

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Білянін Роман Володимирович

УДК 621.365.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ІНДУКЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА
МІДНОЇ КАТАНКИ**

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин
15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Р.В. Білянін

Науковий керівник
Золотарьов Володимир Михайлович
д.т.н., проф.

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Білянin P.B. Тепловий контроль технічного стану індукційних установок для підвищення якості мідної катанки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ", м. Харків, 2019.

У дисертації вирішена важлива наукова задача з розвитку методів контролю технічного стану індукційних установок для виробництва високоякісної мідної катанки шляхом використання математичного моделювання електротеплових процесів у мідному розплаві і багат шаровій термоізоляції з врахуванням її деградації і розподілу температури на поверхні установки, яка має суттєве значення для розвитку кабельної промисловості.

Існуючі на сьогодні методи контролю технічного стану індукційних установок виробництва мідної катанки здійснюються на основі поточного вимірювання лише таких усереднених параметрів, як споживана електрична потужність, еквівалентні активний і реактивний опори електричного навантаження індуктора та різниця температури води на виході і вході контуру охолодження. Вони дають досить обмежену інформацію щодо технічного стану індукційних установок, режимів виробництва високоякісної катанки та підвищення їх ефективності, ресурсу і надійності у відповідності з вимогами сучасної кабельної промисловості.

Вони зокрема не враховують особливості локальних протікань мідного розплаву в багат шарову термоізоляцію установки та змінення їх розмірів і конфігурацій, які визначають мобільність локальних руйнацій ізоляції, закономірності зменшення залишкового ресурсу і енергоефективності установок та погіршення якості мідного розплаву. Всебічний аналіз світових наукових публікацій підтвердив актуальність вирішення наукової задачі з удосконалення методів теплового контролю технічного стану індукційних устано-

вок для виробництва мідної катанки та визначив напрямок наукових досліджень даної дисертації.

Ідея дослідження полягала в тому, щоб визначити взаємозв'язок між розподілами температури по поверхні корпусу індукційної печі та всередині її футеровки, а також закономірності зміни цих розподілів в залежності від геометричних характеристик витоків розплаву та їх зміни у часі. Дослідження показали, що температура в локальних областях на корпусі індукційних печей після їх багаторічної експлуатації може зростати у декілька разів і переважати максимально допустимі значення для безпечного використання.

Методами чисельного експерименту проведені дослідження в недоступних для фізичного експерименту через свою монолітну структуру внутрішніх областях футеровки печі – саме тих областях де виникає руйнування і проникнення розплаву. Верифікація моделі і підтвердження результатів розрахунків проводилась шляхом фізичного експерименту.

В наслідок проведених досліджень створена так звана бібліотеки форм температурних ізотерм в залежності від конфігурацій протікань розплаву у футеровку. В процесі вимірювання поверхневого розподілу температури на корпусі промислової печі, при порівнянні вигляду реальних ізотерм з матеріалами бібліотеки, за найбільшим співпадінням пропонується робити прогноз ступеню зносу футеровки.

Проведені дослідження включали етапи:

- проведення багаторічного неперервного моніторингу технічного стану індукційної печі в період промислового використання з метою дослідження зміни розподілу температури на поверхні її корпусу, пов'язаного з протіканням мідного розплаву в дефектах багатошарової ізоляції;

- розробки математичної моделі індукційної установки з врахуванням складної тривимірної конфігурації її елементів і нелінійних властивостей матеріалів, а також проведення численного експерименту по визначенню зміни об'ємного і поверхневого розподілу температури в залежності від різних типів протікань мідного розплаву в ізоляцію;

- визначення конфігурації реальних протікань міді за даними фізичного експерименту при розбиранні установки після її багаторічного використання;
- розробки на основі проведеного аналізу особливостей роботи індукційної установки нового технічного рішення, спрямованого на удосконалення багатошарової термоізоляції для збільшення ресурсу футеровки і зменшення теплових втрат в установках при їх промисловій експлуатації.

Розроблено новий метод неруйнівного контролю технічного стану індукційних установок для виробництва мідної катанки для силових кабелів енергетичного призначення. У новому методі крім вимірювання реактивного і активного опорів індуктора і температури води в системі охолодження додатково визначається степінь деградації багатошарової термоізоляції шляхом порівняння розрахункового розподілу поточної температури в об'ємі розплаву і ізоляції на тривимірній математичній моделі установки з практичним вимірюванням температури локальних областей (в роботі їх було 72) на верхній корпусу печі.

