

Енергоефективні методи та засоби електротехнологій плавки надчистої міді у вітчизняних індукційних установках

Энергоэффективные методы и средства электротехнологий плавки сверхчистой меди в отечественных индукционных установках

Energy-efficient methods and means of electrotechnologies for the ultrapure copper smelting in domestic induction installations

1. Номер державної реєстрації: 0118U003534.

2. Науковий керівник: д.т.н., проф. Островерхов М.Я., Островерхов Н.Я., Ostroverkhov M.Y.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.) Створено нові методи та засоби математичного моделювання процесів індукційної плавки міді, які полягають в одночасному врахуванні нелінійних властивостей матеріалів та особливостей тривимірної геометрії елементів електротехнічного комплексу. Розроблено засоби математичного моделювання тривимірних неоднорідних електромагнітних і теплових полів з сильними взаємними зв'язками, що виникають в елементах електротехнічного комплексу в процесі індукційної плавки надчистої міді та виготовлення з неї катанки. Вирішено проблему підвищення енергоефективності вітчизняних електротехнологій плавки надчистої міді та збільшення ресурсу електротехнічного комплексу за рахунок знаходження оптимальних режимів нестационарного живлення індуктора при його первинних пусках і геометричних характеристик шин та шаблону для первинної плавки для досягнення мінімуму температур та градієнтів температур в областях інтересу. Розроблено практичні рекомендації для покращення пускових режимів індуктора комплексу та діагностування і прогнозування його роботи на різних етапах технологічного процесу. Особливу цінність результати дослідження мають для вітчизняних фахівців, оскільки вони направлені на підвищення конкурентоздатності вітчизняного кабелю на надвисокі напруги і підвищення надійності енергосистеми України. Підготовлено рекомендації щодо підвищення енергоефективності та ресурсу електротехнічного комплексу технологічної лінії з індукційної плавки надчистої міді та виготовлення катанки на заводі "Південкабель" (м. Харків). Електротехнічні комплекси, що будуть побудовані та модернізовані з врахуванням результатів досліджень, завдяки підвищеній енергоефективності своєї роботи та збільшеному ресурсу, гарантують надійність і оптимальність функціонування в умовах реального виробництва.

(рос.) Созданы новые методы и средства математического моделирования процессов индукционной плавки меди, которые заключаются в одновременном учете нелинейных свойств и особенностей трехмерной геометрии элементов электротехнического комплекса. Разработаны средства математического моделирования трехмерных неоднородных электромагнитных и тепловых полей с сильными взаимными связями, возникающих в элементах электротехнического комплекса в процессе индукционной плавки сверхчистой меди и изготовления из нее катанки. Решена проблема повышения энергоэффективности отечественных электротехнологий плавки сверхчистой меди и увеличения ресурса электротехнического комплекса за счет нахождения оптимальных режимов нестационарного питания индуктора при его первичных пусках и геометрических характеристик шин и шаблона для первичной плавки для достижения минимума температур и градиентов температур в областях интереса. Разработаны практические рекомендации для улучшения пусковых режимов индуктора комплекса, диагностики и прогнозирования его работы на различных этапах технологического процесса. Особую ценность результаты исследования имеют для отечественных специалистов, поскольку они направлены на повышение конкурентоспособности отечественного кабеля на сверхвысокие напряжения и повышения

надежности энергосистемы Украины. Подготовлены рекомендации по повышению энергоэффективности и ресурса электротехнического комплекса технологической линии по индукционной плавки сверхчистой меди и изготовление катанки на заводе "Южкabelь" (г. Харьков). Электротехнические комплексы, которые будут построены и модернизированы с учетом результатов исследований, благодаря повышенной энерго-эффективности своей работы и увеличенному ресурсу, гарантируют надежность и оптимальность функционирования в условиях реального производства.

