

За аналогією з однофазним багатошаровим індуктором визначено розподіл потужності тепловиділення в металі заготовок для кожного з розглянутих варіантів електроживлення трифазного індуктора (кутів ψ). На рис. 4 для тришарового трифазного індуктора наведено розподіли за довжиною об'ємної питомої потужності тепловиділень Q_V на поверхні заготовок (червоним кольором) та питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках Q_L

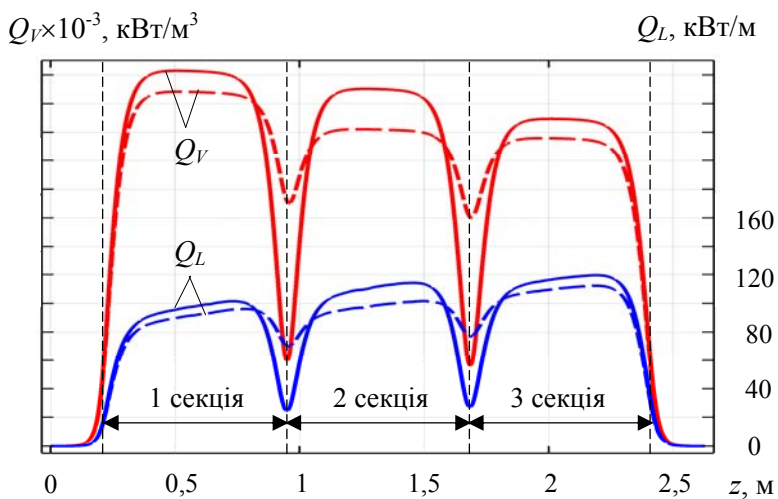


Рис. 4. Розподіли за довжиною об'ємної питомої потужності тепловиділень Q_V на поверхні заготовок (червоний колір) та питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках Q_L (синій колір)

(синім кольором). Результати для $\psi = 120$ ел. град. показано суцільними кривими, для $\psi = 60$ ел. град. – пунктирними. Як видно з наведених кривих, у зонах заготовок навпроти стиків фазних секцій індуктора спостерігаються провали обох потужностей тепловиділення, які для кута $\psi = 60$ ел. град. сягають у середньому приблизно 25 % від значень потужностей у регулярних фазних зонах, а для кута $\psi = 120$ ел. град. вони доходять до 75 %.

Важливим питанням за такого розподілу потужності є розподіл температури в об'ємі заготовок залежно від системи

живлення трифазного індуктора. Як показали розрахунки, суттєва нерівномірність розподілу тепловиділень за довжиною заготовок, включаючи наявність провалів потужності в міжфазних зонах, завдяки високій теплопровідності металу слабо впливає на лінійність нагрівання алюмінієвих заготовок. Розподіл температури за довжиною заготовок у тришаровому трифазному індукторі практично нічим не відрізняється від розподілу температури в разі нагрівання заготовок в одношаровому трифазному індукторі, отриманому в попередній роботі [3]. За $\psi = 60$ ел. град. температура за довжиною зростає практично лінійно, а за $\psi = 120$ ел. град. на ділянках, де стикаються фазні секції індуктора, спостерігається незначна затримка у зростанні температури.

Електричні втрати у витках багатшарових індукторів. Як відомо, електричні втрати у витках лінійних багатшарових індукторів розподіляються по шарах і довжині індуктора нерівномірно, а тому важливо знати такий розподіл для кожного випадку, щоб правильно (раціонально) організувати охолодження індуктора водою (для водоохолоджуваних індукторів). Особливо це стосується індукторів галетного типу. У більшості наявних установок індукційного нагрівання, що мають велике струмове навантаження, водоохолоджуваний індуктор зазвичай розбивають на окремі секції, які електрично з'єднують між собою послідовно, а водою – паралельно.

