

## **В І Д Г У К**

офіційного опонента Сахацького Віталія Дмитровича  
на дисертаційну роботу Білянїна Романа Володимировича  
**"Тепловий контроль технічного стану індукційних установок  
для виробництва мідної катанки"**,  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.11.13 – прилади і  
методи контролю та визначення складу речовин

### **1. Актуальність теми дисертації**

На даний час мідна катанка є одним із основних матеріалів, який використовується для виготовлення струмопровідних жил високовольтних кабелів. При цьому ці жили повинні мати високу чистоту матеріалу з відсотком міді у ньому більш ніж 99,9%. Для отримання катанки такої високої якості переважно використовують метод її вертикального витягування із безкисневого мідного розплаву електроіндукційних установок.

При експлуатації індукційних печей надважливим процесом є діагностика та контроль їх технічного стану, оскільки його погіршення внаслідок забруднення мідного розплаву шлаками впливає на якість отриманої продукції.

Основним недоліком існуючих систем контролю технічного стану індукційних печей є те, що моніторинг здійснюється на основі поточного вимірювання споживаної електричної потужності, повного електричного імпедансу індуктора, а також різниці температури води між входом і виходом контуру охолодження, що не дозволяє визначити розташування, розміри областей протікань розплаву, глибину проникнення металу у термоізоляцію і прогнозувати закономірності зменшення залишкового ресурсу і енергоефективності установок та погіршення якості мідного розплаву на ранніх стадіях виробництва струмопровідних жил високовольтних кабелів.

Тому важливою науково-прикладною задачею контролю технічного стану індукційних печей є розробка таких методів визначення ступеню зношення футеровки індукційних печей, які б дозволяли оцінити місце і геометричні характеристики витоків розплаву міді в дефекти термоізоляції.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках таких держбюджетних НДР: "Розвинути теорію регулювання динамічних характеристик електророзрядних систем та часткових розрядів і електромагнітних напруженостей у полімерній ізоляції високовольтного обладнання" (ДР №0112U008204) та "Розробити електромагнітні системи та напівпровідникові перетворювачі з регульованими параметрами для індукційної термообробки феромагнітних деталей складної форми" (ДР №0115U004397), що виконані у 2013–2018 рр. за Постановою Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України.

Отже, тема дисертації, в якій за допомогою запропонованих методів розв'язується науково-прикладна задача теплового контролю технічного стану індукційних установок, що дозволяє визначити інтенсивність локальної руйнації

ізоляції та поточного погіршення якості мідного розплаву і катанки, забезпечити підвищення, ресурсу і безпеки установок та якості мідної катанки, безумовно актуальна.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Біляніна Р. В., є високою й базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження. Теоретичні дослідження виконано із використанням фундаментальних засад теорії теплопровідності, теорії електричних ланцюгів, методу електротеплових аналогій, вирішенні електродинамічних задач за допомогою рівнянь Максвелла. При побудові математичних моделей та проведенні чисельних експериментів використанні сучасні програмні пакети. Отримані результати відповідають результатам практичних досліджень, що підтверджує ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

## **3. Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур рішення диференціальних рівнянь, відповідністю змісту математичних моделей реальним конструкціям індукційних установок та фізичній суті процесів, які у них здійснюються. Можна стверджувати, що одержані результати логічно та математично аргументовані. Результати теоретичних досліджень, запропоновані методи теплового контролю та міри покращення технічного стану індукційних установок для підвищення якості мідної катанки показали свою працездатність і впроваджені на наукових і виробничих підприємствах України та в навчальному процесі, про що свідчать акти впровадження.

## **4. Основні наукові результати дисертації**

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Уперше розроблено математичну модель усереднених електротеплових процесів у мідному розплаві та багатошаровій ізоляції індукційних установок виробництва мідної катанки з урахуванням виникаючих нелінійних залежностей, що забезпечило реалізацію експрес-термоконтролю стану установок при тривалих перехідних електротермічних процесах.

2. Уперше розроблено математичну модель поточного розподілу температури у багатошаровій ізоляції індукційних установок з урахуванням тривимірної конфігурації її елементів, нелінійних характеристик матеріалів і змінень конфігурацій металевих протікань в ізоляцію, що дозволяє на практиці визначити координати та розміри дефектів ізоляції.

3. Розвинуто метод поточного теплового контролю установок виробництва мідної катанки на основі вимірювання та аналізу не тільки імпедансу індуктора і температури води у системі охолодження, але й визначення об'ємного і поверхневого розподілів температури на тривимірній математичній моделі та їх порівнянням з результатами практичного виміру температури в локальних областях на поверхні ізоляції, що забезпечує більш точне прогнозування ресурсу індукційних установок.

