

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРА МАКАРОВА**

Кваліфікаційна наукова праця
На правах рукопису

ЧЕСТНИХ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.3:519.876.5:621.745.56

ДИСЕРТАЦІЯ

**МАТРИЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У МЕТАЛЕВОМУ РОЗПЛАВІ ПРИ
ПРОТІКАННІ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ**

141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Здобувач: Честних Микола Володимирович

Науковий керівник: Черно Олександр Олександрович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2025

АНОТАЦІЯ

Честних М.В. Матрична формалізація розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено удосконаленню методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для матричної 2D/3D формалізації характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при його кондукційній електрострумовій обробці та розробці відповідних алгоритмів керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об’єкта обробки.

Основні завдання роботи полягають в розробці методологічних засад та програмної реалізації матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки (відображення у 2D та 3D форматах), запропонуванні алгоритму керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об’єкта обробки задля отримання виливків високої якості.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, розкрито стан та сутність науково-технічної проблеми, що досліджується, обґрунтовано доцільність дослідження, наведено зв'язок із науковими програмами та планами науково-дослідних робіт Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичне

значення отриманих результатів, наведено відомості про наукові публікації та апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* проведено огляд науково-технічної інформації щодо особливостей кондукційної електрострумової обробки розплавів алюмінієвих сплавів різними типами струмів, методів моделювання процесів у розплаві при такому його навантаженні.

Проведений огляд показав, що процеси у розплаві при пропусканні електричного струму мають ознаки багатопараметричних та мультифізичних, а результат обробки залежить від багатьох факторів, серед яких: тип струму та тип електродної системи, форма ємності з розплавом, доза введеної у розплав енергії. Оскільки варіантів обробки досить багато, а експериментальні дослідження з розплавом затратні, для дослідження процесів у розплаві при його обробці струмом використовують різні методи моделювання. Більшість авторів застосовують для цього метод скінченних елементів. Зазначено, що використання методу скінченних елементів для дослідження процесів у рідкометалевому провіднику за умов його кондукційної електрострумової обробки пов'язано з труднощами визначення граничних умов задачі, обрання для аналізу відомих математичних моделей або їх коригування з урахуванням особливостей досліджуваних процесів. Проведений аналіз показує, що використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки може суттєво доповнити науковий доробок щодо кондукційної електрострумової обробки розплавів алюмінієвих сплавів.

Другий розділ присвячено розробці розрахункових алгоритмів методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для моделювання розподілу електромагнітних полів у 2D/3D форматах.

В основу методу покладено розбиття об'єкта досліджень на скінченну кількість комірок з подальшим їх заміщенням відповідними електричними схемами. Для ефективного застосування методу розбиття масивних провідників

на елементарні комірки розроблено два підходи його реалізації. Перший передбачає формування за допомогою алгоритму матриці інцидентності загальної схеми заміщення, визначення параметрів схеми заміщення і подальший її розрахунок із застосуванням методу вузлових потенціалів у матричній формі. Другий передбачає попередній розрахунок параметрів схеми заміщення, формування листу з'єднань (netlist) за допомогою алгоритму, написаному на мові Python для програми LtSpice і подальший її розрахунок.

Отримані результати показали принципову відмінність у формуванні сфери впливу на розплав (базового електричного поля) варіантів із двома та чотирма електродами. На відміну від двох електродів, поле стає більш неоднорідним, що може більш ефективно впливати на термодинамічний стан системи розплаву.

Для перевірки отриманих із застосуванням електричних схем заміщення результатів моделювання було проведено фізичне моделювання розподілу електричного поля на плоскій та об'ємній моделях. Результати, отримані за допомогою фізичного моделювання, добре узгоджуються з результатами моделювання методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки, різниця між відповідними значеннями потенціалів не перевищує 6%.

Показано, що використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки дає змогу, по-перше, з задовільною точністю оцінювати розподіл, як мінімум, базового електромагнітного поля у розплаві при його обробці електричними струмами при значно менших витратах часу у порівнянні з методом скінченних елементів, по-друге, визначати розподіл характеристик електромагнітного поля на стінках ємності з розплавом, що може бути використано у подальшому моделюванні методом скінченних елементів.

Запропоновано для дослідження мультифізичних процесів у металевому розплаві при його кондукційній електрострумовій обробці використовувати гібридний метод моделювання, який передбачає сумісне використання методів

розбиття масивних провідників на елементарні комірки, скінченних елементів та інтегральних рівнянь. Такий підхід дозволяє подолати обмеження, що виникають при окремому застосуванні перерахованих методів, зменшити розрахункові затрати та має багатоваріантні перспективи застосування.

Третій розділ присвячено розробці парадигми спрощеної наскрізної системи енергетичного керування якістю литого металу у технологіях ливарного виробництва при застосуванні енергетичних методів обробки розплаву.

У роботі пропонується використовувати наскрізну систему керування, яка передбачає три стадії: проектування, виготовлення, споживання. На стадії проектування, завдання якого полягає в організації умов ефективного керування якістю, пропонується для аналізу потенційних функціональних можливостей та цільових наслідків використання методу енергетичної обробки розплаву, систему відповідних умов та факторів. Така система дозволяє знаходити обґрунтовані раціональні практичні рішення для створення відповідного технологічного модуля та технологічних регламентів. При цьому визначаються умови та фактори для отримання високоякісних виливків. Крім того, на стадії проектування технології вже потрібно на базі експериментальних даних та імітаційного моделювання визначати параметри та архітектуру технологічного модуля.

На стадії виготовлення, враховуючи багатфакторність, багатфункціональність самого виробництва та мультифізичні ознаки рідкометалевої системи, слід проблему керування звузити до проблеми регулювання. При розв'язанні проблеми регулювання потрібно при обробці підтримувати стабільне значення величини енергії, яка вводиться у розплав. Для цього доцільно використовувати фундаментальний принцип – регулювання за відхиленням. Таким чином, процедура регулювання стабільного збудження рідкометалевої системи електромагнітним полем при кондукційній

електрострумовій обробці визначається тільки параметрами джерела струму при конкретній електродній системі. Таке регулювання можна назвати електромагнітним. Воно дає принципову змогу організації сприятливого термодинамічного стану у рідкометалевій системі, за яким утворюються умови покращення її кристалізаційної здатності у напрямку забезпечення ефективної кристалізації литва так, щоб отримати високу якість виливка.

На третій стадії (споживання) характеристика якості вже готового виливка вибірково тестується з позицій виробника на бездефектність. Звісно ж, в умовах ливарного виробництва такий підхід дозволяє тільки *post factum* їх виявляти та відбраковувати неякісні виливки.

У *четвертому розділі* наведено результати експериментальних досліджень електрострумової обробки розплаву алюмінієвого сплаву АК7, що їх було проведено для перевірки енергетичного регулювання параметрів розплаву. Було проведено обробку із застосуванням двоелектродної системи та змінного і випрямленого струмів окремо, а також одночасно. Для цього використано величину струму по 40 А для кожного типу струму в разі обробки одним джерелом і по 20 А за одночасного впливу. Час обробки обирався з урахуванням масштабного фактора (становив 16 хвилин). Додатково, враховуючи результати, що їх отримано методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки, де вперше було показано суттєве збільшення потужності термосилового навантаження у локальних зонах біля електродів, висунуто гіпотезу, що цей факт дозволяє зменшити час обробки при кондукційній електрострумовій обробці. Для перевірки цього факту, додатково відпрацьовано 10 і 5 хвилин.

Отримані результати показали позитивний ефект обробки у всіх режимах, проте найкращий результат отримано саме при скороченні часу обробки практично у три рази, тобто при суттєвому скороченні енерговитрат. Отримано однорідну структуру зі зменшеними зернами α -Al, які до того ж мають

здебільшого округлу форму, а також здрібнені елементи евтектики. Це відбилося на показниках механічних властивостей. Тимчасовий опір σ_v виріс на 13%, відносні видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносне звуження ψ – отримано на рівні 4,4%.

Розроблено рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва.

Ключові слова: електромагнітне поле, моделювання, металевий розплав, алюмінієво-кремнієві сплави, кондукційна електрострумова обробка, еквівалентні схеми, матрична формалізація, фізичний експеримент, методи керування в електричних системах, енергетичне регулювання, якість.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Честних М.В., Цуркін В.М., Іванов А.В., Черно О.О. Моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 4/2021 (56). С. 35-45. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.4.56.35-45.

Режим доступу: https://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/04_35_45_%d7%e5%f1%f2%ed%e8%f5_%d6%f3%f0%ea%b3%ed_%b2%e2%e0%ed%ee%e2_%d7%e5%f0%ed%ee.pdf (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України).

2. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zaporozhets Yu.M., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60, pp. 31-41. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

3. Chestnykh N.V., Ivanov A.V. (2024). Simulation Modeling of the Characteristics of the Primary Electric Field at the Boundaries of a Liquid Metal

Object Treated by Passing an Electric Current. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60, №4. pp. 626–632. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524700224> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

4. Іванов А.В., Честних М.В. (2024). Тривимірне моделювання особливостей розподілу електромагнітних полів та характеристик силової дії під час кондукційної електрострумової обробки розплавів у частотних режимах. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. №2 (65), с. 8-13. DOI: <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.1> (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України).

5. Tsurkin V.M., Chestnykh M.V., Ivanov A.V., Cherny O.O. (2025) The paradigm for building a simplified end-to-end quality management system for technical innovation in foundry production. *Science and innovation*. Vol. 2, pp. 54-63. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine21.02.054> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Честних М.В. (2022). Результати моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції, 27-28 жовтня 2022 року (форма участі – дистанційна). https://www.nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2022/10/Innovation_2022_print_23_10_2022.pdf

7. Честних М.В. (2023). Фізичне моделювання розподілу електричного поля в металевому провіднику. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Автоматика та електротехніка”, 13-14 листопада 2023 року (форма участі – дистанційна). https://www.researchgate.net/publication/375715743_Conference_AE_2023

8. Честних М.В., Іванов А.В. (2024). Особливості розподілу електромагнітних полів у розплаві при обробці електричним струмом у частотних режимах та використанні різних електродних систем. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції, 25-26 вересня 2024 року (форма участі – дистанційна). <https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Materiali-konferencii.pdf>

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V., Degtev Yu.N., Kharytonova T.G. (2023). Experimental study of the effect on the quality indicators of castings of the simultaneous treatment of the melt with different currents. *Metal and Casting of Ukraine*. №3, pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.021>

ABSTRACT

Chestnykh M.V. Matrix formalization of the distribution of electromagnetic field characteristics in metal melt during electric current flow. – Qualifying scientific work with manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electroenergetics, electrical engineering and electromechanics". – National university of shipbuilding, Mykolaiv, 2025.

The dissertation is devoted to the improvement of the method of dividing massive conductors into elementary cells for matrix 2D/3D formalization of the electromagnetic field characteristics in a metal melt during its conductive electric current treatment and the development of appropriate algorithms for controlling the intensity of electrotechnological processes of loading the object of treatment.

The main tasks of the work are to develop methodological principles and software implementation of matrix formalization of the distribution of electrical characteristics in a metal conductor when using the method of dividing massive conductors into elementary cells (display in 2D and 3D formats), to propose an algorithm for controlling the intensity of electrotechnological processes of loading the processing object to obtain high quality castings.

The paper consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a list of references and appendices.

The introduction substantiates the relevance of the work, reveals the state and essence of the scientific and technical problem under study, justifies the feasibility of the research, provides a link with the scientific programs and research plans of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, formulates the purpose and objectives of the research, scientific novelty and practical significance of the obtained results, provides information on scientific publications and approbation of the results of the work.

In the first chapter, an overview of scientific and technical information regarding the characteristics of conductive electric current treatment of aluminum alloy melts with different types of currents, methods of modeling processes in the melt under such a load is provided.

The overview indicates that the processes in the melt during the electric current flow have signs of multi-parametric and multi-physical, and the processing result depends on numerous factors, including the type of current and the type of electrode system, the shape of the melt container, and the dose of energy introduced into the melt. Since there are a lot of processing options and experimental studies with the melt are costly, various modeling methods are used to study the processes in the melt during its electric current treatment. Most authors apply the finite element method for this purpose. It is noted that the application of the finite element method to study processes in a liquid-metal conductor under conditions of its conductive electric current treatment is associated with the difficulty of determining the boundary conditions of the problem, selecting known mathematical models for analysis or adjusting them to take into account the characteristics of the processes under study. The analysis shows that the application of the method of dividing massive conductors into elementary cells can significantly complement the scientific achievements in the field of conductive electric current treatment of aluminum alloy melts.

The second section is devoted to the development of computational algorithms for the method of dividing massive conductors into elementary cells for modelling the distribution of electromagnetic fields in 2D/3D formats.

The method is based on the division of the study object into a finite number of cells with their subsequent replacement by appropriate electrical circuits. For the effective application of the method of dividing massive conductors into elementary cells, two approaches to its implementation have been developed. The first one involves the formation of a general replacement scheme using the incident matrix algorithm, determination of the equivalent circuit parameters and its subsequent calculation using

the method of nodal potentials in matrix form. The second one involves preliminary calculation of the equivalent circuit parameters, formation of a netlist using an algorithm written in Python for the LtSpice software and its subsequent calculation.

The obtained results showed a fundamental difference in the formation of the sphere of influence on the melt (base electric field) for the variants with two and four electrodes. In contrast to two electrodes, the field becomes more heterogeneous, which can more effectively influence the thermodynamic state of the melt system.

To verify the simulation results obtained by using electrical equivalent circuits, physical modelling of the electric field distribution was carried out on a 2D and 3D models. The results obtained from the physical modelling are in good agreement with the results of the modelling by dividing the massive conductors into elementary cells, with the difference between the corresponding potential values not exceeding 6%.

It has been shown that the application of the method of dividing massive conductors into elementary cells enables several key advantages. First, it allows estimating with sufficient accuracy the distribution of at least the basic electromagnetic field in the melt during its treatment with electric currents at a much lower time cost in comparison with the finite element method. Second, it allows determining the distribution of the electromagnetic field characteristics on the sides of the melt container, which can be used in further modelling by the finite element method.

It is proposed to apply a hybrid modelling method for studying multiphysical processes in a metal melt during its conductive electric current treatment. It involves the combined application of methods of dividing massive conductors into elementary cells, finite elements and integral equations. This approach allows overcoming the limitations arising from the separate application of the above methods, reduces computational costs, and has multivariate application prospects.

The third section is devoted to the development of a paradigm of a simplified end-to-end energy management system for the quality of cast metal in foundry technologies with the application of energy methods of melt treatment.

This thesis suggests the use of an end-to-end casting quality management system that involves three stages: design, production, consumption. At the design stage, the task of which is to organize the conditions for effective quality management, a system of relevant conditions and factors is proposed to analyze the potential functionality and target consequences of applying the melt energy treatment method. Such a system allows to find reasonable rational practical solutions for the creation of an appropriate technological module and technological regulations. It also determines the conditions and factors for producing high-quality castings. In addition, at the technology design stage, it is already necessary to determine the parameters and architecture of the process module based on experimental data and simulation modeling.

At the manufacturing stage, taking into account the multifactorial nature, multifunctionality of the production itself, and the multifunctional characteristics of the liquid metal system, the control problem should be narrowed down to the regulation problem. In solving the control problem, it is necessary to maintain a stable value of the energy input to the melt during processing. For this purpose, it is advisable to use the fundamental principle control by deviation. Thus, the procedure for regulating the stable excitation of a liquid metal system by an electromagnetic field during conductive electric current treatment is determined only by the parameters of the current source for a particular electrode system. This control can be called electromagnetic. It provides the fundamental possibility for the organization of a favorable thermodynamic state in the liquid-metal system, which creates conditions for improving its crystallization capacity in the direction of ensuring efficient casting crystallization so as to obtain a high quality casting.

At the third stage (consumption), the quality characteristics of the finished casting are selectively tested for defects from the manufacturer's point of view. Of course, in a foundry environment, this approach allows only post factum detection and rejection of low-quality castings.

Section 4 presents the results of experimental studies of electric current treatment of the melt of aluminium alloy AK7, which were carried out to verify the energy control of melt parameters. The treatment was performed using a two-electrode system and alternating and direct currents separately and simultaneously. For this purpose, a current value of 40 A was applied for each type of current in the case of single-source treatment and 20 A for simultaneous treatment. The processing time was chosen taking into account the scale factor (16 minutes). In addition, taking into account the results obtained by dividing massive conductors into elementary cells, where for the first time a significant increase in the power of the thermal force load in local zones near the electrodes was shown, it was hypothesised that this fact allows reducing the processing time during conductive electric current treatment. To verify this fact, additional 10 and 5 minutes were worked out.

The obtained results showed a positive treatment effect in all modes, but the best result was obtained by reducing the treatment time by almost three times, i.e., with a significant reduction in energy consumption. A homogeneous structure was obtained with reduced α -Al grains, which are mostly rounded, and crushed eutectic elements. This was reflected in the mechanical properties. The temporary resistance σ_B increased by 13%, the relative elongation δ increased by 1.5 times, and the relative narrowing ψ was obtained at the level of 4.4%.

Recommendations for the design of technological processes of electric current treatment of massive conductors in foundry technologies have been developed.

Keywords: electromagnetic field, modeling, metal melt, aluminum-silicon alloys, conductive electric current of melt, equivalent circuits, matrix formalization, physical experiment, control methods in electrical systems, energetic regulation, quality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ ...	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВОГО ДОРОБКУ СТОСОВНО ЗАСТОСУВАННЯ М-К ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У РІДКОМЕТАЛЕВИХ СИСТЕМАХ. СТАН РОЗРОБЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
1.1 Особливості обробки розплаву електричним струмом.....	26
1.2 Характеристика методів моделювання ЕМП у металевому розплаві ...	33
1.3 Застосування еквівалентних електричних кіл для моделювання фізичних полів	37
Висновки до розділу	41
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВИХ АЛГОРИТМІВ СТОСОВНО М-К ПРИ 2D/3D ФОРМАЛІЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У ТОМУ ЧИСЛІ ПРИ ОДНОЧАСНІЙ ОБРОБЦІ РІЗНИМИ СТРУМАМИ	43
2.1 Особливості використання М-К для визначення розподілу електричного струму різного типу у масивній рідкометалевій системі	43
2.2 Розробка матричних розрахункових алгоритмів М-К	46
2.2.1 2D-моделювання розподілу електромагнітного поля у металевому розплаві	54
2.2.2. Методологія застосування М-К для розв'язання задач у 3D форматі	67
2.3 Імітаційне моделювання характеристик первинного електричного поля на границях рідкометалевого об'єкта, що обробляється пропусканням електричного струму	69
2.4 Фізичне моделювання електричного поля у металевому провіднику...	85

2.5 Методологічні засади математичного моделювання процесів у електротехнічних пристроях.....	93
2.5.1 Застосування гібридних методів математичного моделювання для дослідження процесів при КЕСО	94
2.5.2 Застосування М-К та МСЕ для моделювання електромагнітного поля у розплаві	96
Висновки до розділу 2	105
РОЗДІЛ 3 ПАРАДИГМА ПОБУДОВИ СИСТЕМИ НАСКРІЗНОГО КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	107
3.1 Загальні проблеми керування якістю.....	108
3.2 Парадигма спрощеної системи наскрізного керування якістю виливка при застосуванні методу кондукційної електрострумової обробки розплаву	110
3.3 Висновки до розділу 3	116
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗПЛАВУ	118
4.1 Методика експерименту	119
4.2 Результати експериментальних досліджень.....	122
4.3 Рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва	124
Висновки до розділу 4	130
ВИСНОВКИ.....	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	134
Додаток А Список опублікованих праць здобувача за темою дисертації	144
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертації	147
Додаток В Засоби вимірювальної техніки, що використовувалися при проведенні дисертаційних досліджень	148

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АЧХ – амплітудно-частотні характеристики;
БРС – базовий (вищій) рівень структури;
ДРПЧ – диференційні рівняння у часткових похідних;
ДС – дисипативні структури;
ЕМП – електромагнітне поле;
ЕС – електродна система;
КЕСО – кондукційна електрострумова обробка;
М-К – метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки;
МЕВР – методи енергетичного впливу на розплав
МСЕ – метод скінченних елементів;
МІР – метод інтегральних рівнянь;
П-Р – поліваріантний метод кондукційної електрострумової обробки розплаву;
РМС – рідкометалева система;
ЕМАП – електромагнітно-акустичне перетворення енергії;
ПВС – проектування-виготовлення-споживання;
ЯВК – якість-вартість-конкурентоздатність;
КСІ – керування-система-інформація;
АС – alternating current (змінний струм), А;
СС – constant current (постійний струм за величиною), А;
ДС – direct current (постійний струм за знаком), А;
РС – pulse current (імпульсний струм), А;
А – магнітний потенціал, Тл·м;
Е – напруженість електричного поля у розплаві, В/м;
 E_x – х-складова напруженості електричного поля, В/м;
 E_y – у-складова напруженості електричного поля, В/м;

B – магнітна індукція, Тл;

μ_0 – магнітна проникність вакууму, Гн/м;

G – питома електропровідність, См/м;

H – напруженість магнітного поля у розплаві, А/м;

I – сила струму, А;

t – поточний час, с;

T – температура, К;

ρ_{Al} – питомий опір алюмінію, Ом/м;

σ_b – межа міцності, МПа;

U – напруга, В;

V – об'єм РМС, м³;

∇ – оператор Гамільтона;

Φ – магнітний потік, Вб.

ВСТУП

Актуальність теми. Активне використання електротехнологій у промисловості, сільському господарстві, транспорті, будівництві та побуті стало можливим завдяки дослідженням, які дозволяють на базі наукового доробку знаходити нові проектні рішення, які можуть бути навіть стандартизованими. Фундаментальною базою таких досліджень постає розширення проблематики електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Аналіз науково-технічних джерел інформації свідчить про те, що останніми роками провідні наукові школи, які працюють у галузі електротехнологій для ливарного виробництва, проводять активний пошук технологічних методів та регламентів, які спроможні забезпечити підвищення якості литого металу, враховуючи дуалізм показників системи “ціна-якість”. З цього приводу або виявляються ефективні резерви для оптимізації цих показників у таких традиційних технологічних методах обробки розплавів, як електромагнітне перемішування, магнітно-гідродинамічна обробка, ультразвукова обробка тощо [1-10], або ж ведеться пошук нових електротехнологічних методів, як, наприклад кондукційна електрострумова обробка (КЕСО) [11-20]. Виконані дослідження цього методу показали його інноваційну перспективу. Значний внесок у розвиток наукових основ методу КЕСО вносять Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України [14], ряд провідних наукових шкіл Китаю [3, 12, 13, 15, 17], Республіки Корея [11, 18, 19], Австралії [2, 3, 5] та США [20].

Важливо відмітити, що ефективність КЕСО залежить не тільки від параметрів джерел струму, а й від електрофізичних характеристик об'єкта обробки, типів електродних систем, температурних інтервалів обробки та топології і характеристик первинного електромагнітного поля [15, 16].

Експериментальні результати свідчать, що характеристики якості виливка, отриманого при використанні КЕСО, можуть мати високі показники. Але для цього потрібно організовувати технологічні регламенти обробки на підставі наукових даних, які, нажаль, поки що не дозволяють назвати їх такими, що враховують будь-які умови металургійного перероблення будь-якого підприємства ливарного виробництва. Річ у тім, що воно характеризується як багатоваріантне, багатофакторне та багатопараметричне з рознесеними у просторі і часі ланками, для яких традиційно використовують здебільшого емпіричні принципи побудови відповідних технологічних регламентів. Тому актуальною постає проблема їх проектування на основі наукового обґрунтування парадигми, яка базується на сучасних методах досліджень. Щодо КЕСО, що для цього наукові школи і лабораторії все більш активно використовують методи математичного моделювання, для яких застосовують здебільшого розрахункові принципи методу скінченних елементів (МСЕ) [1, 2, 11, 12, 15], методу скінченних різниць (МСР) [21] або методу інтегральних рівнянь (МІР) [16]. Кожен з них має свої позитивні риси, але й труднощі при застосуванні, крім того, слід враховувати багатофакторність ливарного виробництва, тому вони не є універсальними. Для розширення функціональних можливостей методів математичного моделювання процесів при КЕСО та задля отримання верифікованих результатів пропонується у даній роботі використовувати метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К), загальні принципи якого добре відомі. Але стосовно КЕСО вони потребують відповідної адаптації, що враховує специфіку об'єкта обробки та досліджень. Крім того, актуальною постає задача визначення відповідних умов та факторів, які для КЕСО забезпечать ефективне керування технологічними регламентами, починаючи від етапу проектування технології і закінчуючи етапом аналізу якості кінцевого продукту – виливка.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є удосконалення методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для матричної 2D/3D формалізації характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при його обробці електричним струмом; розробка відповідних алгоритмів керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки.

Для досягнення мети розв'язано наступні задачі:

- здійснено аналіз методів моделювання електромагнітного поля у масивних металевих провідниках при їх обробці кондукційним електричним струмом;
- визначено особливості використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К) в умовах протікання електричного струму різного типу через масивний провідник;
- розроблено методологічні засади та програмну реалізацію матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні М-К для моделювання у 2D та 3D форматах;
- проведено перевірку удосконаленого методу М-К шляхом порівняння результатів моделювання процесів при обробці струмом металевого розплаву з відповідними результатами, отриманими методом МСЕ і методом фізичного моделювання;
- запропоновано алгоритм керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки задля отримання виливків високої якості;
- розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва.

Об'єкт дослідження – процеси формування у рідкометалевій системі первинного електромагнітного поля при КЕСО.

Предмет досліджень – принципи матричної формалізації топології первинного електромагнітного поля для дослідження процесів його формування задля побудови методології наскрізного керування ефективністю КЕСО.

Методи досліджень базуються на сучасних фундаментальних уявленнях щодо науково-технічних проблем електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. При дослідженні процесів електрострумового навантаження масивних рідкометалевих провідників використовувались методи імітаційного моделювання. При моделюванні електромагнітних полів основним з них був метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К). Для верифікації результатів, отриманих методом М-К у роботі застосовано метод скінченних елементів та фізичне моделювання. Розробка парадигми побудови системи наскрізного керування якістю у ливарному виробництві виконувалась із застосуванням системного аналізу. Перевірка енергетичного регулювання параметрів розплаву здійснена шляхом фізичного експерименту з використанням методів вимірювання електричних характеристик, термографії, металографії, механічних випробувань та математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Відповідно до тематичного плану ІПТ НАН України та постанови Бюро ВФТПМ НАН України:

- тема НДР “Дослідження процесів, що супроводжують одночасну обробку розплаву силумінів різними типами струмів, та визначення умов і параметрів електромагнітного навантаження розплаву, яке забезпечує підвищення показників якості литого металу”. Номер держреєстрації 0121U109433;

- тема НДР “Дослідження процесів електрострумової обробки ливарних сплавів на основі алюмінію під час плавлення та кристалізації, які забезпечують

сприятливу морфологію залізовмісної фази та підвищення службових характеристик виливків”. Номер держреєстрації 0118U000341;

- тема НДР “Розробка гібридного методу кондукційної електрострумової та індукційної магнітно-імпульсної обробки розплаву, який забезпечить підвищення показників якості литого сплаву”. Номер держреєстрації 0124U000815.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Здійснено розвиток методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К) в частині формалізації розподілу характеристик електромагнітного поля, що дозволило досліджувати процеси електрострумової обробки металевих розплавів з урахуванням особливостей їх енергетичного навантаження для визначення ефективних режимів обробки.

2. Вперше запропоновано спрощену концепцію наскрізного енергетичного керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об’єкта обробки задля отримання виливків високої якості.

3. Визначено умови та фактори, за яких застосування удосконаленого М-К забезпечує достатній рівень верифікації отриманих результатів, що дає можливість ефективного використання даного методу при моделюванні процесів електрострумової обробки розплавів.

Особистий внесок здобувача. В опублікованих у співавторстві роботах автору належить: у [1] – двовимірна та спрощена тривимірна модель для моделювання розподілу характеристик електричного поля у розплаві, загальний алгоритм моделювання із застосуванням методу М-К; у [2] – алгоритми застосування методу М-К для моделювання електромагнітних полів, що генеруються при КЕСО одним типом струму та суперпозицією електричних струмів, проведено чисельні дослідження характеристик електричного поля для випрямленого пульсуючого та змінного струмів, а також їх суперпозиції; у [3] – розрахункові алгоритми та чисельні розрахунки особливостей розподілу

базового електричного поля на границях металевого розплаву при пропусканні електричного струму; у [4, 8] – методика сумісного застосування М-К та МСЕ, проведено чисельне моделювання граничних умов для МСЕ шляхом використання М-К; у [5] – алгоритм регулювання, який названо електромагнітним, результати моделювання із застосуванням М-К, що свідчать про те, що зони активації флуктуацій зосереджуються біля електродів, тому поліваріантний метод КЕСО є більш ефективним аніж метод обробки одним струмом для генерування в окремих зонах РМС більш активних флуктуацій; у [9] – розробка методик та проведення експериментальних досліджень щодо впливу обробки сплаву системи Al-Si трьома типами електричних струмів на ступінь покращення структури виливків.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва.