У багатовиткових індукторах систем для нагрівання циліндричних зливків металу прийнято виділяти регулярну зону, в якій нормальна до поверхні індуктора складова напруженості магнітного поля мала, та крайові зони, де тангенціальні й нормальні напруженості співставні [7]. У загальному випадку втрати у витках цих зон різні. На рис. 5 показано розподіли довжиною втрат у витках однофазного одношарового індуктора типової установки для нагрівання циліндричних заготовок для пресування алюмінієвої катанки, число витків якого складає $N = 154$. Крива 1 на ньому відноситься до типового індуктора, намотаного «на ребро» рівнотовщинною мідною трубкою з поперечним перерізом 12×36 мм (товщина стінок 2 мм), а крива 2 стосується також намотаного «на ребро» індуктора з оптимальним згідно з [3] профілем мідної трубки, яка має збільшену до 10 мм товщину ближньої до заготовки стінки з габаритними розмірами трубки 12×20 мм. Звідси видно, що перехід однофазного одношарового індуктора на оптимальний профіль трубки дає змогу, з одного боку, зменшити втрати у витках, а з іншого – більш рівномірно завантажити витки індуктора за довжиною.

Аналогічні дослідження проводилося для однофазних і трифазних багатшарових індукторів галетного типу, які пропонується використати для такої установки. На рис. 6 наведе-

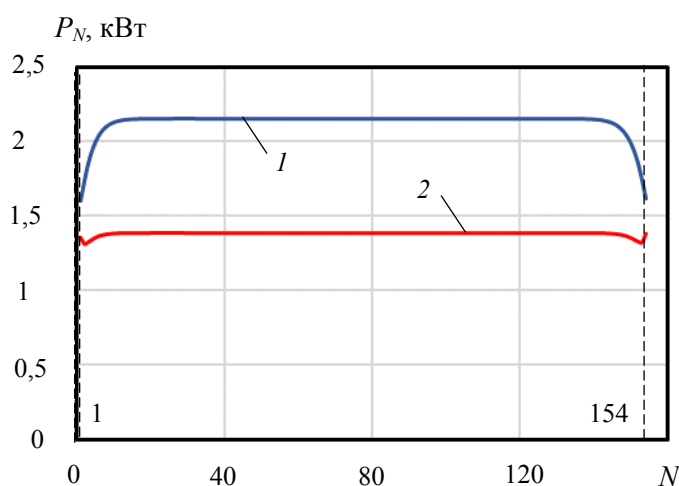


Рис. 5. Розподіли втрат у витках однофазного одношарового індуктора типової установки

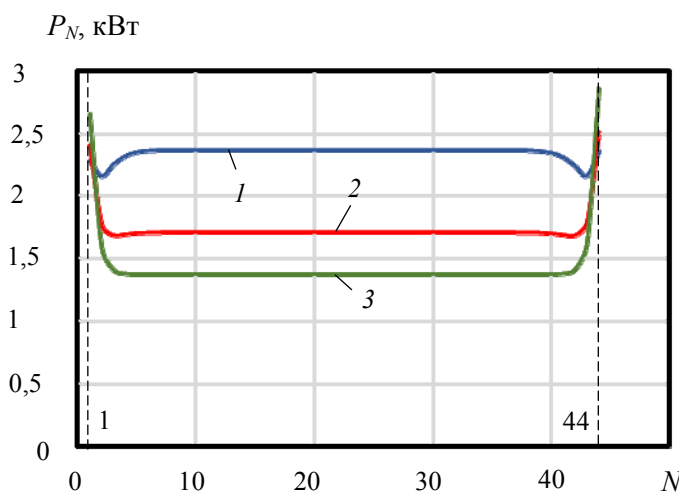


Рис. 6. Розподіли втрат потужності по витках і шарах однофазного тришарового індуктора

но розподіли втрат потужності по витках і шарах однофазного тришарового індуктора, електричні параметри якого представлено в табл. 2 ($n = 3$, з магнітопроводом). Загальна кількість витків цього індуктора складає $N = 132$ (44 витка в кожному шарі). Крива 1 на цьому рисунку відноситься до внутрішнього (першого) шару, крива 2 – до середнього (другого), а крива 3 – до зовнішнього (третього) шару. Як і слід було очікувати, найбільші втрати у витках з приблизно рівномірним розподілом виникають у першому шарі, а найменші – у третьому. У другому і третьому шарах втрати в крайових зонах індуктора суттєво перевершують втрати в регулярній частині. Це призводить до того, що втрати в крайніх галетах індуктора, загальна кількість яких в індукторі становить 22 (6 витків у кожній галеті), більші ніж у галетах регулярної ділянки, що потрібно враховувати під час розбивки індуктора на окремі секції (паралельні гілки) охолодження.