4. Науково обгрунтовано технологію виготовлення термоізоляції печі (без змінення її загальної товщини) на основі визначення особливостей розвитку протікань мідного розплаву в термоізоляцію установок та процесів змінень розподілу в ній температури, що забезпечило підвищення ефективності, ресурсу і безпеки установок та якості мідної катанки з відсотком міді в ній більш ніж 99,9%.

## **5. Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Отримані здобувачем теоретичні результати є основою створення нових методів теплового контролю технічного стану індукційних установок, що дає можливість оцінити стан недоступних для огляду внутрішніх шарів футеровки (що було неможливо раніше) і, таким чином, здійснювати більш точне прогнозування залишкового ресурсу печі.

Запропоновані метод визначення ступеня деградації футеровки індукційних каналних печей при виробництві мідної катанки в кабельній промисловості, а також нова технологія виготовлення термоізоляції дає можливість збільшити ресурс футеровки індукційної печі та зменшити її теплові втрати при експлуатації.

Запропоновані теплові методи контролю футеровки індукційних печей та рекомендації з оптимізації продуктивності установок, їх питомих енерговитрат та збільшення ресурсу впроваджено в ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ", Інституті електродинаміки НАН України і в навчальному процесі кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ "ХПІ", що підтверджується відповідними актами впровадження.

Впровадження результатів роботи у виробництво вже дозволило отримати у 2019 році перші позитивні результати:

- в перші місяці після запуску установки знижено на 20°C температуру на її поверхні (зменшилася до 110°C, замість 130°C, як було раніше);
- зменшено на 5% питомі енерговитрати на 1 т мідної катанки відносно енерговитрат в пускових режимах і на 15% відносно витрат перед зупинкою установки;
- покращено умови праці спеціалістів, що обслуговують установку;
- підвищено якість мідної катанки (на 10% збільшено кількість катанки з відсотковим вмістом міді не менше 99,99%).

## **6. Повнота викладення результатів в опублікованих працях**

Основний зміст дисертації відображено у 12 наукових публікаціях, з них: 8 статей входять до переліку наукових фахових видань, які рекомендовані ДАК України (5 з них у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз Scopus і Web of Science), 2 статті у наукових виданнях, які не перереєстровані, та 2 праці у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Дисертація пройшла апробацію на 5 міжнародних науково-технічних конференціях.

Це дозволяє зробити висновок про ознайомлення широкого кола науковців з основними положеннями дисертаційної роботи. В опублікованих працях забезпечена повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи.

## **7. Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Білянїна Романа Володимировича складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків.

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність досліджень, поставлено їх мету та задачі, наведені методи досліджень, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про наукові публікації автора та апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану методів контролю технічного стану індукційних установок виготовлення мідної катанки.

Наведено вимоги до характеристик мідної катанки для виготовлення сучасних силових кабелів. Проаналізовано вплив домішок та дію реагентів на механічні і технологічні властивості міді. Проаналізовано існуючі методи виготовлення мідної катанки для кабельної промисловості. Встановлено, що на теперішній час в світі використовується два основні типи ліній лиття мідної катанки: це лінії неперервного лиття і подальшої гарячої прокатки та лінії неперервного вертикального лиття. Проаналізовано переваги та недоліки кожного методу.

Надано критичну оцінку існуючим методам контролю технічного стану плавильних печей для виготовлення мідної катанки, що використовується при виготовленні сучасних кабелів надвисоких напруг.

Встановлено, що існуючі методи та засоби діагностики стану працюючих промислових печей мають ряд серйозних недоліків стосовно точності визначення технічного стану теплоізоляції, контролю недоступних для огляду каналів, точності визначення фактичного стану печі за терміном служби.

Обґрунтовано необхідність подальшого удосконалення методів діагностики і контролю технічного стану футеровки індукційних печей з метою збільшення їх ресурсу, зменшення енерговитрат і підвищення якості катанки.

Поставлені задачі дослідження для вирішення цієї мети.

**Другий розділ** присвячено моделюванню усереднених електротеплових процесів в індукційній печі при виготовленні мідної катанки для силових кабелів.

Надано опис електричних і теплових процесів, що виникають в індукційних каналних печах. Доведено, що постійні часу електромагнітної та теплової задач можуть відрізнятись на 4–6 порядків, розміри внутрішніх елементів об'єктів, які розглядаються, можуть відрізнятись більш ніж на порядок, а зміна їх розмірів і кривизни не збігається зі зміною градієнтів розрахункових величин.