Спрощена система наскрізного енергетичного керування ефективністю технологічних регламентів, яку розроблену в дисертаційній роботі, дозволяє визначати умови та фактори, за яких метод електрофізичної обробки рідкого сплаву надає можливість отримувати високу якість виливків (тимчасовий опір σ_v виріс на 13%, відносні видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносне звуження ψ – отримано на рівні 4,4%).

Удосконалено програмну реалізацію матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні М-К для 2D та 3D форматів. Показано, що М-К надає можливість суттєво доповнити функціональні можливості МСЕ та МІР, а також скоротити витрати часу, фінансових та матеріальних ресурсів на розробку і впровадження нових технологій обробки розплавів.

Відомості про апробацію результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях: XIII міжнародна науково-технічна конференція “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”, (Миколаїв, 27-28 жовтня 2022 року), Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Автоматика та електротехніка”, (Миколаїв, 13-14 листопада 2023 року), міжнародна науково-технічна конференція “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”, (Миколаїв, 25-26 вересня 2024 року).

Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались на засіданнях постійно діючого наукового семінару “Проблеми сучасної електротехнічної інженерії” Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова 28.10.2022 р., 27.12.2023 р. і 31.10.2024 р.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 149 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 113 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 3 таблицями та 81 рисунком. Список використаних джерел містить 86 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВОГО ДОРОБКУ СТОСОВНО ЗАСТОСУВАННЯ М-К ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У РІДКОМЕТАЛЕВИХ СИСТЕМАХ. СТАН РОЗРОБЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Особливості обробки розплаву електричним струмом

У ливарному виробництві можна перелічити десятки застосувань електротехнологій для всіх ланок металургійного перероблення у системі “шихта-розплав-виливок”, починаючи з застосування електрики для виплавлення шихти й закінчуючи спеціальними електротехнічними інструментами для видалення формувальної суміші виливка та його оброблення до кондиційного стану. Для середньої ланки системи (розплав) застосовують електротехнології, які можливо віднести до категорії так званих “високих технологій”. Стадію “розплав” поділяють на дві ланки. При температурі, що перевищує границю ліквідусу (T_L) утворюється рідкометалева система (РМС). У температурному інтервалі між ліквідусом та солідусом (T_L - T_S) при охолодженні відбувається поступовий процес кристалізації (рис. 1.1).

Будь-яка обробка розплаву у рідкому стані має наступні завдання: крім невілювання негативних наслідків шихти потрібно забезпечити дегазацію об'єкта обробки, його гомогенізацію у макрооб'ємі, а також у всьому його просторі створити умови для ефективного формування зародків кристалізації та здрібнення твердої фази. У сукупності це можна визначити як покращення кристалізаційної здатності рідкометалевої системи (РМС).

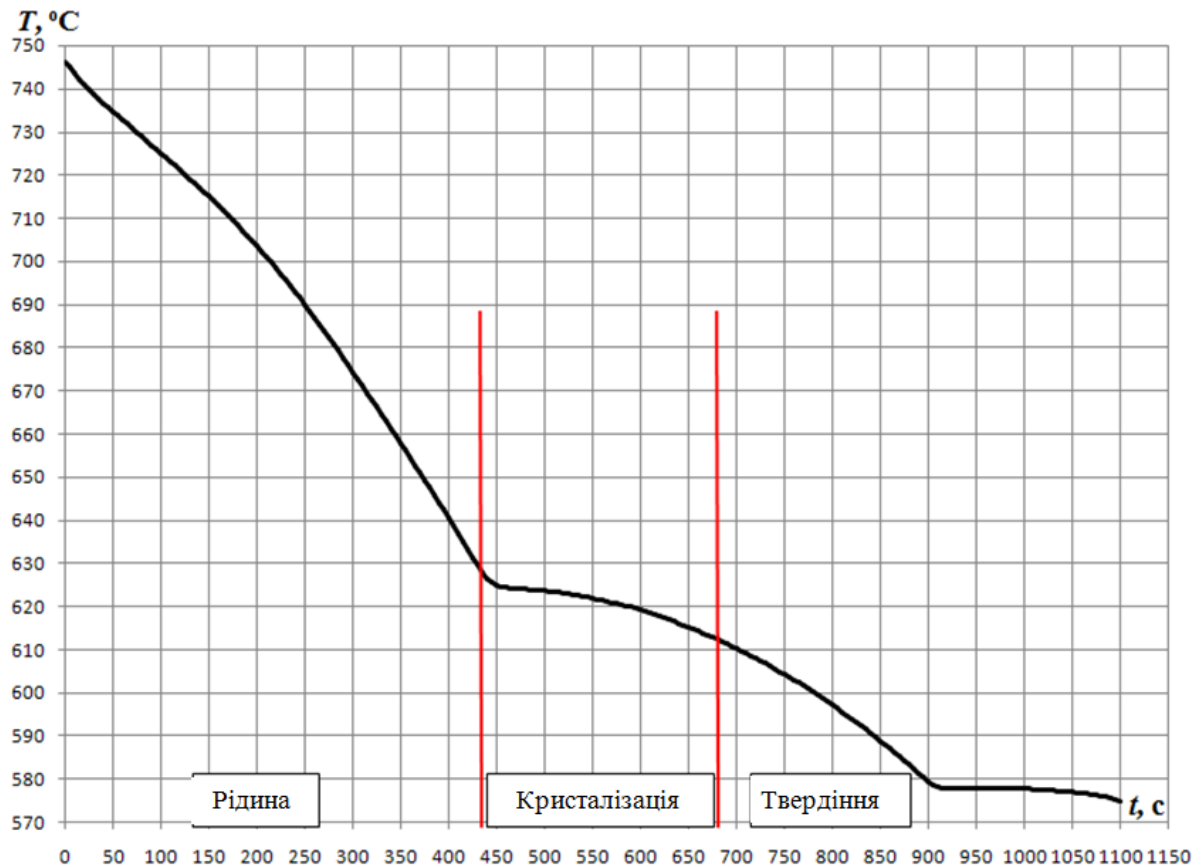


Рисунок 1.1 – Крива охолодження сплаву

Методи обробки розплаву поділяються на реагентні та енергетичні (рис. 1.2). Перші застосовують малі дози різних хімічних елементів. Так, для алюмінієвих сплавів активно застосовують додавання Ti, B, Mn, Zn, Zr, Sr, La, Ce, Nd [23-30]. Їхня дія є вибірковою і дозволяє забезпечити тільки окремі результати впливу. Другі використовують для впливу на розплав різні фізичні поля, дія яких є інтегральною та багатоцільовою. Серед них: вібраційні методи [31-34], електромагнітні [35-38], термічні [39, 40].

До енергетичних методів належить і метод кондукційної електрострумової обробки розплаву (КЕСО), або, як його іноді називають в англійській літературі, обробка електричним полем [17]. Суть його полягає у тому, що через металевий розплав за допомогою спеціальної електродної системи протягом певного часу пропускається електричний струм (рис. 1.3).

При цьому у розплаві виникає базове електромагнітне поле, яке формує вторинні поля: індуковане електромагнітне, звукове за принципами електромагнітно-акустичного перетворення енергії, теплове за рахунок джоулевого нагрівання та поле металопотоків, які утворюються кооперативною термосиловою дією полів, що формуються (рис. 1.4) [12, 14, 16, 41, 42].

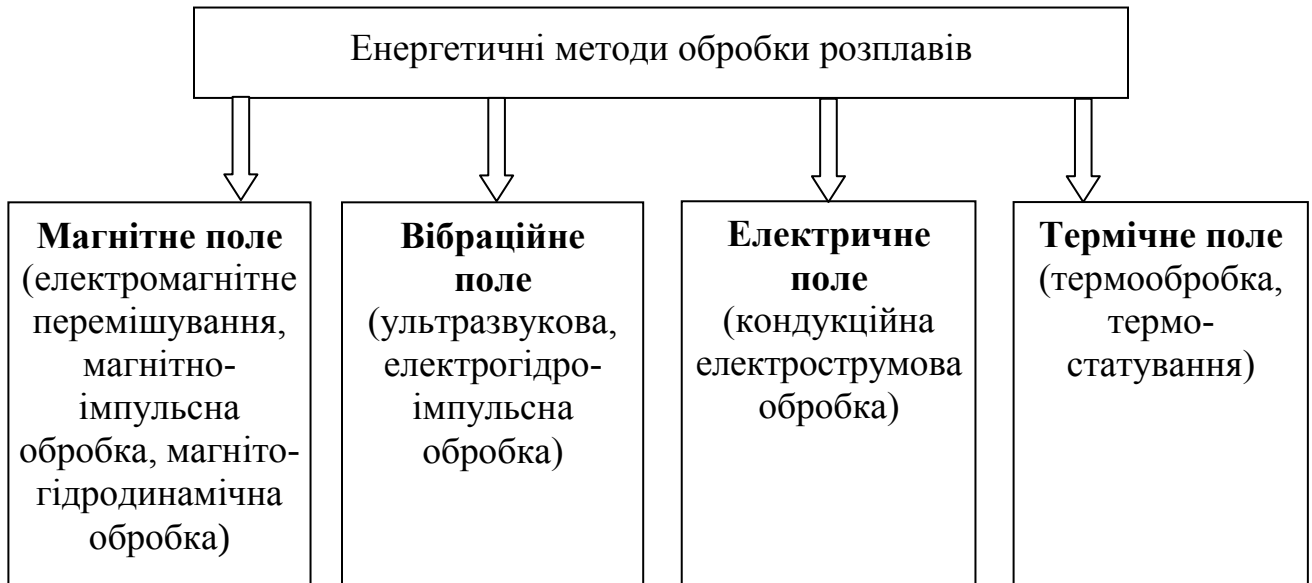


Рисунок 1.2 – Енергетичні методи обробки розплаву металу

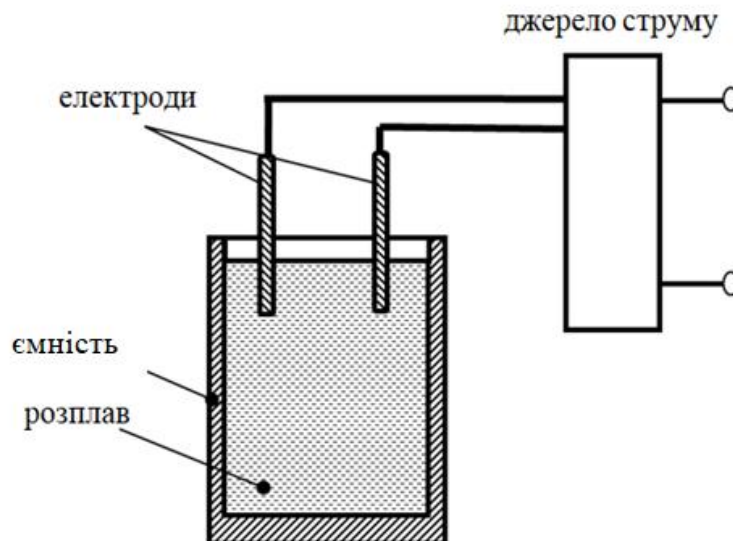


Рисунок 1.3 – Схема обробки розплаву електричним струмом

Саме сукупний вплив цих полів і призводить до гомогенізації та дегазації розплаву, утворення сприятливих умов покращення кристалізаційної здатності і, як наслідок, формування сприятливої структури і властивостей металу.



Рисунок 1.4 – Етапи перетворення енергії при КЕСО

Деякі автори використовують принцип КЕСО для обробки рідкого стану, деякі – тільки для кристалізаційного стану, деякі пропонують обробку струмом так, щоб охопити весь розплав від рідини до твердого. Такі підходи мають відповідний науковий доробок, обґрунтування кожного з них обумовлюється метою обробки. Обробка рідкого стану забезпечує тільки сприятливі умови кристалізації. Обробка кристалізаційного – створює умови здрібнення структури твердої фази, що зростає. Наскрізна – має за мету об'єднати ці принципи. Але, як зазначено в роботах [16, 41], вони відрізняються енергетичними показниками, що складають термосиловий вплив. Енергетичні зв'язки РМС відповідають умовам ближнього порядку, для твердого стану

характерна наявність як ближнього, так і дальнього порядків. Крім того, рідкий стан є хитливим, більш флуктуаційним аніж твердий. Тому з енергетичної точки зору раціонально застосовувати КЕСО саме рідкого стану. Наскрізна обробка потребує при переході позначки T_L (рис.1.1) поступово збільшувати потужність струму до кінця обробки, що дуже важко реалізувати технічними засобами.

У даній роботі досліджуються тільки умови КЕСО рідкометалевої системи.

Показники етапів перетворення енергії (рис 1.4) надають можливість стверджувати, що процеси, які утворюються при КЕСО, в сукупності належать до мультифізичних [43].

Для КЕСО можливо використовувати різні типи струмів (рис. 1.5), але вони характеризуються різними функціональними можливостями, а їх окремий вплив забезпечує різну зміну характеристик якості виливка [15, 41]. Так, при обробці розплаву постійним струмом (СС або DC) переважають електротеплові процеси в об'ємі розплаву. Виникає теплова конвекція, електроперенесення, зміна термодинамічних параметрів на межі поділу фаз, а також хімічні перетворення. Використання змінного струму (АС) відрізняється наявністю коливань і пульсацій, а за значних частот – виникненням скін-шару, тобто більш вираженим електросиловим навантаженням. Вплив імпульсного струму (РС) схожий на змінний, але відрізняється наявністю паузи струму і має широкий спектр амплітудно-частотних характеристик. Результат обробки також значною мірою залежить від типу електродної системи, що використовується, [16, 44] та форми ємності з розплавом [18].

Важливим досягненням попередніх досліджень є визначення того, що позитивний ефект обробки відбувається за умов введення у розплав за час обробки певної дози густини енергії (W_B), яка дорівнює значенню енергії кристалізації сплаву $W_B \approx E_c$ [45]. Для сплавів на основі алюмінію величина E_c

лежить у межах від $0,5$ до $6 \cdot 10^8$ Дж/м³ [45]. На рис. 1.6 наведено залежність межі міцності вилівка від величини масштабного фактора. Можна помітити, що максимальне значення межі міцності вилівка досягається саме при $W_B \approx E_c$. Це співвідношення названо масштабним фактором. По-перше, він дозволяє суттєво звужити для задачі енергетичні параметри, які варіюються. По-друге – перенести результати, отримані у лабораторії на малих масах сплаву, на промислові умови.

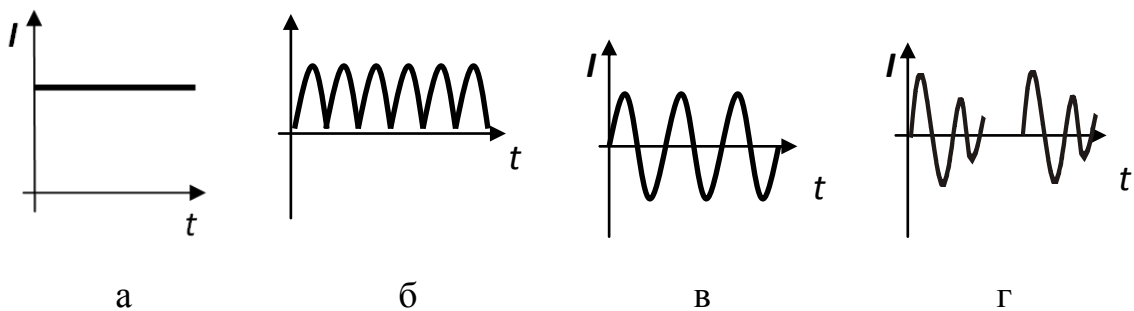


Рисунок 1.5 – Типи струмів при КЕСО: а – постійний за амплітудою (CC), б – постійний за знаком (DC), в – змінний (AC), г – імпульсний (PC).

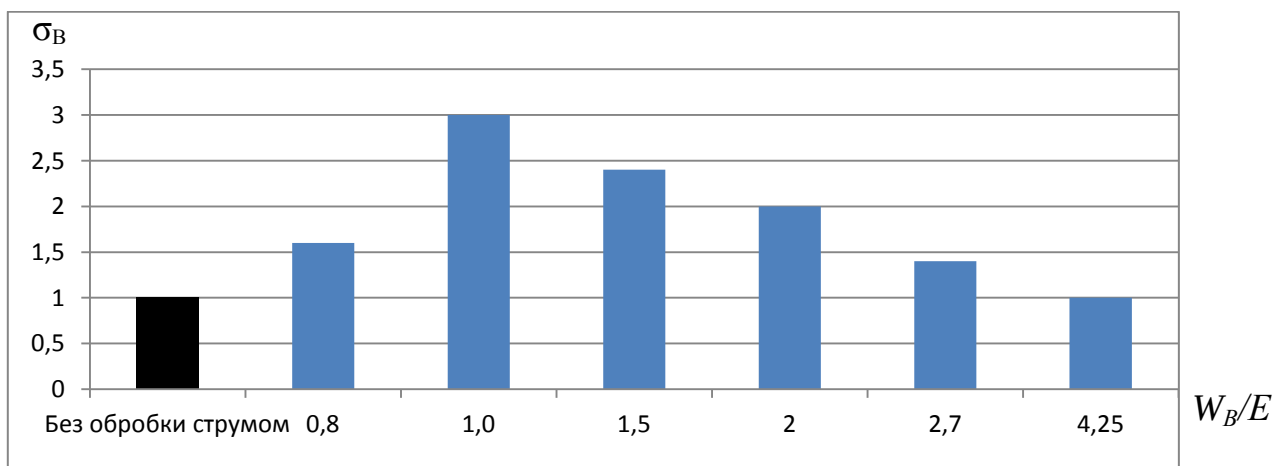


Рисунок 1.6 – Залежність межі міцності вилівка від величини масштабного фактора

Для CC, DC, AC доза енергії визначається за формулою:

$$W_B \approx (U_e I_e \cdot t) / V, \text{ Дж/м}^3, \quad (1.1)$$

де U_e – величина напруги на електродах; I_e – діюче значення струму у електричному колі; t – час обробки; V – об’єм розплаву.

Для РС:

$$W_B \approx \frac{CU_0^2}{2} \cdot k \cdot f \cdot t \cdot \frac{1}{V}, \text{ Дж/м}^3, \quad (1.2)$$

де C – ємність конденсаторної батареї, Ф; U_0 – напруга, В; f – частота слідування імпульсів, Гц.

В Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України запропоновано новаційний метод одночасної обробки розплаву струмами різних типів, який названо поліваріантним [46, 47]. У цьому випадку створюється можливість суттєво розширити функціональні можливості КЕСО впливати на якість виливка поліваріантно в залежності від структури системи “типи струмів-електродні системи”.

Підсумовуючи, метод КЕСО можливо характеризувати такими ознаками:

- метод можна використовувати в технологіях одиничного, дрібносерійного та серійного ливарного виробництва. При цьому потенційно КЕСО можливо застосовувати для обробки у печі, промисловій ємності, у жолобі, або безпосередньо у формі;
- вибір параметрів обробки визначається умовами технологічного регламенту і базується на меті обробки та характеристиках джерел струму;
- для КЕСО можливо використовувати одне джерело струму, або одночасно декілька;
- маса однієї порції розплаву, що обробляється, не лімітована. Для кожної маси час і параметри обробки визначаються через масштабний фактор ($W_B \approx E_c$) за допомогою формул (1.1), (1.2);
- керування технологічним модулем – дистанційне, одним оператором;

- важливою рисою модуля для КЕСО є організована заздалегідь система електробезпеки;
- вагомою перевагою КЕСО перед іншими електротехнологіями обробки розплаву є низький рівень потужності, що споживається технологічним модулем. Питома споживана енергія не перевищує величину 30 кВт·год/т [38, 47];
- технічна реалізація технологічного модуля для КЕСО не потребує вартісного унікального обладнання. У першу чергу це стосується джерел струму. Їх різні варіанти добре зарекомендували свою продуктивність у різних застосуваннях електротехнологій. Ця характеристика у порівнянні з низькими енерговитратами дозволяє сподіватись на високий рівень рентабельності методу КЕСО.

Опубліковані експериментальні дані щодо використання КЕСО у ливарному виробництві свідчать про ефективність цього методу, його екологічну чистоту, простоту технологічного модуля при раціональному поєднанні показників «ціна – якість». Але брак деяких науково обґрунтованих даних поки не дозволяє переходити до активного впровадження у промисловість.

1.2 Характеристика методів моделювання ЕМП у металевому розплаві

Дослідження в галузі ливарного виробництва в основному ґрунтувалися на фізичному експерименті. Але останніми роками з розвитком принципів комп'ютерного моделювання методи чисельного аналізу дали змогу, зокрема, істотно розширити науково обґрунтовані уявлення про пошук ефективних методів обробки розплаву, зокрема, електричним струмом [1, 2, 11, 12, 15]. При цьому фізичному експерименту в основному відводиться роль визначення post

factum залежності кінцевого результату металургійної переробки від параметрів навантаження об'єкта обробки.

Дослідження розподілу фізичних полів у розплаві при КЕСО представляє значний інтерес, адже саме поля є сполучною ланкою між зовнішніми параметрами впливу та внутрішніми структурно-кінетичними та фазовими перетвореннями. Врахування багатофакторного впливу на розплав може бути зроблено тільки в рамках розв'язування мультифізичної задачі [43]. Експериментальні методи досліджень таких процесів у цьому випадку спіткаються з певними труднощами та практично не є можливими. Тому на цей час використовують імітаційне моделювання – чисельний експеримент, але за умов певного спрощення постановки задач [15].

В загальному випадку, розрахунки фізичних полів можуть здійснюватися аналітичними або чисельними методами. Під час використання аналітичних методів шукану функцію подають у вигляді явної залежності від вихідних даних, унаслідок чого можна безпосередньо оцінити вплив на розподіл поля і його характеристики від різних параметрів. Проте, складна геометрія ємності з розплавом та електродних систем у поєднанні з ознаками мультифізичності процесів у розплаву при КЕСО практично унеможливлюють застосування аналітичних методів. Тому, натеper, для дослідження фізичних полів у РМС при КЕСО застосовують чисельні методи моделювання.

У наш час, для чисельного моделювання фізичних полів, що виникають у розплаві при КЕСО, використовують наступні методи: метод скінченних різниць МСР) [21, 22], методи інтегральних рівнянь (МІР) [6, 15, 17, 48], метод скінченних елементів (МСЕ) [1, 2, 11, 12, 15].

Згідно МСР, розв'язок шукається у вигляді функції, визначеної тільки у вузлах сітки, а похідні, що входять у диференціальне рівняння, апроксимуються різними співвідношеннями щодо сіткової функції [49]. Він є досить простим у реалізації та легко адаптується для розв'язування різних типів рівнянь і може

бути застосований до складних геометрій і матеріалів, зокрема до неоднорідних середовищ, таких як рідкий метал, де властивості можуть залежати від координат.

Проте застосування МСР при моделюванні фізичних полів у розплаві при його обробці електричним струмом стикається з певними труднощами. У деяких випадках, наприклад, при моделюванні складних геометрій розплавів або різких змін властивостей матеріалу, МСР може стикатися з труднощами в точному дотриманні крайових умов. Це може вимагати складних методів для корекції сітки та врахування особливостей границь. У розплаві можуть відбуватися процеси на різних часових і просторових масштабах. МСР вимагає високої щільності сітки для захоплення цих процесів, особливо у випадку тривимірного моделювання, що веде до значного збільшення обчислювальних витрат.

Для КЕСО розплав МСР знаходить своє застосування при моделюванні хвильових полів, що виникають у розплаві при його обробці електричним струмом, або магнітно-імпульсним навантаженням [21] та інших випадках [22].

Переваги МІР очевидні в ситуаціях, коли просторову область взаємодії або множину, в якій локалізується процес, вдається еквівалентно подати на множині меншої розмірності. Тут завдання перетворюється з варіанта 3D у 2D, розмірність системи рівнянь знижується на порядок.

МСЕ ґрунтується на варіаційному принципі, який зводить задачу до мінімізації функціонала помилки апроксимації. У цьому контексті застосовується метод Галеркіна, який полягає в підборі тестових функцій, що дає змогу звести задачу до системи лінійних рівнянь [50, 51]. Це дає чисельне наближення розв'язку, яке ефективно враховує складні взаємодії, такі як теплопередача, електромагнітні та акустичні поля. МСЕ передбачає розбиття області, що досліджується, на скінченну кількість елементів певного типу (трикутники, чотирикутники, тетраедри, паралелепіпеди та ін.), вибір функції

апроксимації, задавання граничних умов і розрахунків системи лінійних рівнянь. Важливо відмітити, що існуючі сучасні пакети програм, що використовують MCE (COMSOL, ANSYS) значно спрощують задачу створення, розв'язання і аналізу моделей.

Очевидною перевагою MCE є його широкі функціональні можливості в дослідженні мультифізичних процесів, що супроводжують КЕСО (електромагнітні, теплові, акустичні, гідродинамічні). При цьому є можливість досліджувати процеси як на макро-, так і на мікрорівнях в об'єкті обробки. Саме через це, а також його точність, можливість моделювання областей довільної форми, більшість дослідників віддає перевагу MCE.

Але MCE стикається з розрахунковими проблемами при дослідженні процесів у рідкометалевому провіднику за умов його кондукційної електрострумової обробки. Задачі, які розв'язуються, не є класичними. При їх польовій постановці емпіричним методом, а інколи навіть інтуїтивно, базуючись на досвіді дослідника, потрібно визначати розподіл первинного (базового) електричного або магнітного поля на границях об'єкта обробки. Це тягне за собою розв'язання проблем тестування розв'язку задач. Крім того, аналіз процесів у масивних об'єктах обробки масою в десятки або й сотні кілограмів методом скінченних елементів створює додаткові проблеми, що пов'язані з вибором доцільної розрахункової сітки та розв'язувача сіткових рівнянь. У цьому випадку слід враховувати потенційні можливості апаратного та програмного забезпечення MCE і розрахунковий час.

Отже, все ж таки під час застосування математичного моделювання дослідники стикаються з деякими аспектами адекватного вибору параметрів формалізації. Наприклад, визначення граничних умов задачі, обрання для аналізу відомих математичних моделей або їх коригування з урахуванням особливостей досліджуваних процесів.

Згадані методи не є універсальними, їх застосування визначається поставленою метою досліджень та розрахунковими можливостями технічних засобів.

З приводу цього, актуальним є завдання пошуку не менш продуктивного гнучкого методу дослідження у рідкометалевому розплаві, як мінімум, базового (первинного) електричного поля. Таким методом може бути добре відомий метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К), але за умов його адаптування до особливостей КЕСО. Безумовно, що він не замінить МСР, МСЕ та МІР, але його використання може дозволити розширити науковий доробок стосовно КЕСО.

1.3 Застосування еквівалентних електричних кіл для моделювання фізичних полів

Ідея використовувати електричні заступні схеми для моделювання фізичних полів не нова. Перші роботи з цього приводу були опубліковані ще у першій половині XX сторіччя. Відомі роботи з цього приводу Крона [52] та ін. Саме Крон першим показав, що, по суті, будь-яка польова задача, може бути представлена у вигляді еквівалентного електричного кола високого порядку, кількість вузлів та гілок якого відповідає числу кінцевих елементів, вибраних у розрахунковій області [52].

Відомо два підходи до моделювання з використанням електричних схем заміщення: математичний та фізичний. При застосуванні математичного підходу для області обирається малий елемент об'єму. Для нього, шляхом усереднення диференціальних рівнянь у часткових похідних будується еквівалентне коло. Еквівалентне коло всієї області формується з скінченної кількості таких елементів [43].

Фізичий підхід передбачає побудову схеми заміщення, геометрично подібної до області, що моделюється. За номіналами елементів схеми визначаються масштабні коефіцієнти, що дають змогу перейти від отриманих значень електричних величин до параметрів області моделювання [43].

