

РОЗДІЛ 8. ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОЇ АНАЛОГІЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ

Щерба А.А., д.т.н., проф., Перетятко Ю.В., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Олійник В.С., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра атомних електростанцій та інженерної теплофізики

Вступ. До показників якості металу для виготовлення мідних жил силових кабелів (однорідність складу, хімічна чистота та ін.) пред'являються високі вимоги, забезпечення яких задовольняє використання індукційної печі [1, 2].

Якість мідної катанки тісно пов'язана з проведенням регулярної діагностики технічного стану установок для її промислового виготовлення при встановлених промислових умовах із врахуванням вимог до електричних та енергетичних характеристик електротехнічного обладнання та оптимальних режимів його роботи. Існуючі методи моніторингу поточного стану таких установок не дозволяють оцінити технічний стан термофутеровки індукційної печі в динаміці, що унеможливорює планування ремонту печі. Варто зауважити, що термофутеровка кладеться з окремих цеглин і під впливом розплаву високої температури цегляна конструкція руйнується, що призводить до проникнення рідкого металу між цеглою, в стінки або шви, та подальшим її розтіканням. Таким чином недостатня інформація щодо руйнації матеріалу термоізоляції індукційних установок призводить до забруднення ним мідного розплаву, що унеможливорює виготовлення мідної катанки з вмістом міді 99,99% і відповідного підвищення пропускної здатності силових кабелів.

Тому актуальним залишаються дослідження присвячені аналізу неоднорідних розподілів електромагнітного і температурного полів в індукційній печі з урахуванням конфігурації можливих дефектів у вигляді витоків розплаву в її термоізоляцію. Такі дослідження дозволять вдосконалити існуючі методи діагностики індукційних установок шляхом оцінки як глибини і розмірів протікань мідного розплаву в їхню термоізоляцію, так і зміну у часі розподілу градієнту температур на корпусі установки. В свою чергу таке вдосконалення пов'язане з розробкою електротеплової моделі індукційної каналної печі для моделювання тривалих у часі електромагнітних та теплових процесів. У роботі [2] показано, що процеси тепло- та масопереносу, які протікають при безперервному литті катанки, можуть моделюватись еквівалентною RC схемою заміщення з нелінійними елементами та комутаційними ємкостями. В представлених дослідженнях увага була

зосереджена на отриманні динамічних характеристик процесу нагріву без врахування витоків розплаву у термоізоляцію.

Слід зауважити, що характерна особливість дослідження електромагнітних, теплових і магнітогідродинамічних процесів полягає в наявності фазових переходів, зміні маси розплаву, і т.д., а також динаміці та неперервності протікання взаємопов'язаних електромагнітних та теплових процесів [2].

Мета роботи. Метою досліджень даної роботи є розробка уточненої схемної моделі зв'язаних електромагнітних та теплових процесів на основі методу електротеплової аналогії з її комп'ютерною реалізацією.

Матеріали і результати досліджень. Класичний аналітичний опис тепло- та електропереносу процесів міститься у ряді робіт [2-5]. Разом з тим створення математичного моделювання таких процесів дозволяє доповнити та уточнити особливості їх динаміки, забезпечуючи визначення додаткових характеристик роботи промислового обладнання та удосконалення й оптимізації технологічних процесів, як результат реалізувати контроль, діагностику та запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Незалежно від функціонального призначення, конструкції в якій взаємопов'язані теплові та електромагнітні процеси представляють собою системи передачі теплового потоку, які, як правило, складні геометрично, конструктивно і фізично, а складові їх матеріали неоднорідні. Проектування таких систем передбачає проведення розрахунків теплофізичних процесів, метою яких є визначення температурних полів повних конструкцій. Теплові розрахунки кожного елемента з безперервними властивостями можливі традиційно як чисельними методами, так і аналітичним рішенням рівняння теплопровідності. В обох випадках застосування теорії безперервного середовища для моделювання провідності з'єднання твердих тіл ускладнюється тим, що в контактах відбувається розрив полів температури і теплофізичних властивостей, що приводить до порушення фізико-математичної коректності задачі теплопровідності, що має на увазі однозначність, достатність граничних умов і безперервну залежність рішення в залежності від них.