Головною перевагою розробленого методу діагностики є можливість визначення безпосереднього розташування, форми і розмірів протікань мідного розплаву у дефекти футеровки (що було неможливо раніше), а, відповідно, більш точного прогнозування залишкового ресурсу установок, завчасного виявлення режимів їх роботи, близьких до аварійних, та оптимізації всіх режимів в залежності від поточного стану і ресурсу футеровки.

Головна наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Вперше розроблено метод теплового контролю технічного стану індукційних установок виробництва мідної катанки шляхом використання електротеплових аналогій і розробки нової математичної моделі усереднених електротеплових процесів у мідному розплаві та багатошаровій ізоляції з урахуванням виникаючих нелінійних залежностей, що забезпечило реалізацію експрес-термоконтролю стану установок при тривалих перехідних електротермічних процесах.

2. Вперше розвинуто метод поточного теплового контролю установок виробництва мідної катанки на основі аналізу не тільки активного і реактивного опорів індуктора та температури води у системі охолодження, але й ступеню деградації термоізоляції та визначення об'ємного і поверхневого розподілів температури на тривимірній математичній моделі з їх порівнянням з розподілами температури в локальних областях на поверхні ізоляції. Використання цього методу забезпечує розробку методики підвищення ефективності, ресурсу і безпеки індукційних установок з урахуванням ступеню деградації багат шарової термоізоляції печі.

3. Вперше розроблено математичну модель поточного розподілу температури у багат шаровій ізоляції індукційних каналних установок з урахуванням тривимірної конфігурації її елементів, нелінійних характеристик матеріалів і змінень конфігурацій металевих протікань в ізоляцію. Використання цієї моделі дозволяє визначати найбільш небезпечні розподіли температури при тривалій експлуатації установок.

4. Вперше розроблено метод контролю конфігурацій і загального об'єму протікань мідного розплаву в термоізоляцію установок шляхом порівнянь об'ємного і поверхневого розподілів температури в неї, що дозволяє визначати інтенсивність локальної руйнації ізоляції та поточного погіршення якості мідного розплаву і катанки.

5. Вперше обґрунтовано удосконалення ізоляції за рахунок змінення її структури – заміни одного із шарів трьома іншими без змінення загальної товщини на основі визначення особливостей розвитку протікань мідного розплаву в термоізоляцію установок і виникаючих змінень розподілу в ній температури, що забезпечило підвищення ефективності, ресурсу і безпеки установок та якості мідної катанки.

Головне практичне значення одержаних результатів в галузі електроенергетики полягає у тому, що розроблено нове технічне рішення для удосконалення багат шарової термоізоляції індукційних установок з метою зменшення їх енерговтрат і збільшення ресурсу. Воно полягає у використанні за-

мість третього термоізоляційного шару з легковагової цегли трьох шарів: монолітного вогнетривкого бетону, легковагової цегли і вогнетривкого паперу, при збереженні загальної товщини ізоляції.

Впровадження такого рішення в індукційній установці UPCAST US20X-10 на ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ" забезпечило:

- зниження на 20°C температури на її поверхні – температура зменшилася до 110°C, замість 130°C, як було раніше в перші місяці після запуску установки;

- зменшення питомих енерговитрат на 1 т мідної заготовки – на 5% відносно енерговитрат установки після її пуску та на 15% відносно витрат перед її зупинкою;

- покращення умов праці спеціалістів, що обслуговують установку;

- підвищення якості мідної катанки, зокрема збільшення на 10% кількості катанки з відсотковим вмістом міді не менше 99,99%.

Розроблено практичні рекомендації для зменшення максимальних значень температури, її градієнтів, розмірів ізоляції з підвищеною температурою та витоків у неї мідного розплаву. Розроблені рекомендації з оптимізації продуктивності установок, їх питомих енерговитрат та збільшення ресурсу впроваджено на ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ", Інституті електродинаміки НАН України і в навчальному процесі кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ "ХПІ".