Для масивного провідника еквівалентна електрична схема може бути побудована наступним чином [43]. Оберемо для нього малий елемент уздовж протікання струму у провіднику (рис 1.7). Закон Ома для такого елемента:

$$J = \sigma E = \sigma \left(-\nabla \varphi - \frac{\partial A}{\partial t} \right). \quad (1.3)$$

Де J – густина струму, А/м;

E – напруженість електричного поля, В/м

σ – питома провідність, См/м;

A – векторний магнітний потенціал, Тл·м;

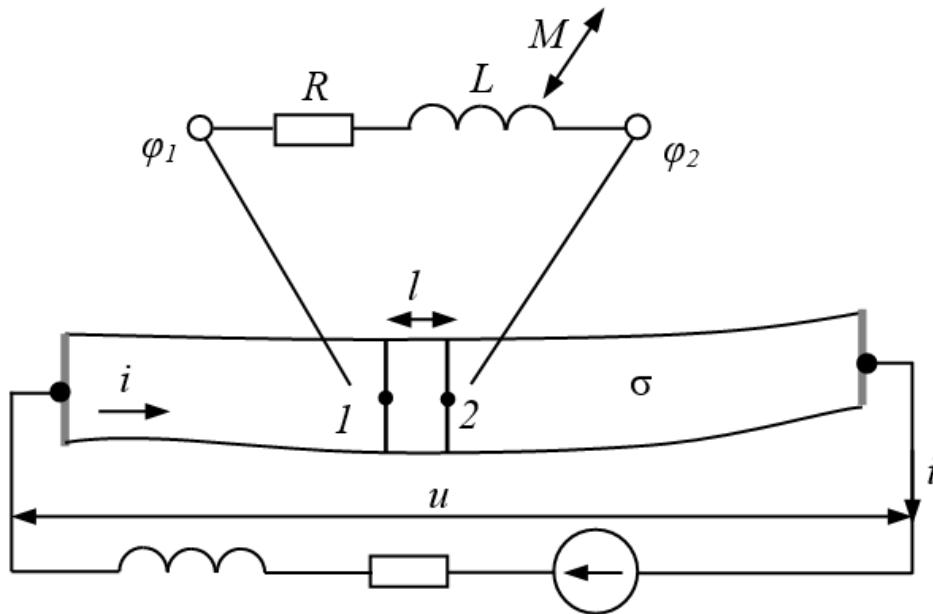


Рисунок 1.7 – Побудова еквівалентної електричної схеми для електричного поля у масивному провіднику

Якщо проінтегрувати цей вираз уздовж елемента від точки 1 до точки 2, отримаємо

$$\int_1^2 \frac{J}{\sigma} \cdot dl = - \int_1^2 \nabla \varphi \cdot dl - \int_1^2 \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl; \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{\sigma_1} \int_1^2 dl = R;$$

$$- \int_1^2 \nabla \varphi \cdot dl = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Відомо, що зміна магнітного потоку призводить до виникнення ЕРС

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.5)$$

де Φ – магнітний потік, Вб.

Магнітний потік через векторний потенціал визначається за формулою:

$$\Phi = \oint A \cdot dl. \quad (1.6)$$

Тоді для обраного елемента

$$\varepsilon = - \frac{d}{dt} \int_1^2 A \cdot dl. \quad (1.7)$$

Як відомо, для електричних кіл потік Φ визначається через струм i та самоіндукцію L :

$$\frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt} + M_1 \frac{di_2}{dt} + \dots + M_k \frac{di_k}{dt}. \quad (1.8)$$

Таким чином отримуємо рівняння балансу напруг на ділянці кола:

$$iR = \varphi_1 - \varphi_2 - \left(L \frac{\partial i}{\partial t} + M_1 \frac{\partial i_2}{\partial t} + \dots + M_k \frac{\partial i_k}{\partial t} \right), \quad (1.9)$$

де L – ЕРС самоіндукції; M – взаємна індукція елементів зі струмом.

З рівняння 1.9 випливає, що напруга на обраному елементі дорівнює

$$u_{12} = \int_1^2 - \nabla \varphi \cdot dl = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.10)$$

За другим законом Кірхгофа:

$$\oint_l (-\nabla \varphi) \cdot dl = 0. \quad (1.11)$$

Таким чином, для змінного електричного поля може бути побудована електрична еквівалентна заступна схема (рис. 1.7) через розбиття масивного провідника на скінченну кількість елементів, кожен з яких заміщується електричним колом згідно з формулою (1.9) [43].

Електричні схеми заміщення разом із застосуванням методу аналогій лягли в основу аналогових обчислювальних машин (електроінтеграторів), які широко застосовувались для моделювання фізичних полів різної природи. Але з розвитком можливостей цифрових обчислювальних машин чисельні методи поступово витісняли таке моделювання.

В останні роки спостерігається підвищення інтересу до використання електричних схем заміщення для моделювання фізичних полів у різних галузях [53-59]. Це пов'язано з наявністю значної кількості програмних продуктів для моделювання процесів, що відбуваються у електричних колах (Simulink Matlab, Mathcad). Деякі з них доступні безоплатно, наприклад LTspice. Це значно спрощує процес моделювання. Основна задача тепер полягає у отриманні “електронної схеми заміщення” процесу, що досліджується для одного із відомих програмних продуктів, які працюють з електричними схемами.

Враховуючи складність постановки та проведення відповідних вимірювань у фізичних експериментах, більшість сучасних досліджень процесів, що відбуваються у розплаві при обробці його струмом, виконують методами чисельних експериментів. При цьому, як правило, застосовують метод скінченних елементів. Але дослідники спіткаються з проблемою визначення коректних граничних умов. Крім того, виникають розрахункові проблеми при аналізі процесів у масивних провідниках.

В роботі пропонується для дослідження розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму застосовувати модифікований до таких умов метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки. При цьому застосовується відомий метод

матричної формалізації електромагнітних процесів, який потребує відповідної модернізації. При цьому досягається реальна можливість більш точного відображення потенціалів у локальних зонах за рахунок здрібнення комірок.

Таким чином, отримані результати дозволять суттєво доповнити відомі дані, які отримано, наприклад, методом скінченних елементів, та запропонувати програмний продукт для створення рекомендацій виготовлення литва з застосуванням методу обробки розплаву електричним струмом.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз показує, що використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки може суттєво доповнити науковий доробок щодо кондукційної електрострумової обробки розплавів алюмінієвих сплавів за умов розв'язання наступних задач:

- визначити особливості використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки (М-К) в умовах протікання електричного струму різного типу через масивний провідник;
- розробити методологічні засади та програмну реалізацію матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні М-К для моделювання у 2D та 3D форматах;
- провести перевірку удосконаленого методу М-К шляхом порівняння результатів моделювання процесів при обробці струмом металевого розплаву з відповідними результатами, отриманими методом МСЕ і методом фізичного моделювання;
- розробити алгоритм керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки задля отримання виливків високої якості;

- розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВИХ АЛГОРИТМІВ СТОСОВНО М-К ПРИ 2D/3D ФОРМАЛІЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У ТОМУ ЧИСЛІ ПРИ ОДНОЧАСНІЙ ОБРОБЦІ РІЗНИМИ СТРУМАМИ

2.1 Особливості використання М-К для визначення розподілу електричного струму різного типу у масивній рідкометалевій системі

В основі М-К закладено розбиття об'єкта, що досліджується, на скінченну кількість комірок. Кожна комірка та її зв'язки з іншими заміщуються електричною схемою, в якій розподіл напруг і струмів математично описуються таким самим чином, як і процеси, що моделюються у кожній комірці [43]. Параметри схем заміщення (опір, індуктивність, ємність) залежать від властивостей середовища, що моделюється, геометричних розмірів комірок, а також від типу процесу, що моделюється (стаціонарний, нестаціонарний). На рис. 2.1 наведено електричні схеми заміщення плоскої та об'ємної комірок. Тут у якості елементів $A_{i,j}$ можуть бути опір, індуктивність, ємність. Така параметризація має свої переваги. Як було показано раніше, для КЕСО існує багато варіантів режимів обробки (різні типи струмів, багатоелектродні системи, різні рівні заглиблення електродів і т. д.). Пошук ефективних режимів в таких умовах вимагає значної кількості експериментальних або чисельних досліджень, що потребує значних коштів та часу. Так, наприклад, моделювання двох режимів обробки розплаву з використанням електродів з ізолюваною та неізолюваною бічною поверхнею, у випадку МСЕ, вимагає заміни геометричної моделі, нового розбиття на елементи і задавання граничних умов на поверхні електродів. М-К, звісно ж, поступається у точності методу скінченних елементів, проте він дозволяє оцінювати можливі сценарії розподілу

фізичних полів у розплаві при різних режимах обробки при значно менших витратах часу, а отже, може бути застосований для пошуку ефективних режимів. За необхідності, найбільш цікаві варіанти потім можуть бути більш детально досліджені за допомогою як МСЕ, так і МСР або МІР. На рис. 2.1 представлено 2D (а), 3D (б) варіанти комірок.

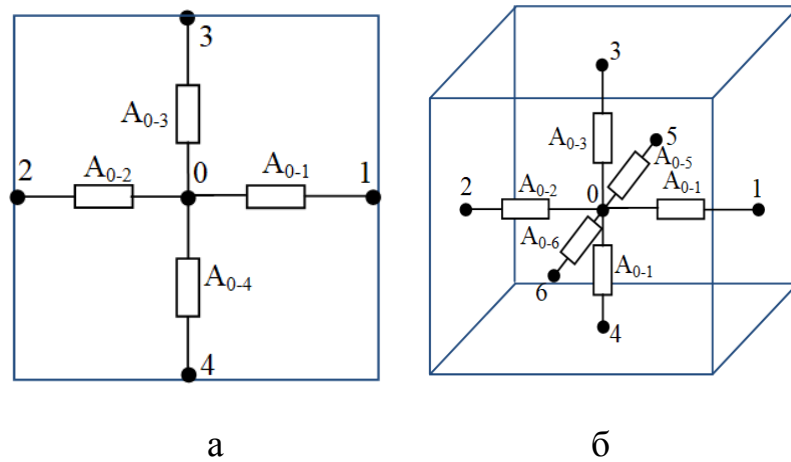


Рисунок 2.1 – Електрична схема заміщення для плоскої (а) та об’ємної (б) комірок

Враховуючи мультифізичні аспекти процесів при КЕСО, у фундаментальній базі яких лежать процеси та явища різної фізичної природи і які навряд чи є автономними, на мій погляд тут можливо обрати такий підхід – виділити якийсь фізичний процес, що є базовим для формування вторинних процесів і визначає їх параметри. Звісно ж, мова йде про базові (первинні) електричне та магнітне поля, характеристики яких постають об’єктом досліджень.

Для моделювання електромагнітних полів у розплаві при його електрострумовій обробці із застосуванням М-К пропонується наступний алгоритм:

1. Визначаються геометричні параметри ємності з розплавом.
2. Визначається тип електродної системи, тип струму та його параметри.

3. Обирається площа перерізу (для 2D).
4. В залежності від мети аналізу обирається розмір комірок.
5. Відповідно до розбиття будується електрична схема заміщення.
6. Для отриманої електричної сітки формується матриця інциденції (або netlist за умови використання LtSpice).
7. Здійснюється параметризація об'єкта обробки.
8. Проводиться розрахунок із використанням методу вузлових потенціалів у матричній формі (або моделювання у LtSpice з подальшою обробкою отриманих даних).
9. Результат виводиться у графічному вигляді для аналізу розподілу струмів і потенціалів первинного базового поля.
10. Проводиться розрахунок напруженості електричного поля, густини струму та напруженості магнітного поля за отриманими значеннями струмів/потенціалів.

Переваги М-К, можна окреслити наступним чином.

1. На відміну від МСЕ та МІР, М-К дозволяє на стадії проектування технології ефективно та гнучко проводити експрес-аналіз ситуацій, які виникають при КЕСО. У першу чергу аналізувати можливі сценарії топології первинних електричного та магнітного полів та їх характеристики. При цьому показуючи характеристики оригінальних граничних та початкових умов.
2. Під час КЕСО розплав у вже при виробництві за наявності відповідного програмного продукту М-К дозволяє виконувати функцію електромагнітного регулювання процесу навантаження об'єкта обробки. При цьому потрібно підтримувати постійне значення масштабного фактора ($W_B \approx E_C$).
3. Функціональною концепцією забезпечення валідованих та верифікованих результатів є об'єднання в одному макеті (кластері) декількох різних принципів, методів або концепцій.

2.2 Розробка матричних розрахункових алгоритмів М-К

Для ефективного застосування М-К необхідно якимось чином сформулювати загальну схему заміщення області, що буде досліджуватись. Тут можливі два підходи. Перший передбачає формування за допомогою алгоритму матриці інцидентності загальної схеми заміщення, визначення параметрів схеми заміщення і подальший її розрахунок із застосуванням методу вузлових потенціалів у матричній формі. Другий передбачає попередній розрахунок параметрів схеми заміщення, формування листу з'єднань (netlist) для програми LtSpice і подальший її розрахунок.

Для першого підходу було розроблено алгоритм, блок-схему якого наведено на рис. 2.2.

Подальший розрахунок виконується наступним чином. Для однорідних осередків уздовж осей x і y приймалось, що їх питомий опір дорівнює питомому опору алюмінію за температури ліквідусу (1000 °K) $\rho_{Al} = 24,77 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [60].

Опір комірок уздовж осей визначається як $R_x = \rho_{Al} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$, $R_y = \rho_{Al} \cdot \frac{b}{a \cdot c}$,

$R_z = \rho_{Al} \cdot \frac{c}{a \cdot b}$, де a, b, c – розміри комірки, м.

Далі формується діагональна матриця опорів R_{diag} . На її основі формуємо діагональну матрицю провідностей (G): $G_i = 1/R_{diag\ i}$. Тоді потенціали всіх вузлів графа визначаємо по відношенню до базового вузла:

$$\varphi = M \cdot G \cdot M^T \cdot (-I_{дж}), \quad (2.1)$$

де M – матриця з'єднань вузлів, складена за першим законом Кірхгофа; M^T – транспонована матриця інцидентій; $I_{дж}$ – струм джерела.

Напругу U на всіх гілках електричного кола визначаємо як:

$$U = \varphi \cdot M^T. \quad (2.2)$$

У свою чергу, сили струмів I в гілках визначаємо як:

$$I = G \cdot U, \quad (2.3)$$

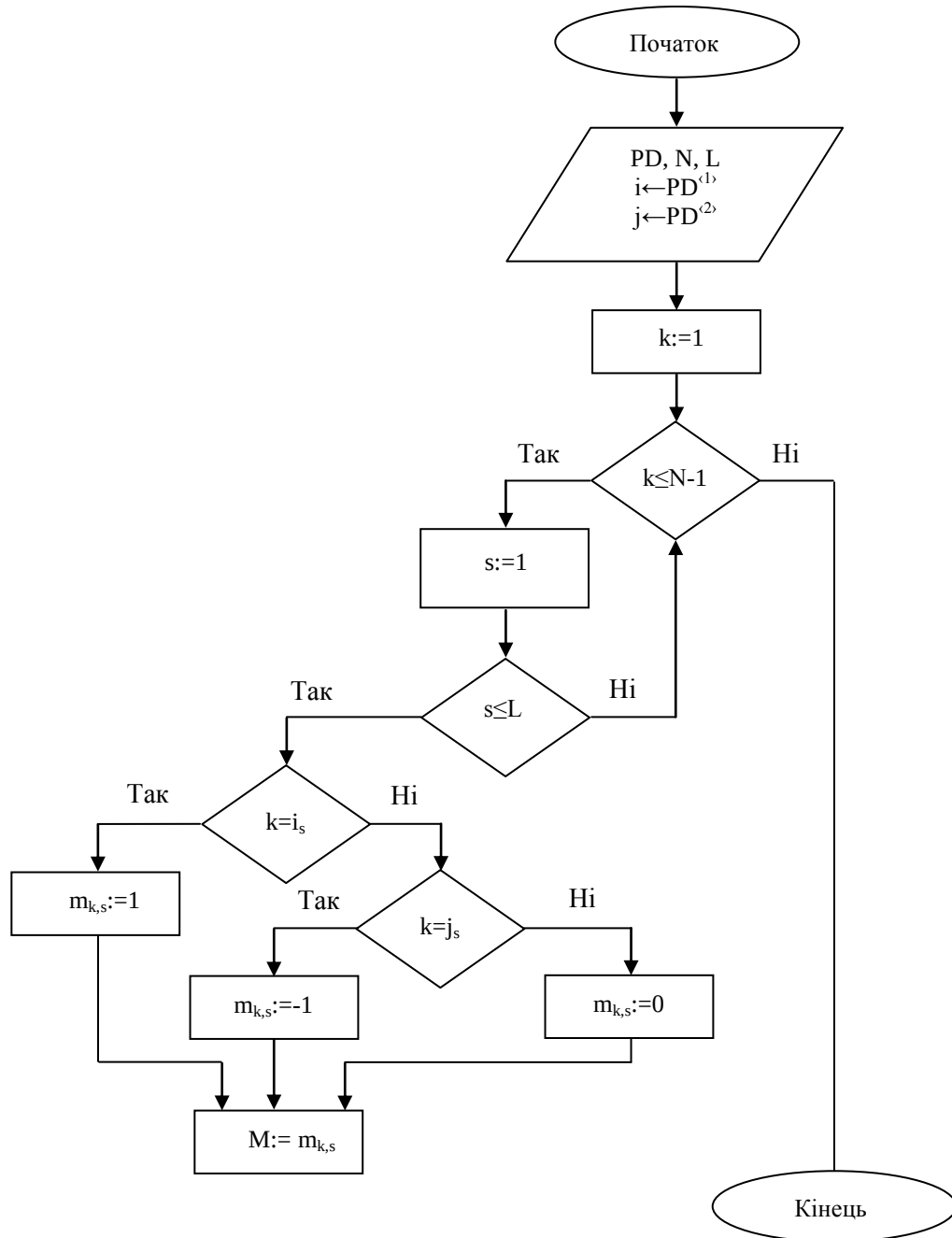


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму для формування матриці інциденцій: PD – матриця з’єднань вузлів; N – кількість вузлів; L – кількість гілок схеми заміщення, k, s – індекси.

Для другого підходу розроблено алгоритм на мові Python, що формує лист з'єднань LtSpice (рис. 2.3). Як вхідні дані йому необхідно задавати параметри елементів схеми заміщення та кількість комірок уздовж відповідних осей. Алгоритм формує електричне коло із заданої кількості комірок і кожній з них присвоюються відповідні координати. При цьому можливо досліджувати процеси у середовищах з анізотропними властивостями. Така можливість реалізована через задавання числових значень елементів схеми заміщення уздовж кожної із осей, а також можливість задавати будь-які значення цих параметрів за відповідними координатами комірки. Після закінчення дії алгоритму сформований лист з'єднань завантажується у програму LtSpice і відбувається розрахунок. У результаті отримується матриця потенціалів, струмів і напруг, які можна використати для подальших розрахунків.

Отримані за будь-яким з описаних підходів значення струмів і потенціалів можуть бути використані для визначення напруженості електричного поля, густини струму та напруженості магнітного поля. Наприклад для випадку обробки розплаву постійним струмом напруженість електричного поля розраховується за формулою

$$E = -\text{grad}\varphi. \quad (2.4)$$

Через значення потенціалів схеми заміщення напруженість електричного поля визначається через різниці схеми. Для вузлів, що знаходяться на границях моделі, застосовується різниця вліво:

$$E_x = -\frac{\varphi_{x+1} - \varphi_x}{\Delta x}; \quad (2.5)$$

$$E_y = -\frac{\varphi_{y+1} - \varphi_y}{\Delta y}; \quad (2.6)$$

$$E_z = -\frac{\varphi_{z+1} - \varphi_z}{\Delta z}. \quad (2.7)$$

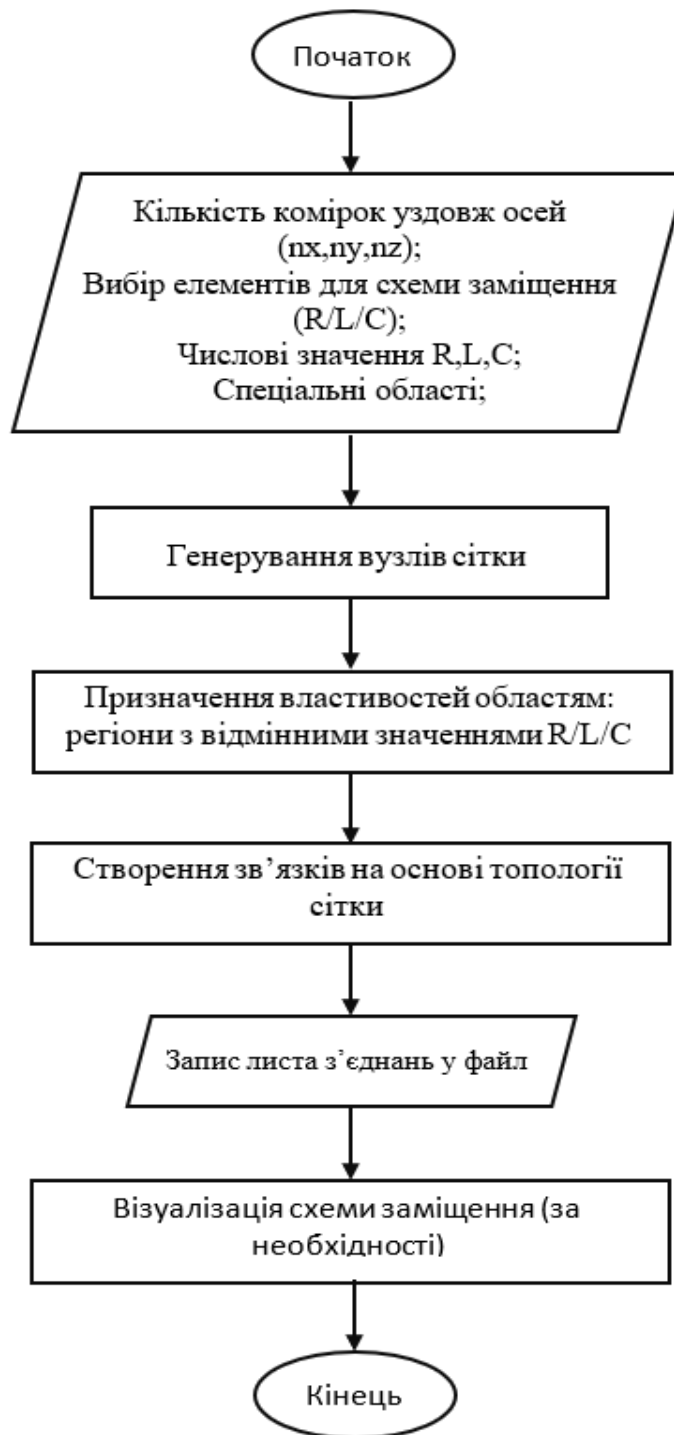


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму, що представляє електричну схему заміщення у вигляді листа з'єднань для програми LtSpice

Для всіх інших застосовується подвійна різниця, а саме

$$E_x = -\frac{\varphi_{x+1} - \varphi_{x-1}}{2\Delta x}; \quad (2.8)$$

$$E_y = -\frac{\varphi_{y+1} - \varphi_{y-1}}{2\Delta y}. \quad (2.9)$$

Таким чином визначаються E_x , E_y , складові електричного поля.

Після цього може бути визначена густина струму

$$J = \sigma E. \quad (2.10)$$

Для розрахунку магнітного поля пропонується наступний підхід. Оскільки для декартових координат результуюча схема заміщення середовища має вигляд прямокутників або квадратів (у випадку 2D) чи паралелепіпедів або кубів (для 3D) із вузлами в їх вершинах, то виникає можливість розглядати такі прямокутники (паралелепіпеди) як окремі комірки, ребра яких є провідниками зі струмом кінцевої довжини. Згідно із законом Біо-Савара-Лапласа, елемент лінійного струму Idl створює магнітне поле, індукція якого в точці з радіус-вектором r , визначається співвідношенням

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \times \hat{r}}{r^2}, \quad (2.11)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, Гн/м; dl – вектор довжини сегменту зі струмом; $\hat{r}$ – одиничний вектор, спрямований від сегмента струму до точки спостереження.

Застосування закону Біо-Савара, а також принципу суперпозиції, дає можливість визначати магнітне поле в таких комірках.

Для розрахунку магнітного поля необхідно виконати наступні обчислювальні дії.

1. Спочатку кожна гілка кожної комірки розбивається на обрану кількість сегментів. Коли провідник розбивається на сегменти, то для кожного сегмента визначаються координати його кінців.

Координати початку сегменту визначаються за формулами:

$$x_1(k) = x_1 + k \frac{x_2 - x_1}{N}; \quad (2.12)$$

$$y_1(k) = y_1 + k \frac{y_2 - y_1}{N}. \quad (2.13)$$

Координаті кінця сегменту розраховуються наступним чином:

$$x_2(k) = x_2 + (k+1) \frac{x_2 - x_1}{N}; \quad (2.14)$$

$$y_2(k) = y_2 + (k+1) \frac{y_2 - y_1}{N}, \quad (2.15)$$

де k – індекс сегменту; N – кількість сегментів.

Наступним кроком є визначення векторів $\vec{r}_1, \vec{r}_2$, що направлені від початку та кінця сегмента до точки спостереження, а їх модулі дорівнюють відповідним відстаням.

$$\vec{r}_1 = (x_c - x_1(k), y_c - y_{s1}), \quad \vec{r}_2 = (x_c - x_1(k), y_c - y_{s1}). \quad (2.12)$$

Потім виконується нормування векторів $\vec{r}_1, \vec{r}_2$:

$$\hat{r}_1 = \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|}, \quad \hat{r}_2 = \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|}. \quad (2.17)$$

Вектор сегмента визначається за формулою:

$$\vec{l} = (x_{s2} - x_{s1}, y_{s2} - y_{s1}). \quad (2.18)$$

Тоді косинуси кутів між вектором сегмента та $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ визначаються за формулами:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\vec{l} \cdot \vec{r}_1}{|\vec{l}| \cdot |\vec{r}_1|}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{\vec{l} \cdot \vec{r}_2}{|\vec{l}| \cdot |\vec{r}_2|}. \quad (2.19)$$

2. Для спрощення розрахунку, пропонується виконувати розрахунок вкладу кожного сегменту у поле лише в центрі обраної комірки. Розрахункова схема комірки наведена на рис. 2.4. На схемі прийнято наступні позначення: $N_{i,j}$ – вузли схеми заміщення, l – сегмент провідника рамки зі струмом уздовж

осі x , або y , r_1 – відстань від початку сегмента до точки спостереження, м, r_2 – відстань від кінця сегмента до точки спостереження, α_1 кут між r_1 та l , α_2 кут між r_2 та l , dB_i – вклад у магнітне поле в центрі рамки від сегменту зі струмом.

Коли знайдені всі необхідні складові, відбувається розрахунок магнітного поля від сегмента у точці спостереження.

$$dB_i = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (2.20)$$

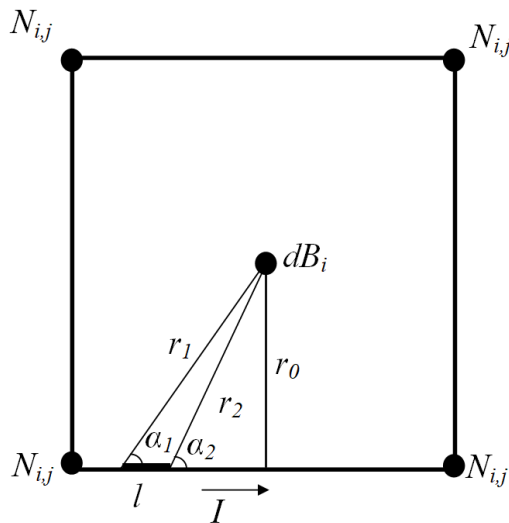


Рисунок 2.4 – Прямокутна комірка для розрахунку магнітного поля

3. Після визначення вкладів всіх сегментів гілок відповідної комірки розраховується сума їх вкладів з урахуванням напрямів струмів. Таким чином розраховуються магнітні поля в центрах кожної рамки:

$$B = \sum dB_i. \quad (2.21)$$

4. Для підвищення точності розрахунку, можливо врахувати вклад у магнітне поле в комірці від сусідніх комірок. Для цього, після розрахунку їх магнітного поля визначається сума вкладів сусідніх комірок для кожної з них з урахуванням відстані між їх центрами.

Для оцінки необхідної кількості сегментів, на яку потрібно розбивати кожний провідник рамки зі струмом було проведено розрахунок величини магнітного поля у центрі рамки від одного провідника за різної кількості сегментів. Таким чином, поле розраховувалось у центрі квадрату зі стороною 2,5 мм від провідника по якому тече струм 10 А. Для розрахунку було застосовано розбиття провідника на 10, 15, 20, 25, 40, 50, 100, 1000 та 10 000 сегментів. Результати розрахунків наведено на рис. 2.5.