Математичний опис процесів тепло- та електропровідності тіл має багато спільного, що надає можливість застосовувати електротеплову аналогію [3,4] та використовувати її для комбінації чисельного та схемного розрахунків.

Електротеплова аналогія. Для одновимірної моделі процес переносу теплової енергії описується рівнянням Фур'є

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (1)$$

де q – щільність теплового потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності (або теплопровідність) середовища; T – температура. Знак мінус вказує на те, що тепловий потік виникає у напрямку від'ємного температурного градієнту.

Згідно закону Ома процес переносу заряду (щільність електричного струму) описується рівністю

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (2)$$

де j – щільність струму; γ – електрична провідність середовища; E – напруженість електричного поля. Враховуючи, що $\vec{E} = -\text{grad}\phi$, рівняння (2) можна переписати у вигляді

$$\vec{j} = -\gamma \text{grad}\phi \quad (3)$$

отримуючи повну аналогію з рівнянням (1).

У найпростішому випадку потік тепла через нескінченно однорідний шар ізоляції товщиною l , на поверхнях якої підтримуються температури $T_{\text{ш},1}$ та $T_{\text{ш},2}$, $T_{\text{ш},1} > T_{\text{ш},2}$, рівняння (1) можна записати у вигляді

$$q = \lambda \frac{T_{\text{ш},1} - T_{\text{ш},2}}{l} = \frac{\lambda}{l} \Delta T \quad (4)$$

де $\Delta T = T_{\text{ш},1} - T_{\text{ш},2}$ – контактний перепад температур, а відношення $R_{\text{тепл}} = \frac{l}{\lambda}$ – тепловий опір однорідного шару, розмірність якого $\left(\frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}\right)$.

Для переносу електричного заряду через нескінченно однорідну ділянку площею S та товщиною l з рівняння (3) отримуємо щільність

$$j = \gamma \frac{\phi_1 - \phi_2}{l} = \frac{I}{S}$$

Звідки $I = \frac{S\gamma}{l} (\phi_1 - \phi_2) = \frac{S\gamma}{l} U_{12} = \frac{U_{12}}{R_{\text{елект}}}$ – відомий закон Ома [3-5],

де I – сила струму; $U_{12} = \phi_1 - \phi_2$ – падіння напруги.

Величину $R_{\text{елект}}$ вважають електричним опором ідеалізованого резистивного елемента. Для прямолінійного провідника

$$R_{\text{елект}} = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S} \quad \text{або} \quad R_{\text{елект}} = \frac{U}{I} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{I} \quad (5)$$

значення електричного опору залежить від геометрії резистора і його матеріалу, де ρ – питомий опір; γ – питома провідність; l та S – довжина та поперечний переріз провідника, відповідно.

Таким чином, склалась певна відповідність між математичним поданням теплового та електричного опорів. Під тепловим опором розуміють питому величину, яка відноситься до одиничної площі та характеризується щільністю теплового потоку. Натомість електричний опір характеризується електричним струмом, а не його щільністю.

З метою узгодження теплових та електричних величин рівняння (4) можна подати у інтегральній формі:

$$P = qS = \frac{\Delta T}{R_{\text{тепл}}} \quad (6)$$

де $R_{\text{тепл}}$ – повний або абсолютний тепловий опір з розмірністю $\left(\frac{\text{К}}{\text{Вт}}\right)$ [3-5].

Елементи теплових кіл.

Встановивши відповідність між тепловими та електричними величинами згідно теорії електротеплової аналогії можливе створення «теплових схем».

А отже відповідними аналогами електричного потенціалу і струму є різниця температур ΔT і потік тепла згідно аналізу виразів (5) та (6). Звідки розрахунок теплового опору шару ізоляції здійснюється за виразом [3, 4]

$$R_{\text{тепл}_m} = \frac{T_{\text{ш},1} - T_{\text{ш},2}}{q_x} = \frac{\Delta T}{q_x} = \frac{l}{\lambda S} \quad (7)$$

де l та S – відповідно товщина та площа поверхні стінки теплової ізоляції, через яку передається тепло; λ – теплопровідність матеріалу ізоляції.