(eng.) New methods and means of mathematical modelling of induction melting processes of copper have been developed. They consist in simultaneous consideration of nonlinear properties of materials and features of three-dimensional geometry of elements of the electrotechnical complex. Means of mathematical modelling of three-dimensional inhomogeneous electromagnetic and thermal fields with strong interconnections, arising in the elements of the electrical complex in the process of induction melting of ultrapure copper and the manufacture of wire rod from it, have been developed. The problem of increasing the energy efficiency of domestic electrotechnologies of ultrapure copper smelting and increasing the life time of the electrical complex was solved. Result was achieved by finding the optimal modes of non-stationary power supply of the inductor at its initial starts and geometric characteristics of inductor coils and template for primary smelting to achieve minimum temperatures and gradients. Practical recommendations for improving the starting modes of the inductor of the complex and diagnosing and forecasting its operation at different stages of the technological process have been developed. The results of the study are of special value for domestic specialists, as they are aimed at increasing the competitiveness of domestic cable for ultra-high voltages and increasing the reliability of the power system of Ukraine. Recommendations for improving the energy efficiency and resource of the electrical complex of the technological line for induction smelting of ultrapure copper and the manufacture of wire rod at the plant "YUZHicable" (Kharkov). Electrical complexes, which will be built and modernized taking into account the results of research, due to the increased energy efficiency of their work and increased resource, guarantee the reliability and optimal operation in real production.

4. наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

1. Патент України на винахід № 123068 . Спосіб обробки розплаву металу / Щерба А.А., Іванов В.В., Цуркін В.М., Череповський С.С., Честних М.В.; опубліковано 12.02.2018, бюл. № 3/2018 р.

2. Патент України на корисну модель № 137593. Підземна кабельна лінія електропередачі / Щерба А.А., Кириленко О.В., Подольцев О.Д.; опубліковано 25.10.2019, бюл. № 20/2019 р.

3. Патент на корисну модель № 132061. Спосіб визначення напруги зворотної послідовності з корекцією похибки / Щерба А.А., Маков Д.К.; опубліковано 11.02.2019, бюл. № 3/2019 р.

4. Патент України на корисну модель № 142864. Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач / Бойко В.С.; опубліковано 25.06.2020, бюл. № 12/2020 р.

5. Патент України на винахід № 121920. Спосіб визначення напруги зворотної послідовності з корекцією похибки / Щерба А.А., Маков Д.К.; опубліковано 10.08.2020, бюл. № 15/2020 р.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Науково технічний рівень виконаної роботи відповідає світовому рівню та перевищує його за окремими показниками. Отримано нові наукові та науково-прикладні результати з розробки нових методів і засобів математичного та фізичного моделювання для підвищення енергоефективності та збільшення ресурсу елементів індукційних комплексів для плавки надчистої міді: отримала розвиток теорія електромагнітних і теплових процесів з сильними взаємними зв'язками, (теорії зв'язаних електромагнітних і теплових полів), які виникають в

елементах електротехнічного комплексу для плавки надчистої міді, особливо в режимах його первинного пуску; розроблено нові методи і засоби математичного моделювання з одночасним врахуванням нелінійних властивостей матеріалів, складної тривимірної геометрії елементів комплексу, проведенням оптимізації сітки скінченних елементів та вдосконаленням математичного солверу для забезпечення його стійкої збіжності; розвинуто теорію знаходження оптимальних режимів нестационарного живлення індуктора та оптимальних геометричних характеристик його елементів при первинних пусках шляхом мінімізації областей найбільших температур та градієнтів температури і їх зміни в часі; вдосконалено систему діагностування пускових режимів елементів комплексу для підвищення його енергоефективності та збільшення ресурсу. Високий рівень отриманих результатів підтверджено публікаціями у високо рейтингових журналах та доповідями на провідних міжнародних конференціях спільноти IEEE.

6. Економічна привабливість для просування на ринок.

Економічна привабливість полягає у підвищенні енергоефективності вітчизняних електротехнологій плавки надчистої міді та збільшенні ресурсу електротехнічного комплексу шляхом створення нових методів та засобів математичного моделювання динамічних електромагнітних та температурних полів в тривимірному неоднорідному середовищі з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів та особливостей тривимірної геометрії. Виготовлення вітчизняних електричних кабелів та проводів з мідною жилою з показниками якості на рівні кращих світових виробників потребує надвисокої чистоти її матеріалу (99,99% Cu). В умовах постійного зростання цін на енергоносії, імпортного походження комплектуючих електротехнічного комплексу по випуску мідної катанки та жорсткої конкуренції на світових ринках впровадження запропонованих рішень забезпечує підвищення енергоефективності на 5-15 % та збільшення ресурсу на 20-40 %, гарантує надійність і оптимальність функціонування в умовах реального виробництва. Вартість реалізації проекту складає близько 1,5 млн. грн, терміни впровадження та окупності складають 1-2 роки та 3 роки відповідно.