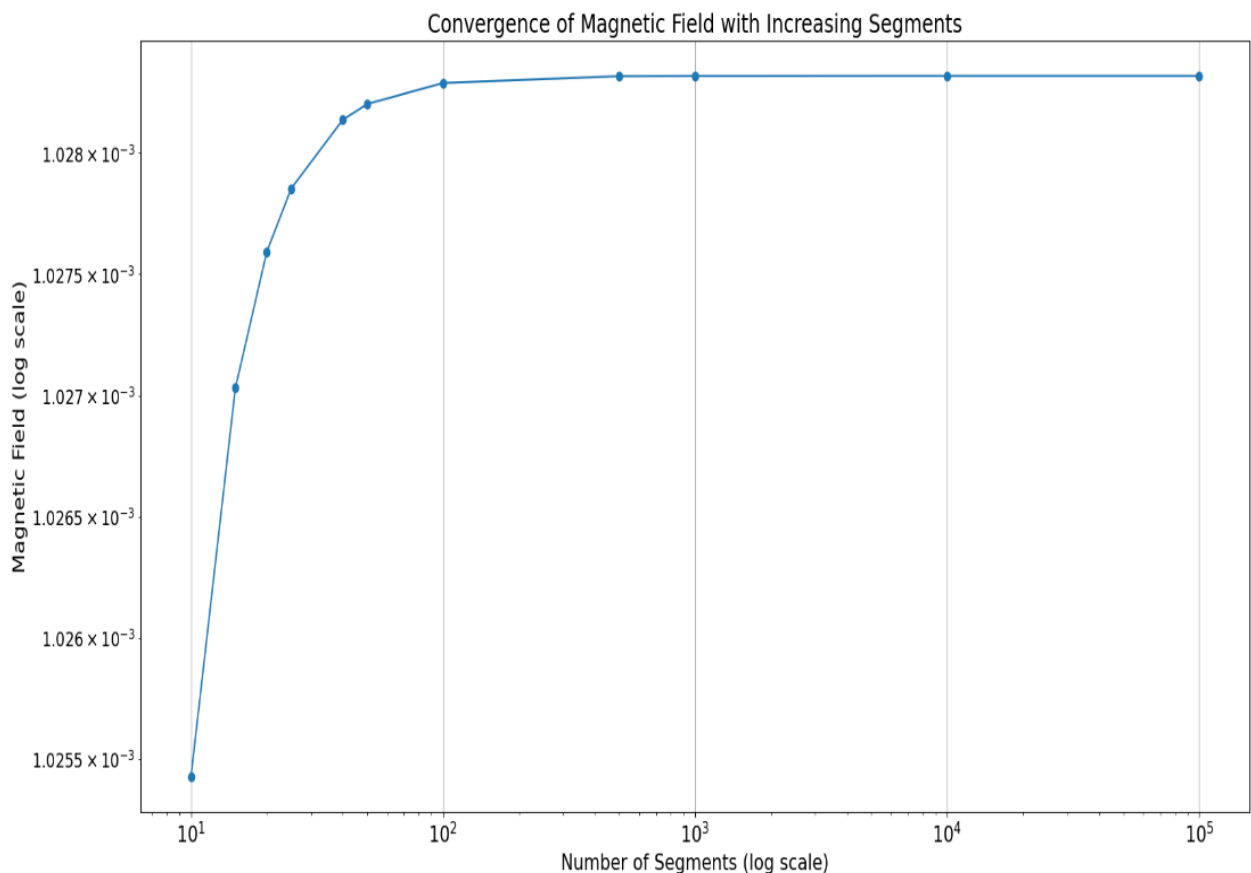


Рисунок 2.5 – Залежність магнітного поля у центрі рамки зі струмом від кількості сегментів, на які розбивається провідник

З рис. 2.5 видно, що збільшення кількості сегментів більше ста не призводить до помітних змін у результуючому магнітному полі, а отже й немає необхідності у подальшому підвищенні кількості сегментів.

Таким чином, за допомогою М-К із застосуванням розроблених алгоритмів виконується моделювання електромагнітного поля у розплаві при його обробці електричним струмом.

2.2.1 2D-моделювання розподілу електромагнітного поля у металевому розплаві. Для аналізу обрано алюміній у рідкому стані при температурі 1000 К. Розплав знаходиться у ємності, яка має форму прямокутного паралелепіпеду з непровідними стінками. Електричний постійний струм амплітудою 100 А підводиться до розплаву електродами дотично до середини паралельних верхніх ребер. Відповідно вертикальна площина перерізу для 2D аналізу у формі квадрата (розміром 45х45мм) з'єднує точки дотику електродів, як показано на рис. 2.6 цифрами 1 та 10. Для порівняння, площина розбивалась на 100 та 400 комірок. На рис. 2.6 представлено таке розбиття для 100 комірок. Великими цифрами прийнято нумерацію вузлів комірок, а малими цифрами – їх гілок. Вузли № 101 і № 102 позначають місце підключення електродів. Моделювання виконувалось із застосуванням першого підходу.

На рис. 2.7, 2.8 представлено результати розрахунків за формулами (2.1) – (2.3). Тут I_{x1} – струми уздовж осі x між вузлами 1-2, 2-3, 3-4...9-10, I_{x2} – струми між вузлами 11-12, 12-13...19-20 і т.д. ϕ_{x1} – значення потенціалів вузлів уздовж осі x (1, 2, 3...10). Для осі y , I_{y1} – струми між вузлами 1-11, 11-21, 21-31...81-91, ϕ_{y1} – значення потенціалів вузлів уздовж осі y (1, 11, 21...91) і т.д.

Як видно з наведених рисунків, збільшення кількості комірок практично у 4 рази не суттєво змінило якісний розподіл струмів та потенціалів. Але кількісні їх значення істотно зменшились для струмів і збільшились для потенціалів.

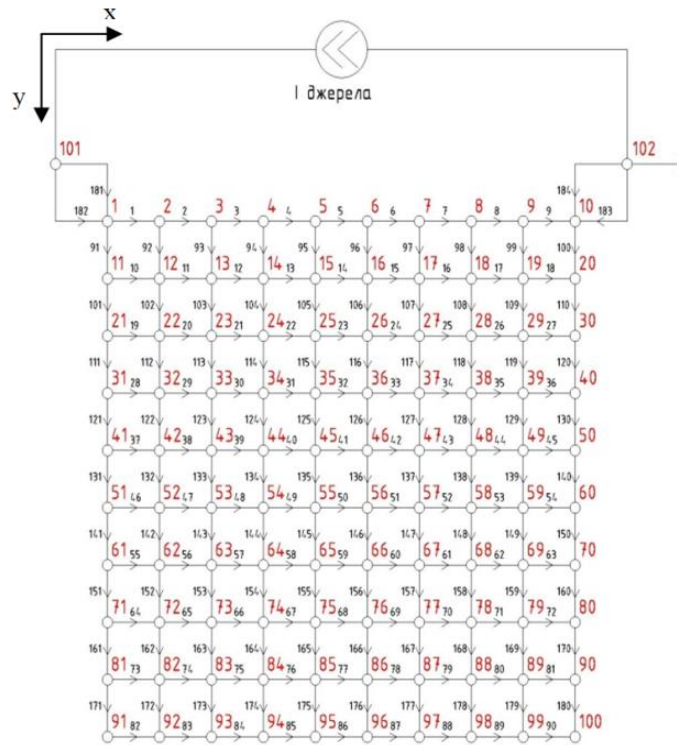
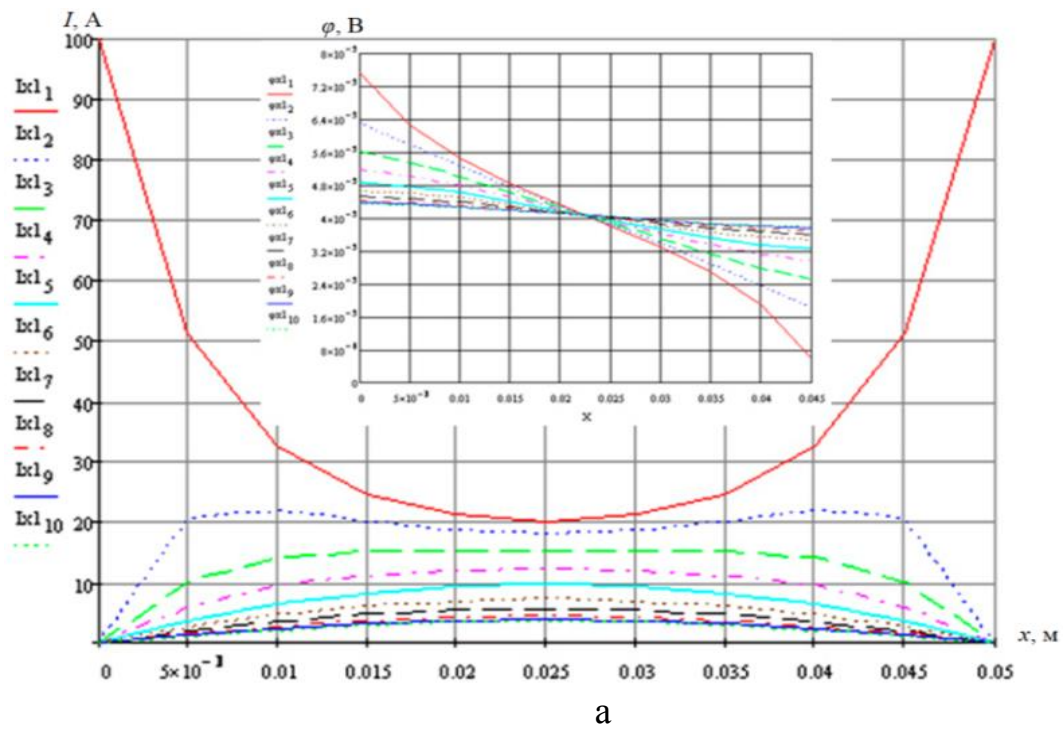
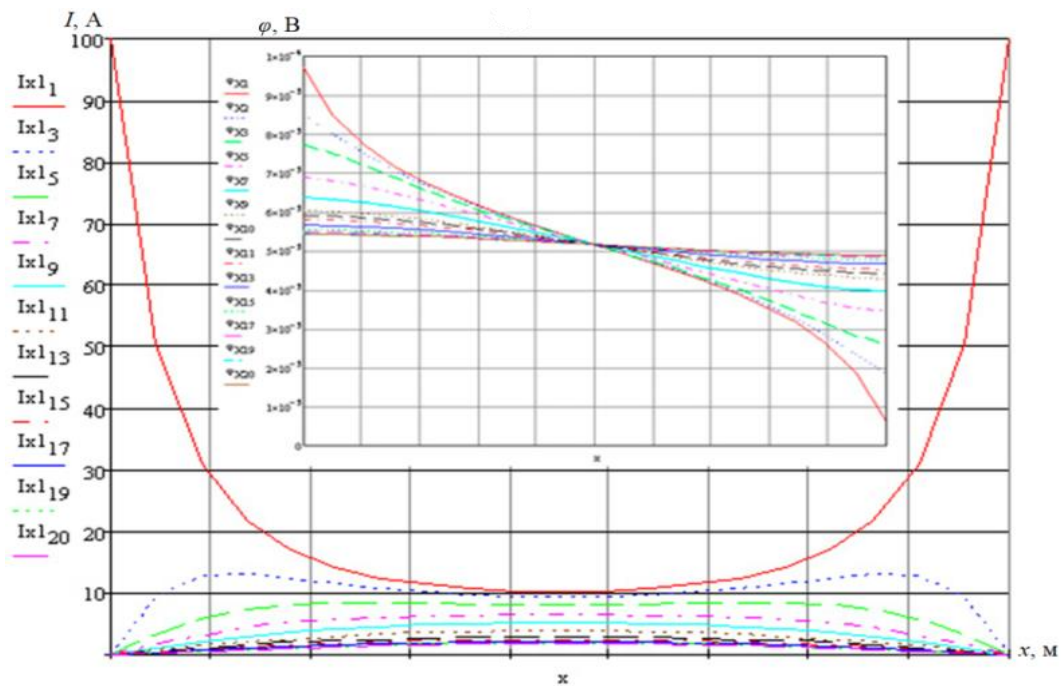


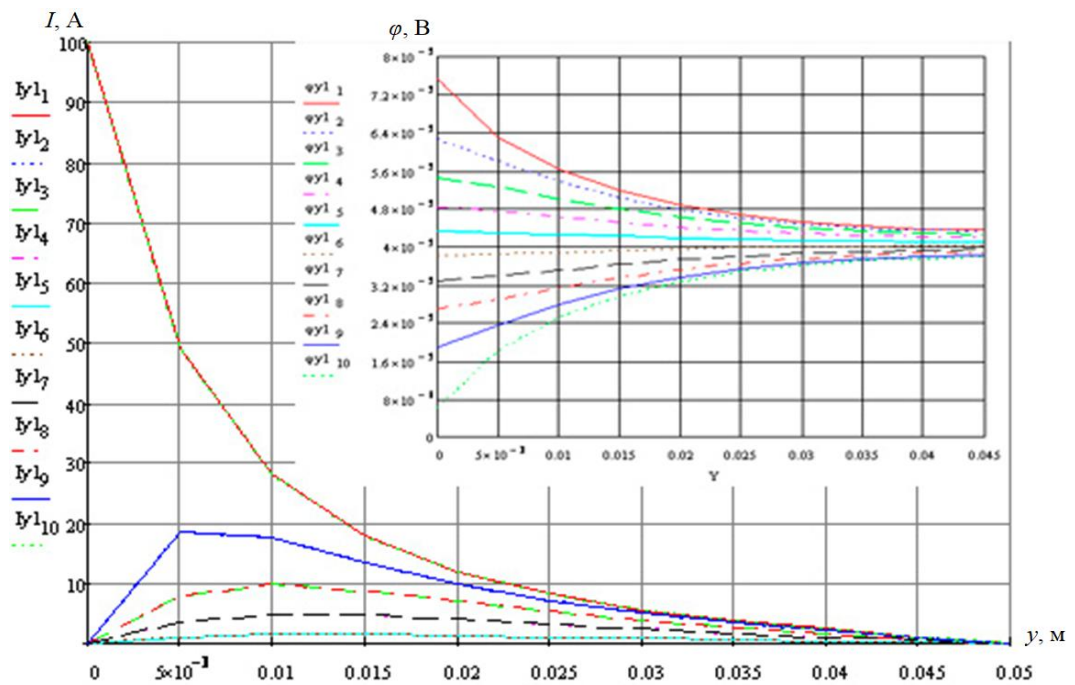
Рисунок 2.6 Геометрична модель (граф) площини перерізу, що аналізується





б

Рисунок 2.7 – Розподіл струму і потенціалів в розплаві, уздовж осі x : а – для площини, що розбивалась на 100 комірок, б – для площини, що розбивалась на 400 комірок.



а

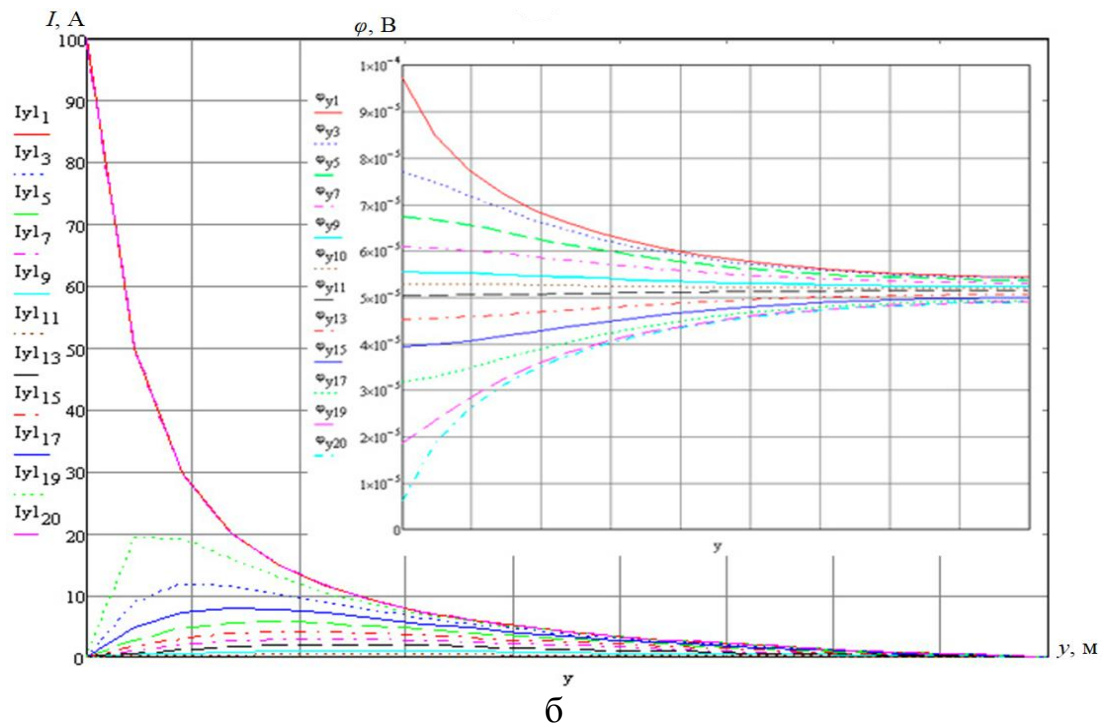


Рисунок 2.8 – Розподіл струму і потенціалів уздовж осі y : а – для площини, що розбивалась на 100 комірок, б – для площини, що розбивалась на 400 комірок

На рис. 2.9 для порівняння наведено результат розрахунків поставленої задачі, що його отримано МСЕ. Тут застосовано сітку з кількістю 400 елементів. Отже отримано як якісне збігання результатів, так і певною мірою кількісне.

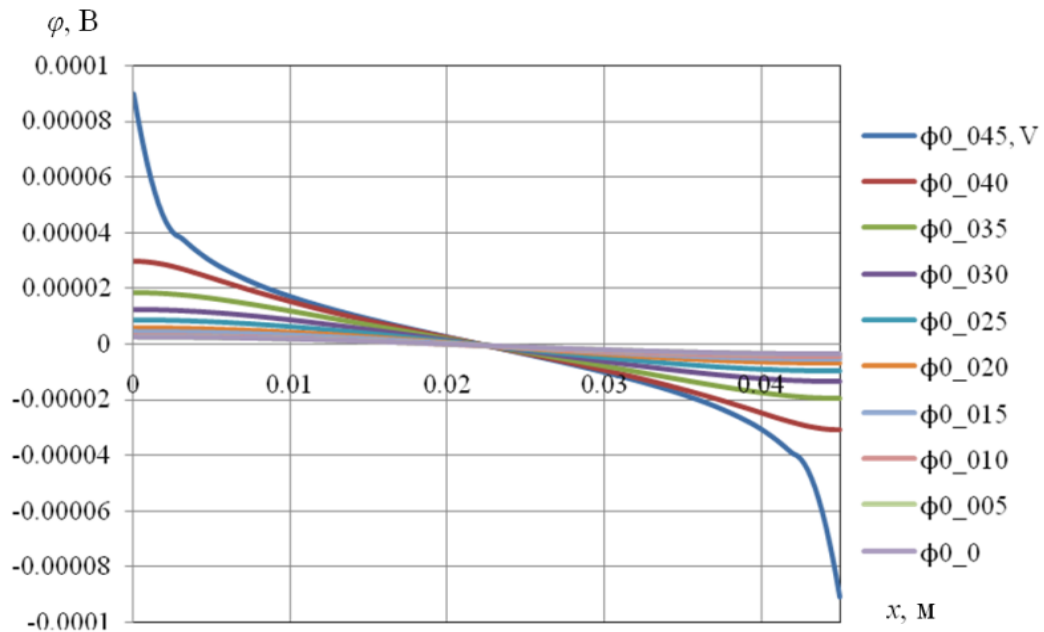


Рисунок 2.9 – Розподіл потенціалів уздовж осі x , отриманий МСЕ

Отримані із моделі на 400 комірок розподіли струмів і потенціалів у площині було застосовано для розрахунку електричного і магнітного полів за формулами (2.5) – (2.21). Результати розрахунків наведено на рис. 2.10 – 2.16. Рис. 2.10 відображає теплову карту електричного поля. На рис. 2.11 показано розподіл E_x складової електричного поля. Розподіл E_y , зображено на рис. 2.12, а на рис. 2.13 – векторний розподіл електричного поля. Видно, що максимальні значення E_x відповідають місцям підведення електродів, і поле значно зменшується з віддаленням від них. Так уздовж осі x для поверхні розплаву у центрі ємності поле спадає у 4,5 рази. Для центру та дна ємності мінімальні значення спостерігаються біля стінок форми, і поле зростає ближче до центру. Вектор $\vec{E}$, як і має бути, направлений вниз і в сторону від “+” електрода, та вгору і до “-” електрода.

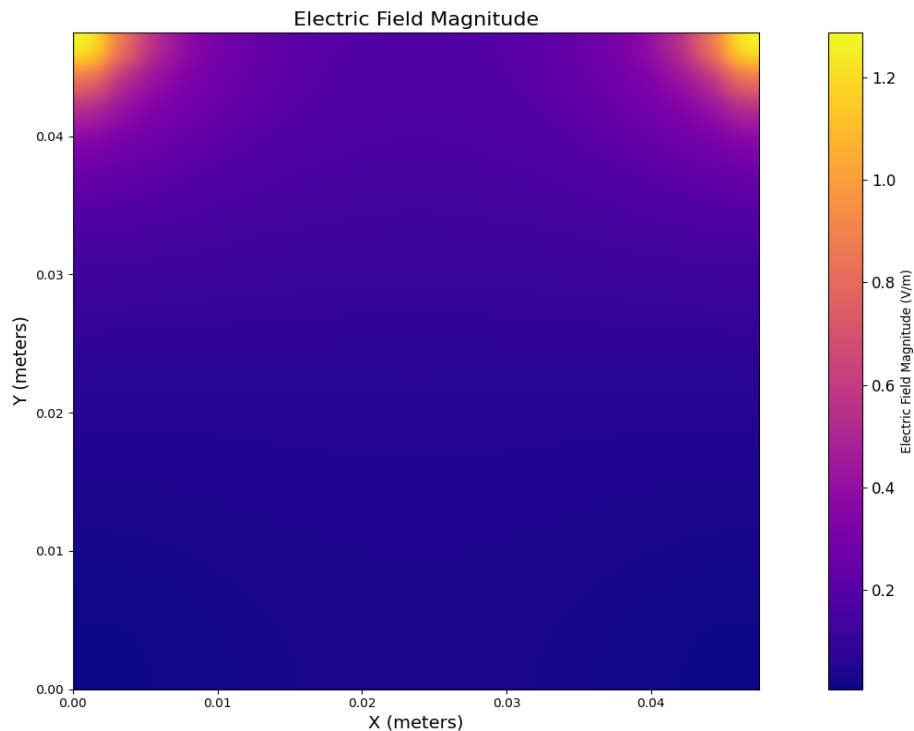


Рисунок 2.10 – Теплова карта електричного поля

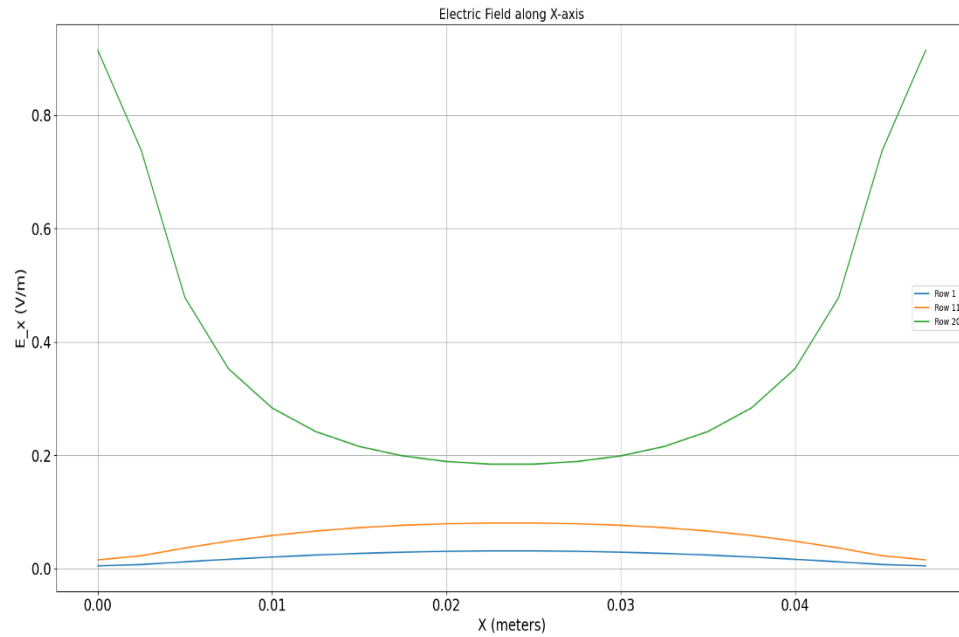


Рисунок 2.11 – E_x складова електричного поля на поверхні, в центрі та на дні площини перетину

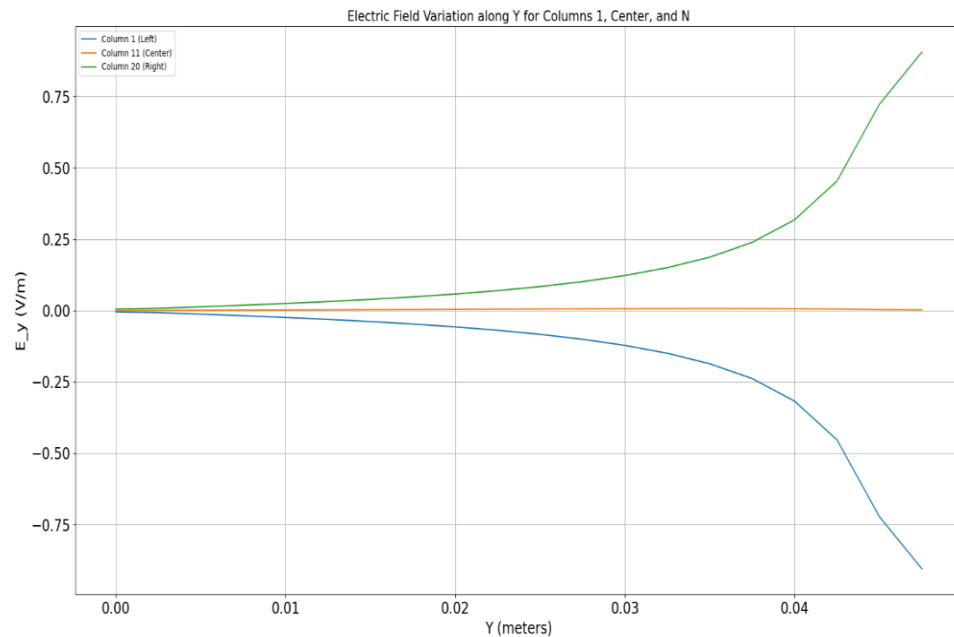


Рисунок 2.12 – E_y складова електричного поля на поверхні, в центрі та на дні площини перетину

На рис 2.14 наведено кольорову гаму B_z складової магнітного поля у розплаві. Видно, що області найбільших значень вектору магнітної індукції

знаходяться біля електродів і спадають з віддаленням від них. Розподіл магнітного поля симетричний.