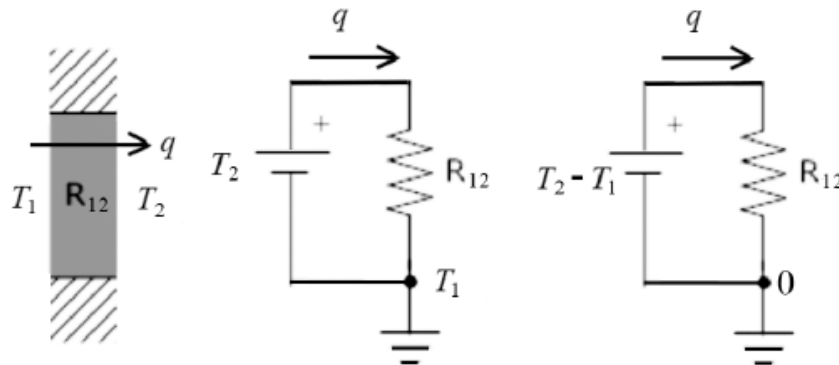


Рисунок 1 – Схемне моделювання теплового опору

Зважаючи на те, що тепла ізоляція розташована не у вакуумі, необхідно враховувати явище тепломасообміну (взаємозв'язаний перенос енергії та речовини у просторі та пов'язане з різницею концентрацій речовини).

Перенос енергії здійснюється за рахунок механізму теплопровідності, конвекції та випромінювання. Зв'язок швидкості зміни теплового потоку при конвекційному теплообміні між твердою тепловою ізоляцією та розплавом/навколишнім середовищем встановлює закон Ньютона-Ріхмана. У диференційній формі

$$\frac{dq}{dt} = hS(T_{\text{н.с.}} - T_{\text{ш}}) \quad (8)$$

де $T_{\text{ш}}$ – температура тіла, $T_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища, h – коефіцієнт теплопередачі (конвекції), що залежить від геометрії тіла, стану поверхні, режиму теплопередачі і інших факторів.

Виходячи з (8) опір теплового потоку від ізоляційної поверхні з температурою $T_{\text{ш}}$ до розплаву/навколишнього середовища з температурою $T_{\text{н.с.}}$

$$R_{\text{тепл}_\text{конв}} = \frac{T_{\text{ш}} - T_{\text{н.с.}}}{q_x} = \frac{l}{hS} \quad (9)$$

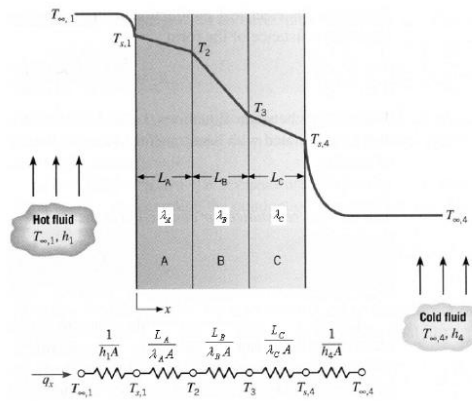


Рисунок 2 – Послідовне з'єднання стінок

$$R_{\text{тепл.еквів}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{q_x} = \frac{1}{S} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{l_A}{\lambda_A} + \frac{l_B}{\lambda_B} + \frac{l_C}{\lambda_C} + \frac{1}{h_2} \right).$$

Оскільки $q = CT$, де C – теплоємність тіла, то диференціальне рівняння (8) можна записати як

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hS}{C} (T_{\text{н.с.}} - T_{\text{ш}}) = k(T_{\text{н.с.}} - T_{\text{ш}})$$

Розв'язок даного рівняння має вигляд:

$$T = T_{\text{н.с.}} + (T_0 - T_{\text{н.с.}}) e^{-kt},$$

де T_0 – позначає початкову температуру тіла.

Таким чином, температура тіла зменшується експоненційно в міру охолодження, наближаючись до температури навколишнього середовища.

Швидкість охолодження залежить від параметра $\lambda = \frac{hS}{C}$ – коефіцієнта теплопровідності.