Ключові слова: індукційний нагрів, плавлення безкисневої міді, плавильно-роздавальна канална піч, діагностика і моніторинг технічного стану, протікання розплаву, руйнування футеровки, фізичний експеримент, чисельне моделювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Беянин Р.В. Анализ влияния способа изготовления медной катанки на характеристики медной проволоки / Р.В. Беянин // Вісник НТУ "ХПІ". 2013. № 11 (985). С. 174-181.
2. Беянин Р.В. Выбор основных требований к электрическим испытаниям отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.М. Золотарев, Ю.А. Антоненко, В.В. Золотарев, Р.В. Беянин, А.А. Науменко // Вісник НТУ "ХПІ". 2014. № 21 (1064). С. 31-35.
3. Belyanin R. The comparison of electric field perturbations by water inclusions in linear and nonlinear XLPE insulation / M. Shcherba, V. Zolotarev, R. Belyanin // Proc. of 16th Intern. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015). P. 188-191.
4. Беянин Р.В. Анализ электромагнитных процессов в индукционной канальной печи, используемой в кабельной промышленности / В.М. Золотарёв, Р.В. Беянин, А.Д. Подольцев // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2016. № 44. С. 110-115.
5. Беянин Р.В. Трёхмерное моделирование электромагнитных процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки / В.М. Золотарёв, М.А. Щерба, В.В. Золотарёв, Р.В. Беянин // Технічна електродинаміка. 2017. №3. С. 13-21.
6. Беянин Р.В. Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной канальной печи для производства медной катанки / А.А. Щерба, А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая, В.М. Золотарёв, Р.В. Беянин // Технічна електродинаміка. 2017. №4. С. 55-64.
7. Belyanin R.V. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin, R.P. Mygushchenko, O.Yu. Kropachek // Electrical engineering and electromechanics. 2018. № 1. P. 35-40.

8. Belyanin R.V. Calculation of the equivalent electrical parameters of the inductor of an induction channel furnace with defects in its lining / A.D. Podoltsev, V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin // *Electrical engineering and electromechanics*. 2018. № 4. P. 29-34.

9. Belyanin R. The optimization of power supply modes of induction melting apparatus with a total metal draining / V. Zolotarev, R. Belyanin, Y. Peretyatko, S. Lamanov // *Proc. of 16th Intern. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015)*. P. 255-258.

10. Belyanin R.V. Electromechanical transient processes during supply voltage changing in the system of polymer insulation covering of the current-carrying core of ultra-high voltage cables / V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin, R.P. Mygushchenko, I.M. Korzhov // *Electrical engineering and electromechanics*. 2018. №2. P. 47-53.

11. Бе́лянін Р.В. Використання регульованого магнітного зв'язку в індукційних установках з напівпровідниковим послідовним резонансним однокомірковим інвертором / С.Л. Ламанов, Ю.В. Перетятко, Р.В. Бе́лянін // *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2015. № 12 (1121). С. 435-438.

12. Бе́лянін Р. В. Особенности производства и эксплуатации сшитой полиэтиленовой изоляции силовых кабелей разных классов напряжения / А. А. Щерба, И. Н. Кучерявая, В. М. Золотарёв, Р. В. Бе́лянін // *Гідроенергетика України*. 2016. № 1-2. С. 30-40.

ANNOTATION

Belyanin R.V. Thermal control of the technical state of induction installations for quality increasing of copper rod. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for a Candidate of Engineering Sciences degree by specialty 05.11.13 – devices and methods of control and determination of composition of substances. – PJSC "Yuzhcable Works", Kharkiv, 2019.

The dissertation solves an important scientific task on the development of control methods of the technical state of induction installations for the production of high-quality copper wire rod using the mathematical modeling of electro-thermal processes in copper melt and multilayer thermal insulation, taking into account its degradation and temperature distribution on the surface of the installation, which is essential for the development of the cable industry.

The existing methods for controlling the technical state of induction installations for the production of copper rod are realized on the basis of the current measurement of only such averaged parameters as the electric power consumed, the equivalent active and reactive resistances of the electric load of inductor, and the difference in water temperature at the outlet and inlet of the cooling circuit. They provide very limited information on the technical state of induction installations, modes of production of high-quality wire rod and increase their efficiency, resource life and reliability in accordance with the requirements of modern cable industry.

