

## Моделювання та аналіз електротеплових процесів в установках індукційної термообробки алюмінієвої жили силових кабелів

У роботі досліджено електромагнітні та теплові процеси в установках індукційного нагрівання алюмінієвої жили силових кабелів та умови реалізації технологій її відпалювання. При математичному моделюванні вказаних процесів ураховано такі конструктивні особливості індуктора, як його значна довжина і відповідно велика кількість його витків, що викликало необхідність використати метод мультимасштабного моделювання. При цьому на макрорівні розраховувались електро-теплові процеси в жилі, що рухалась у магнітному полі індуктора, а на мікрорівні (тобто на рівні елементарної комірки, що має лише один виток індуктора) визначався розподіл електромагнітного поля та густини електричного струму в перерізі масивного мідного витка індуктора з урахуванням особливостей його конструкції. На обох рівнях у роботі використовувався чисельний метод скінченних елементів, реалізований в пакеті програм Comsol. За результатами розрахунку електромагнітного поля на рівні елементарної комірки, отримано частотні залежності еквівалентних  $R$ ,  $L$  параметрів індуктора із урахуванням скін-ефекту, ефекту близькості та геометричного ефекту. Досліджено кількісний вплив частоти електричного струму на ці ефекти та отримано залежність електричного ККД індуктора від частоти джерела електроживлення. Показано, що для ефективного нагрівання алюмінієвої жили діаметром 28 мм оптимальне значення частоти знаходиться в діапазоні 1–2 кГц, в якому електричний ККД може досягати значень  $\eta_{ind} = 0,3–0,33$ . Бібл. 31, рис. 10, табл. 1. **Ключові слова:** електромагнітні процеси, індукційна термообробка, алюмінієва струмопровідна жила, силові кабелі, мультимасштабне моделювання, частота струму, ККД індуктора.

**Вступ.** Тривалий час інноваційні дослідження та розробки у вітчизняній електроенергетиці були спрямовані на розвиток децентралізованих локальних електричних систем Microgrid [1–4], що використовують динамічне регулювання балансу потужностей розосереджених джерел електроенергії в умовах нестаціонарного її споживання промисловими і житловими комплексами та об'єктами без урахування електрофізичних особливостей конструктивних елементів кабельно-провідникової продукції повітряних [5] і кабельних ліній електропередачі (ЛЕП) [6–8].

У XXI столітті промислово розвинені країни світу у повітряних ЛЕП стали використовувати самоутримні ізолювані проводи (СП) зі зміцненою струмопровідною жилою з електротехнічних сплавів марки «ТА» (твердий алюміній) і наномодифікованою («зшитю») поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією. В Україні промислове виробництво СП першим освоїв ПАТ «Завод Південкабель» (м. Харків) [5]. Їх впровадження в однофазних та трифазних ЛЕП напругою до 1 кВ дозволило скручувати в один джгут фазні та нульовий проводи, що у декілька разів зменшило погонну індуктивність і падіння напруги. Суттєво зменшились площа землевідведення на будівництво ЛЕП і спростились їх ремонт та обслуговування. У таких ЛЕП не виникають короткі замикання під час негоди та інших зовнішніх впливах, що підвищило безпеку і надійність систем електроживлення відповідальних енергоспоживачів [5]. Значне зменшення індуктивності повітряних ЛЕП із СП призвело навіть до появи досліджень доцільності використання в них емнісних компенсаторів реактивної потужності [9].

ПАТ «Завод Південкабель» освоїв також серійне виробництво інноваційних вітчизняних силових кабелів з тришаровою ЗПЕ ізоляцією і переважно алюмінієвою жилою, що забезпечило інтенсивний розвиток будівництва і використання в Україні підземних кабельних ЛЕП на напругу до 330 кВ і потужністю в сотні-тисячі МВА, які є більш надійними та захищеними від будь-яких зовнішніх впливів [7], ніж повітряні ЛЕП навіть із СП [5]. Причому при виготовленні

струмопровідних жил кабелів теж здебільше використовують сплави марки «ТА».

Проте у даний час в Україні загострюється проблема прискорення робіт по відновленню електроживлення об'єктів критичної інфраструктури з використанням неушкоджених кабельних каналів і лотків, для вирішення якої бажано використовувати кабелі з жилою підвищеної пластичності та струмопровідності.

Найбільші пластичність і питому електропровідність мають сучасні силові кабелі зі ЗПЕ ізоляцією і мідною багатодроговою жилою [10–12]. Такі кабелі використовують в енергосистемах багатьох країн світу. Але відсутність власних родовищ міді в Україні та висока ціна її імпорту обмежують можливість її широкого використання у вітчизняній електроенергетиці.

У нашій країні силові кабелі з мідною струмопровідною жилою в основному використовують в імпульсній електротехніці, зокрема в колах розряду лінійних [13] і нелінійних [14] емнісних накопичувачів електроенергії електророзрядних установок для реалізації імпульсних іскроплазмових процесів отримання мікро- і нанопорошків з унікальними властивостями [15, 16]. Для зменшення індуктивності таких кіл і отримання в них високих динамічних параметрів зворотний імпульсний струм може протікати по мідному екрану кабелів, тобто звичайні силові кабелі можуть використовуватись як коаксіальні.

В електроенергетиці України переважно використовуються сучасні силові кабелі зі ЗПЕ ізоляцією та скрученою і ущільненою алюмінієвою багатодроговою жилою [7, 17]. Для покращення пластичності та питомої струмопровідності такої жили її необхідно «відпалювати», тобто піддавати спеціальній термообробці при температурі близько 420 °С певний час, а потім повільно охолоджувати для наближення структури алюмінієвих виробів до рівноважного стану [18].

Практичну та економічну ефективність використання технології «відпалювання» для покращення експлуатаційних характеристик алюмінієвих струмопровідних жил вже підтверджено авторами статті раніше при реалізації технології пасивного нагрівання

алюмінієвої жили, намотаної на металевий барабан. Її пасивне нагрівання здійснювалось від електротенів, розташованих разом із жилою у спільній термокамері. Зараз ця технологія «відпалювання» алюмінієвої жили використовуються на ПАТ «Завод Південкабель» у технологічних лініях серійного виготовлення сучасних низьковольтних кабелів з алюмінієвою жилою підвищеної пластичності та електропровідності.

Проте в технологічних лініях промислового виготовлення сучасних вітчизняних силових кабелів на середні та високі напруги вже використовується індукційне нагрівання до 60–95 °С поверхні рухомої алюмінієвої жили кабелів височастотним струмом для покращення якості нанесення на неї тришарової ЗПЕ ізоляції [7]. Тому було важливо оцінити ефективність використання індукційних установок у таких лініях не тільки для порівняно низькотемпературної термообробки поверхні алюмінієвих жил, але і для підвищення їх пластичності та питомої струмопровідності.

У даній роботі досліджувався багатовитковий індуктор малого діаметру (сумірний з діаметром жили кабелю) та відносно великої довжини ( $\geq 2$  м), в гармонічному магнітному полі якого рухалась жила кабелю. Електричні параметри індуктора і височастотного джерела живлення вибирались таким чином, щоб температура жили на виході досягала 420 °С.

Різні режими індукційної термообробки струмопровідних матеріалів і виробів досліджувались у численних наукових публікаціях [19–27]. Зокрема у публікації вчених світового виробника сучасних систем нагрівання кабелів і проводів Inductotherm Group company [22] досліджено інноваційні індукторні системи для одночасного ефективного нагрівання однопровідникових і багато-провідникових жил кабелів з обґрунтуванням вибору оптимальної частоти. Розглянуто можливість індукційного нагрівання провідників діаметром від 1,27 до 15,75 мм при частоті джерела живлення від 10 до 800 кГц.