Оскільки температура ізоляційного шару змінюється із зміною кількості тепла q , то окрім теплового опору ізоляційний шар характеризується теплоємністю (тепломасою), тобто кількістю накопиченого тепла, що можна подати як

$$q = C \frac{d(T_2 - T_1)}{dt} \quad (10)$$

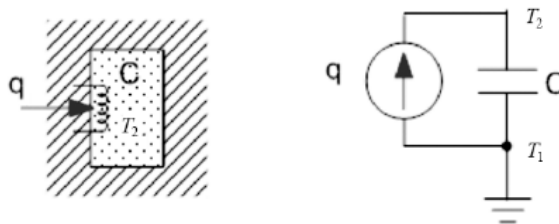


Рисунок 3 – Схемне моделювання теплоємності

Вираз (10) узгоджується з взаємозв'язком між напругою та струмом на електричні ємності

$$i_c(t) = C \frac{du_c}{dt}. \quad (11)$$

З теорії тепломасообміну теплова ємність визначається як добуток теплоємності C_p та маси m активних елементів індукційної одиниці

$$C = C_p m$$

З порівняння виразів (10) та (11) слідує, що тепловий потік на електричних схемах заміщення моделюється джерелом струму

$$P(t) = \frac{dq}{dt} \Leftrightarrow i(t) = \frac{dQ}{dt}$$

Опис електротеплової динамічної моделі індукційної каналної печі.

Комп'ютерна модель взаємопов'язаних електротеплових процесів індукційній каналній печі із врахуванням фазових переходів матеріалу; дискретного збільшення маси розплавленого металу; підтримання необхідної робочої температури в зоні розплаву; безперервного лиття катанки, що пов'язане з зменшенням маси розплавленого металу детально описані у роботі [2]. Для дослідження значень температур, його градієнтів та встановлення областей високих температур в локальних областях футеровки оригінальна електротеплова динамічна модель була уточнена до вигляду, представленому на рис. 4.

При побудові деталізованої моделі зберігається структурний зв'язок між електричною та тепловою нелінійним задачами, запропонований [2], та основні положення мультифізичних задач, наведених в [7], враховані методики прогнозування ресурсу печі за рахунок зміни ізотерм на її корпусі, запропоновані у [8]. Ділянка термічного опору футеровки була розділена на 18 секцій по довжині та 4 шари по товщині.