Обґрунтовано, що при вирішенні поставлених задач не можна скористатися готовими програмним продуктом та алгоритмами побудови сіток кінцевих елементів при вирішенні систем диференціальних рівнянь. Тому виникає потреба розробити нові математичні моделі, які більш підходять до конкретних особливостей виникаючих задач.

За допомогою методу електротеплових аналогій для аналізу взаємозв'язаних електричних й теплових процесів, що протікають в одній установці, розроблено електричну модель індукційної установки висхідного вертикального лиття UPCAST з урахуванням тривалого характеру перебігу процесів (до 36 годин), наявності фазового переходу при плавленні мідного шаблону та особливостей основних технологічних операцій.

Виконано комп'ютерну реалізацію моделі в програмному середовищі Matlab/Simulink/SPS та отримані динамічні характеристики процесу індукційного нагріву й плавлення мідного шаблону. При цьому використано підхід штучного зменшення частоти джерела електроживлення з одночасним пропорційним збільшенням усіх індуктивностей в еквівалентному електричному колі, виходячи з умови  $\omega L = const$ .

Чисельно проаналізовано два режими роботи печі: пускового (коли здійснюється поступове нагрівання і плавлення мідного шаблону протягом 36 год) та режиму лиття катанки із одночасним завантаженням холодних мідних катодів і підтримки температури розплаву без виробництва катанки.

Для першого режиму виконано аналіз впливу температури навантаження на величину активної  $P(T)$  і реактивної потужностей  $Q(T)$  установки та коефіцієнт її потужності  $\cos \varphi(T)$ . Отримані залежності дають змогу реалізувати найбільшу енергоефективність процесу нагрівання мідного шаблону та здійснювати компенсацію реактивної потужності зміненням ємності компенсуючих конденсаторів в залежності від температури шаблону.

Показано, що в процесі нагрівання мідного шаблону до температури плавлення, для повної компенсації реактивної потужності, що споживається піччю на частоті 50 Гц, величина ємності конденсаторної батареї повинна зменшуватись приблизно на 10 % від ємності при початковій кімнатній температурі.

Для другого режиму визначено часові залежності активної потужності та температури міді при зануренні в розплав холодних мідних катодів, які дозволяють проводити оптимізацію технологічного процесу нагріву та дають змогу визначити допустиму масу катодів, які завантажують, коли температура розплаву залишається в необхідних межах.

Розроблено електричну схему заміщення індукційної установки, завдяки якій отримано залежності реальних активного  $R_{ex}$  і реактивного  $X_{ex}$  опорів індуктора від параметрів вторинного рідкометалевого контуру  $R_2'$  і  $X_2'$ .

Отримані залежності дають можливість оцінювати змінення конфігурації плавильного каналу по вимірним відхиленням величин  $R_{ex}$ ,  $X_{ex}$ , що розширює можливості корегування подальших режимів виробництва мідної катанки.

**Третій розділ** присвячено визначенню локальних об'ємних і поверхневих зон максимального нагрівання футеровки індуктора.

Розглянуто особливості методів контролю технічного стану та виявлення передаварійних ситуацій індукційних печей при виготовленні мідної катанки.

Розроблено тривимірну математичну модель індукційної установки виробництва мідної катанки для контролю об'ємних і поверхневих зон з максимальними температурами та їх градієнтами в багатошаровій термоізоляції. Модель відповідає всім кресленням елементів індукційної установки, до складу якої входить ванна з розплавом і багатошаровою термоізоляцією та індуктор із сформованим рідкометалевим каналом і суцільною термостійкою ізоляцією.

Здійснено розрахунки густини вихрових струмів у плавильному каналі шляхом розв'язку системи рівнянь Максвелла відносно векторного потенціалу  $A$  за відомими струмами у котушках індуктора та розподілу температури в елементах установки шляхом розв'язку рівняння теплового балансу відносно температури  $T$  нагрівання плавильного каналу в індукторі. Для цього об'єм елементів тривимірної моделі індукційної установки покривався сіткою кінцевих елементів – тетраєдрів. Отримані диференційні рівняння записувалися для цих скінчених елементів об'єму і доповнювалися граничними умовами на їх межах і потім розв'язувалися чисельними методами в пакеті Comsol.