У статті [23] показано шляхи оптимізації індукційного нагрівання із застосуванням індукторів двох типів – плоского і соленоїдного, виконаного на основі litz-провідників. Визначено оптимальну частоту для отримання максимального електричного ККД. Показано, що при фіксованій геометрії та інших параметрах системи ефективність індукційного нагрівання залежить від об'єму міді в обмотках. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

У роботі [24] розв'язано перехідну електромагнітно-теплову модель індукційного нагрівання феромагнітних матеріалів із врахуванням їхніх нелінійних залежностей (зокрема  $B(H, T)$ ) та використанням методу скінченних елементів. Стратегія мультифізичного моделювання полягала в тому, що електромагнітна задача розв'язувалась для фіксованих ізотермічних температурних полів, а теплова – для фіксованої теплоти джерела нагрівання. Результати комп'ютерного моделювання феромагнітного зразка в циліндричному індукторі (з внутрішнім діаметром 50 мм і 5 витками) підтверджено експериментальними дослідженнями індукційного нагрівання зразків матеріалів при трьох швидкостях нагрівання.

У публікації [25] автори з використанням методу скінченних елементів провели мультифізичне моде-

лювання та експериментальну перевірку розподілу температури в залежності від частоти струму індукційного нагрівача. Особливістю роботи є виготовлення індуктора із проводу типу літцендрат і використання відносно високих частот від 15 до 25 кГц.

У роботі [26] проведено дослідження щодо впливу потужності індукційного нагрівача, швидкості подачі та діаметра сталевого зразка AISI 4140 на розподіл температури у зразках в залежності від діаметру (7 мм, 14 мм, 21 мм і 28 мм). Використовувався індуктор і вигляді спіральної котушки із внутрішнім діаметром 5,8 см, що нагріває тестовий зразок в діапазоні температур від 492 °С до 746 °С. Реалізуються дві стадії нагріву – перша стадія із феромагнітними властивостями зразка, а друга стадія, коли внаслідок перевищення температури Кюрі, зразок стає парамагнітним.

У публікації [27] автори експериментально дослідили розподіл температури, швидкість нагрівання, перегрів і коливання температури комерційного прутка зі сплаву алюмінію 6061 діаметром 10 мм і довжиною 1,5 м із аналізом впливу режимів термообробки на механічні властивості сплаву. Показано, що зразок після нагрівання індукційним способом до температури 560 °С має кращі механічні властивості порівняно зі зразком, нагрітим у звичайній електричній печі.

Одним із найбільш важливих параметрів ефективності індукційного нагрівання є частота струму електроживлення індуктора, при якій його електричний ККД набуває максимального значення. Ця частота залежить від багатьох чинників – розмірів в перерізі витків індуктора, його габаритних розмірів та повітряного проміжку між індуктором та жилою, а також від матеріалу струмопровідної жили кабелів, її розмірних та інших характерних параметрів. Враховуючи велику довжину такого індуктора та відповідно велику кількість витків ( $\sim 100$ ), чисельний розрахунок електромагнітного поля та ККД на його основі при врахуванні геометричних розмірів масивних витків індуктора в такий структурі та неоднорідності розподілу електричного струму в їх об'ємі, потребує значних комп'ютерних ресурсів.

Особливості спрощення комп'ютерних розрахунків електромагнітного поля і визначення ККД в таких системах у наведених публікаціях не розглядалися. У даній статті для спрощення розрахунків використано метод мультимасштабного моделювання [28–30], в основу якого покладено поняття елементарної комірки, що містить тільки один виток індуктора та малий фрагмент жили, розташований біля цього витка. При цьому не враховувалась дія кінцевих ефектів в індукторі, оскільки при великій його довжині, вони слабо впливають на інтегральні електромагнітні характеристики і кінцеве значення температури жили на виході з індуктора.

Таким чином, відповідно до підходу мультимасштабного моделювання, польова задача розглядалась в області елементарної комірки, що містить лише один масивний виток індуктора та фрагмент жили. Еквівалентні  $R, L$  параметри цієї комірки розраховувались як функції частоти джерела живлення, а потім ці результати шляхом періодичного повторення цієї комірки переносились на всю конструкцію індуктора установки електроіндукційного нагрівання.

**Метою статті** є розроблення на основі методу мультимасштабного моделювання комп'ютерної моделі для аналізу електротеплових процесів в індукційній установці для нагрівання рухомої алюмінієвої жили силового кабелю для кількісної оцінки ефективності використання таких установок в існуючих промислових технологічних лініях виготовлення сучасних кабелів для підвищення пластичності та питомої струмопровідності їхніх алюмінієвих жил.

Однією із найбільш важливих задач було отримання частотних залежностей еквівалентних  $R, L$  параметрів

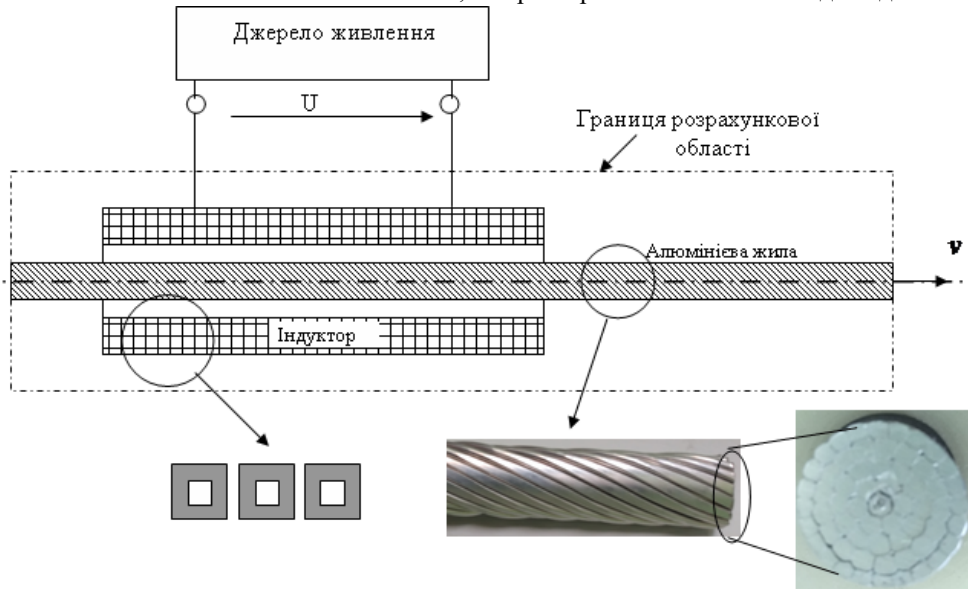


Рис. 1. Схема фізичної моделі досліджуваної установки для індукційного нагрівання алюмінієвої жили силового кабелю, що рухається із постійною швидкістю  $v$

індукційні електричні струми та внаслідок виділення джоулевого тепла відбувається її нагрівання.

Математичну модель для аналізу зв'язаних електромагнітних і теплових процесів було побудовано в наступному наближенні:

1. Розгляд електромагнітного процесу проводився в усталеному режимі в частотній області, коли всі характеристики поля є комплексними величинами. Тепловий процес розглядався в стаціонарному режимі.

2. Індуктор на практиці виготовляється із мідної трубки і має складну структуру, яку умовно показано на рис. 1. Однак, на першому етапі, коли основна увага приділяється тепловому процесу в жилі, індуктор можна розглядати як багатовиткову котушку із заданою середньою густиною електричного струму  $\vec{J}_i = \dot{I}_i N_i / S_i$ , де  $\dot{I}_i N_i$  – магніторушійна сила індуктора, а  $S_i$  – площа його перерізу. У цьому виразі та далі крапкою зверху позначено комплексні величини.

3. Жила, що нагрівається, є алюмінієвою, багатодротяною та ущільненою. Зовнішній її вигляд та переріз показано на рис. 1. Коефіцієнт ущільнення досягає 0,96 і, внаслідок цього, вона в розрахунках розглядалась як суцільна. При цьому враховувались нелінійні залежності електропровідності, теплопровідності і питомої теплоємності її матеріалу від температури.

4. Враховуючи приблизно циліндричну форму індуктора та жили, розташованої симетрично відносно індуктора, задача розглядалась як осесиметрична, у двовимірній постановці в циліндричній системі коор-

такого індуктора із врахуванням нерівномірного розподілу електричного струму по його перерізу та визначення за їх допомогою оптимальної частоти джерела живлення, що відповідає максимальному значенню електричного ККД індуктора.