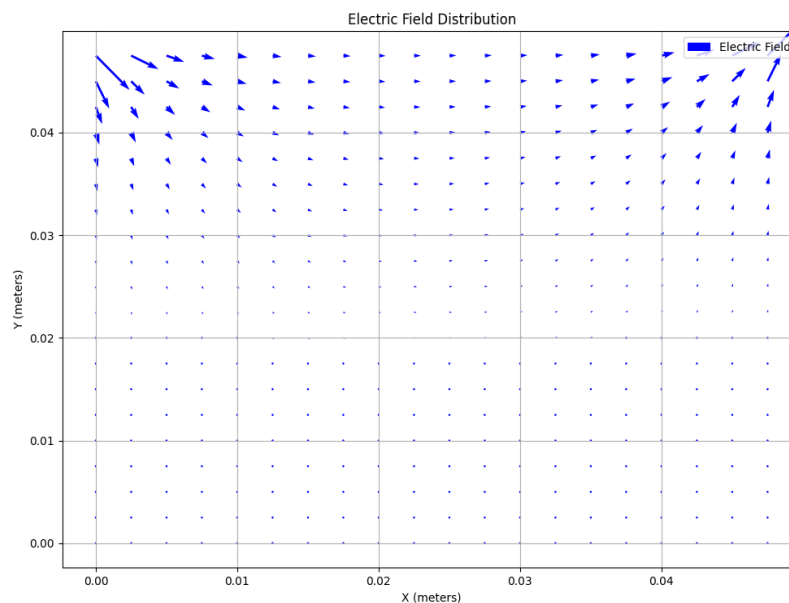


Рисунок 2.13 – Розподіл векторного електричного поля у площині підведенні електродів

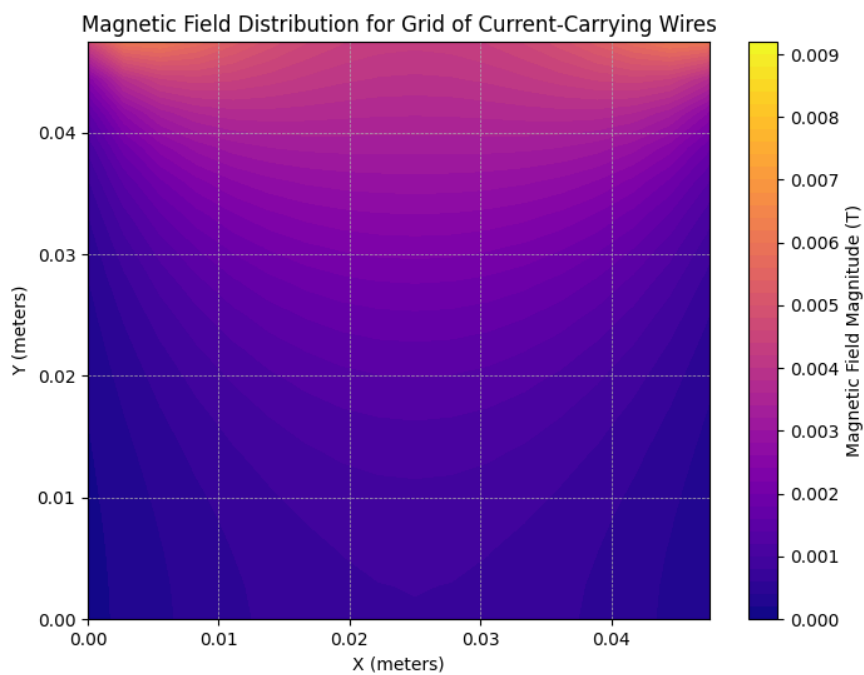


Рисунок 2.14 – Кольорова гамма магнітного поля у розплаві у площині підведення електродів

Для порівняння якісних та кількісних характеристик розподілу електромагнітного поля отриманих М-К та МСЕ, проведемо моделювання методом МСЕ для тієї самої площини. У якості початкових умов у такому випадку візьмемо значення потенціалів з М-К у 4 кутах пластини.

Результати розрахунків представлено на рис. 2.15 – 2.17.

Як можна побачити, просторові картини розподілу Е-М поля, векторів та чисельні значення співпадають у межах допустимих похибок. Тому метод М-К можна використовувати як для власних розрахунків числових та просторових характеристик Е-М полів, так і комбінувати з іншими методами, наприклад МСЕ.

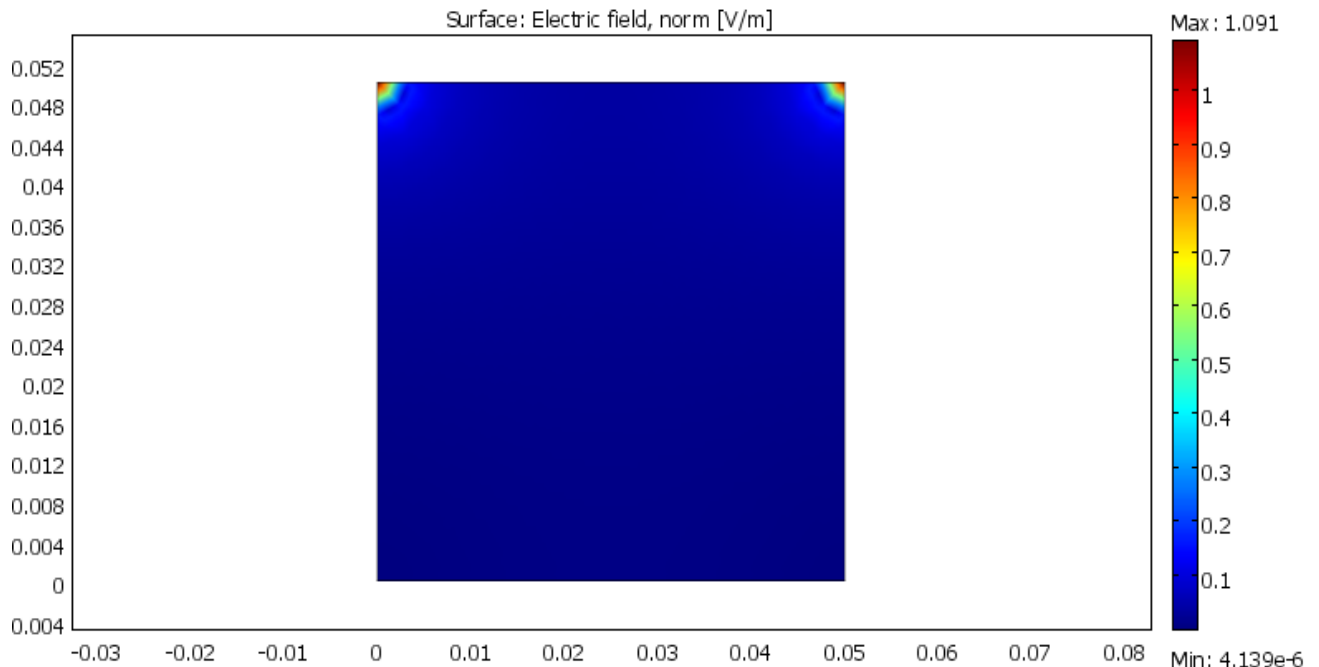


Рисунок 2.15 – Кольорова гамма електричного поля у розплаві, отримана із застосуванням МСЕ

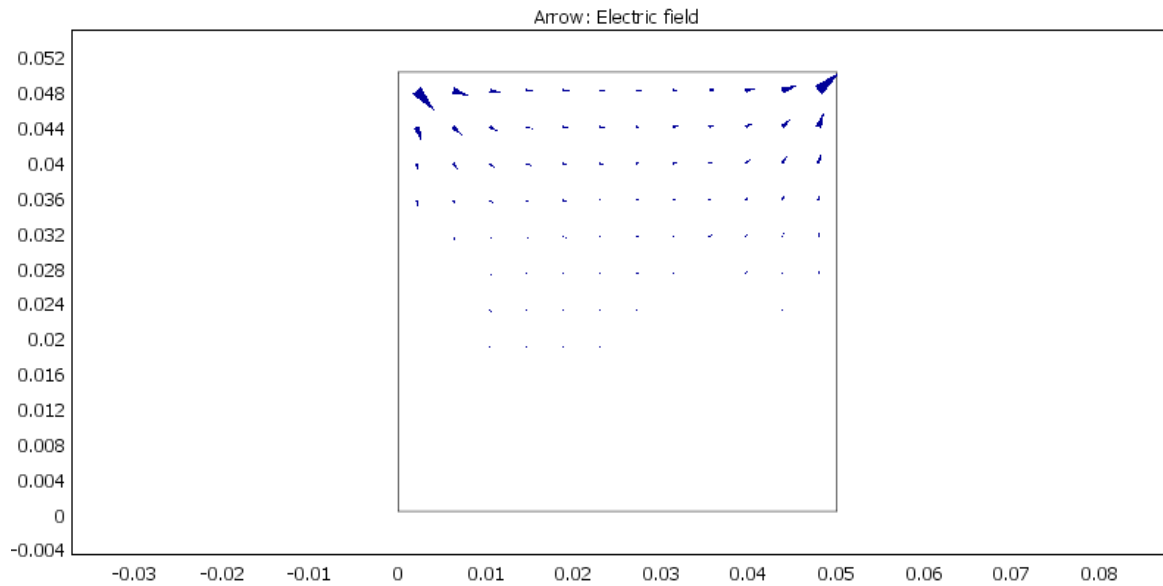


Рисунок 2.16 – Розподіл векторного електричного поля у площині підведенні електродів, отриманий із застосуванням МСЕ

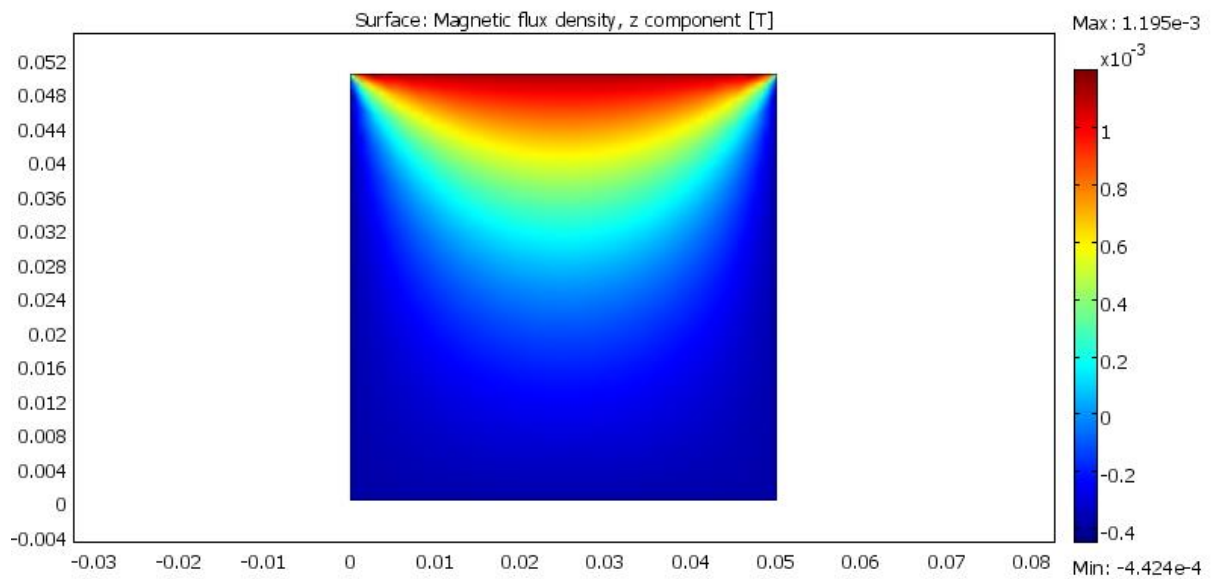
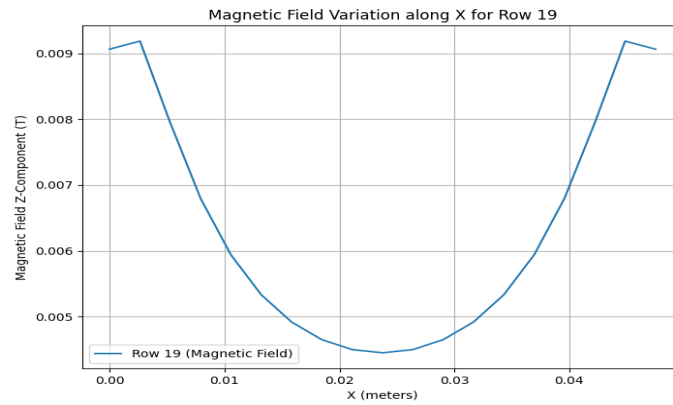


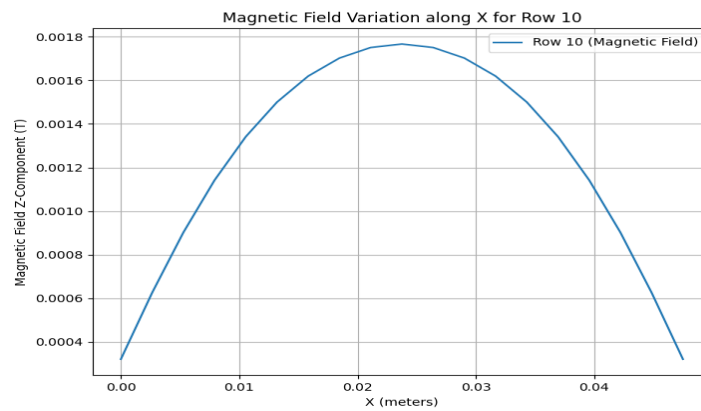
Рисунок 2.17 – Кольорова гамма магнітного поля у розплаві, отримана із застосуванням МСЕ

Рисунок 2.18 відображає розподіл B_z складової уздовж осі x на поверхні ємності з розплавом (а), в центрі ємності (б) та на дні (в). Видно, що вже у центрі ємності поле спадає майже у 5 разів, а на дні вже на порядок порівняно з

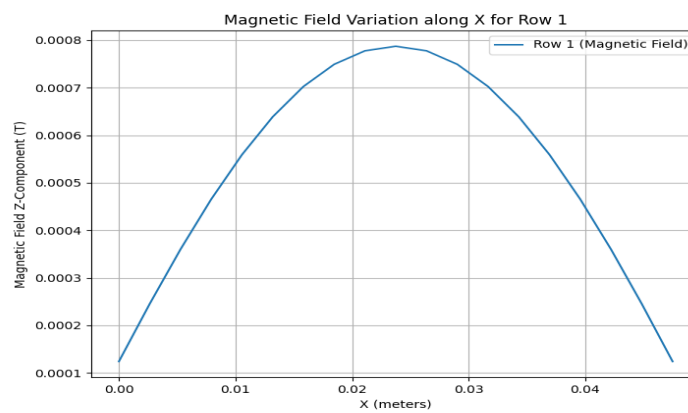
поверхнею, де протікає найбільший струм. Схожа картина і уздовж осі y (рис. 2.19).



а



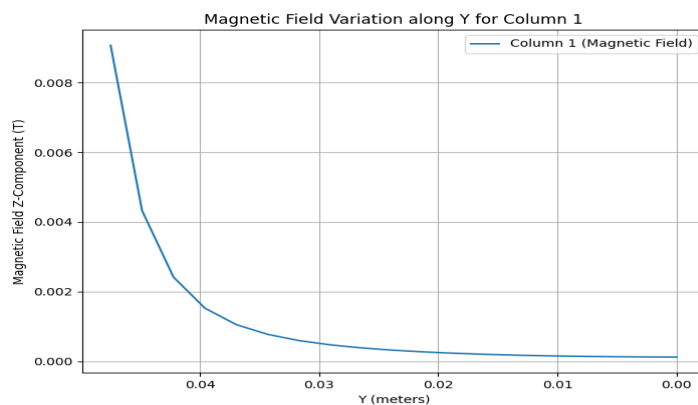
б



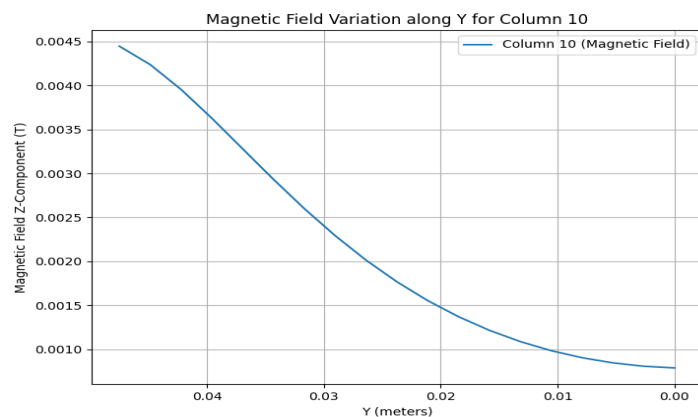
в

Рисунок 2.18 – Розподіл B_z складової вектору магнітної індукції уздовж осі x :

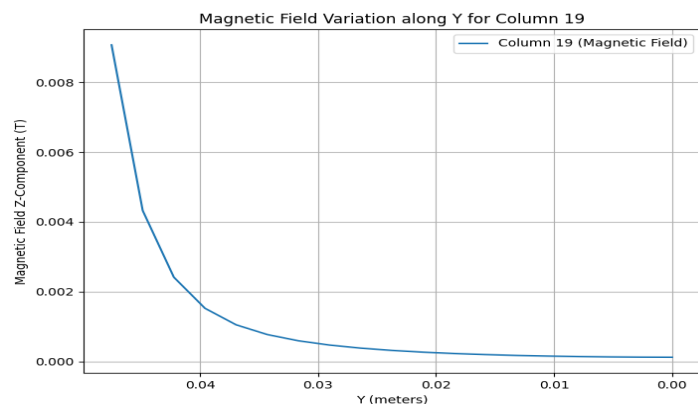
а – на поверхні, б – в середині ємності, в – на дні.



а



б



в

Рисунок 2.19 – Розподіл B_z складової вектору магнітної індукції поля уздовж осі у:
а – біля лівої стінки ємності, б – у центрі, в – біля правої стінки ємності

Із застосуванням геометричної моделі рис. 2.6 також було проведено моделювання обробки розплаву окремо пульсуючим та змінним струмами, а

також їх одночасного застосування. Для цього змінний, випрямлений пульсуючий струми та їх сума підводились до розплаву електродами дотично до середини паралельних верхніх ребер. Для аналізу було обрано амплітуди змінного та випрямленого пульсуючого струмів величиною по 40 А за умов їх окремої дії. При їх одночасній дії ці величини мали значення по 20 А.

На рис. 2.20 – 2.21 наведено, для прикладу, розподіли потенціалів у вузлі 12 при різних режимах джерела струму та амплітудно-часові залежності струмів між вузлами 12 та 13 (рис. 2.6, гілка 11).

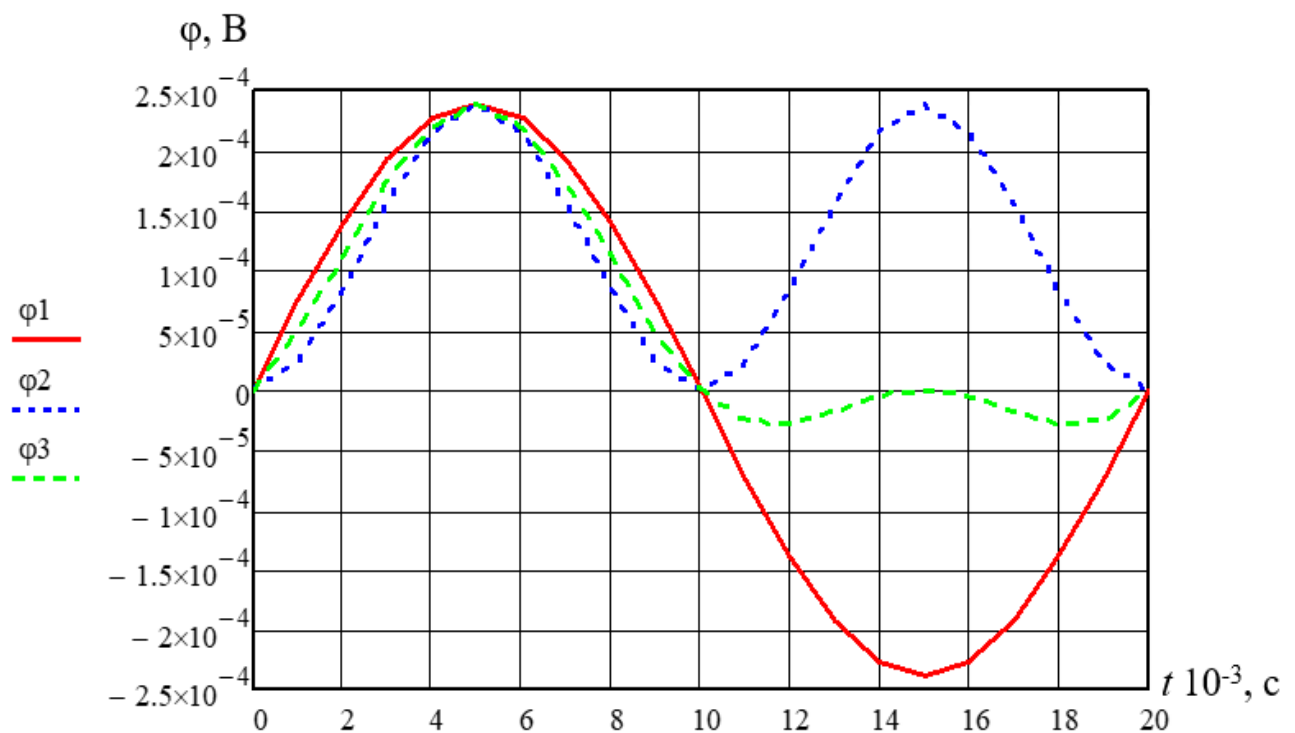


Рисунок 2.20 – Потенціали 12 вузла при різних режимах джерела струму

Наведені на рис. 2.20 – 2.21 результати відображають часові залежності φ_1 , I1 для змінного струму, φ_2 , I2 – для випрямленого пульсуючого та φ_3 , I3 – для сумарної дії струмів.

На рис. 2.23 наведено часові залежності напруженості електричного поля E у розплаві у відповідній точці, отримані методом скінченних елементів.

Порівнюючи з результатами, що їх отримано із застосуванням М-К (рис 2.22), можна відмітити повне якісне співпадіння та невелику кількісну різницю.

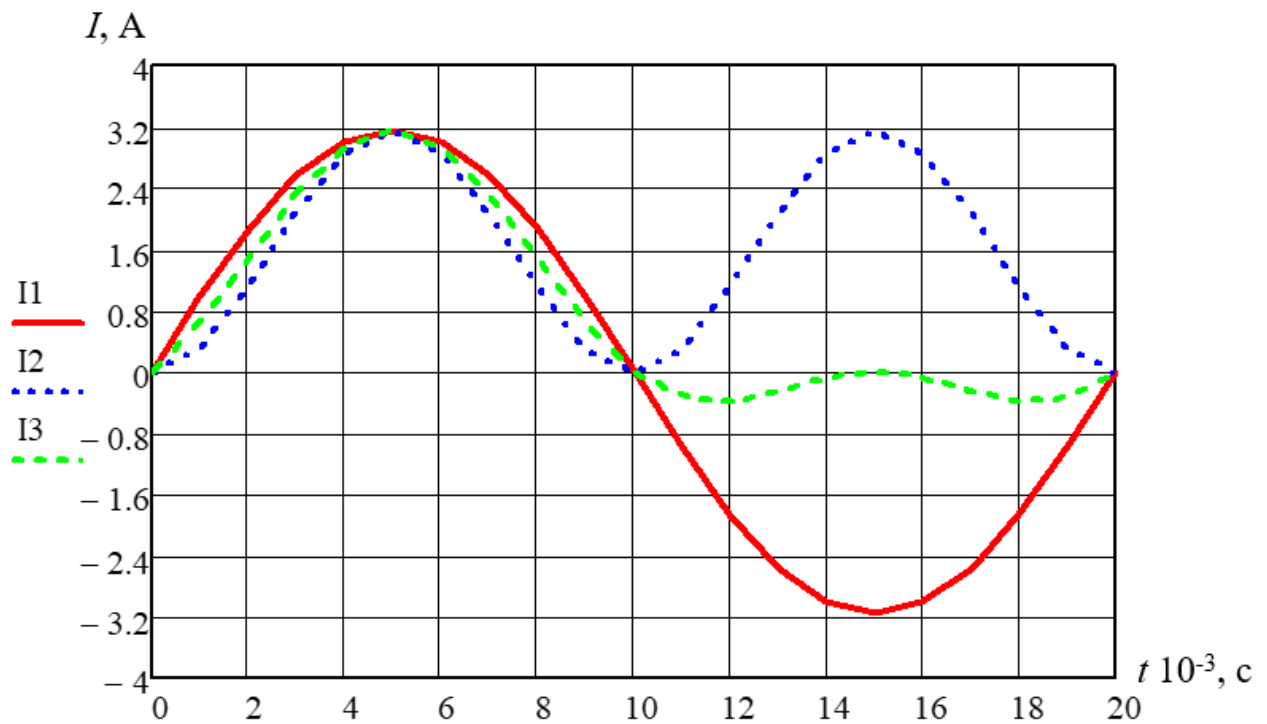


Рисунок 2.21 – Струми між вузлами 12 та 13

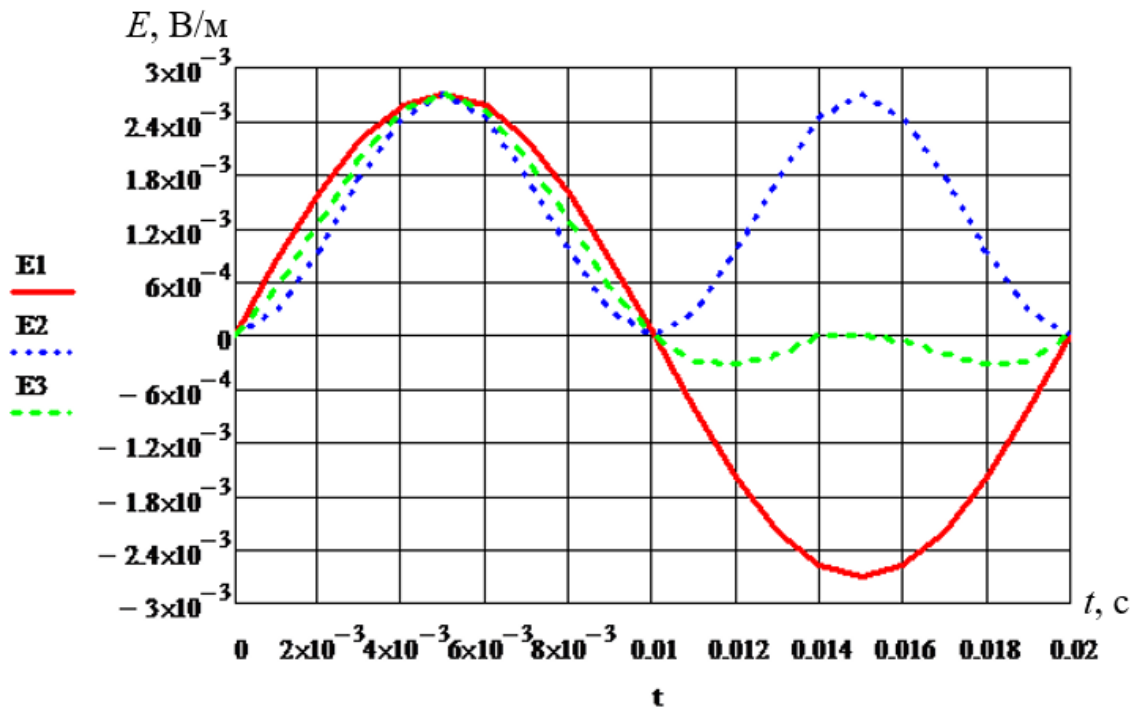


Рисунок 2.22 – Напруженість електричного поля

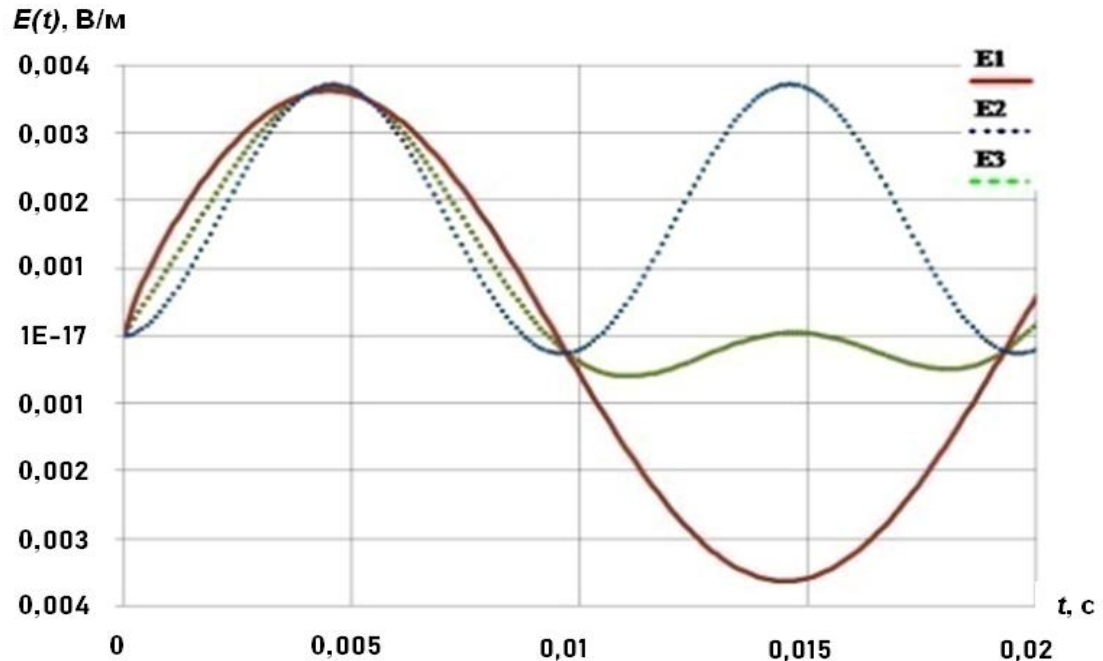


Рисунок 2.23 – Напруженість електричного поля, визначена із застосуванням МСЕ

Таким чином, порівнюючи результати, які отримано методами М-К та МСЕ, можна стверджувати, що М-К дозволяє з достатньою точністю відтворювати розподіл базового електричного поля у металевому розплаві при його обробці як постійним, так і змінним електричним струмом. Отже, у комплексі МСЕ та М-К можуть суттєво вплинути на розширення наукового доробку щодо термосилової дії на розплав.