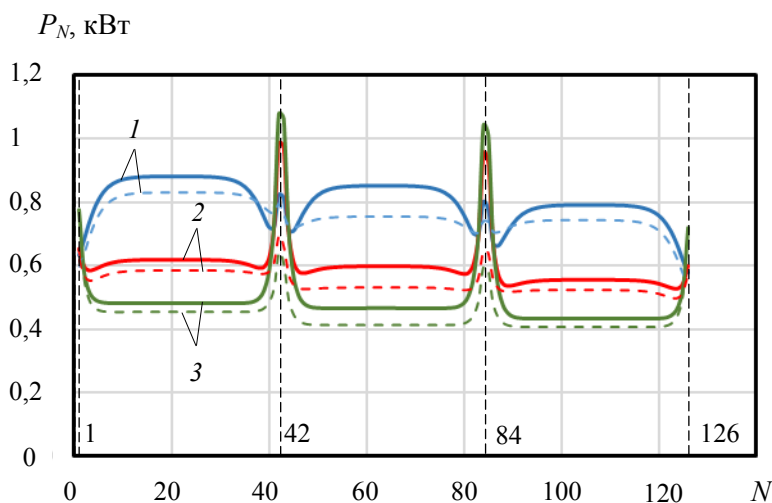


Рис. 7. Розподіли втрат у витках і шарах трифазного індуктора для $\psi = 120$ ел. град. (суцільні криві) і для $\psi = 60$ ел. град. (пунктирні криві)

Моделювання електричних втрат у витках трифазних багатошарових індукторів галетного типу із загальною кількістю витків у кожній фазній секції $N_s = 126$ (42 витка в кожному шарі) проводилося для кутів фазового зсуву між напругами сусідніх секцій $\psi = 120$ і 60 ел. град. Результати цього моделювання показано на рис. 7, де наведено розподіли втрат по витках і шарах індуктора для $\psi = 120$ ел. град. (суцільні криві) і для $\psi = 60$ ел. град. (пунктирні криві). Нумерація кривих на цьому рисунку відповідає нумерації кривих на рис. 6.

Як впливає з цього рисунку, характер кривих розподілу втрат у витках регулярних ділянок кожної фазної секції трифазного індуктора такий самий, як і для однофазного індуктора. Найбільші втрати виникають у витках внутрішнього шару, а найменші – у зовнішньому шарі. Подібні розподіли втрат для обох індукторів спостерігаються й у крайових зонах. Особливим для трифазного індуктора є розподіл втрат на ділянках стика сусідніх фазних секцій. Якщо для внутрішнього шару (криві 1) втрати на цих ділянках співставні із втратами на регулярних ділянках для обох кутів ψ , то для двох інших шарів (криві 2 і 3) ці втрати більші втрат на регулярних ділянках. Водночас у випадку $\psi = 120$ ел. град. максимальні втрати на ділянках стика виникають у витках зовнішнього шару, які суттєво (майже в 2 рази) перевершують втрати на регулярних ділянках, а мінімальні – у витках внутрішнього шару. Для $\psi = 60$ ел. град. характер розподілу втрат на цих ділянках такий, як і для регулярних ділянок, тобто максимальні втрати виникають у витках внутрішнього шару, а мінімальні – у витках зовнішнього шару. Загалом втрати у витках індуктора за $\psi = 60$ ел. град. менші ніж втрати за $\psi = 120$ ел. град. Отриманий таким чином розподіл втрат у витках трифазного індуктора слід враховувати під час організації водяного охолодження такого індуктора.