Дослідження спрямовані на оцінку можливості досягнення мети у промисловій технологічній лінії безперервного накладання сучасної тришарової зшитой поліетиленової ізоляції на рухому алюмінієву жилу кабелів на напругу до 110 кВ, які серійно виготовляє ПАТ «Завод Південкабель».

**Математична модель аналізу зв'язаних електромагнітних і теплових процесів.** На рис. 1 схематично показано фізичну модель досліджуваної установки, що включає водоохолоджуваний багатовитковий індуктор відносно великої довжини та алюмінієву жилу силового кабелю, що рухається з постійною швидкістю  $v$  у гармонічному магнітному полі індуктора. При підключенні індуктора до джерела живлення промислової або високої частоти, в жилі виникають

динат  $r0z$  відносно комплексної змінної – векторного магнітного потенціалу  $\vec{A}(r, z)$ , а також температури  $T(r, z)$  у розрахунковій області, показаній на рис. 1.

Ця область містить три підобласті – індуктор, алюмінієву жилу і оточуюче ці елементи повітряне середовище. Математична модель, що описувала зв'язані електромагнітні і теплові процеси, включала постановку електромагнітної і теплової задач, які представлено далі.

Електромагнітний процес описувався системою диференціальних рівнянь для комплексної величини векторного магнітного потенціалу  $\vec{A}$ :

$$j\omega\sigma(T)\vec{A}_\varphi + \mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \vec{A}_\varphi) = 0, \text{ в області жили, (1)}$$

$$\mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \vec{A}_\varphi) = \begin{cases} \dot{I}_i N_i / S_i, & \text{в області індуктора,} \\ 0, & \text{у повітрі,} \end{cases} \text{ (2)}$$

де  $\sigma(T)$  – електропровідність жили, що залежить від температури,  $\omega$  – кутова частота струму в індукторі,  $\mu_0$  – магнітна стала.

Як граничні умови для електромагнітної задачі задавалася умова симетрії відносно осі  $r = 0$  і умова магнітної ізоляції на зовнішній границі:

$$\vec{A}_\varphi|_C = 0. \text{ (3)}$$

Зв'язок електромагнітної задачі із тепловою здійснювався за допомогою двох величин – джоулевого тепловиділення в жилі  $q$  та нелінійної залежності електропровідності жили  $\sigma(T)$ .

Теплова задача для невідомого розподілу температури  $T$  включала наступне диференціальне рівняння теплопереносу за рахунок механізмів теплопровідності та конвекції:

$$\rho C_p(T) \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) = \begin{cases} q, & \text{в області жили,} \\ 0, & \text{в інших} \\ & \text{елементах області,} \end{cases} \quad (4)$$

де  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$  – густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу відповідного середовища, що залежать від температури;  $\mathbf{u} = (0, v)$  – швидкість руху жили;  $q$  – питома потужність джерела тепла, обумовлена індукційним нагрівом жили наведеними струмами. Вона визначалась як

$$q = \frac{\dot{J} \dot{J}^*}{\sigma} = \omega^2 \sigma (A_\varphi \cdot A_\varphi^*), \quad (5)$$

де  $\dot{J} = -j\omega \sigma \dot{A}_\varphi$  – діюче значення густини наведеного струму;  $\dot{A}_\varphi^*$  – комплексно-спряжена величина векторного магнітного потенціалу.

Як граничні умови для теплової задачі приймалися наступні:

- на осі симетрії  $r = 0$  – умова симетрії;
- на зовнішній границі розрахункової області, а також на вхідній (в напрямку руху) границі жили температура дорівнює температурі навколишнього середовища  $T = T_0$ ;
- на вихідній границі жили задавався лише конвективний перенос теплоти;
- на границях індуктора температура припускалась постійною і дорівнювала  $70^\circ\text{C}$ , що пов'язано з наявністю водяного охолодження витків індуктора.

Диференціальні рівняння для електромагнітного поля (1) – (2) і температурного поля (4) з урахуванням зазначених граничних умов представляли зв'язану електротеплову задачу, що вирішувалася чисельно методом скінченних елементів за допомогою пакету програм Comsol [31]. Залежності змінення від температури величин  $\rho(T)$ ,  $C_p(T)$ ,  $\lambda(T)$  для алюмінієвої жили задавалися за даними бібліотеки матеріалів цього пакету.

**Аналіз результатів розрахунку електротеплової задачі.** При виконанні розрахунків використовувалися наступні значення параметрів. Розміри розрахункової області –  $4,5 \times 0,2$  м. Довжина індуктора – 2 м, внутрішній діаметр – 40 мм, кількість витків  $N_i = 50$ . Струм в індукторі вибирався з умови, що температура жили на виході із індуктора дорівнює приблизно температурі відпалювання для алюмінію  $T_{an} = 400\text{--}430^\circ\text{C}$ , частота струму в індукторі змінювалась від 50 до 5000 Гц. Діаметр жили – 28 мм, швидкість її руху –  $v = 0,5$  м/хв. Температура навколишнього повітря  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Ізолінії векторного магнітного потенціалу  $A(r, z)$  та розподіл магнітної індукції  $|\mathbf{B}|$  у розрахунковій області при частоті струму 50 Гц наведено на рис. 2,а. Магнітне поле зосереджене в скін-шарі, який при частоті 50 Гц становить  $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu_0 \sigma)} = 15$  мм. Звідси, джоулеві втрати виділялись майже по всьому об'ємі жили, що призводило до рівномірного її нагрівання по товщині.

Розподіл температури в розрахунковій області показано на рис. 2,б, а на рис. 2,в – розподіл температури

вздовж осі  $z$  на осі симетрії (нижня крива) та на поверхні жили (верхня крива) при частоті струму 50 Гц.

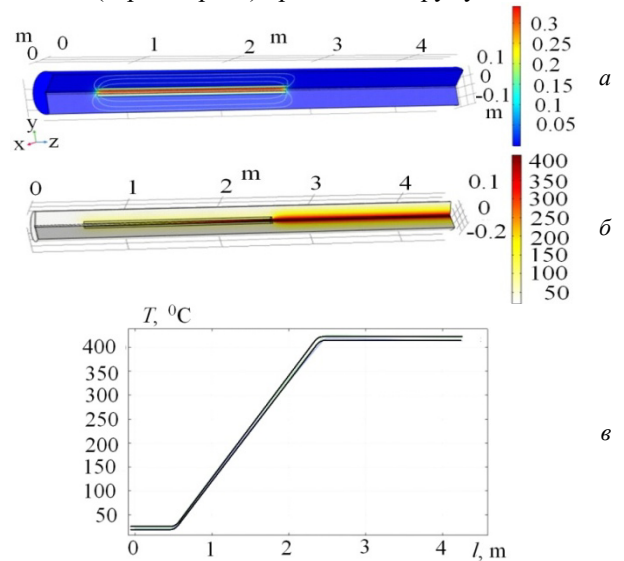


Рис. 2. Ізолінії векторного магнітного потенціалу та розподіл магнітної індукції у розрахунковій області при частоті струму 50 Гц (а); розподіл температури в розрахунковій області (б); розподіл температури вздовж осі  $z$  на осі симетрії (нижня крива) та на поверхні жили (верхня крива) при частоті струму 50 Гц (в)

Як випливає з результатів розрахунку, температура по глибині жили розподілена рівномірно внаслідок малого діаметру жили. Також температура зростає на ділянці «вхід – вихід із індуктора» по лінійному закону, досягаючи на виході необхідної температури відпалювання –  $420^\circ\text{C}$ .

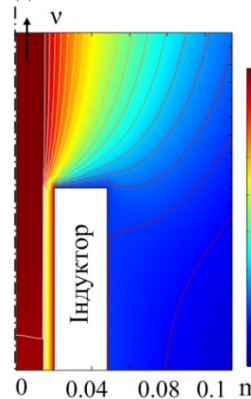


Рис. 3. Розподіл температури на виході із індуктора

Просторовий розподіл температури на виході із індуктора в збільшеному масштабі показано на рис. 3. Слід зазначити, що після виходу із зони індуктора, розподіл температури по глибині жили не стає більш однорідним внаслідок охолодження поверхневих ділянок жили. Для кількісної оцінки ступеня нерівномірності нагрівання жили по її глибині, можна використовувати коефіцієнт нерівномірності температури:

$$k_T = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{0,5(T_{\max} + T_{\min})} \cdot 100, \quad (6)$$

де  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  – відповідно максимальна і мінімальна температура в радіальному перерізі жили на виході з індуктора. Для досліджуваного випадку за даними рис. 2,в, величина  $k_T = 1,6\%$ .