2.2.2 Методологія застосування М-К для розв’язання задач у 3D форматі. Для розрахунків у 3D форматі можна використовувати наступні підходи.

У об’ємному об’єкті обробки вирізаємо меридіональні або азимутальні площини (рис 2.24). У цьому випадку розрахунки можуть бути спрощеними. Кількість площин визначається метою задачі.

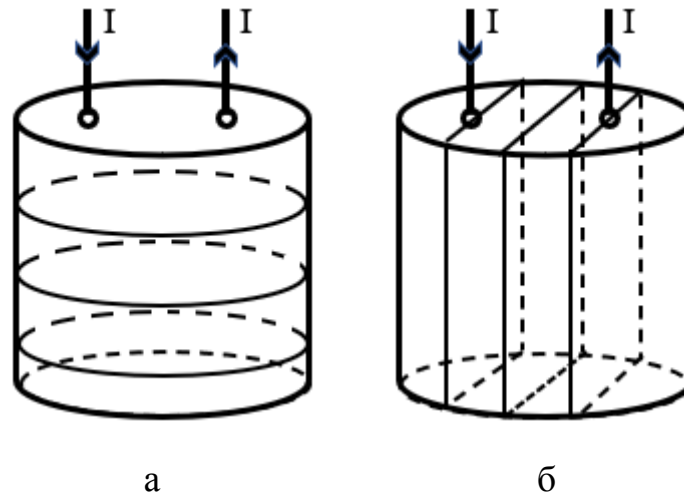


Рисунок 2.24 – Приклади переведення 3D формату у 2D на геометричній постановці задач

Другий підхід дозволяє визначати електричні характеристики базового електромагнітного поля безпосередньо у 3D форматі. Звісно ж цей підхід надає змогу отримати більш верифіковані результати. Для цього об'єкт обробки розбиваємо на об'ємні елементарні комірки (рис 2.1).

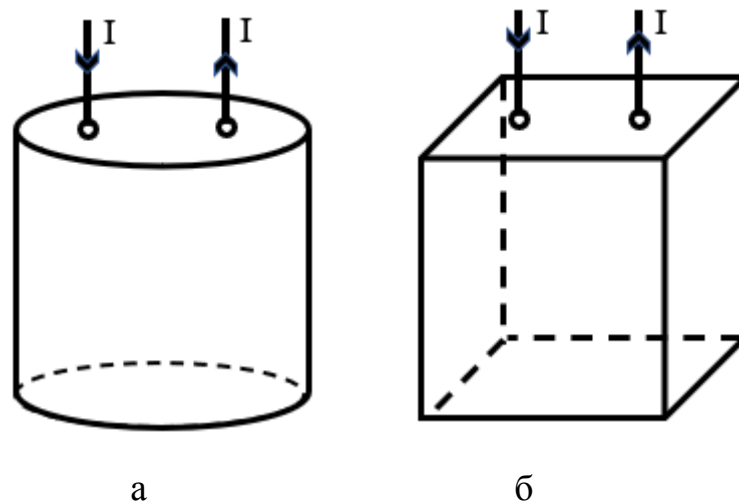


Рисунок 2.25 – Варіанти геометричної постановки задачі для 3D формату

Розрахункові алгоритми для обох підходів наведені у підрозділі 2.2.

2.3 Імітаційне моделювання характеристик первинного електричного поля на границях рідкометалевого об'єкта, що обробляється пропусканням електричного струму

При застосуванні імітаційного моделювання для визначення розподілу фізичних полів у розплаві при КЕСО, наприклад методом скінченних елементів (МСЕ), виникає проблема визначення граничних умов (ГУ) для первинного (базового) електричного поля. Підхід, що при цьому застосовується, використовує когнітивний принцип, коли інтуїтивно підбираються характеристики потенціалів та струмів на границях, які є логічними в якісному плані та фізично обґрунтовані за кількісними показниками [61], а отримані рішення диференціальних рівнянь вважатимуться ототожненими з реальними явищами лише з деяким припущенням. Зазначимо, що коректно визначені ГУ разом із початковими умовами дозволяють виконати необхідну умову коректності постановки задачі.

Тому актуальною є задача коректного визначення граничних умов за допомогою відомого методу, результативність якого підтверджена під час вирішення інших задач, наприклад, (М-К) [62]. Залежно від того, якими рівняннями описується досліджуване поле, вибирається електрична схема заміщення для комірки. Весь об'єкт, що досліджується, моделюється як кінцеве число таких комірок [43], застосовуючи варіанти *2D* або *3D*. По суті, будь-яка польова задача, розв'язувана будь-яким чисельним методом (скінченних елементів, контрольного об'єму, або скінченних різниць) може бути представлена у вигляді еквівалентного електричного кола високого порядку, кількість вузлів та гілок якого відповідає числу кінцевих елементів, вибраних у розрахунковій області [43]. М-К дає змогу, по-перше, коректно визначити ГУ для розрахункових процедур, а по-друге, оцінити розподіл базового

електромагнітного поля у розплаві при менших витратах розрахункового часу, хоча і при меншій точності отриманих результатів у порівнянні з МСЕ.

Проведемо розрахункові процедури ГУ за умов використання одного або двох типів струму. Відповідно для аналізу обрано два варіанти електродних систем: двоелектродна та чотириелектродна (рис. 2.26).

Дослідження виконаємо для розплаву алюмінію при температурі 1000 К, який знаходиться у ємності, що має форму прямокутного паралелепіпеду з непровідними стінками розміром 45x40x45 мм. Оберемо електричний струм, який підводився або одним джерелом постійного за амплітудою струму у випадку двоелектродної системи (струм амплітудою 100 А), або одночасно з використанням чотириелектродної системи двома джерелами постійних за амплітудою струмів амплітудою 50 А кожний. У даній задачі торці електродів розташовано практично під поверхнею розплаву. Досліджувані грані (границі) на рис. 2.26 позначено відповідно Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 . Також досліджувався розподіл електричних характеристик на верхній та нижній границях

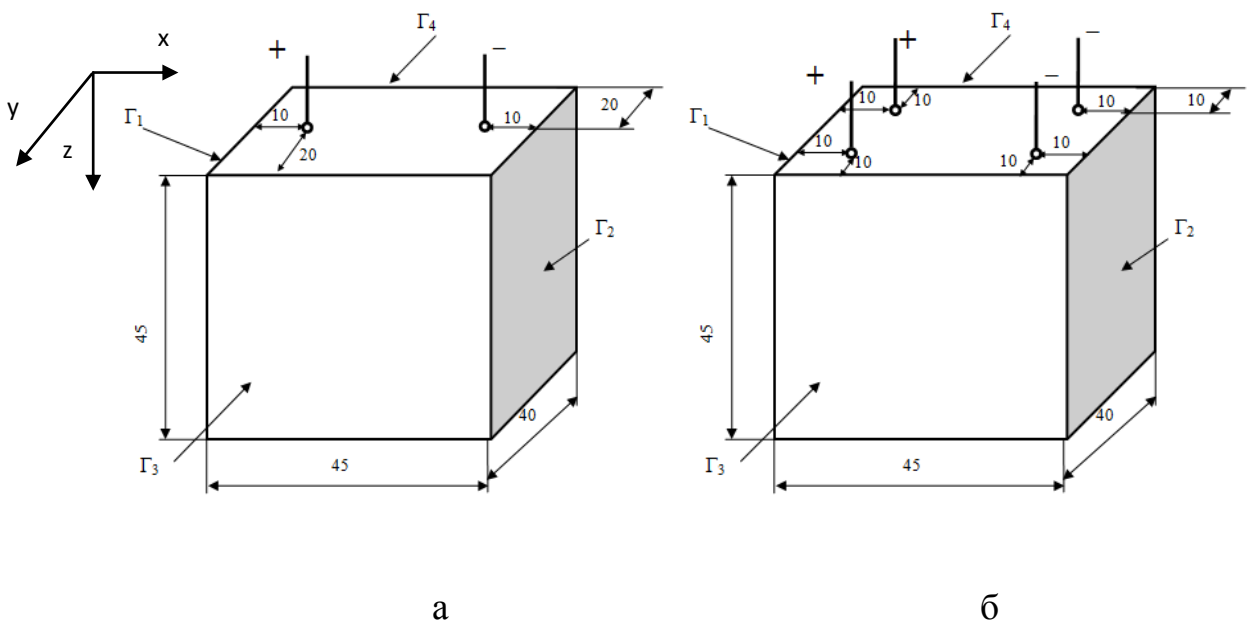


Рисунок 2.26 – Геометричні моделі задачі із використанням двоелектродної (а) та чотириелектродної (б) систем

Об'єм розплаву розбивався на комірки розмірами 5х5х5 мм. Відповідна електрична заступна схема мала 900 вузлових точок та 2420 гілок. Матриця інциденції формувалась за допомогою алгоритму, блок-схему якого наведено на рис. 2.2.

Для однорідних осередків уздовж осей x , y , z приймалось, що їх питомий опір ρ дорівнює питомому опору алюмінію за температури 1000 К, $\rho_{Al} = 24,77 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [60]. Отримані результати наведено на рис. 2.27-2.46.

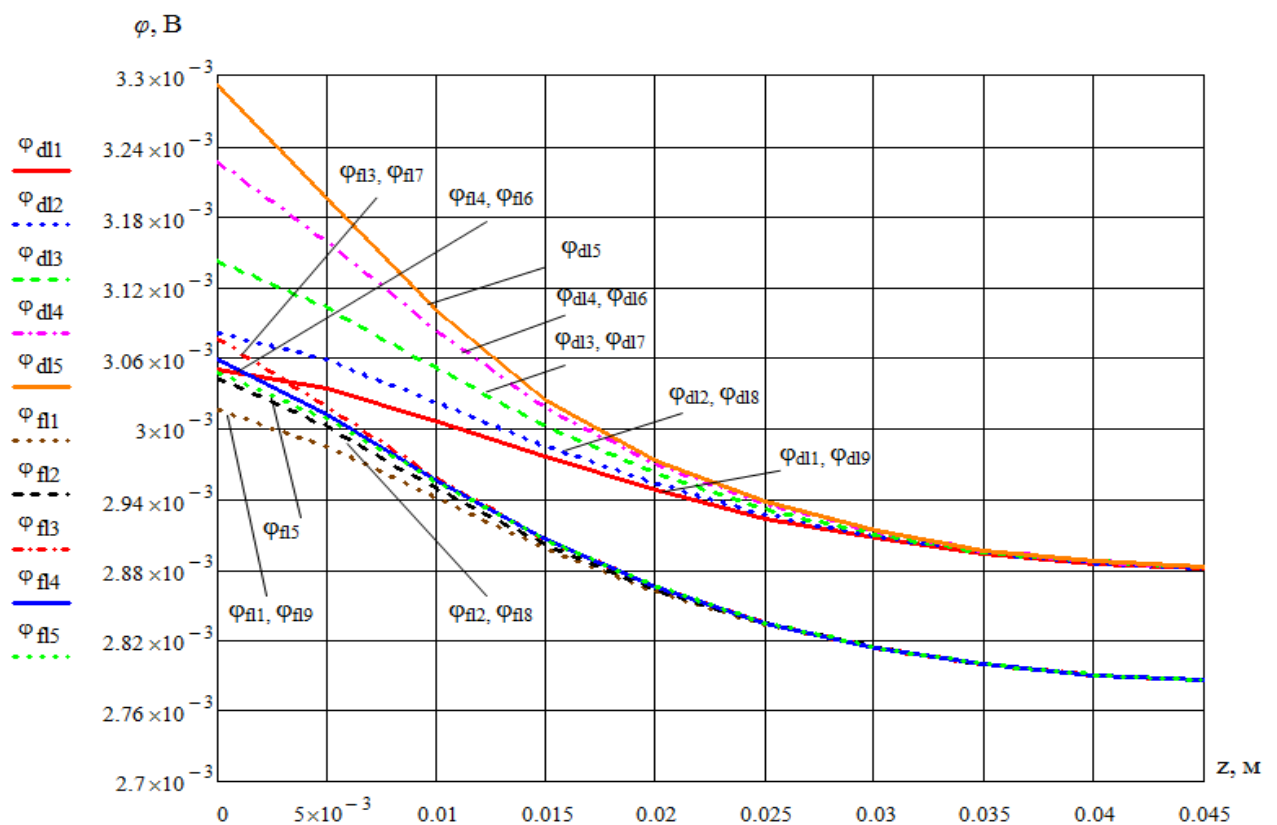


Рисунок 2.27 – Розподіл потенціалів на границі (Г1) уздовж осі z ($\varphi_{dl1} - \varphi_{dl9}$ – для двоелектродної системи, $\varphi_{fl1} - \varphi_{fl9}$ – для чотириелектродної системи)

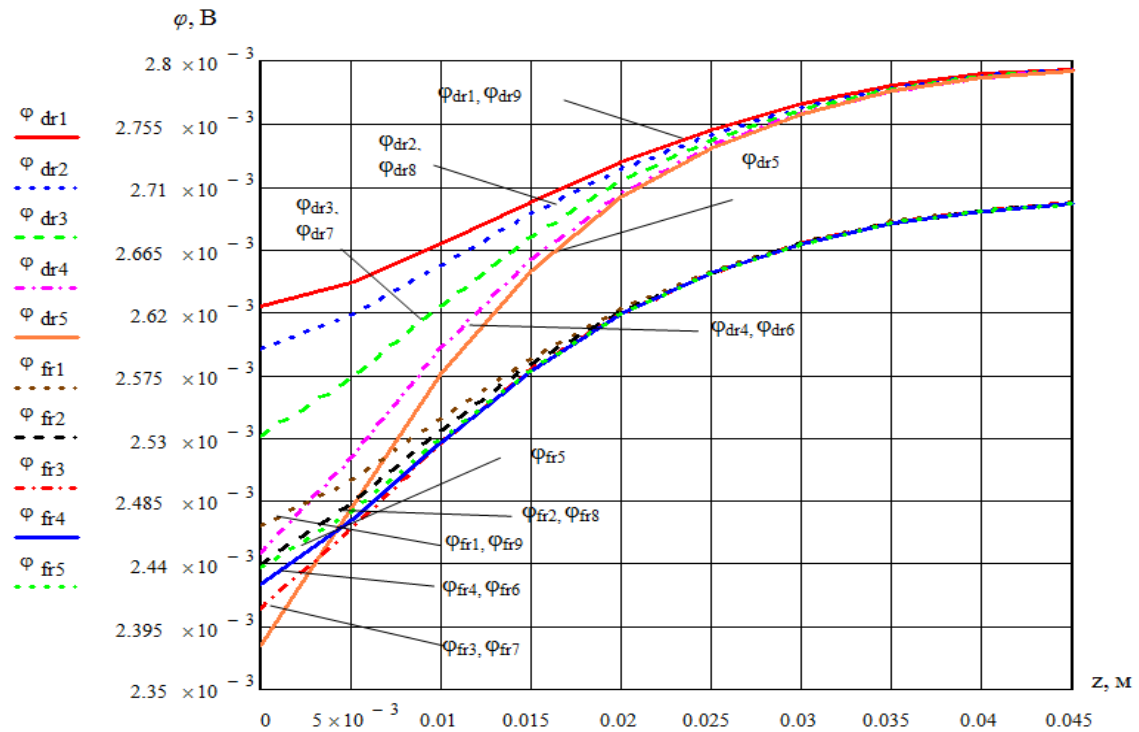


Рисунок 2.28 – Розподіл потенціалів на границі (Γ_2) уздовж осі z ($\varphi_{dr1} - \varphi_{dr9}$ – для двоелектродної системи, $\varphi_{fr1} - \varphi_{fr9}$ – для чотириелектродної системи)

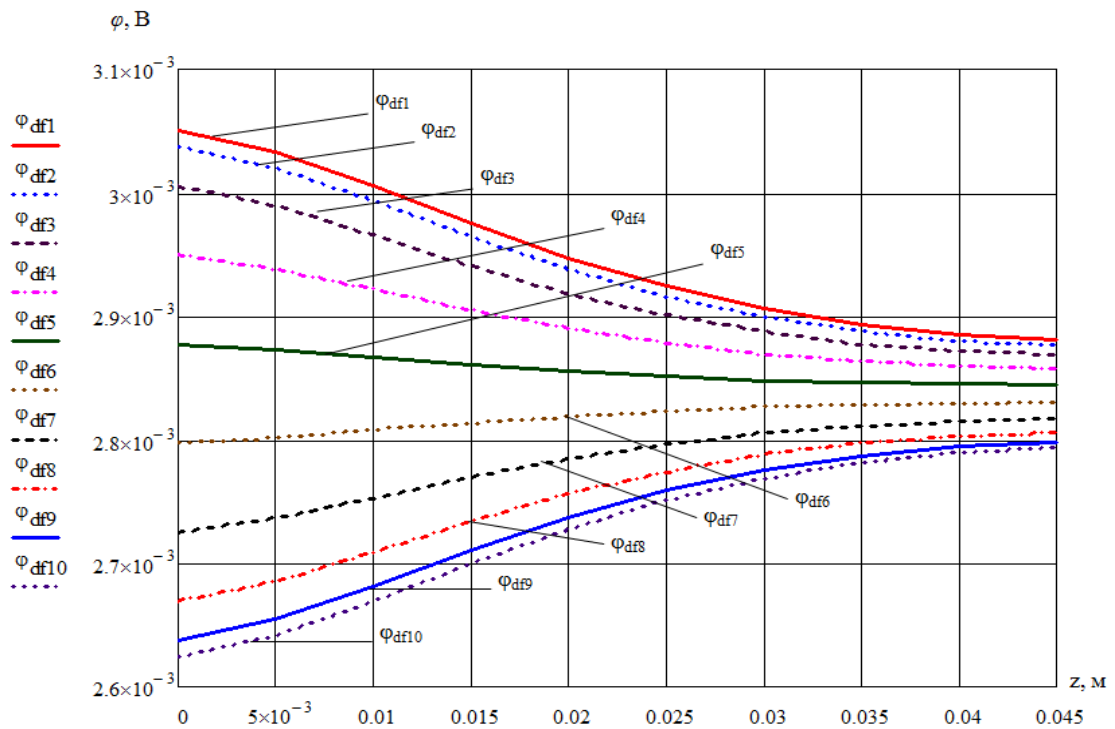


Рисунок 2.29 – Розподіл потенціалів на границі (Γ_3) уздовж осі z (двоелектродна система)

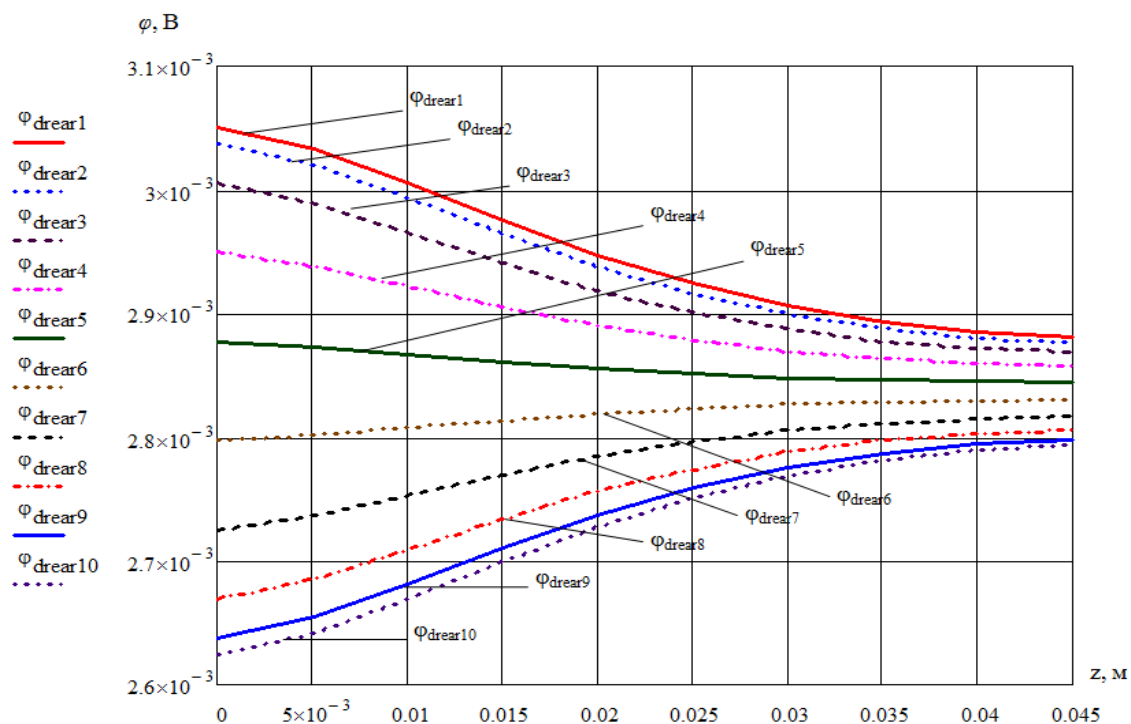


Рисунок 2.30 – Розподіл потенціалів на границі (Γ_4) уздовж осі z (двоелектродна система)

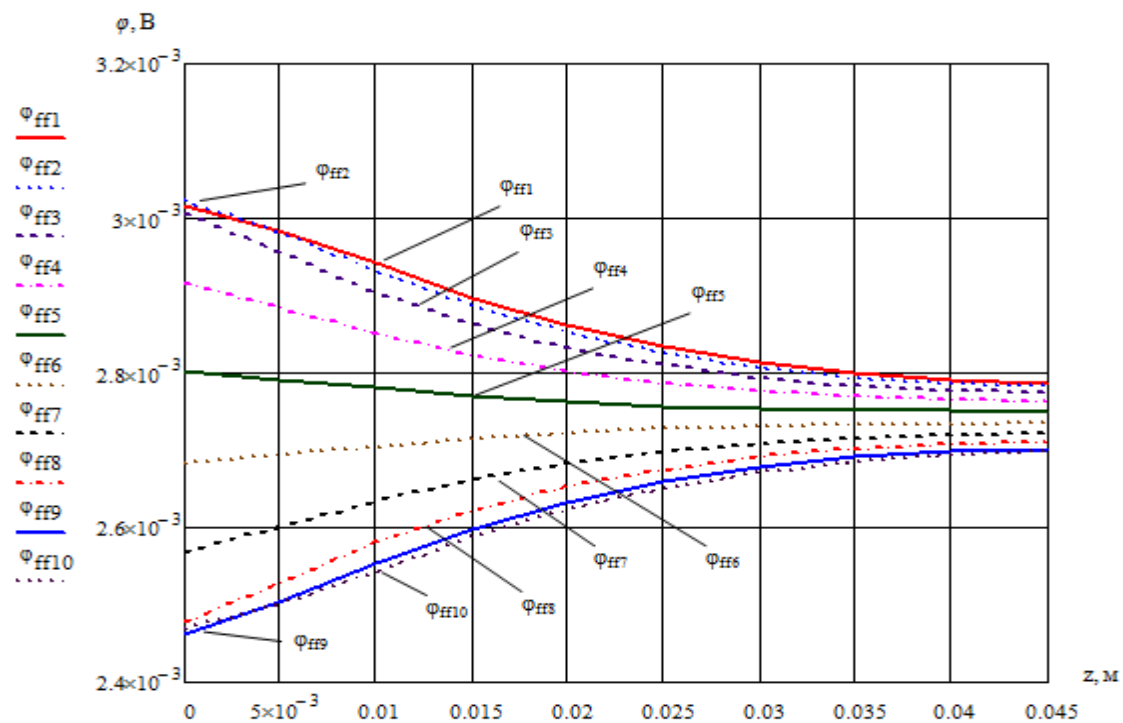


Рисунок 2.31 – Розподіл потенціалів на границі (Γ_3) уздовж осі z (чотириелектродна система)

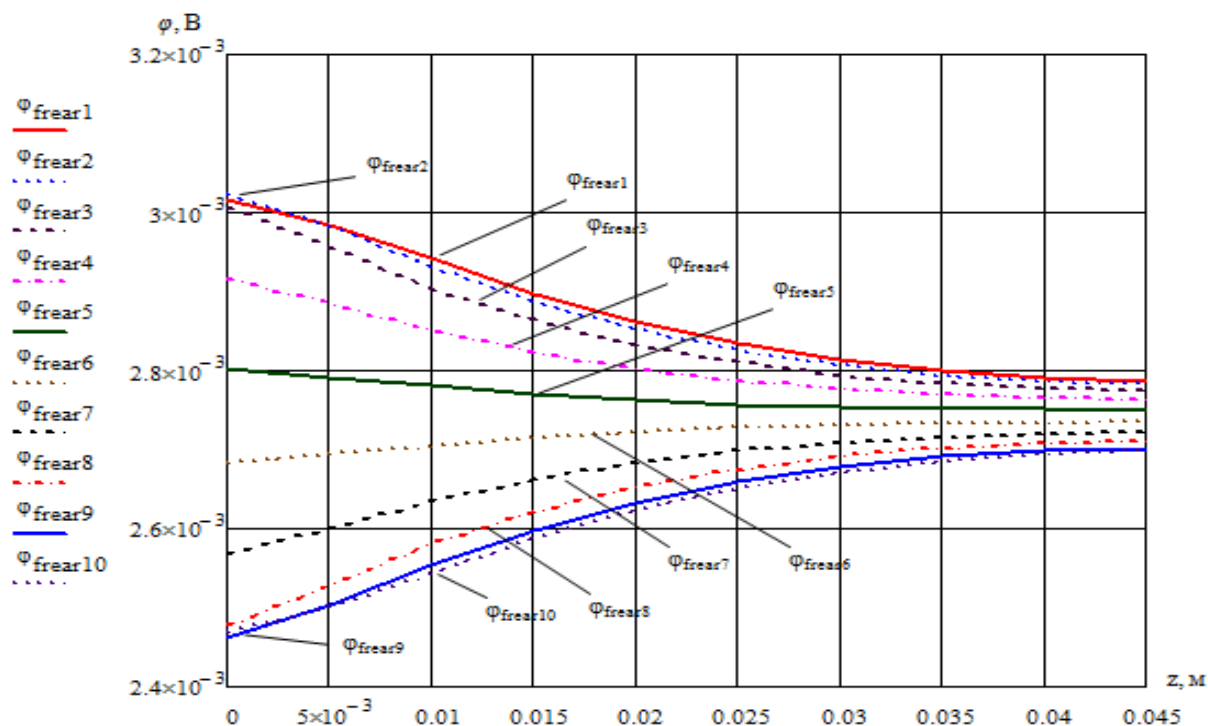


Рисунок 2.32 – Розподіл потенціалів на границі (Γ_4) уздовж осі z (чотириелектродна система)

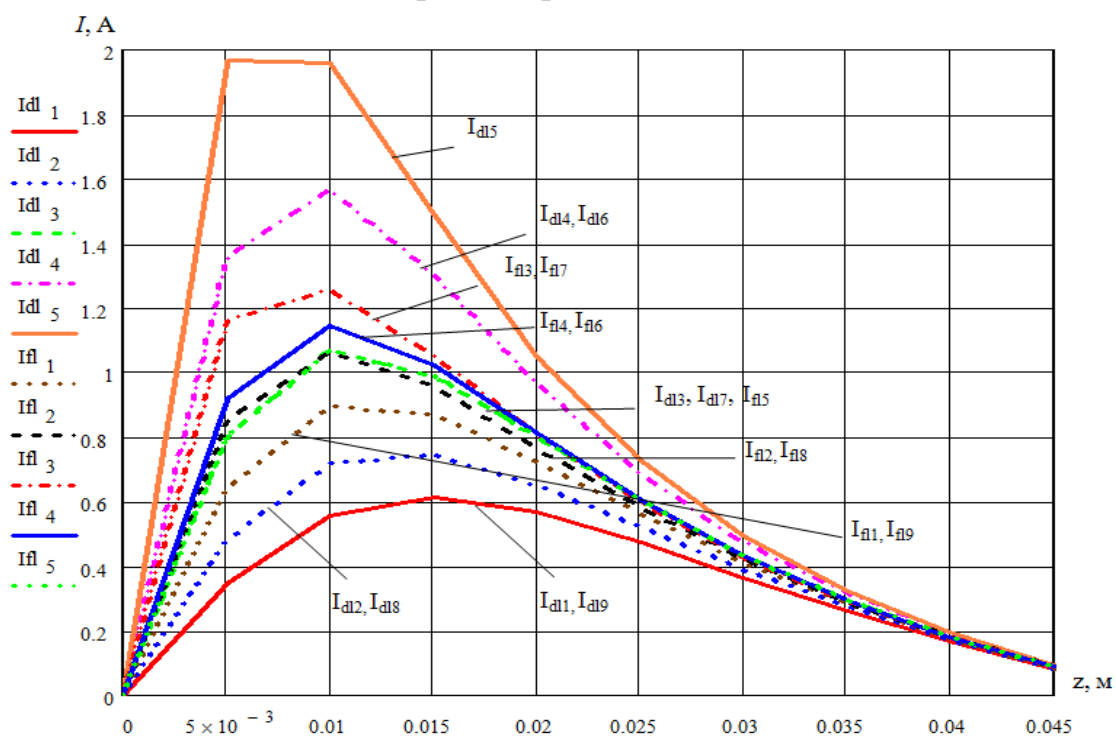


Рисунок 2.33 – Розподіл струмів на границі(Γ_1) уздовж осі z ($I_{dl1} - I_{dl9}$ – для двоелектродної системи, $I_{fl1} - I_{fl9}$ – для чотириелектродної системи)