Проведено чисельний експеримент по визначенню локальних об'ємних і поверхневих зон максимального нагрівання термоізоляції в номінальних і аварійних режимах роботи установки. Знайдено змінення у часі розподілу температури  $T$  у мідному шаблоні при первинному запуску індуктора.

Слід відмітити, що вимірювання реальної температура шаблону за допомогою прикріпленого датчика температури підтвердили результати розрахунків.

Розраховано також розподіл температури в елементах індуктора, зокрема в багатошаровій термоізоляції та на її зовнішній поверхні.

Виявлені області максимальної температури  $T_{max}$  та області максимальних градієнтів температури  $\Gamma_{T_{max}}$ , які є ключовими передумовами появи тріщин у футеруванні.

Розраховано та проведено аналіз поточного змінення градієнтів температури  $G_T$  в поперечному перерізі індуктора. Встановлено їх зростання в ізоляції протягом перших 18 годин нагрівання мідного шаблону та зменшення при її прогріванні під час останньої стабілізаційної паузи.

Так максимальні градієнти, які спостерігаються для моменту нагріву  $t_4 = 18$  год (при максимальній температурі шаблону  $1230^\circ\text{C}$ ), досягають значення  $G_{T_{\max}} = 169^\circ\text{C}/\text{см}$ . При таких значеннях у футеровці виникають механічні напруженості, які є співставними з межею міцності матеріалу.

Отримані результати є додатковими даними для контролю та оптимізації технологічних режимів.

Проведено чисельний аналіз найбільш імовірної ситуації витоку розплаву у напрямку зовнішньої поверхні корпусу індуктора. Досліджувалась залежність максимальної температури  $T_{\max}$  від глибини проникнення розплаву у футеровку.

Отримана залежність добре описується степеневою функцією і демонструє нелінійне зростання температури в залежності від глибини проникнення розплаву.

Отримані результати пропонується використовувати для вдосконалення методу визначення ступені руйнування футеровки індукторів індукційних каналних печей. Метод полягає у додатковому вимірюванні крім імпедансу індуктора, областей максимальної температури на його корпусі в процесі експлуатації.

Дані про розташування таких областей слугують вхідними даними у розроблену математичну модель, у якій шляхом чисельного експерименту визначається така конфігурація об'ємних протікань розплаву, яка призводить до підвищення температури на корпусі печі до значень рівних реально виміряним. Таким чином пропонується визначати конфігурацію (глибину, об'єм) протікань розплаву і залишкову товщину футеровки до корпусу індуктора, а також прогнозування ресурсу індуктора.

У **четвертому розділі** надано результати дослідження, що стосуються визначення локальних об'ємних і поверхневих зон максимального нагрівання футеровки ванни промислової печі, з метою визначення взаємного зв'язку між температурними розподілами у ваннах печей і наявністю протікань розплаву.

З 2014 по 2018 рік проведено вимірювання поточної зміни температури у 72 зонах на поверхні корпусу ванни як з боку завантаження катодів, так і з боку витягування катанки. Встановлено збільшення швидкості зростання температури на корпусі установки з часом. Підвищення температури і більш інтенсивне руйнування ізоляції відбувається біля зони витягування гарячої катанки, а менше – біля зони завантаження холодних катодів, що пояснюється різною циркуляцією мідного розплаву. Відмічено, що при цьому зростають як теплові питомі витрати на виробництво мідної катанки, так і небезпека експлуатації індукційної установки.

Для встановлення взаємозв'язку між поверхневим розподілом температури на корпусі печі з об'ємною конфігурацією протікань мідного розплаву в термоізоляцію проведено чисельний експеримент на розробленій математичній моделі, який узгоджувався з даними проведених температурних вимірювань. В моделі була реалізована індукційна канална піч з чотиришаровою футеровкою, яка заповнена розплавом міді. Глибина проникнення металу варіювалась від 0 до 275 мм, рахуючи від поверхні першого арматурного шару футеровки. Витоки розплаву моделювалися, таким чином, щоб розподіл температури на корпусі печі відповідав експериментально вимірюваному.

Встановлено, що поява мідного розплаву у першому шарі ізоляції майже не змінює температуру її зовнішньої поверхні, його проникнення у другий шар підвищує максимальну поверхневу температуру  $T_{\max}$  на 10–15°C, у третій – на 25–30°C, а в останній четвертій – на 100 і більше градусів. Показано, що при цьому також значно змінюється розподіл градієнта температури  $\Gamma_T$  у чотиришаровій ізоляції.