**Електромагнітна задача на рівні елементарної комірки – на мікрорівні.** Розглянута вище електротеплова задача не дозволяє провести детальний аналіз електромагнітних процесів в індукторі внаслідок відносно великої його довжини – співвідношення довжина/діаметр дорівнює 50. Для такого аналізу далі розглядалась додаткова задача на рівні елементарної комірки.

На рис. 4 показано структуру індуктора, що складається із масивних мідних витків, виконаних із мідної трубки, які охолоджуються рідиною, що прокачується в цій трубці. Через велику довжину індуктора та наявність значного числа витків в його структурі було виділено елементарну комірку, яка включала один виток індуктора та фрагмент жили, розташованої біля цього витка (вона показана на рис. 4 пунктирною лінією).

При цьому припускалось, що вся структура задачі може бути отримана шляхом періодичного повторення цієї комірки вздовж осі  $z$  і загальна кількість таких комірок дорівнює числу витків індуктора  $N_i$ .

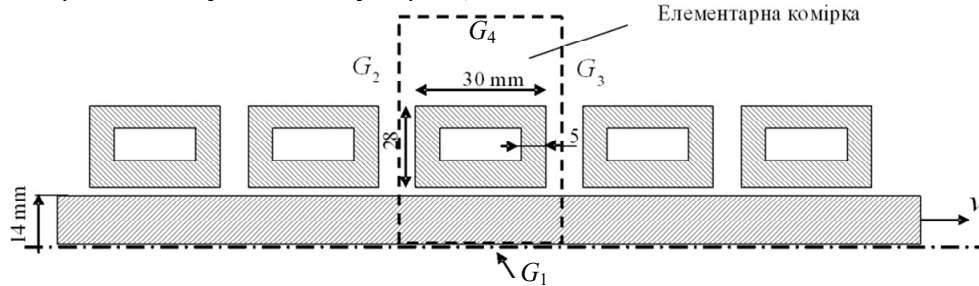


Рис. 4. Структура багатовиткового індуктора з виділеною елементарною коміркою

Математична модель електромагнітної задачі в області елементарної комірки в наближенні, що жила є нерухомою (наближення малого значення магнітного числа Рейнольдса) і припускаючи справедливості вісесиметричної постановки, має наступний вигляд:

- в області жили –

$$j\omega\sigma(T)\dot{A}_\varphi + \mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \dot{A}_\varphi) = 0; \quad (7)$$

- в області витка індуктора –

$$\begin{cases} j\omega\sigma \dot{A}_\varphi + \mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \dot{A}_\varphi) = \sigma \frac{\dot{U}_{turn}}{2\pi r}; \\ \int_{S_{turn}} \dot{J} dS = \dot{I}_{turn}, \quad \dot{J} = \sigma \left( \frac{\dot{U}_{turn}}{2\pi r} - j\omega \dot{A}_\varphi \right); \end{cases} \quad (8)$$

- в повітрі –

$$\mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \dot{A}_\varphi) = 0, \quad (9)$$

де  $\dot{U}_{turn}$  – невідома напруга в перерізі витка, яка розраховується разом із векторним магнітним потенціалом  $\dot{A}$  при заданому значенні електричного струму у витку  $\dot{I}_{turn}$ . Оскільки всі витки індуктора з'єднані послідовно, то цей струм дорівнює струму індуктора  $\dot{I}_i$ , який вважається заданим.

Задавалися наступні граничні умови для електромагнітної задачі (7) – (9): умова симетрії відносно осі  $r = 0$  на границі  $G_1$  (див. рис. 4), умова парної симетрії на бокових границях  $G_2, G_3$  та умова магнітної ізоляції на зовнішній границі  $G_4 - A_\varphi|_{G_4} = 0$ .

На рис. 5 показано розрахований в пакеті Comsol розподіл магнітного поля  $|B|$ , Тл (ліворуч) та густини електричного струму  $|J|$ , А/м<sup>2</sup> (праворуч) в перерізі елементарної комірки при різній частоті електричного струму  $f$ . Струм у витку індуктора приймався 1 А.

При цьому не враховувалась дія кінцевих ефектів в індукторі, однак при великій його довжині ці ефекти слабо впливають на інтегральні характеристики, і відповідно на кінцеве значення температури жили на виході із індуктора.

Прийняті при розрахунках розміри витків індуктора показано на рис. 4. Припускалось, що всі витки індуктора з'єднані послідовно, а також, що температура жили в області комірки дорівнювала середній температурі жили по її довжині 220 °С.

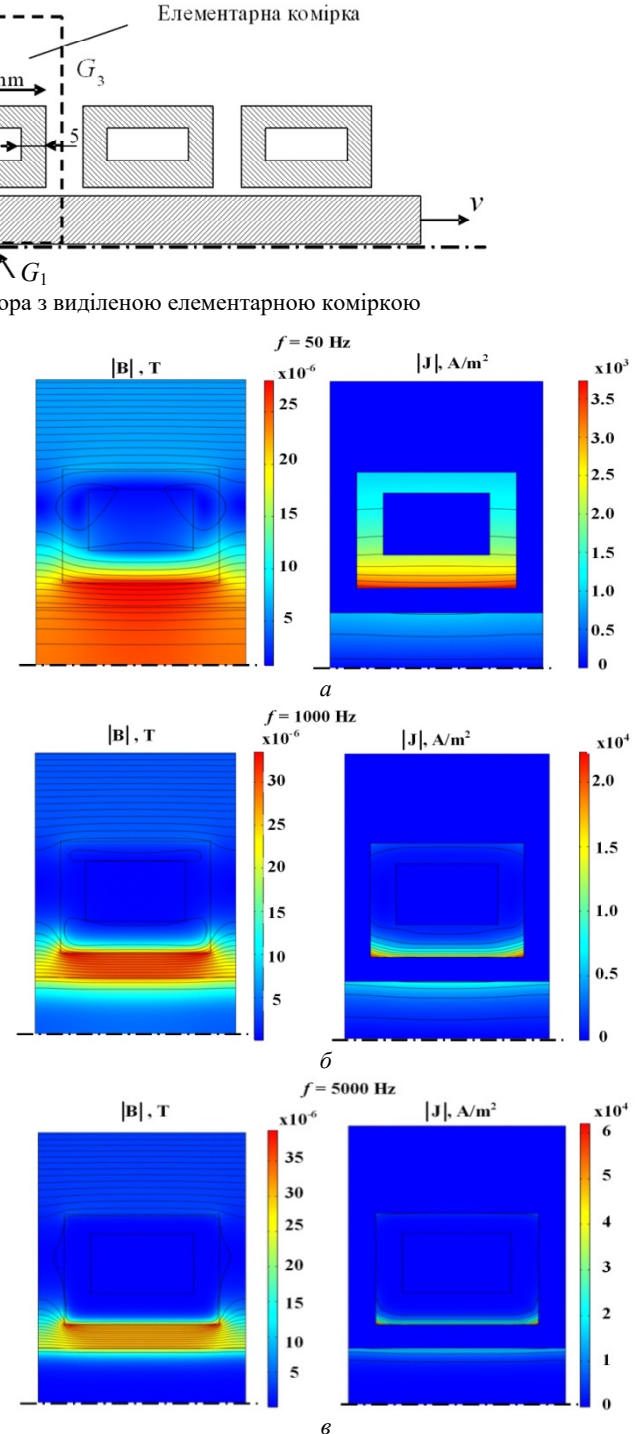


Рис. 5. Розподіли магнітного поля (ліворуч) та густини електричного струму (праворуч) в перерізі елементарної комірки при частоті електричного струму: 50 Гц (а); 1000 Гц (б); 5000 Гц (в)

Із наведених рисунків видно прояв наступних ефектів:

- скін-ефект, коли магнітне поле та електричний струм витісняються на поверхню провідника;
- ефект близькості, коли наявність сусідніх витків зменшує струм на бокових гранях витка, що належить до комірки;
- геометричний ефект, коли внаслідок циліндричної структури витка електричний струм збільшується на внутрішній його поверхні і зменшується на зовнішній. За даними рис. 5 видно, як при зростанні частоти збільшується проява цих ефектів.