In particular, they do not take into account the peculiarities of local leakages of the copper melt into the multilayer insulation of the installation and change its dimensions and configurations, which determine the mobility of local insulation destruction, the regularities of reduction of the residual life and energy efficiency of the installations, and the deterioration of the copper melt quality. Comprehensive analysis of world scientific publications confirmed the actuality of solving the scientific problem of improving the methods of thermal control of the technical state of induction installations for the production of copper wire rod and determine the direction of scientific research in this dissertation.

The idea of the study was to determine the relationship between the temperature distributions along the surface of the body of the induction furnace and inside its lining, as well as to find the regularities of the change of these distributions, depending on the geometric characteristics of the melt leakages and their changes in time. Studies have shown that the temperature in the local areas on the body of induction furnaces after their long-term operation can increase several times and exceed the maximum allowable values for safe use.

The study of the interior of the lining of the furnace, which is inaccessible to the physical experiment (due to its monolithic structure), i.e. in those areas where the destruction of lining and penetration of the melt occurred, is carried out by numerical experiment methods. Verification of the model and confirmation of the results of calculations were carried out by physical experiment.

As a result of the research, a so-called library of forms of temperature isotherms has been created, depending on configurations of leakage of the melt in the lining. In the process of measuring the surface temperature distribution on the body of an industrial furnace, the real isotherms are compared with the isotherms from the library, and for the greatest coincidence it is proposed to make a forecast of the degree of wear of the lining.

The studies included the following steps:

- performance a long-term continuous monitoring of the technical state of the induction furnace during its industrial use for the purpose of studying the change in the temperature distribution on the surface of the furnace body caused by the leakage of the copper melt in the defects of the lining;
- development of the mathematical model of an induction furnace that takes into account the complex three-dimensional configuration of its elements and nonlinear properties of the materials, as well as a performance of numerical experiment in order to determine the change in the volumetric and surface temperature distribution depending on different types of copper melt leakage into insulation;

– determination of the configurations of real copper leakages according to the experimental data during the disassembly of the installation after its long-term industrial use;

– on the basis of analysis of the peculiarities of the operation of the induction installation a new technical solution development, which improve the multilayer thermo-insulation for increase the lining life and reduce thermal losses in the installations during its industrial operation.

A new method of non-destructive control of the technical state of induction installations for the production of copper wire rod for power cables of energy purpose has been developed. According to new method, in addition to measuring the reactive and active resistances of the inductor and the water temperature in the cooling system, the degree of degradation of the multilayer thermal insulation is additionally determined by comparing the calculated distribution of the current temperature in the volume of melt and insulation on the three-dimensional mathematical model of the installation with practical measurement of the temperature of the local areas (there were 72 areas in the dissertation) on the surface of the furnace body.

The main advantage of the developed diagnostic method is the ability to determine the direct location, shape and dimension of copper melt leakages into defects of the lining (which was impossible earlier), and therefore more accurately predict the remaining life of the installations, the timely detection of their operation, which is close to emergency operation, and optimization of all modes depending on the current state and lining life.

The main scientific novelty of the results contains in:

1. For the first time the method of thermal control of the technical state of the induction installations for the production of copper wire rod has been developed using the electro-thermal analogies and new mathematical model of the averaged electro-thermal processes in the copper melt and multilayer insulation, taking into account emerging nonlinear dependencies, which ensured the realization of the express-thermo-controlling the state of the installations with long transient electro-thermal processes.

2. For the first time the method of the current thermal control of installations for copper wire rod production has been developed on the basis of the analysis of not only the active and reactive resistances of the inductor and the water temperature in the cooling system, but also the degree of degradation of the thermal insulation and the determination of the volume and surface temperature distributions on a three-dimensional mathematical model with their comparison with temperature distributions in local areas on the insulation surface. The use of this method provides the development of technique for increasing the efficiency, resource life and safety of induction installations, taking into account the degree of degradation of multilayer thermal insulation of the furnace.

3. For the first time a mathematical model of the current distribution of temperature in a multilayer insulation of induction channel installations with the consideration of the three-dimensional configuration of its elements, nonlinear characteristics of materials and changes in the configurations of metal leakages into insulation has been developed. The use of this model allows to determine the most dangerous temperature distributions with long-term operation of the installations.