7. Потенційні користувачі.

Міністерство енергетики України, Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України, науково-дослідні, проектно-конструкторські інститути, організації та фірми, які займаються розробкою та модернізацією індукційних установок в електротехнологіях плавки надчистих металів, зокрема міді. Заводи з випуску кабельної та провідникової продукції, зокрема ПАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків), ПАТ «Одескабель», «МПКА-Україна» (м. Запоріжжя), «ЮТЕКС Україна» (м. Чернігів) та інші. Результати досліджень можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці фахівців на кафедрі теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

8. Стан готовності розробки.

Розроблене авторське програмне забезпечення для математичного моделювання електромагнітних і теплових процесів з сильними взаємними зв'язками в електротехнічному комплексі індукційної плавки надчистої міді, особливо в режимах його первинного пуску, що дозволяє підвищити енергоефективність та збільшити ресурс елементів комплексу. Засоби математичного моделювання одночасно враховують нелінійні властивості матеріалів, складну тривимірну геометрію елементів комплексу, а також забезпечують знаходження оптимальних режимів нестационарного живлення індуктора та оптимальних геометричних характеристик його елементів при первинних пусках шляхом мінімізації областей найбільших температур та градієнтів температури і їх зміни в часі. Підготовлено рекомендації щодо підвищення енергоефективності та ресурсу електротехнічного комплексу технологічної лінії з індукційної плавки надчистої міді та виготовлення катанки на профільних підприємствах.

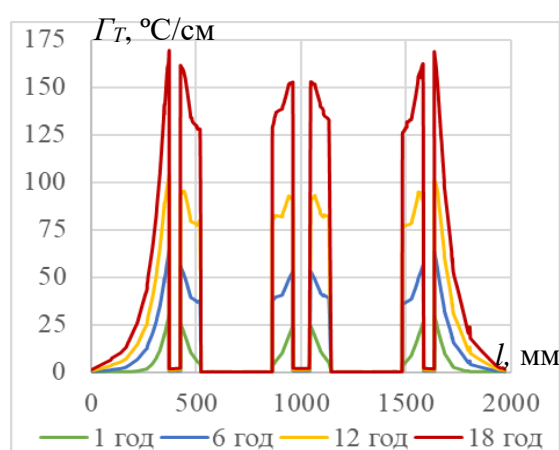
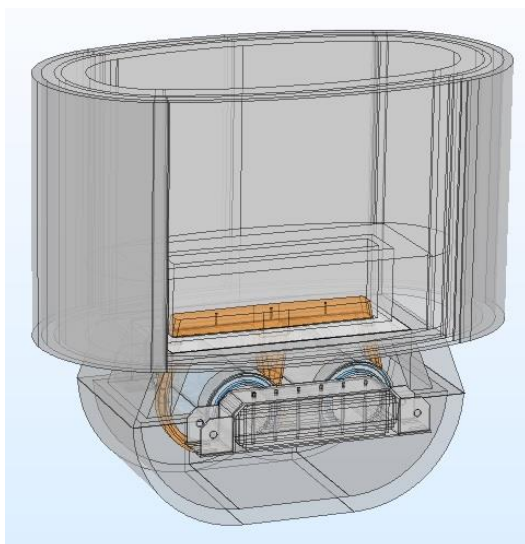
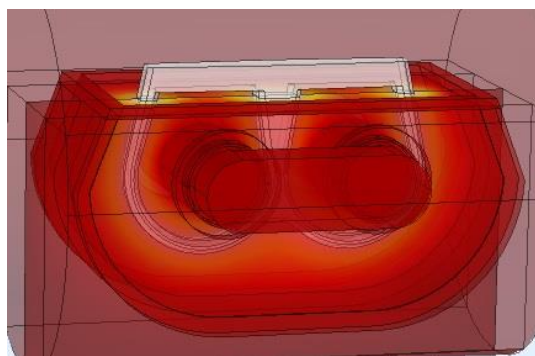
9. Існуючі результати впровадження.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені на ПАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків). Використання результатів роботи на технологічній лінії виготовлення кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги, випуск якого освоїв завод "Південкабель", дозволяє отримати позитивний економічний ефект, оскільки така продукція випускається декількома підприємствами у світі і користується високим попитом. Результати досліджень з розрахунку електромагнітних полів у тривимірних неоднорідних середовищах складної конфігурації в умовах нелінійних та нестационарних властивостей матеріалів впроваджено у навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського у III частині фундаментальної професійно-орієнтованої дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет електроенерготехніки та автоматики, кафедра теоретичної електротехніки, (044) 204-82-39, toe209@gmail.com.