Розподіл магнітного поля в індукторі великої довжини, що досліджується в даній задачі, може бути отримано шляхом періодичного повторення картини магнітного поля для комірки – такі картини наведені на рис. 6 для трьох значень частоти джерела живлення. Зазначимо, що такий розподіл буде справедливим для внутрішніх ділянок індуктора і буде відрізнятися від розподілу в його кінцевих зонах. Але використання такого підходу, що базується на розрахунку поля елементарної комірки, дозволяє значно спростити задачу розрахунку електромагнітних процесів індукторів великої довжини, який і використовується в задачі індукційного нагрівання жили силового кабелю.

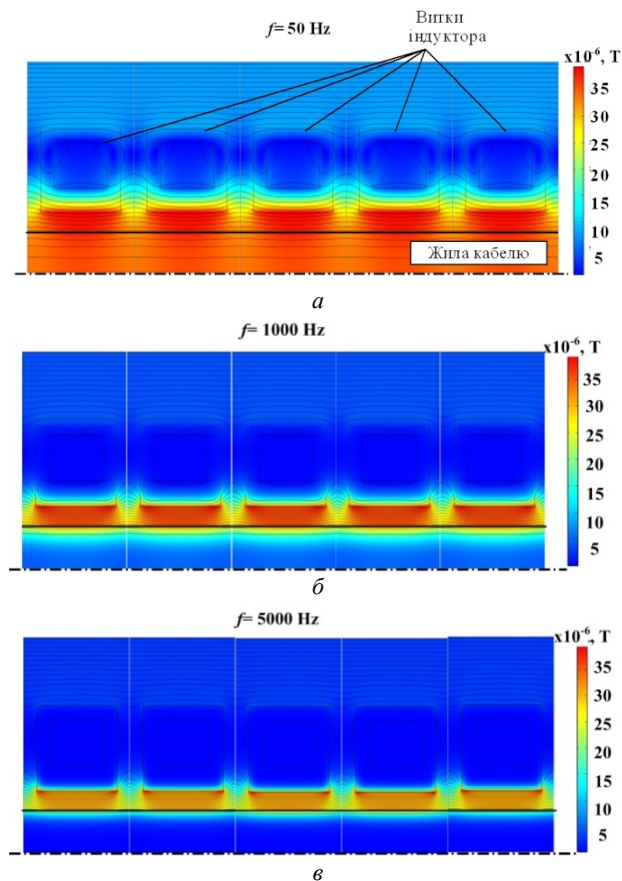


Рис. 6. Розподіли магнітного поля в індукторі великої довжини при частоті електричного струму: 50 Гц (а); 1000 Гц (б); 5000 Гц (в)

**Розрахунок еквівалентних електричних параметрів одного витка та багатовиткового індуктора в цілому.** За результатами розрахунку електромагнітного поля в області елементарної комірки можуть

бути розраховані еквівалентні електричні параметри одного витка індуктора як елемента цієї комірки в залежності від частоти електричного струму. При цьому в роботі використовується послідовна схема заміщення витка (рис. 7,а), та багатовиткового індуктора в цілому (рис. 7,б).

Схема заміщення багатовиткового індуктора із числом витків  $N_i$  має таку ж структуру, як і схема для комірки на рис. 7,а, тільки значення всіх параметрів помножено на це число витків  $N_i$  (рис. 7,б).

Ці схеми містять активний опір витка  $R'_{ind}(\omega)$ , активний опір фрагмента жили  $R'_{core}(\omega)$  та еквівалентну індуктивність  $L'_{eq}(\omega)$ , де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота електричного струму. Позначення цих елементів зі штрихом означає, що вони відносяться до одного витка індуктора.

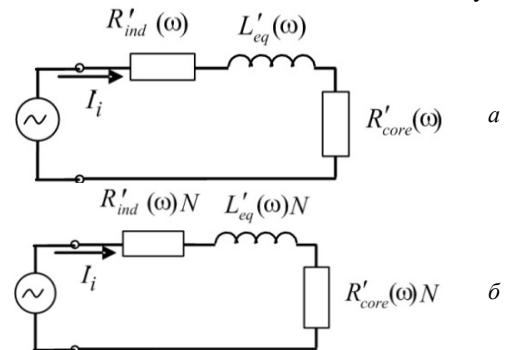


Рис. 7. Послідовні схеми заміщення: одного витка (а); багатовиткового індуктора в цілому (б)

Для розрахунку частотних залежностей цих параметрів використовувались наступні вирази:

$$R'_{ind}(\omega) = \frac{1}{I_i^2} \int_{S_{turn}} \frac{JJ^*}{\sigma} 2\pi r dS, \quad (10)$$

$$R'_{core}(\omega) = \frac{1}{I_i^2} \int_{S_{core}} \frac{JJ^*}{\sigma} 2\pi r dS, \quad (11)$$

$$L'_{eq}(\omega) = \frac{1}{I_i^2} \int_{S_{cell}} \dot{B}\dot{H}^* 2\pi r dS, \quad (12)$$

де  $S_{turn}$ ,  $S_{core}$ ,  $S_{cell}$  – відповідно поверхня витка, жили та елементарної комірки.

На рис. 8 показані розраховані частотні залежності цих параметрів елементарної комірки. З них можна заключити наступне.

Еквівалентний опір жили  $R'_{core}(\omega)$  при невеликій частоті (< 50 Гц) наближається до малого (нульового) значення, в той час як опір витка  $R'_{ind}(\omega)$  наближається до опору на постійному струмі.

Обидва опори зростають із ростом частоти і дозволяють розрахувати електричний ККД індуктора як співвідношення втрат у жилі до загальних втрат – у жилі та в індукторі.

Еквівалентна індуктивність комірки зменшується з найбільшою швидкістю в діапазоні частот 50 Гц – 1000 Гц, коли магнітне поле інтенсивно витісняється у повітряний проміжок.

При більших частотах індуктивність обумовлена переважно магнітним полем у цьому проміжку і її зменшення значно уповільнюється.

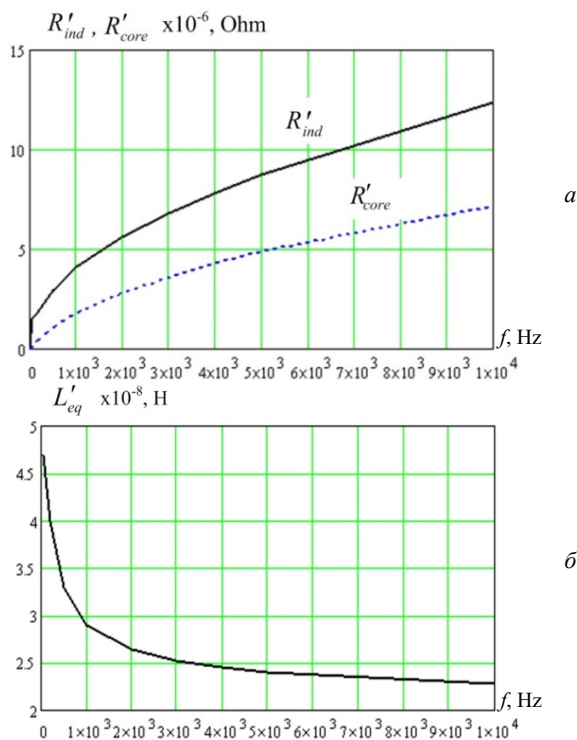


Рис. 8. Частотні залежності параметрів елементарної комірки: активного опору витка  $R'_{ind}(\omega)$  і фрагмента жили  $R'_{core}(\omega)$  (а); еквівалентної індуктивності  $L'_{eq}(\omega)$  (б)

Використання схеми заміщення багатовиткового індуктора (рис. 7,б) дозволяє, використовуючи ще електричну схему для високочастотного джерела живлення, розрахувати електричні процеси в установці для індукційного нагрівання жили при різних частотах джерела живлення.