Висновки. У результаті проведеного комп'ютерного моделювання електротеплових процесів у разі індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих зливків (заготовок) для пресування катанки показано, що при намотці прямокутною рівнотовщинною водоохолоджуваною мідною трубкою багатошарові індуктори індукційної установки мають більш високу енергоефективність відносно одношарових індукторів. Для типової установки, яка ви-

користується в технології пресування алюмінієвої катанки для отримання струмопровідних жил силових кабелів, визначено оптимальну кількість шарів індуктора, яка і для однофазного, і для трифазного виконання дорівнює трьом. Використання такого індуктора дає змогу в середньому на 20 % підвищити ККД наявної установки.

Для однофазного і трифазного тришарових індукторів визначено втрати у витках і їхній розподіл довжиною та шарами індукторів, що дає змогу раціонально організувати охолодження водою таких індукторів.

Для типової індукційної установки рекомендовано перехід із однофазного одношарового індуктора на трифазний тришаровий індуктор галетного типу з фазовим кутом між секціями у 60 ел. град., який дає змогу підвищити електричний ККД наявної установки з 39 до 48 %, а також вирівняти навантаження за фазами для трифазної мережі живлення.

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)», № державної реєстрації 0123U100769), КПКБК 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. 594 с.
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. Жаркін А.Ф., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І., Золотарьов В.В., Білянін Р.В. Моделирование электро-тепловых процессов в установке индукционной термообработки алюминиевых слитков и назначения шляхив підвищення її ефективності при пресуванні катанки для силових кабелів. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 6. С. 81–91.
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com>
5. Злотников И.И., Захаров И.В. Повышение эффективности работы устройств для индукционного нагрева. *Вестник Гомельского Гос. Техн. Ун-та*. 2015. № 4. С. 53–58.
6. Harvey J.G. The theory of multy-layed windings for induction heating and their application to a 1 MW 50 Hz longitudinal flux billet heater. *VIII Congress UIE*. Liege. 1976. No 4. Pp.11a.
7. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 271 с.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат. 1986. 528 с.

MULTILAYER INDUCTORS FOR INDUCTION HEAT TREATMENT INSTALLATION OF ALUMINUM CASTINGS WHEN PRESSING RODS FOR POWER CABLES

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

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

Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: yugoris@ukr.net

2 – YUZH CABLE WORKS, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

On the basis of the developed mathematical model, computer (numerical) modeling of electrothermal processes in a multi-layer inductor installation, which is used for heating cylindrical aluminum ingots (blanks) before pressing the wire rod, as a basis for obtaining current-conducting cores of power cables from it, was carried out. Single-phase and three-phase multilayer inductors of the gallette type were studied, as a result of which it was shown that the maximum value of the electrical efficiency of such an installation for both inductors is provided by their three-layer winding with a water-cooled copper tube of rectangular section. For both inductors, distributions along the radius and length of the aluminum blanks of the volumetric specific power and the specific linear power of heat release from the eddy currents induced in the blanks were obtained. For a three-phase inductor, such distributions were obtained when feeding it with voltages with phase shift angles of 120 and 60 degrees. The losses in the turns of the inductors and their distribution along the length and layers of both inductors were also studied. Ref. 8, fig. 7, tables 2.

Key words: electro-thermal processes, induction heat treatment, aluminum ingots, single-phase and three-phase multilayer inductors, computer modeling, efficiency of electro-heat treatment.

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. 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)
3. Zharkin A.F., Goryslavets Yu.M., Gluhenkyi 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)
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com>
5. Zlotnikov I.Y., Zakharov I.V. Increasing the efficiency of induction heating devices. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta*. 2015. No. 4. Pp. 53–58. (Rus)
6. Harvey J.G. The theory of multi-layered windings for induction heating and their application to a 1 MW 50 Hz longitudinal flux billet heater. *VIII Congress UIE*. Liege. 1976. No. 4. Pp.11a.
7. Nemkov V.S., Demidovych V.B. Theory and calculation of induction heating devices. L.: Energoatomizdat, 1988. 271 p. (Rus)
8. Tikhomirov P.M. Calculation of transformers. M.: Energoatomizdat. 1986. 528 p. (Rus)

Надійшла: 11.06.2024

Прийнята: 16.07.2024

Submitted: 11.06.2024

Accepted: 16.07.2024