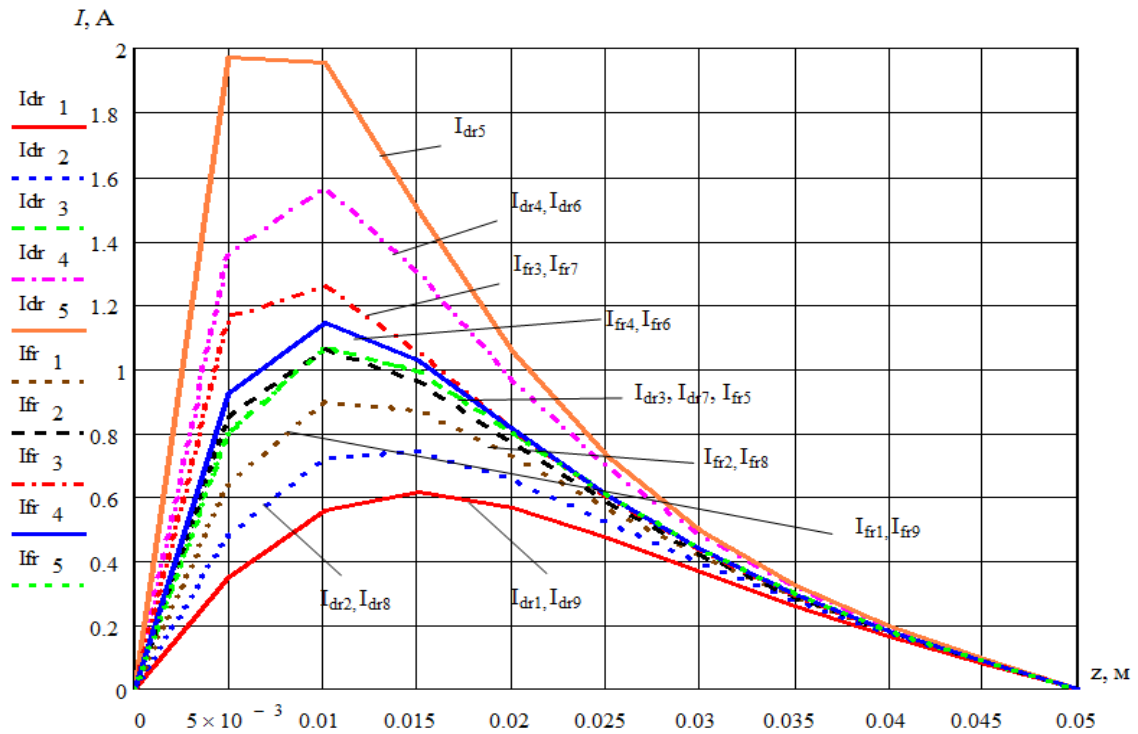


Рисунок 2.34 – Розподіл струмів на границі(Γ_2) уздовж осі z ($I_{dr1} - I_{dr9}$ – для двоелектродної системи, $I_{fr1} - I_{fr9}$ – для чотириелектродної системи)

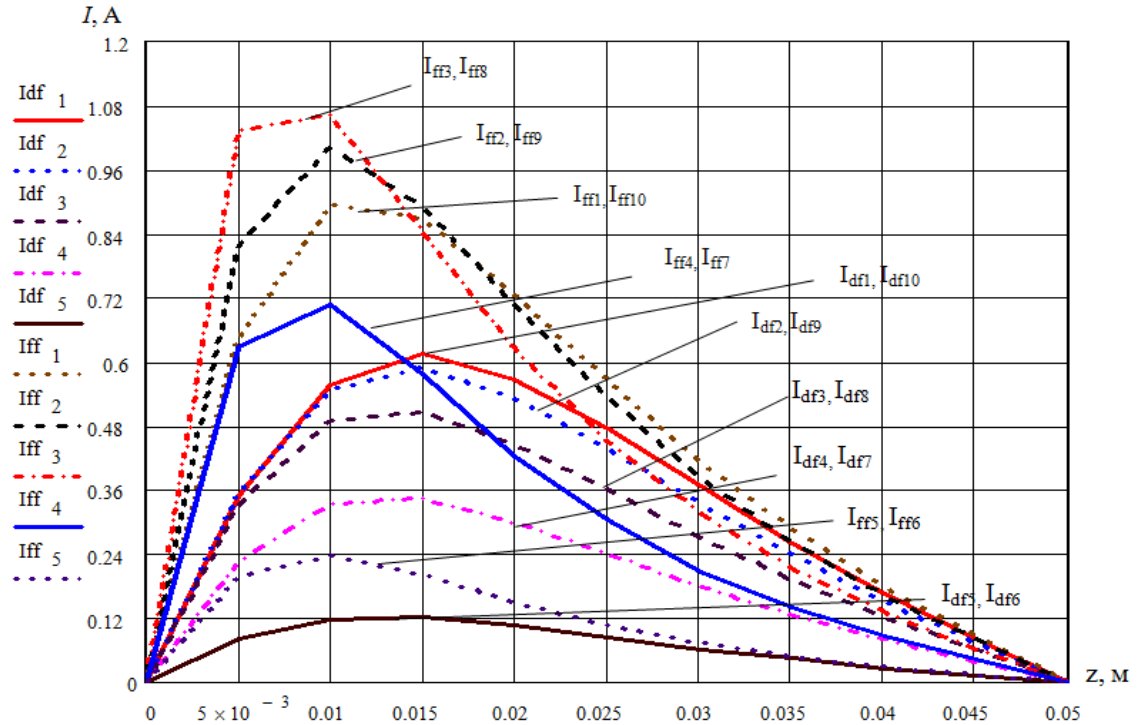


Рисунок 2.35 – Розподіл струмів на границі(Γ_3) уздовж осі z ($I_{df1} - I_{df9}$ – для двоелектродної системи, $I_{ff1} - I_{ff9}$ – для чотириелектродної системи)

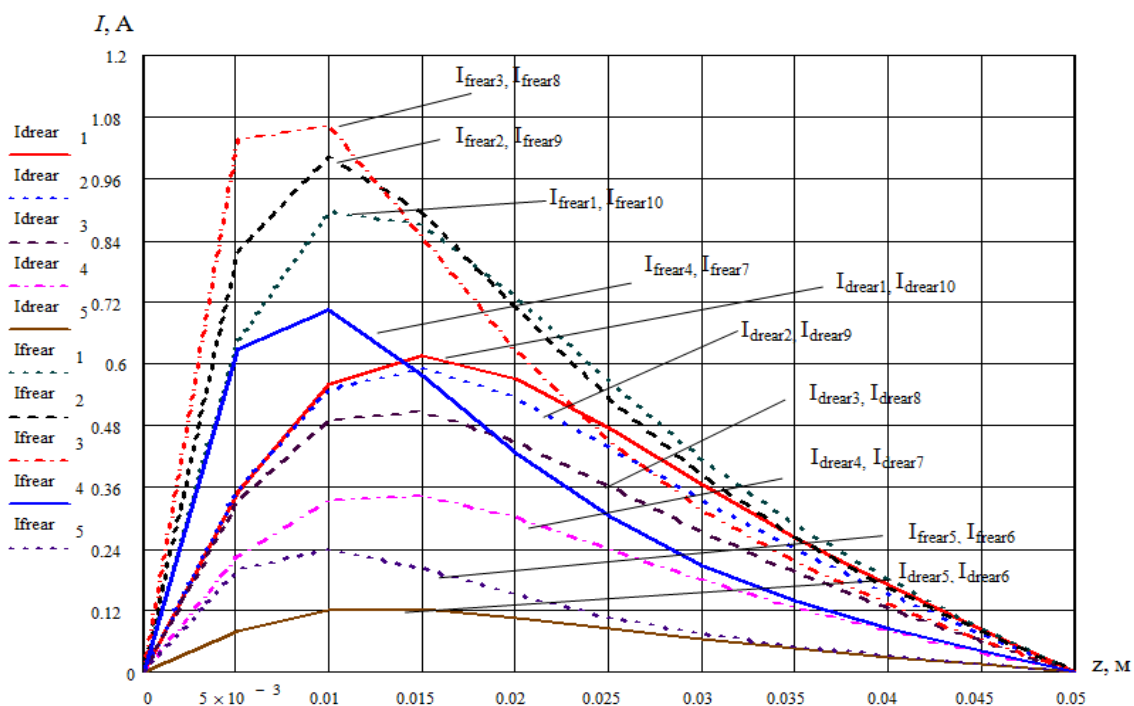


Рисунок 2.36 – Розподіл струмів на границі(Γ_4) уздовж осі z ($I_{drear1} - I_{drear9}$ – для двоелектродної системи, $I_{frear1} - I_{frear9}$ – для чотириелектродної системи)

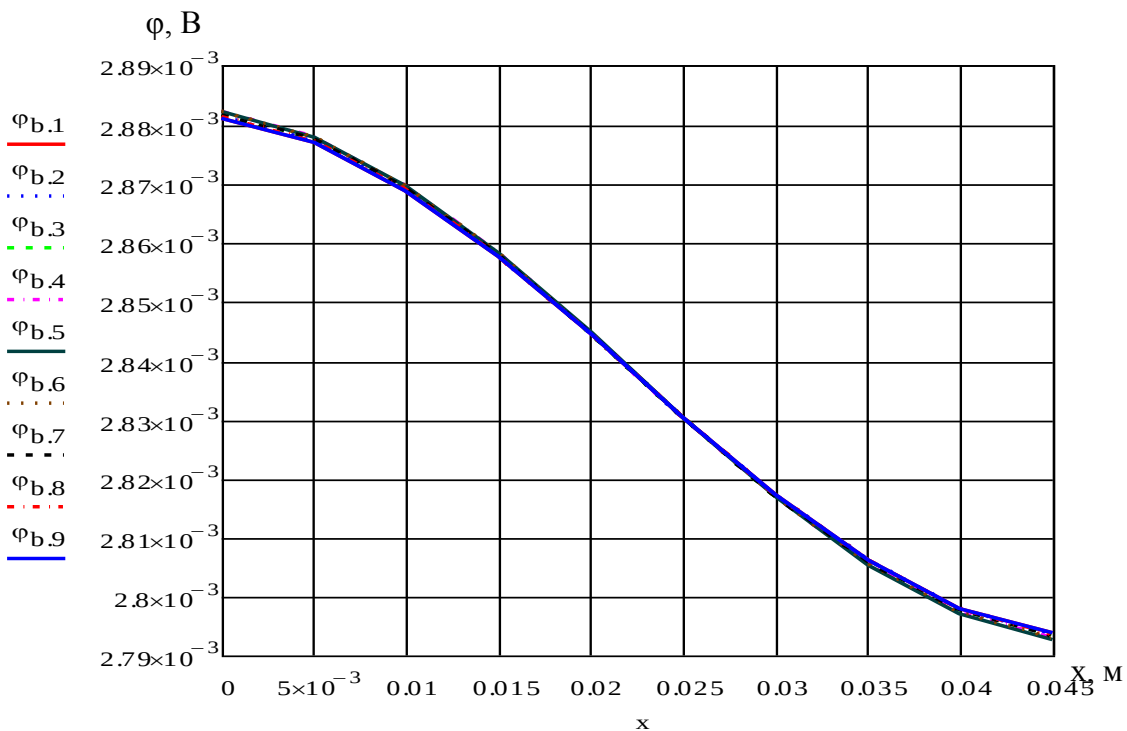
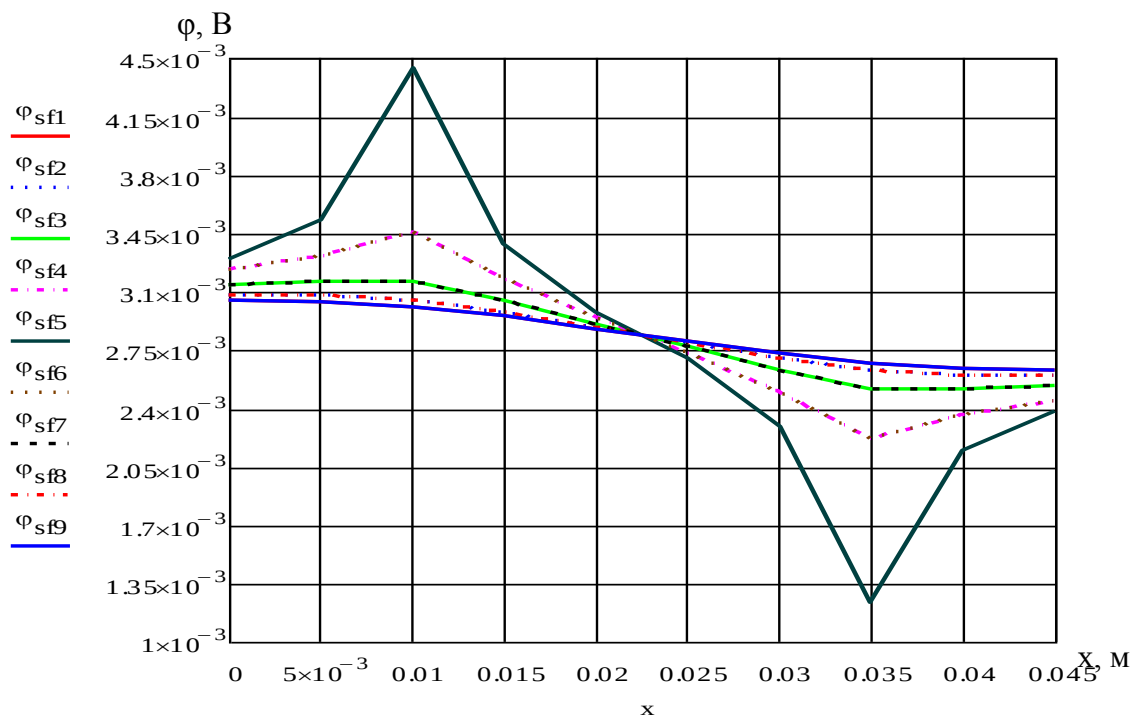


Рисунок 2.37 – Розподіл потенціалів на дні ємності для двоелектродної системи



Розподіл 2.38 – Розподіл потенціалів на поверхні розплаву для двоелектродної системи

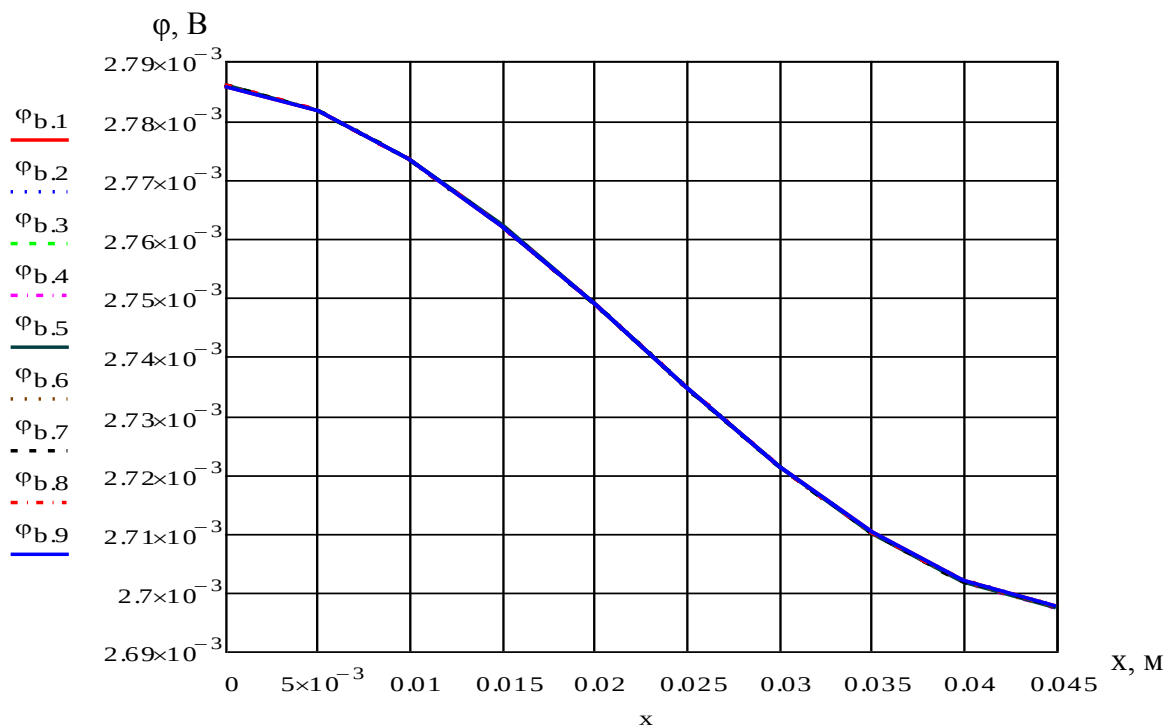
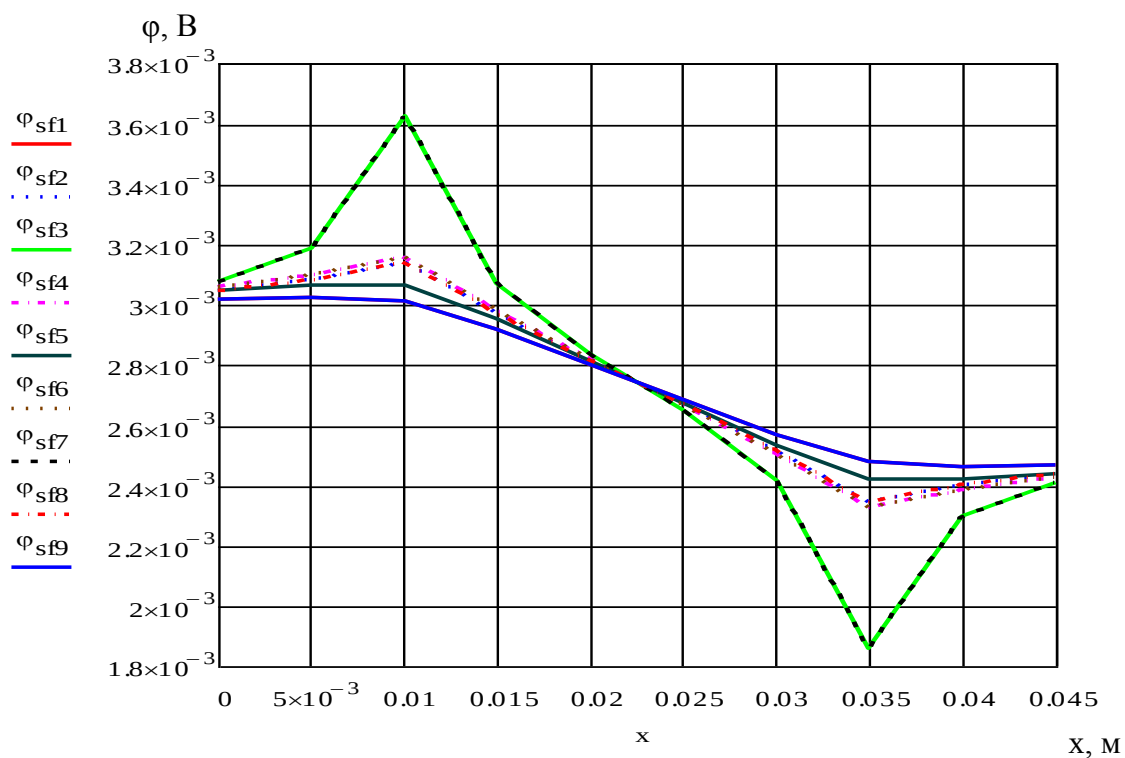


Рисунок 2.39 – Розподіл потенціалів на дні ємності для чотириелектродної системи



Розподіл 2.40 – Розподіл потенціалів на поверхні розплаву для чотириелектродної системи

I, A

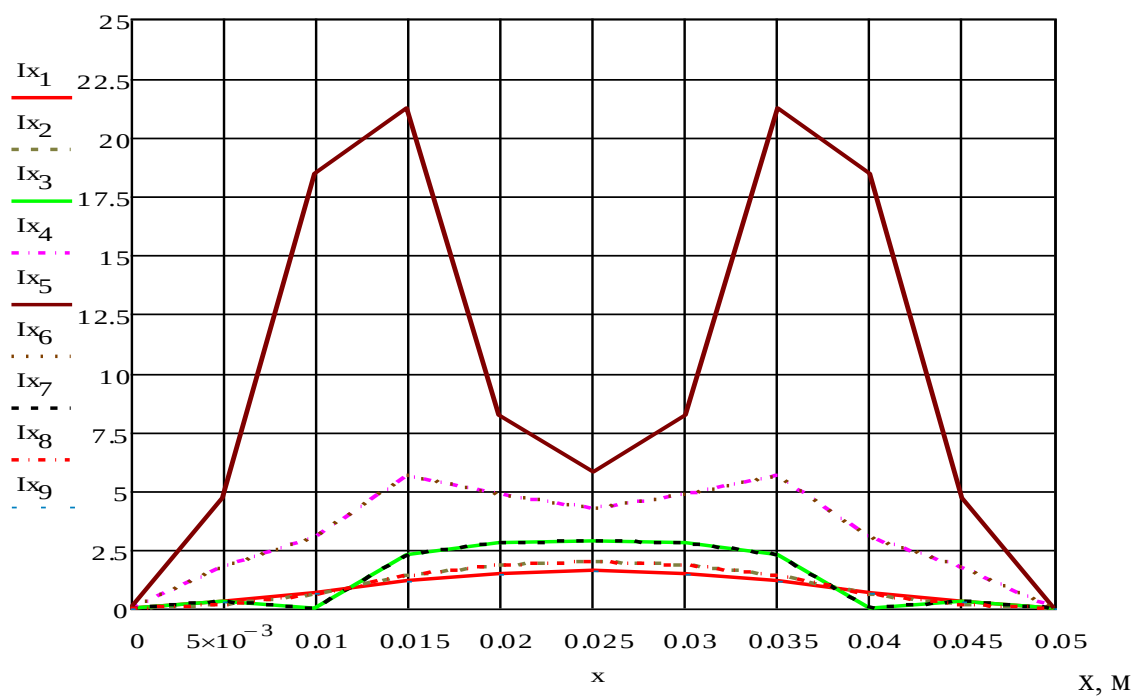


Рисунок 2.41 – Розподіл струмів на поверхні ємності уздовж осі x для двоелектродної системи

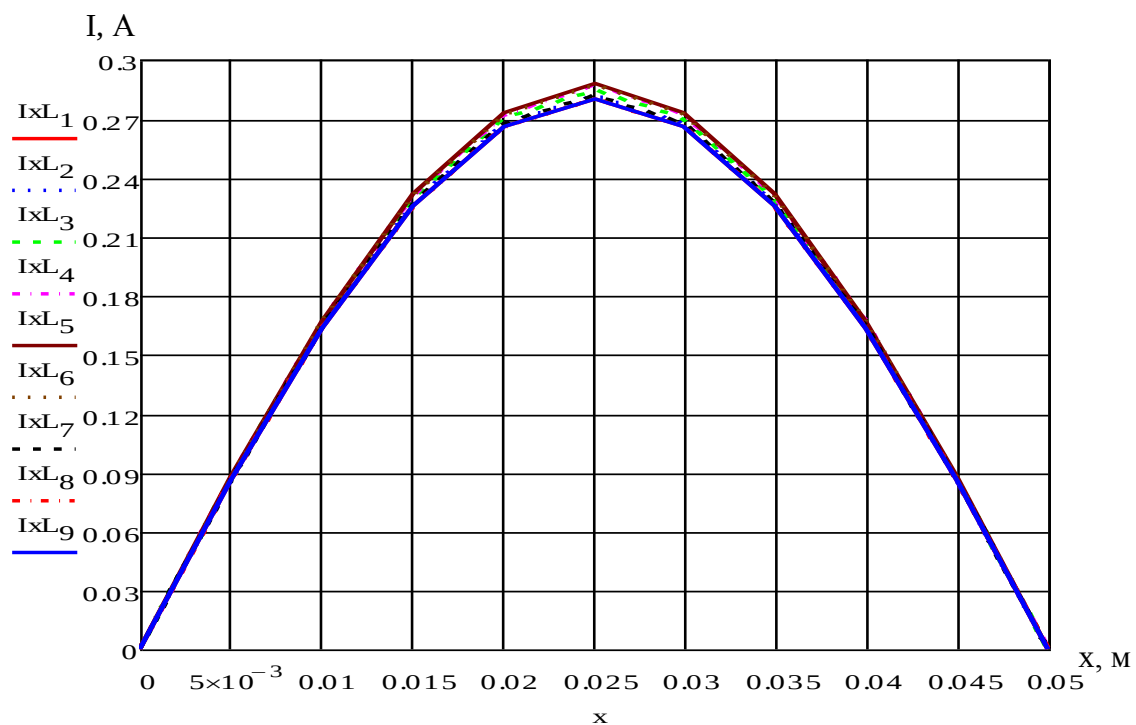


Рисунок 2.42 – Розподіл струмів на дні ємності уздовж осі x для двоелектродної системи

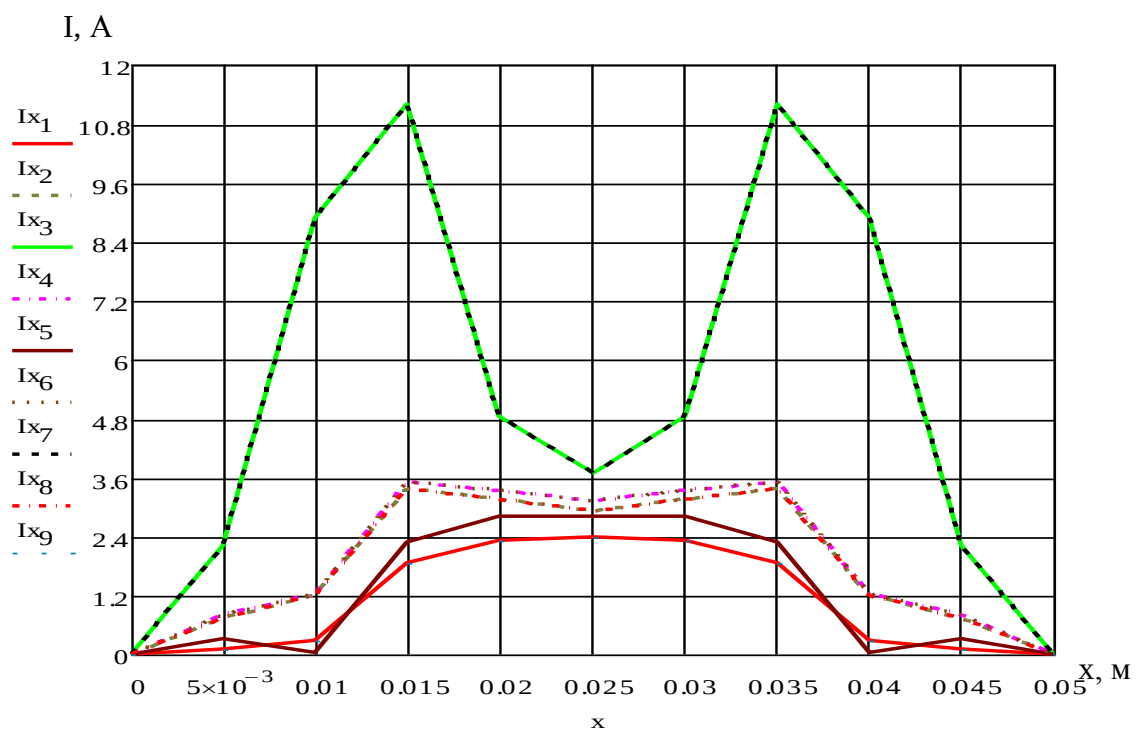


Рисунок 2.43 – Розподіл струмів на поверхні ємності уздовж осі x для чотириелектродної системи

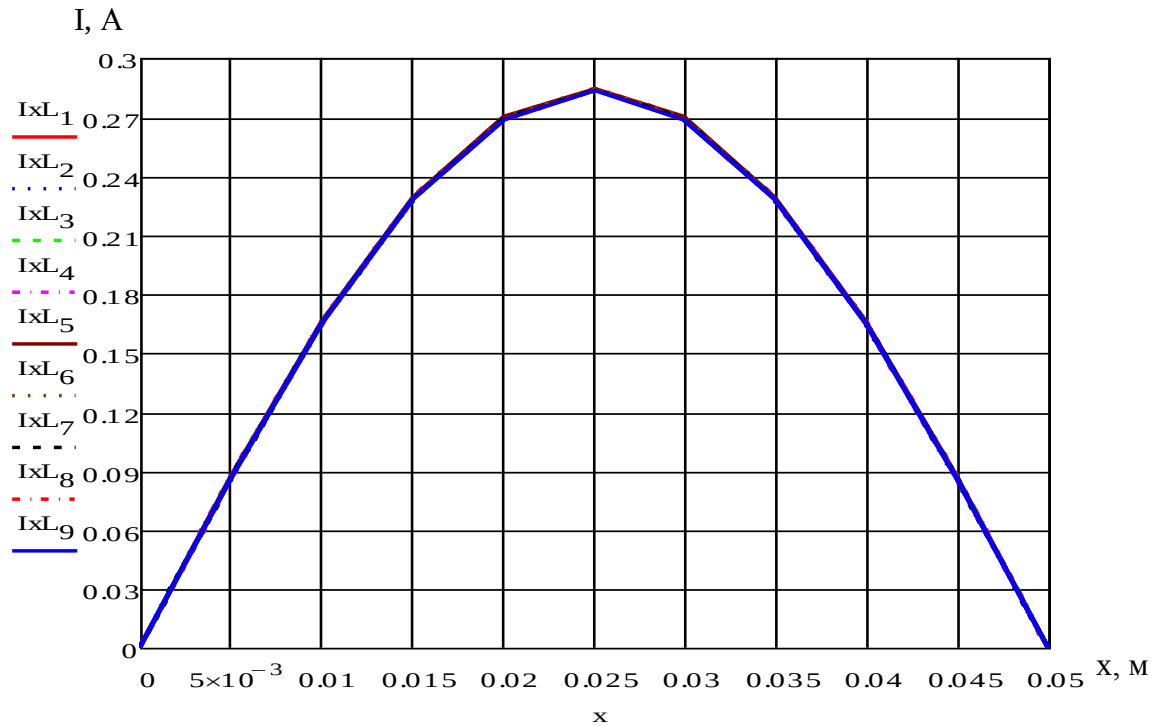


Рисунок 2.44 – Розподіл струмів на дні ємності уздовж осі x для чотириелектродної системи

Отримані результати показали різний якісний та кількісний розподіл потенціалів електричного струму та його значень для двоелектродної та чотириелектродної систем.