Отримані результати дали можливість розробити нову методику теплового контролю технічного стану індукційних каналних печей для виготовлення мідної катанки та запропонувати нове технічне рішення, яке полягало у заміні третього шару термоізоляції із легковагої цегли на комбінований трикомпонентний шар з термостійкого бетону, теплоізоляційної легковагої цегли та вогнетривкого волокнистого паперу. Експериментальні дослідження показали, що порівняно з відомою чотиришаровою структурою ізоляції нова шестишарова ізоляція має покращений розподіл температури.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список опублікованих праць за темою дисертації.

**Висновки** до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

**Список використаних джерел** досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 140 найменувань.

**Оформлення дисертаційної роботи** відповідає встановленим вимогам.

Матеріал роботи викладено, за деяким виключенням, послідовно, грамотно, математично коректно з використанням загальноприйнятої термінології та з дотриманням сучасних правил подання наукової інформації. Дисертацію та автореферат оформлено згідно до вимог оформлення науково-технічної документації. Результати дослідження достатньо проілюстровані графічним матеріалом.

Автореферат ідентичний за змістом основним науковим положенням, висновкам та результатам дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

Таким чином, дисертаційна робота та автореферат за змістом і оформленням відповідають вимогам ДАК вищої кваліфікації МОН України.

## **8. Зауваження за дисертацією**

До недоліків дисертації можна віднести наступне:

1. У підрозділі 2.2 при розробці математичної моделі індукційної печі поставлена задача урахування фазового переходу, але у чому сутність цього переходу та як він визначається не наведено.

2. У підрозділі 2.2 (рис. 2.4 в та рис. 2.7) при визначенні теплового опору ізоляції не обґрунтовано, чому він обирається як величина стала, яка не залежить від зміни температури в тепловій ізоляції, в той час, як теплові ємності обирають залежними від цієї температури.

3. У випадку сильно зв'язаних електромагнітної та теплової задач, які розв'язуються у часовій області (підрозділ 2.2), застосовується масштабування часу в електромагнітній задачі. Це досягається шляхом штучного зниження в електромагнітній задачі частоти джерела живлення з одночасним пропорційним збільшенням значень всіх індуктивностей в еквівалентному ланцюгу при виконанні умови  $\omega L = const$ .

Цей метод вирішення задачі недостатньо обґрунтовано, оскільки відомо, що вихідна напруга у вторинному контурі трансформатора також залежить від частоти джерела живлення, тому на практиці вводять номінальний коефіцієнт трансформації.

Крім цього, з даної умови можна зробити висновок, що зменшення частоти живлення у 50000 разів не впливає на енергію, яка споживається трансформатором від джерела живлення.

4. Зазначено, що у підрозділі 2.4 досліджується перший із методів діагностики стану футеровки індукційної печі. Цей метод, як наведено у розділі 1, є одним із головних, який використовується на практиці.

Не зазначено, чому виникла необхідність проведення його дослідження та відмінність отриманих результатів від відомих. Також не обґрунтовано діапазон змінення параметрів  $X_2^1 / X_2^1|_0$  та  $R_2^1 / R_2^1|_0$ .

5. У підрозділі 3.3 при постановці задачі розрахунку теплових процесів у футеровці індукційних печей у формулі (3.2) обрані тільки члени першого ступеня ряду, який розкладено. Не визначено методичну похибку, яка виникає у наслідок відкидання останніх членів ряду.

6. Розроблені математичні моделі є комп'ютерними і їх по Самарському О.А. та Михайлову О.П. можна віднести до моделей, які існують у тріадах: « модель (диференційні рівняння)- алгоритм- програма».

Однак у роботі друга частина тріади – алгоритм не наведено. У багатьох випадках не наведено також граничні умови вирішення диференційних рівнянь.

7. У розділі 4 при аналізі результатів вимірювання не надано методик у обробки результатів вимірювання та оцінку невизначеності отриманих результатів.

8. Не наведено базу даних для різних типів дефектів футеровки печі.

Але ці зауваження не торкаються принципових положень роботи і не знижують її позитивної оцінки.

## 9. Загальний висновок по дисертації

Дисертаційна робота Білянїна Романа Володимировича «Тепловий контроль технічного стану індукційних установок для виробництва мідної катанки» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу для господарства України науково-прикладну задачу створення методів і засобів контролю технічного стану індукційних установок для підвищення якості мідних струмопровідних жил високовольтних кабелів.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами), а здобувач Білянїн Роман Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри  
«Метрологія та безпека життєдіяльності»  
Харківського національного  
автомобільно-дорожнього університету

11.06.19

В.Д. Сахацький