Знаючи залежності еквівалентних активних опорів витка та жили від частоти, можна розрахувати електричне ККД індуктора за виразом

$$\eta_i(\omega) = \frac{R'_{core}(\omega)}{R'_{core}(\omega) + R'_{ind}(\omega)} \quad (13)$$

Результати розрахунку ККД індуктора, як функції частоти джерела живлення, отримані з використанням розрахованих активних опорів, що наведені на рис. 8, представлені на рис. 9 суцільною кривою.

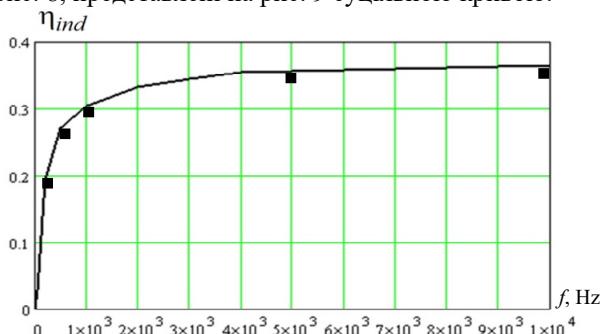


Рис. 9. Частотна залежність ККД індуктора як результат розрахунку для елементарної комірки (суцільна крива), так і для індуктора в цілому (позначки ■)

З цього рисунку видно, що ефективність нагрівання жили на промисловій частоті доволі низька електричне ККД дорівнює  $\eta_{ind} = 0,028$ . Оптимальне значення частоти складає 1–2 кГц і при цьому електричний ККД відповідно  $\eta_{ind} = 0,3–0,33$ .

Хоча при подальшому збільшенні частоти електричний ККД дещо зростає, але при цьому також зростають втрати в напівпровідникових елементах джерела живлення і тому рекомендації щодо збільшення частоти  $f > 2000$  Гц потребують додаткових досліджень.

Результати розрахунку температурного поля в жилі при оптимальній частоті 1000 Гц показують однорідний розподіл температури по глибині жили на виході із індуктора – коефіцієнт нерівномірності температури  $k_T = 2\%$ .

Для верифікації запропонованої комп'ютерної моделі, що побудована на основі методу мультимасштабного моделювання, було проведено двовимірний розрахунок електромагнітної задачі для всієї розрахункової області, що містить багатовитковий індуктор із масивними витками, алюмінієву жилу та область повітря загальноприйнятим способом. Отриманий розподіл силових ліній магнітного поля в розрахунковій області для частоти струму 1000 Гц показано на рис. 10.



Рис. 10. Розподіл силових ліній магнітного поля в перерізі багатовиткового індуктора при частоті 1000 Гц

За результатами розрахунку були визначені загальні втрати в індукторі, в жилі і на їх основі розраховувалося електричний ККД індуктора  $\eta_i(\omega)$ . Результати цих розрахунків наведено на рис. 9 позначками ■. Порівняння результатів розрахунків, отриманих із використанням елементарної комірки (суцільна крива) і при розгляді індуктора в цілому (показані позначкою ■) свідчить про узгодженість цих результатів. При цьому для розрахунку загальноприйнятим способом задачі, результати якої представлено на рис. 10, потрібно значно більше комп'ютерних ресурсів, і це є особливою рисою розрахунку саме індукторів відносно великої довжини, що використовуються в технологічних процесах виготовлення струмопровідних жил силових кабелів.

В табл. 1 наведені результати експериментального дослідження характеристик алюмінієвого дроту, що використовується на ПАТ «Завод Південкабель» при виготовленні струмопровідної жили, до та після процесу відпалювання, реалізованого нагріванням електротенами у спеціальній камері з подальшою витримкою у термостаті.

Таблиця 1  
Результати експериментального дослідження характеристик алюмінієвого дроту

Матеріал – алюмінієва жила	Опір розривання, Н/м <sup>2</sup>	Відносне подовження, %	Питомий електричний опір при 20 °С, Ом·м
до відпалювання	177,9	2,0	$2,80 \cdot 10^{-4}$
після відпалювання	87,6	38	$2,77 \cdot 10^{-4}$

Підвищення пластичності алюмінієвої жили силових кабелів дозволяє суттєво прискорити роботи по відновленню ліній електропередачі (ЛЕП) України у воєнний і повоєнний періоди з використанням незруйнованих кабельних каналів і лотків та підвищити надійність систем електроживлення вітчизняних об'єктів критичної інфраструктури.

Підвищення питомої електропровідності алюмінієвої жили кабелів додатково дозволяє або зменшити

її переріз, і відповідно об'єм всіх активних матеріалів в конструкції силових кабелів, або додатково підвищити надійність систем електроживлення.

Отримані у статті результати обґрунтовують доцільність створення експериментального зразка установки високочастотної (1–2 кГц) індукційної термообробки алюмінієвої жили силових кабелів на напругу до 110 кВ для уточнення технологічних і економічних показників такої термообробки, зокрема при її використанні у промислових лініях безперервного накладання сучасної тришарової зшитої поліетиленової ізоляції на рухому алюмінієву жилу кабелів, які серійно виготовляє ПАТ «Завод Південкабель» (м. Харків, Україна).

#### Висновки.

Розроблено математичну та комп'ютерну моделі для аналізу електротеплових процесів в установці індукційного нагрівання алюмінієвої жили силового кабелю для реалізації технологічного процесу відпалювання цієї жили. Враховуючи конструктивні особливості індуктора для реалізації такого процесу (зокрема, велику довжину індуктора та значну кількість його масивних витків), у роботі використовувався метод мультимасштабного моделювання.

При цьому, на макрорівні досліджувались електротеплові процеси в жилі, а на мікрорівні (тобто на рівні елементарної комірки, що містить лише один виток індуктора та фрагмент жили) розраховувався розподіл електромагнітного поля та густини електричного струму в перерізі масивного мідного витка індуктора з урахуванням особливостей його конструкції. На обох рівнях у роботі використовувався чисельний метод скінченних елементів, реалізований в пакеті програм Comsol.

За результатами розрахунку електромагнітного поля на рівні елементарної комірки, отримано частотні залежності еквівалентних  $R$ ,  $L$  параметрів індуктора із врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості та геометричного ефекту та досліджено кількісний вплив частоти електричного струму на ці ефекти.

Отримано залежність електричного ККД індуктора від частоти джерела живлення.

Аналіз отриманих чисельних результатів показав, що при індукційній термообробці рухомої алюмінієвої жили діаметром 28 мм і протіканні в індукторі струмів частотою до 2 кГц ККД процесів термообробки може перевищувати 30 % і можуть бути реалізовані температурні режими, достатні для відпалювання такої жили без використання термоізоляційної камери.

Для верифікації запропонованої комп'ютерної моделі, що побудована на основі методу мультимасштабного моделювання, було проведено двовимірний розрахунок електромагнітної задачі для всієї розрахункової області, що містить багатовитковий індуктор із масивними витками, алюмінієву жилу та навколишню повітряну область загальноприйнятним способом. Порівняння результатів розрахунків свідчить про узгодженість отриманих результатів. При цьому для розрахунку задачі загальноприйнятним способом потрібно значно більше комп'ютерних ресурсів.

Отримані результати обґрунтовують доцільність створення експериментального зразка установки високочастотного (1–2 кГц) індукційного термовідпалювання алюмінієвої жили силових кабелів для уточ-

нення технологічних і економічних показників її використання у промислових лініях безперервного накладання сучасної тришарової зшитої поліетиленової ізоляції на рухому алюмінієву жилу кабелів на напругу до 110 кВ, які серійно виготовляє ПАТ «Завод Південкабель» (м. Харків, Україна).