4. For the first time a method for controlling the configurations and the total volume of copper melt leakages into the thermal insulation of installations was developed by comparing the volume and surface distribution of temperature in the insulation, which allows to determine the intensity of the local destruction of the insulation and the current deterioration of the quality of copper melt and wire rod .

5. For the first time the improvement of insulation was justified due to the change of its structure – the replacement of one of the layers by three other without changing the total thickness, on the basis of determining the peculiarities of the development of copper leakages into the thermal insulation of installations and the resulting changes in the distribution of the temperature in it, which ensured improvement efficiency, resource life and safety of installations and quality of copper wire rod.

The main practical significance of the results obtained in the field of electric power industry is that a new technical solution has been developed to improve the multilayer thermal insulation of induction installations in order to reduce their

energy loss and to increase the resource life. It consists in using instead of the third thermal insulation layer of lightweight brick – three layers: monolithic refractory concrete, lightweight brick and refractory paper, while maintaining the overall thickness of the insulation.

Implementation of this solution in the UPCASt induction installation US20X-10 at PJSC "PIVDENKABEL WORKS" provided following:

- decrease in temperature on its surface by 20 °C – the temperature dropped to 110 °C, instead of 130 °C, as it was before in the first months after the installation start;

- reduction of specific energy consumption per 1 ton of copper billet – by 5% relative to the energy consumption of the installation after its commissioning and by 15% relative to the consumption before it stops;

- improvement of working conditions for specialists serving the installation;

- improvement of the quality of copper wire rod, in particular, an increase by 10% of the wire rod with a percentage of copper content not less than 99.99%.

Practical recommendations for reducing the maximum values of temperature, its gradients, the sizes of insulation with high temperature and the leakages of copper melt in it have been developed. The recommendations for optimization of installation productivity, their specific energy consumption and resource life increase have been implemented at PJSC "PIVDENKABEL WORK", at the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine and in the educational process of the Department of Electrical Insulation and Cable Engineering of NTU "KhPI".

Key words: induction heating, melting of oxygen-free copper, melting and distributing channel furnace, diagnostics and monitoring of technical state, melt leakage, lining destruction, physical experiment, numerical simulation.

PUBLICATION LIST OF APPLICANT

1. Belyanin R.V. Analysis of the influence of the method of manufacturing of copper rod on the characteristics of copper wire / R.V. Belyanin // Visnyk NTU «KhPI». 2013. No 11 (985). Pp. 174-181.
2. Belyanin R.V. Selection of the main requirements for electrical testing of domestic cable samples with XLPE insulation / V.M. Zolotaryov, Yu.A. Antonets, V.V. Zolotaryov, R.V. Belyanin, A.A. Naumenko // Visnyk NTU «KhPI». 2014. No 21 (1064). Pp. 31-35.
3. Belyanin R. The comparison of electric field perturbations by water inclusions in linear and nonlinear XLPE insulation / M. Shcherba, V. Zolotarev, R. Belyanin // Proc. of 16th Intern. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015). P. 188-191.
4. Belyanin R. V. Analysis of electromagnetic processes in the induction channel furnace used in the cable industry / V.M. Zolotaryov, R. V. Belyanin, O.D. Podoltsev // Pratsi Insytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Kyiv, 2016. No 44. Pp. 110-115.
5. Belyanin R. V. Three-dimensional modeling of electromagnetic and thermal processes of induction melting of copper template with accounting of installation elements design / V.M. Zolotaryov, M. A. Shcherba, V. V. Zolotaryov, R. V. Belyanin // Tekhnichna Elektrodynamika. 2017. No 3. Pp. 13-21.
6. Belyanin R. V. Modeling and control of long-term electromagnetic and thermal processes in induction channel furnace for copper rod production / A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, I.N. Kucheriava, V.M. Zolotaryov, R.V. Belyanin // Tekhnichna Elektrodynamika. 2017. No 4. Pp. 55-64.
7. Belyanin R.V. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin, R.P. Mygushchenko, O.Yu. Kropachek // Electrical engineering and electromechanics. 2018. № 1. P. 35-40.

8. Belyanin R.V. Calculation of the equivalent electrical parameters of the inductor of an induction channel furnace with defects in its lining / A.D. Podoltsev, V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin // *Electrical engineering and electromechanics*. 2018. № 4. P. 29-34.