11. Фото.



12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

Монографії:

1. Островерхов М.Я., Сільвестров А. М., Зеленський К.Х. Методи дослідження електротехнічних систем і комплексів: Монографія. – К.: ТАЛКОМ, 2019. – 300 с.
2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги: Монографія. – Київ: Ліра-К, 2019. – 241 с.
3. Щерба А.А., Супруновська Н.І., Петриченко С.В. Динамічні процеси в електророзрядних установках. Монографія. Київ: Про Формат, 2018. 350 с.
4. Щерба М.А. Сильні електричні поля в полімерній ізоляції кабелів надвисоких напруг. Монографія. Київ: Про Формат, 2019. 277 с.
5. Щерба А.А., Руденко Ю.В., Аналіз багатоінтервальних процесів у напівпровідникових перетворювачах. Монографія. Київ: Про Формат, 2020. 352 с.
6. Power supply for educational institutions: efficiency and alternatives: Collective monograph / Edited by M. Sotnyk, Doctor of Technical Sciences. – Hamilton, Canada, Accent Graphics Communications & Publishing, 2020. – 146 p.
7. Theoretical aspects of modern engineering: Collective monograph. Boston (USA)-2020, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data ISBN-978-1-64945-862-9, DOI-10.46299/ISG.2020.MONO.TECH.III

Докторські дисертації:

1. Щерба М.А. Розрахунок тривимірних електричних полів у нелінійній полімерній ізоляції надвисоковольтних кабелів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.05 – теоретична електротехніка. – 2018, Київ.

Кандидатські дисертації:

1. Лободзинський В.Ю. Перехідні процеси в представлених багатополюсниками трифазних колах із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05 – теоретична електротехніка, науковий керівник Щерба А.А. – 2020, Київ..
2. Трінчук Д.Я. Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05 – теоретична електротехніка, науковий керівник Островерхов М.Я. – 2019, Київ..

Статті у виданнях, що входять до НМБД Scopus:

1. Shcherba, M.A. Electric field during transient process of configuration changing of water micro-inclusions in liquid dielectrics. Технічна електродинаміка. 2018. № 1. С. 23–29.
2. Shcherba, M.A. Coupled electromagnetic and thermal processes in thermal insulation of induction channel furnaces during changes of its defects configuration. Технічна електродинаміка. 2018. № 2. С. 17–24.
3. Shcherba, A.A., Suprunovska N.I., Shcherba, M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. Технічна електродинаміка. 2018. № 3. С. 43–47.
4. Shcherba, M.A. Numerical simulation of electromagnetic and thermal fields in induction channel furnaces with defects of lining. Технічна електродинаміка. 2018. № 4. С. 33–36.
5. Shcherba, M.A. Influence of the density increasing of close located water micro-inclusions on electrophysical processes in nonlinear solid dielectric. Технічна електродинаміка. 2018. № 5 С. 22–25.
6. Shcherba, A.A., Suprunovska N.I. Cyclic transients in the circuits of electric discharge installations taking into account the influence of magnitude and rate of discharge currents rise on resistance of electric spark load. Technical Electrodynamics. 2018. № 2. pp. 3-10.
7. Shcherba, A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Probabilistic properties of electrical characteristics of capacitor charge circuit with stochastic active resistance. Technical Electrodynamics. 2018. № 6. pp. 14-17.
8. Martynov V.V., Shcherba, A.A. High-voltage multiphase semiconductor converters with reduced energy accumulation for Gas discharge installations. Technical Electrodynamics. 2018. № 4. pp. 65-69.