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників Microgrid на локальних ринках України. *Технічна електродинаміка*, 2022, № 3, С. 37–48. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.037>.
2. Lezama F., Soares J., Hernandez-Leal P., Kaisers M., Pinto T., Vale Z. Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 4081–4088. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>.
3. Sinha A., Basu A.K., Lahiri R.N., Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P.A. Setting of Market Clearing Price (MCP) in Microgrid Power Scenario. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596357>.
4. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, pp. 402–411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
5. Золотарьов В.М., Щерба А.А., Карпушенко В.П., Перетятко Ю.В., Золотарьов В.В., Обозний А.Л. *Рекомендації щодо вибору характеристик, конструкцій і застосування самоутримних ізольованих проводів виробництва ЗАТ «Завод «Південкабель» на повітряних лініях електропередачі підвищеної надійності та безпеки*. Харків: Майдан, 2008. 62 с.
6. Peschke E., Olshausen R. *Cable Systems for High and Extra-High Voltage*. MCD Verlag, 1999. 296 p.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Кабели с полимерной изоляцией на сверх-высокие напряжения*. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
8. Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Increasing noise immunity of cables for fire protection systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 54–58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.07>.
9. Кириленко О.В., Бінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*, 2021, № 4, С. 44–54. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>.
10. Nijman E., Buchegger B., Böhler E., Rejlek J. Experimental Characterization and Dynamic Modelling of Electrical Cables. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2023, vol. 5, no. 2, pp. 888–896. doi: <https://doi.org/10.4271/2022-01-0952>.
11. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal Action of the Pulse of the Current of a Short Artificial-Lightning Stroke on Test Specimens of Wires and Cables of Electric Power Objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 544–555. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.
12. Shazly J.H., Mostafa M.A., Ibrahim D.K., Abo El Zahab E.E. Thermal analysis of high-voltage cables with several types of insulation for different configurations in the presence of harmonics. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, vol. 11, no. 14, pp. 3439–3448. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0862>.
13. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric energy loss at energy exchange between capacitors as function of their initial voltages and capacitances ratio. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 9–11. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
14. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 1, С. 3–10. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.003>.
15. Ochin P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark



- Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 738-739, pp. 451-455. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
16. Вінниченко Д.В. Вплив електричних параметрів високовольтних електророзрядних установок синтезу нановуглецю на їхню продуктивність і питомі енерговитрати. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 4, С. 95-97. doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.04.095>.
  17. Ametani A., Xue H., Ohno T., Khalilhezahad H. *Electromagnetic Transients in Large HV Cable Networks: Modeling and calculations*. The Institute of Engineering Technology, 2021. 591 p. doi: <https://doi.org/10.1049/PBPO204E>.
  18. Мохорт А.В., Чумак М.Г. *Термічна обробка металів*. Київ: Либідь, 2002. 512 с.
  19. Rudnev V., Loveless D., Cook R. *Handbook of induction heating*. Boca Raton, CRS Press, 2017. 776 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315117485>.
  20. Sharma G.K., Pant P., Jain P.K., Kankar P.K., Tandon P. Numerical and experimental analysis of heat transfer in inductive conduction based wire metal deposition process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 5, pp. 2395-2407. doi: <https://doi.org/10.1177/09544062211028267>.
  21. Bao L., Wang B., You X., Li H., Gu Y., Liu W. Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 151, art. no. 119422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119422>.
  22. Mortimer J., Rudnev V., Clowes D., Shaw B. Intricacies of Induction Heating of Wires, Rods, Ropes & Cables. *Wire Forming Technology International*, Winter 2019, pp. 46-50.
  23. Lope I., Acero J., Carretero C. Analysis and Optimization of the Efficiency of Induction Heating Applications With Litz-Wire Planar and Solenoidal Coils. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 7, pp. 5089-5101. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2478075>.
  24. Fisk M., Ristinmaa M., Hultkrantz A., Lindgren L.-E. Coupled electromagnetic-thermal solution strategy for induction heating of ferromagnetic materials. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, vol. 111, pp. 818-835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.07.009>.
  25. Siesing L., Frogner K., Cedell T., Andersson M. Investigation of Thermal Losses in a Soft Magnetic Composite Using Multiphysics Modelling and Coupled Material Properties in an Induction Heating Cell. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2016, vol. 08, no. 09, pp. 182-196. doi: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2016.89018>.
  26. Amarulloh A., Haikal H., Atmoko N.T., Utomo B.R., Setiadi D., Marchant D., Zhu X., Riyadi T.W.B. Effect of power and diameter on temperature and frequency in induction heating process of AISI 4140 steel. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 26-34. doi: <https://doi.org/10.31603/mesi.6782>.
  27. Shang F., Sekiya E., Nakayama Y. Application of High-Frequency Induction Heating Apparatus to Heat Treatment of 6061 Aluminum Alloy. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52, no. 11, pp. 2052-2060. doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-M2011825>.
  28. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Многомасштабное моделирование в электротехнике*. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. 255 с.
  29. Kovachki N., Liu B., Sun X., Zhou H., Bhattacharya K., Ortiz M., Stuart A. Multiscale modeling of materials: Computing, data science, uncertainty and goal-oriented optimization. *Mechanics of Materials*, 2022, vol. 165, art. no. 104156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104156>.
  30. Ryu C.J., Kudeki E., Na D.-Y., Roth T.E., Chew W.C. Fourier Transform, Dirac Commutator, Energy Conservation, and Correspondence Principle for Electrical Engineers. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2022, vol. 7, pp. 69-83. doi: <https://doi.org/10.1109/JMMCT.2022.3148215>.
  31. Режим доступу: <https://www.comsol.com> (Дата звернення: 22.03.2023).
  2. Lezama F., Soares J., Hernandez-Leal P., Kaisers M., Pinto T., Vale Z. Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 4081-4088. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>.
  3. Sinha A., Basu A.K., Lahiri R.N., Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P.A. Setting of Market Clearing Price (MCP) in Microgrid Power Scenario. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596357>.
  4. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, pp. 402-411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
  5. Zolotarev V.M., Shcherba A.A., Karpushenko V.P., Peretiakho Yu.V., Zolotarev V.V., Oboznyi A.L. *Recommendations for the selection of characteristics, designs and application of self-carrying insulated wires produced by PJSC YUZH-CABLE WORKS for overhead power lines of increased reliability and safety*. Kharkiv, Maidan Publ., 2008. 62 p. (Ukr).
  6. Peschke E., Olshausen R. *Cable Systems for High and Extra-High Voltage*. MCD Verlag, 1999. 296 p.
  7. Shydlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotariev V.M., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. *Polymer insulated cables for extra high voltage*. Kyiv, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2013. 550 p. (Rus).
  8. Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Increasing noise immunity of cables for fire protection systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 54-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.07>.
  9. Kurylenko O.V., Blinov I.V., Parus E.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 4, pp. 44-54. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.044>.
  10. Nijman E., Buchegger B., Böhrer E., Rejlek J. Experimental Characterization and Dynamic Modelling of Electrical Cables. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2023, vol. 5, no. 2, pp. 888-896. doi: <https://doi.org/10.4271/2022-01-0952>.
  11. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal Action of the Pulse of the Current of a Short Artificial-Lightning Stroke on Test Specimens of Wires and Cables of Electric Power Objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 544-555. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.
  12. Shazly J.H., Mostafa M.A., Ibrahim D.K., Abo El Zahab E.E. Thermal analysis of high-voltage cables with several types of insulation for different configurations in the presence of harmonics. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, vol. 11, no. 14, pp. 3439-3448. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0862>.
  13. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric energy loss at energy exchange between capacitors as function of their initial voltages and capacitances ratio. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 9-11. doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.03.009>.
  14. Beletsky O.A., Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Dependences of power characteristics of circuit at charge of supercapacitors. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 1, pp. 3-10. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.003>.
  15. Ochinn P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 738-739, pp. 451-455. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
  16. Vinnychenko D.V. Influence of electrical parameters of high-voltage electric-discharge systems for synthesis of nanocarbon on their performance and specific power inputs. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 4, pp. 95-97. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.04.095>.
  17. Ametani A., Xue H., Ohno T., Khalilhezahad H. *Electromagnetic Transients in Large HV Cable Networks: Modeling and calculations*. The Institute of Engineering Technology, 2021. 591 p. doi: <https://doi.org/10.1049/PBPO204E>.
  18. Mokhort A.V., Chumak M.G. *Thermal processing of metals*. Kyiv, Lybid Publ., 2002. 512 p. (Ukr)
  19. Rudnev V., Loveless D., Cook R. *Handbook of induction heating*. Boca Raton, CRS Press, 2017. 776 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315117485>.