9. Belyanin R. The optimization of power supply modes of induction melting apparatus with a total metal draining / V. Zolotarev, R. Belyanin, Y. Peretyatko, S. Lamanov // *Proc. of 16th Intern. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015)*. P. 255-258.

10. Belyanin R.V. Electromechanical transient processes during supply voltage changing in the system of polymer insulation covering of the current-carrying core of ultra-high voltage cables / V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba, R.V. Belyanin, R.P. Mygushchenko, I.M. Korzhov // *Electrical engineering and electromechanics*. 2018. №2. P. 47-53.

11. Belyanin R. V. Using an adjustable magnetic connection in induction units with a semiconductor serial resonant single-cell inverter / S.L. Lamanov, Yu.V. Peretiatio, R.V. Belyanin // *Visnyk NTU «KhPI»*. 2015. No 12 (1121). Pp. 435-438.

12. Belyanin R. V. Features of production and operation of cross-linked polyethylene insulation of power cables of different voltage classes / A.A. Shcherba, I.N. Kucheriava, V.M. Zolotaryov, R.V. Belyanin // *Gidroenergetyka Ukrainy*. 2016. No 1-2. Pp. 30-40.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІНДУКЦІЙНИХ УСТАНОВОК ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНОЇ КАТАНКИ	14
1.1 Вимоги до характеристик мідної катанки для виготовлення сучасних силових кабелів.....	14
1.2 Аналіз існуючих методів виготовлення мідної катанки для кабельної промисловості.....	23
1.3 Загальна оцінка методів контролю технічного стану плавильних печей для виготовлення мідної катанки, що використовується при виго- товленні сучасних кабелів надвисоких напруг.....	27
1.4 Можливі шляхи вдосконалення методів діагностики технічного ста- ну футеровки індукційних печей	35
1.5 Висновки за розділом 1	44
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ УСЕРЕДНЕНИХ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧАХ ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНОЇ КАТАНКИ ДЛЯ СУЧАСНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ	47
2.1 Опис електричних і теплових процесів, які виникають в індукційних канальних печах	49
2.2 Математична модель індукційної каналної печі в Matlab/Simulink/ SPS на основі метода мультифізичного моделювання	52
2.3 Моделювання і контроль довготривалих електромагнітних і тепло- вих процесів в індукційних канальних печах при їх первинних запусках	66
2.4 Моделювання і контроль довготривалих електромагнітних і тепло- вих процесів в індукційних канальних печах при литті катанки	71
2.5 Еквівалентні електричні параметри індуктора індукційної каналної печі	74
2.6 Висновки за розділом 2	83

РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄМНИХ І ПОВЕРХНЕВИХ ЗОН МАКСИМАЛЬНОГО НАГРІВАННЯ ФУТЕРОВКИ ІНДУКТОРА.....	86
3.1 Особливості методів контролю технічного стану та виявлення пере- даварійних ситуацій індукційних печей при виготовленні мідної катанки	88
3.2 Тривимірна математична модель індукційної каналної печі	96
3.3 Фізико-математична постановка задачі розрахунку теплових проце- сів у футеровці індукційних печей	102
3.4 Електромагнітні і теплові поля в індукторі індукційних каналних печей при його первинному запуску	106
3.5 Діагностика появи дефектів футеровки індуктора та визначення їх конфігурації	120
3.6 Висновки до розділу 3	125
РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄМНИХ І ПОВЕРХНЕВИХ ЗОН МАКСИМАЛЬНОГО НАГРІВАННЯ ФУТЕРОВКИ ВАННИ ПЕЧІ ...	127
4.1 Фізичний експеримент по вимірюванню розподілу температури на корпусі ванни індукційної каналної печі при проникненні розплаву у її футеровку.....	127
4.2 Моделювання об'ємного розподілу протікань міді у футеровці	138
4.3 Визначення стану футеровки печі при її заміні	143
4.4 Розробка й впровадження технічних рішень по вдосконаленню фу- теровки печі	146
4.5 Висновки до розділу 4	152
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	157
ДОДАТОК А Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації	172
ДОДАТОК Б Практичне застосування результатів роботи	174