9. Shcherba, A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Technical Electrodynamics*. 2018. № 3. pp. 43-47.
10. Shcherba, A.A., Podoltsev, A.D., Kucheriava, I.M. The magnetic field of underground 330 kV cable line and ways for its reduction. *Technical Electrodynamics*. 2019. № 5. pp. 3-9.
11. Shcherba, A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Determination of probabilistic properties of electrical characteristics of circuits of electric discharge installations taking into account their stochastically changing parameters. *Technical Electrodynamics*. 2019. № 4. pp. 3-11.
12. Suprunovska N. I. Shcherba, M.A., Mykhailenko V. V. Peretyatko Yu. V. Transients at changing the configuration of the discharge circuit of the capacitor of semiconductor electrical discharge installations with an electro-spark load. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2 С. 3–9.
13. Suprunovska N. I. Shcherba, M.A., Peretyatko Yu. V. Roziskulov S.S. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuits *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4 С. 15–18.
14. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Дослідження магнітного поля силових кабелів, прокладених у поліетиленових трубах з магнітними властивостями. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 15-21.
15. M. Ostroverkhov, V. Chumack, E. Monakhov and A. Ponomarev, "Hybrid Excited Synchronous Generator for Microhydropower Unit," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 219-222.
16. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. "Conditions for Limiting the Output Voltage of Double-circuit Semiconductor Discharge Installations with Positive Voltage Feedback," 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv-Slavske, Ukraine, 2019, pp. 1-4.
17. M. Ostroverkhov and V. Pyzhov, "Control of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 277-282.
18. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. "Method for Increasing the Rate of Current Rise in the Load of Electrical Discharge Installations," 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv-Slavske, Ukraine, 2019, pp. 1-4.
19. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov, "Axial Flux Permanent Magnet Controlled Generator," 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, 2018, pp. 353-357.
20. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov, "Synchronous Axial-Flux Generator with Hybrid Excitation in Stand Alone Mode," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 455-459.
21. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov, "Output Voltage Stabilization Process Simulation in Generator with Hybrid Excitation at Variable Drive Speed," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 310-313.
22. M. Ostroverkhov and M. Buryk, "Vector Control of Field Regulated Reluctance Motor," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 486-490.
23. M. Ostroverkhov and M. Buryk, "Control of Permanent Magnet Synchronous Motor under Conditions of Parametric Uncertainty," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 98-101.
24. Shcherba Anatolii; Shcherba Maksym, Peretyatko Yulia. "Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 353-356.
25. Shcherba A., Zolotarev V., Shcherba M., Belyanin R. Improving Wear Assessment Method of Inductor Thermal Insulation of Channel Furnaces for Ultra-Pure Copper Melting. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, 2020. p. 335-338.

26. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Biletsky O.O. "Increasing Energy Efficiency of Charge Circuits of Supercapacitors from Voltage Source," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 164-167.

27. M. Ostroverkhov, V. Chumack and Y. Monakhov, "Robust Control of Hybrid Excited Synchronous Machine," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 295-300.

28. M. Ostroverkhov and D. Trinchuk, "Increasing the Efficiency of Electric Vehicle Drives with Supercapacitors in Power Supply," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 258-261.

29. M. Y. Ostroverkhov and M. P. Buryk, "Speed Control System of Synchronous Motor Drives with Field Weakening using the Concept of Inverse Problems of Dynamics," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 310-314.

30. N. Ostroverkhov and N. Buryk, "Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5.

31. M. Ostroverkhov, Y. Monakhov and V. Chumack, "Study of Robust Speed Control of Hybrid Excited Synchronous Machine with Field Weakening," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 5-9.

13. Ключові слова: електротехнологія плавки, індукційна установка, надчиста мідь, енергоефективність.