#### REFERENCES

I. Kurylenko O.V., Zhuikov V.Y., Denysiuk S.P. Use of dynamic tariffication for optimization microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. *Technical Electrodynamics*, 2022, no. 3, pp. 37-48. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.03.037>.

20. Sharma G.K., Pant P., Jain P.K., Kankar P.K., Tandon P. Numerical and experimental analysis of heat transfer in inductive conduction based wire metal deposition process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 5, pp. 2395-2407. doi: <https://doi.org/10.1177/09544062211028267>.
21. Bao L., Wang B., You X., Li H., Gu Y., Liu W. Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 151, art. no. 119422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119422>.
22. Mortimer J., Rudnev V., Clowes D., Shaw B. Intricacies of Induction Heating of Wires, Rods, Ropes & Cables. *Wire Forming Technology International*, Winter 2019, pp. 46-50.
23. Lope I., Acero J., Carretero C. Analysis and Optimization of the Efficiency of Induction Heating Applications With Litz-Wire Planar and Solenoidal Coils. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 7, pp. 5089-5101. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2478075>.
24. Fisk M., Ristinmaa M., Hultkrantz A., Lindgren L.-E. Coupled electromagnetic-thermal solution strategy for induction heating of ferromagnetic materials. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, vol. 111, pp. 818-835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.07.009>.
25. Siesing L., Frogner K., Cedell T., Andersson M. Investigation of Thermal Losses in a Soft Magnetic Composite Using Multiphysics Modelling and Coupled Material Properties in an Induction Heating Cell. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2016, vol. 08, no. 09, pp. 182-196. doi: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2016.89018>.
26. Amarulloh A., Haikal H., Atmoko N.T., Utomo B.R., Setiadi D., Marchant D., Zhu X., Riyadi T.W.B. Effect of power and diameter on temperature and frequency in induction heating process of AISI 4140 steel. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 26-34. doi: <https://doi.org/10.31603/mesi.6782>.
27. Shang F., Sekiya E., Nakayama Y. Application of High-Frequency Induction Heating Apparatus to Heat Treatment of 6061 Aluminum Alloy. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52, no. 11, pp. 2052-2060. doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-M2011825>.
28. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. *Multiscale modeling in electrical engineering*. Kyiv, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2011. 255 p. (Rus).
29. Kovachki N., Liu B., Sun X., Zhou H., Bhattacharya K., Ortiz M., Stuart A. Multiscale modeling of materials: Computing, data science, uncertainty and goal-oriented optimization. *Mechanics of Materials*, 2022, vol. 165, art. no. 104156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104156>.
30. Ryu C.J., Kudeki E., Na D.-Y., Roth T.E., Chew W.C. Fourier Transform, Dirac Commutator, Energy Conservation, and Correspondence Principle for Electrical Engineers. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2022, vol. 7, pp. 69-83. doi: <https://doi.org/10.1109/JMMCT.2022.3148215>.
31. Available at: <https://www.comsol.com> (accessed 22 March 2023).

Надійшла (Received) 11.04.2023  
 Прийнята (Accepted) 29.06.2023  
 Опублікована (Published) 02.01.2024

Щерба Анатолій Андрійович<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН України, д.т.н.,  
 Подольцев Олександр Дмитрович<sup>1</sup>, д.т.н., гол.н.с.,  
 Супруновська Наталія Ігорівна<sup>1</sup>, д.т.н., пров.н.с.,  
 Білянн Роман Володимирович<sup>2</sup>, к.т.н.,  
 Антонець Тарас Юрійович<sup>2</sup>, к.т.н.,  
 Маслюченко Ігор Миколайович<sup>3</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
 03057, Київ, пр. Берестейський, 56,  
 e-mail: iednat1@gmail.com (Corresponding Author)

<sup>2</sup> ПАТ «Завод Південкабель»,

61099, Харків, вул. Автогенна, 7,

<sup>3</sup> Науково-технічний центр ДП НАЕК «Енергоатом»,  
 01054, Київ, вул. Гоголівська, 22-24.

#### How to cite this article:

Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Suprunovska N.I., Bilianin R.V., Antonets T.Yu., Masluhenko I.M. Modeling and analysis of electro-thermal processes in installations for induction heat treatment of aluminum cores of power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 1, pp. 51-60. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.07>

A.A. Shcherba<sup>1</sup>, O.D. Podoltsev<sup>1</sup>, N.I. Suprunovska<sup>1</sup>, R.V. Bilianin<sup>2</sup>,  
 T.Yu. Antonets<sup>2</sup>, I.M. Masluhenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of  
 Ukraine,

56, Prospect Beresteyskiy, Kyiv-57, 03057, Ukraine.

<sup>2</sup> YUZHicable WORKS, PJSC,

7, Avtogenna Str., Kharkiv, 61095, Ukraine.

<sup>3</sup> Scientific and Technical Center SE «NNEGC «Energoatom»,  
 22-24, Gogolivska Str., Kyiv, 01054, Ukraine.

#### Modeling and analysis of electro-thermal processes in installations for induction heat treatment of aluminum cores of power cables.

**Introduction.** The development of the electric power industry is directly related to the improvement of cable lines. Cable lines meet modern requirements for reliability, they are increasingly used. **Problem.** Currently, power cables with an aluminum multi-conductor core, which requires heat treatment - an annealing process at the stage of the technological manufacturing process, are widespread. This process makes it possible to desirably reduce the electrical resistance of the wire and increase its flexibility. For effective use of induction heating during annealing of an aluminum core, it is necessary to determine the optimal frequency of the power source of the inductor. Considering the long length of the inductor and the large number of its turns, the numerical calculation of the electromagnetic field, which is necessary for calculating the equivalent R, L parameters of the turns of the inductor and its efficiency, requires significant computer resources. The **goal** is to develop a computer model for calculating electro-thermal processes in an induction plant for heating (up to the annealing temperature) an aluminum core of a power cable moving in the magnetic field of a long multi-turn inductor, as well as obtaining frequency dependences of the equivalent R, L parameters of such an inductor and determining the optimal the value of the frequency of the power source, which corresponds to the maximum value of the electrical efficiency of the inductor.

**Methodology.** The mathematical model was developed to analyze the coupled electromagnetic and thermal processes occurring in a core moving in a time-harmonic magnetic field of an inductor at a constant speed. The differential equations for the electromagnetic and temperature fields, taking into account the boundary conditions, represent a coupled electro-thermal problem that was solved numerically by the finite element method using the Comsol software package. For a detailed analysis of the electromagnetic processes in the inductor, an additional problem was considered at the level of the elementary cell, which includes one turn of the inductor and a fragment of the core located near this turn. **Results.** According to the results of the calculation of the electromagnetic field in the area of the elementary cell, the equivalent electrical parameters of one turn of the inductor and the entire multi-turn inductor were calculated depending on the frequency of the electric current. The frequency dependences of the electrical efficiency of the inductor were calculated. **Originality.** Taking into account the design features of the inductor (its long length and large number of turns), the method of multiscale modeling was used. Electro-thermal processes in the core were studied at the macro level, and the distribution of the electromagnetic field and electric current density in the cross-section of the massive copper turn of the inductor was calculated at the micro level – at the level of an elementary cell containing only one turn of the inductor. The frequency dependences of the equivalent R, L parameters of the inductor, taking into account the skin effect, the proximity effect, and the geometric effect, were obtained, and the quantitative influence of the electric current frequency on these effects was studied. **Practical value.** The dependence of the electrical efficiency of the inductor on the frequency of the power source was obtained and it was shown that for effective heating of an aluminum core with a diameter of 28 mm, the optimal value of the frequency is in the range of 1–2 kHz, and at the same time the electrical efficiency reaches values of  $\eta_{ind} = 0.3–0.33$ , respectively. References 31, figures 10, table 1.

**Key words:** electromagnetic processes, induction heat treatment, aluminum conductive core, power cables, multiscale modeling, current frequency, inductor efficiency.