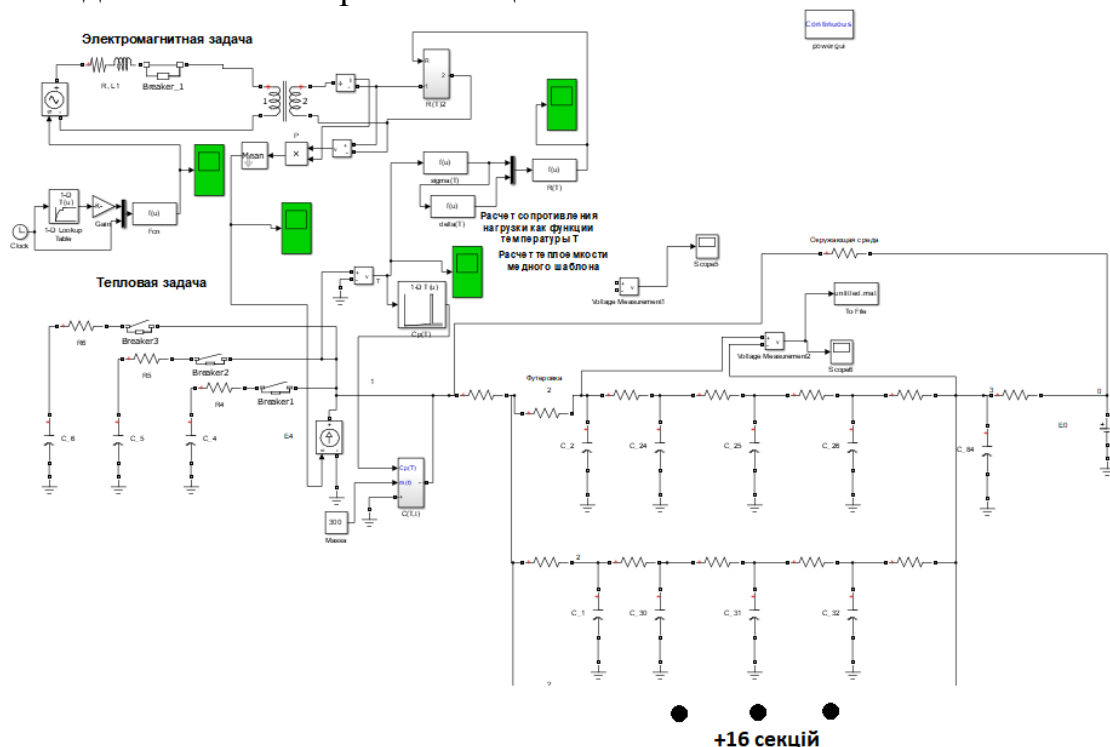


Рисунок 4 – Електротеплова динамічна модель індукційної пічки

Результати валідації уточненої моделі представлені на рис. 5, як залежність зміни температури мідного шаблону, який нагрівається індукційною установкою протягом 36 годинного періоду (а) та масштабованого для початку заповнення (б).

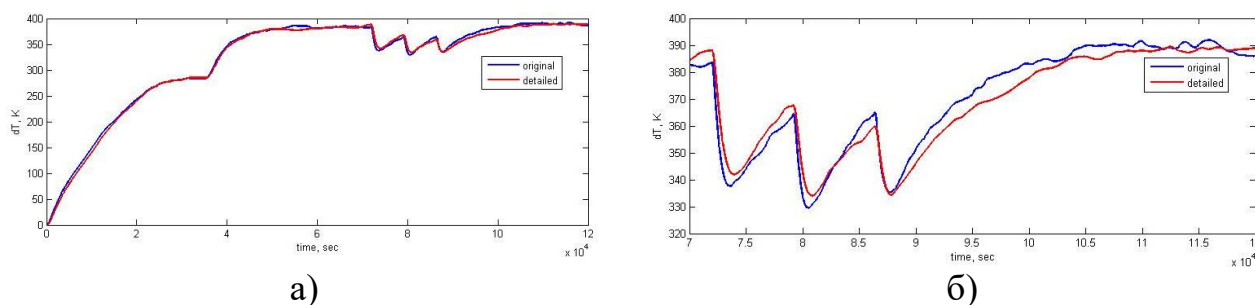


Рисунок 5 – Порівняння перепаду температури на стінці в оригінальній (синя крива) та в уточненій (червона) схемах

Перевірку адекватності запропонованої уточненої моделі здійснюється шляхом порівняння графіків зміни температури мідного шаблону рис. 5. Незначні відхилення отриманих кривих пов'язані з вибором математичного решателя.

Запропонована деталізація дозволить виконати моделювання поступового просочування розплавленого металу вглиб футеровки.

Висновки. Порівняння результатів чисельного розрахунку електротеплових динамічних процесів в індукційній каналній печі із використанням мультифізичного моделювання засвідчує достовірність результатів та адекватність деталізованої моделі.

Результати моделювання ілюструють можливість застосування електротеплової аналогії в питаннях створення двовимірних динамічних моделей з нелінійними елементами. Дане твердження є важливим, оскільки дозволяє опосередковано оцінити зміни градієнта температур на корпусі печі шляхом зміни термічного опору футеровки.

Перелік посилань

1. UPCAST Products: офіційний сайт компанії UPCAST. [Електронний ресурс]. – <https://www.upcast.com/ru/>
2. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н., Золотарев В. М., Белянин Р. В. Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной каналной печи для производства медной катанки // Технічна електродинаміка. - 2017. - № 4. - С. 55-64.
3. A. F. Robertson, Daniel Gross An Electrical-Analog Method for Transient Heat-Flow Analysis // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – August 1958. – Vol. 61, No.2. – Pp.105-115
4. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена, – СПб: СПбГУИТМО, 2010. – 93с.
5. Gerald Parnis Building Thermal Modelling Using Electric Circuit Simulation. – School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering University of New South Wales Sydney, Australia, 2012. – Pp. 137
6. Золотарев В.М., Щерба М.А., Золотарев В.В., Белянин Р.В. Трехмерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки.// Техн. електродинаміка. – 2017. – № 3. – С. 13–21.
7. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Институт электродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
8. Zolotaryov V.M., Shcherba M.A., Belyanin R.V., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture. Electrical engineering and electromechanics. 2018. № 1. P. 35-40.