Так, на границях Γ_1 та Γ_2 (рис. 2.27 та рис. 2.28) розподіл потенціалів для чотирьох електродів є більш компактним, ніж для двох електродів. На поверхні розбіг їх значень складає $0,06 \cdot 10^{-3}$ В, що приблизно складає 2% амплітудного значення, як на Γ_1 , так і на Γ_2 . Для двох електродів на поверхні розплаву різниця значень потенціалів складає $0,3 \cdot 10^{-3}$ В, або 10%. Для обраних електродів розподіл потенціалів на Γ_1 та Γ_2 асиметричний. При цьому біля дна ємності вони мають фактично однакові значення, а їх різниця для двох і чотирьох електродів складає $\approx 0,1 \cdot 10^{-3}$ В. Показово те, що розподіл потенціалів в обох випадках електродів є симетричним відносно максимального значення.

На границях Γ_3 та Γ_4 (рис. 2.29 – рис. 2.32) для чотирьох електродів розподіл потенціалів більш компактний, аніж для двох електродів. Але біля поверхні їх щільність (на відміну від двох електродів) більша на 23%, а біля дна – на 55%. На середині глибини $\approx 46\%$.

Щодо розподілу значень струмів, то на Γ_1 та Γ_2 незалежно від типу електродів, як і для потенціалів, він формується практично симетричним як якісно, так і кількісно. Максимальні значення струмів відповідають інтервалу заглиблення від $5 \cdot 10^{-3}$ м до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

На границях Γ_3 та Γ_4 спостерігаємо аналогічне розташування струмів. Важливо відмітити, що максимальні значення струмів при двох електродах практично у 2 рази більші аніж при чотирьох. Крім того – більш компактно розташовані струми на Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 та Γ_4 для двох електродів.

На дні ємності спостерігаємо практично однаковий розподіл потенціалів та струмів для дво- та чотириелектродної систем. З рис. 2.37 та 2.39 видно, що значення потенціалів зменшується уздовж осі x , при цьому різниця між максимальним і мінімальним значеннями потенціалів складає $\approx 0,9 \cdot 10^{-4}$ В. Розподіл струмів згідно з рис. 2.42, 2.44 симетричний відносно середини ємності.

На поверхні розподіл потенціалів симетричний відносно середини ємності. Максимальне і мінімальне значення потенціалів відповідають місцям підведення електродів, при цьому для двоелектродної системи максимальне значення більше на $\approx 8 \cdot 10^{-4}$ В, а мінімальне менше на $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ В. Для чотириелектродної системи, як і на границях Γ_3 та Γ_4 , розподіл струмів на поверхні аналогічний, максимальні значення струмів при двох електродах практично у 2 рази більші, аніж при чотирьох.

Різниця у розподілі характеристик електричного поля на всіх відповідних площинах для двох та чотирьох електродів, які заглиблено практично біля поверхні розплаву, визначаються двома обставинами у постановці задачі. Для

чотирьох електродів утворюються два канали провідності. У цьому варіанті струми формуються за умов обопільного впливу відповідних сусідніх електромагнітних полів. Крім того, чотири електроди розташовано на 50% ближче до граней Γ_3 та Γ_4 аніж два електроди. Це, звісно ж, також впливає на топологію полів, що досліджувались.

Ці дві умови потребують більш ретельного дослідження. Наприклад, якщо обробка відбувається одночасно різними типами струмів (постійний, змінний та імпульсний). Крім того, електроди можуть бути з ізолюваною бічною поверхнею та різнозаглибленими [12, 16].

Хоча отримані у даній роботі результати щодо ГУ є логічними з фізичної точки зору, але що стосується валідації та верифікації отриманих результатів, то для цього потрібно ГУ визначити різними методами.

Таким чином, використання методу М-К дає змогу, по-перше, з задовільною точністю оцінювати розподіл, як мінімум, базового електромагнітного поля у розплаві при його обробці електричними струмами при значно менших витратах часу, по-друге, визначати розподіл характеристик електромагнітного поля на стінках ємності з розплавом, що може бути використано у подальшому моделюванні методом МСЕ.

На рис. 2.45, рис. 2.46 наведено, для прикладу, у 3D варіанті напруженості електричного поля в металевому розплаві для дво- та чотириелектродної систем, які розраховано за формулою 2.4 (для постійного струму). Розрахунки виконано для варіанта рис. 2.26, електроди заглиблено у розплав на 2 мм.

Як бачимо, отримані результати показують суттєву різницю амплітудних значень напруженості електричного поля на поверхні, в середині ємності та на її дні. При цьому, вперше у розрахунковій практиці показано, що біля електродів спостерігається суттєве збільшення амплітудного значення напруженості електричного поля. Таким чином, можна висунути гіпотезу про те, що саме в районі електродів термосилове навантаження РМС буде найсильнішим. За

рахунок течій рідкого металу за час обробки відбувається перемішування зон розплаву, які відрізняються інтенсивністю навантаження. Як наслідок, весь об'єм РМС буде перебувати під термосиловим впливом достатньої інтенсивності.

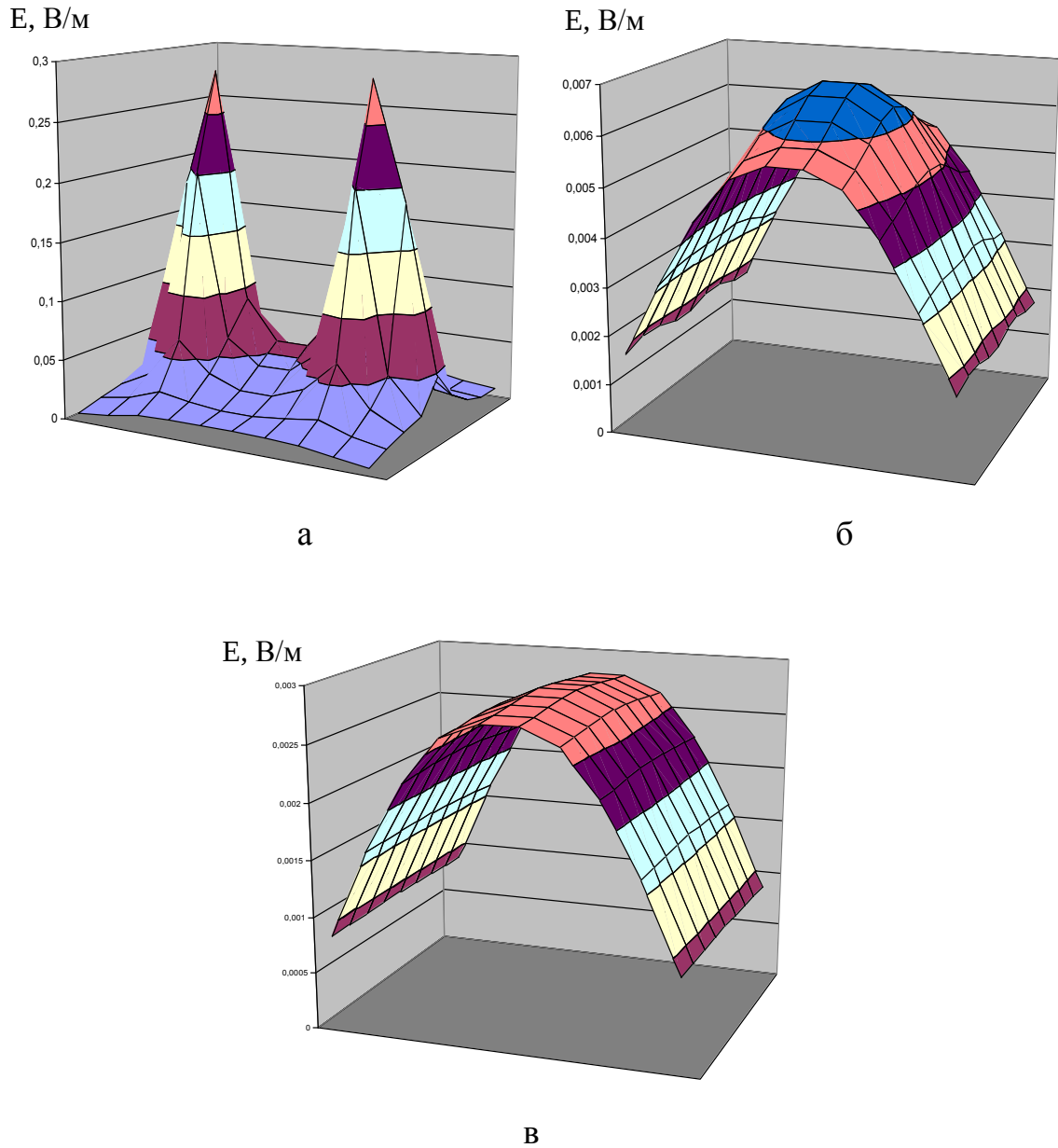
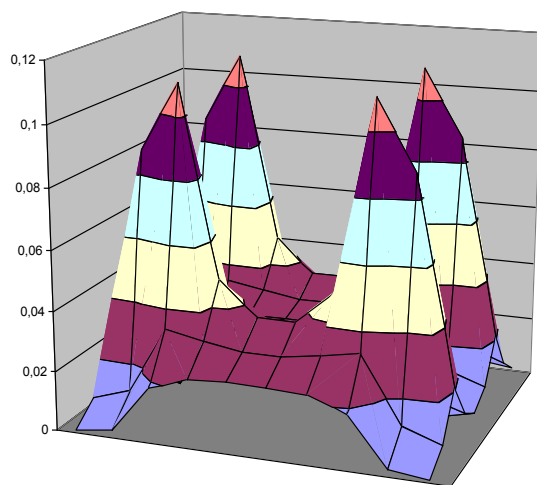


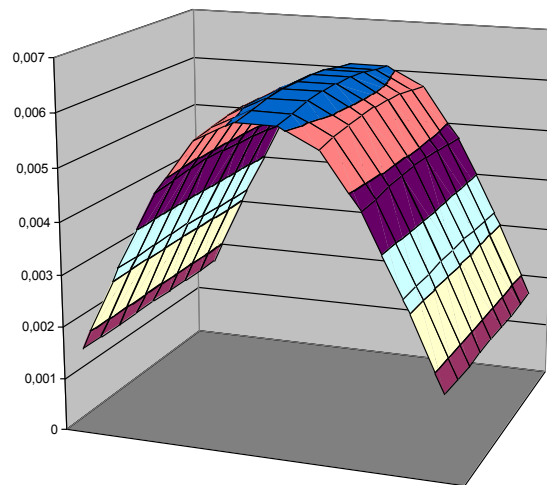
Рисунок 2.45 – Напруженість електричного поля у розплаві при використанні двоелектродної системи: а – на поверхні, б – в середині ємності, в – на дні ємності

E, В/м



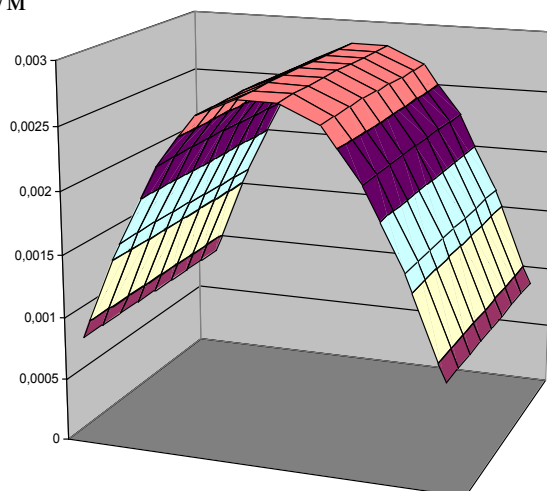
а

E, В/м



б

E, В/м



в

Рисунок 2.46 – Напруженість електричного поля у розплаві при використанні чотириелектродної системи: а – на поверхні, б – в середині ємності, в – на дні ємності

2.4 Фізичне моделювання електричного поля у металевому провіднику

Для верифікації результатів моделювання за допомогою М-К було проведено фізичне моделювання електричного поля у металевому провіднику на плоскій та об'ємній моделях. У якості плоскої моделі обрано металеву пластину (латунь) розмірами 270х325х1 мм, на якій на рівній відстані одна від одної уздовж осей x та y наносились точки для вимірювань. Всього обрано 3 варіанти, а саме: 5х5 точок, 10х10 та 20х20 (рис. 2.47) У даному розбитті точки відповідають вузлам комірок. Моделювалась обробка електричним струмом з використанням дво- та чотириелектродних систем. Електричний постійний струм амплітудою 20 А (для двоелектродної системи) та по 10 А для кожної електродної системи (для чотирьохелектродної системи) підводився до пластини відповідно рис. 2.48. Вимірювання проводились по 5 разів у кожній точці за допомогою вольтметра В7-22А та цифрового мультиметра Picotest M3500A і розраховувалось середнє значення для кожної точки та відповідна похибка.

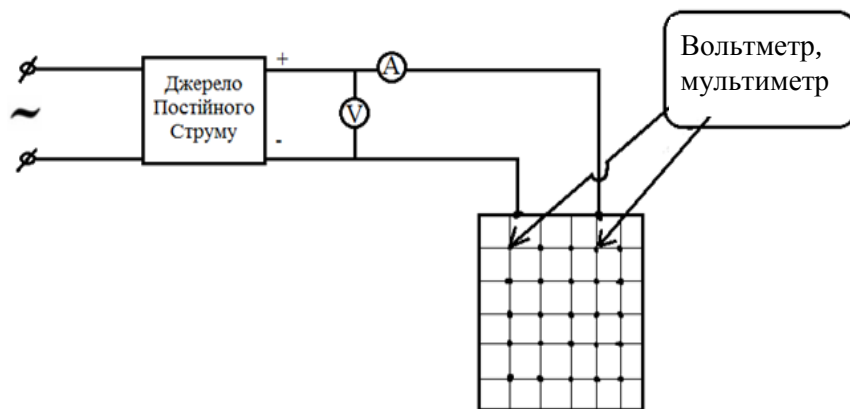


Рисунок 2.47 – Схема фізичного моделювання

На рис. 2.49 наведено відносні значення розподілу потенціалів у пластині між електродами 1 і 2 уздовж осі x для чотирьохелектродної системи у безрозмірному вигляді для 5, 10 та 20 точок.

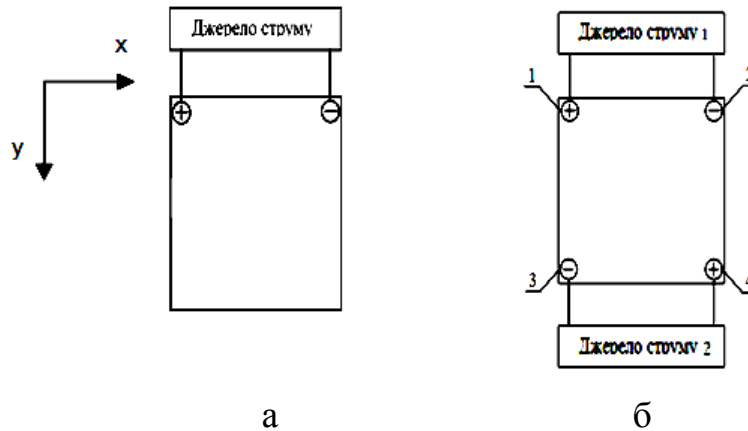


Рисунок 2.48 – Варіанти підключення електродних систем, які використовувались при моделюванні: а – двоелектродна система, б – чотириелектродна система.

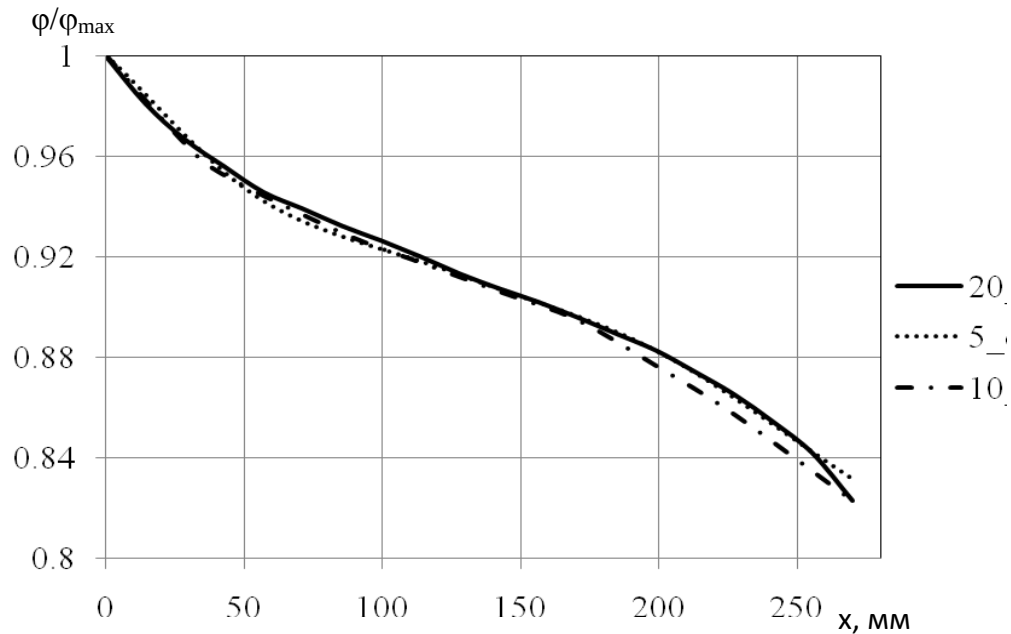


Рисунок 2.49 – Відносні значення розподілу потенціалів у пластині між електродами 1 і 2 уздовж осі x для чотирьохелектродної системи

Як бачимо, кількість точок не суттєво вплинула на результати вимірювань. Це можна пояснити тим, що криві розподілу потенціалів мають гладку форму. Тому можна припустити, що для математичного моделювання методом М-К не потрібно обирати велику кількість комірок. Але, якщо попередні результати показують наявність перегинів кривих, наприклад рис. 2.33 – 2.36, рис. 2.41 – 2.43, то в цих областях (локально) логічно кількість комірок збільшити.

На рис. 2.50 та рис. 2.51 наведено розподіл потенціалів у пластині для двох- та чотирьохелектродної систем відповідно, де ряд 1 відповідає значенням між електродами 1 та 2, ряд 2 – значенням у пластині, що нижче на величину Δy (відстань між точками вимірювань уздовж осі y), ряд 3 – нижче на $2\Delta y$ і т. д.

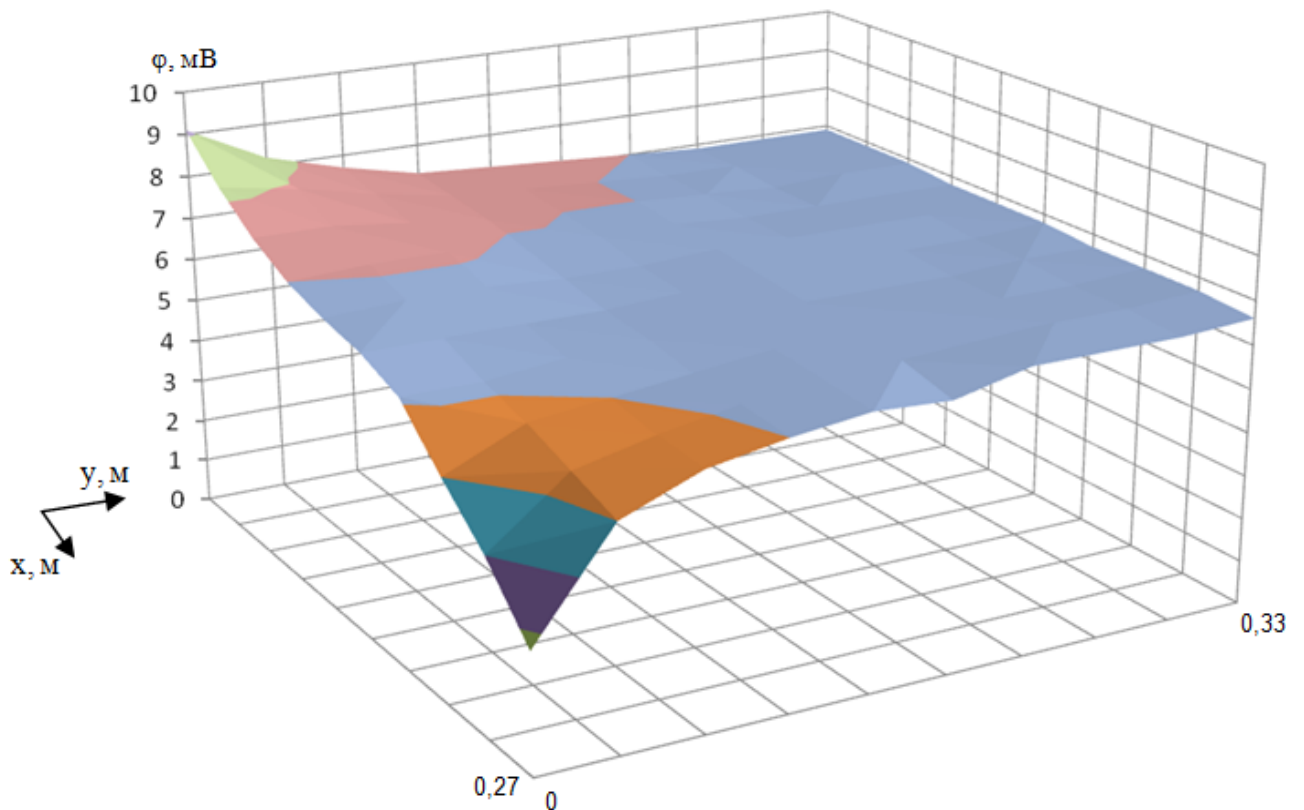


Рисунок 2.50 – Розподіл потенціалів у пластині для двохелектродної системи

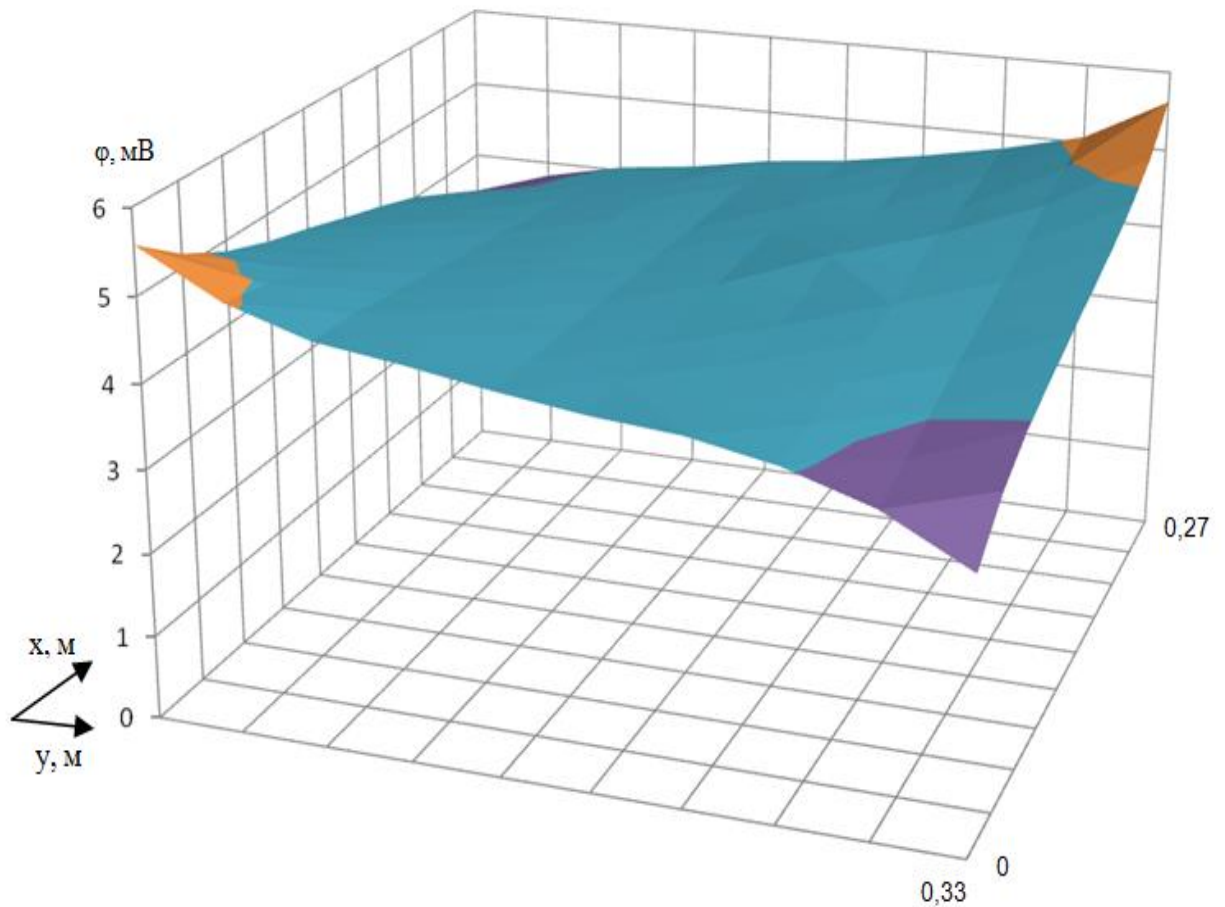


Рисунок 2.51 – Розподіл потенціалів у пластині для чотириелектродної системи

З рис 2.50, 2.51 видно рівномірний розподіл потенціалів електричного поля у площині пластини для двоелектродної системи, локальний максимум, що відповідає місцю підключення позитивного електрода, та локальний мінімум у місці підключення негативного електрода. Для чотирьохелектродної системи розподіл потенціалів у площині пластини симетричний з наявністю двох максимумів та двох мінімумів, що відповідають місцям підведення електродів.

На рис. 2.52 для порівняння наведено розподіл потенціалів у пластині між електродами 1 і 2 уздовж осі x для чотирьохелектродної системи, що отримано методом М-К (φ_{x1}) для 400 комірок (20×20) та при фізичному моделюванні (φ_{exp}). Різниця між значеннями не перевищувала 6%. Відносна похибка вимірювань не перевищила 3%.

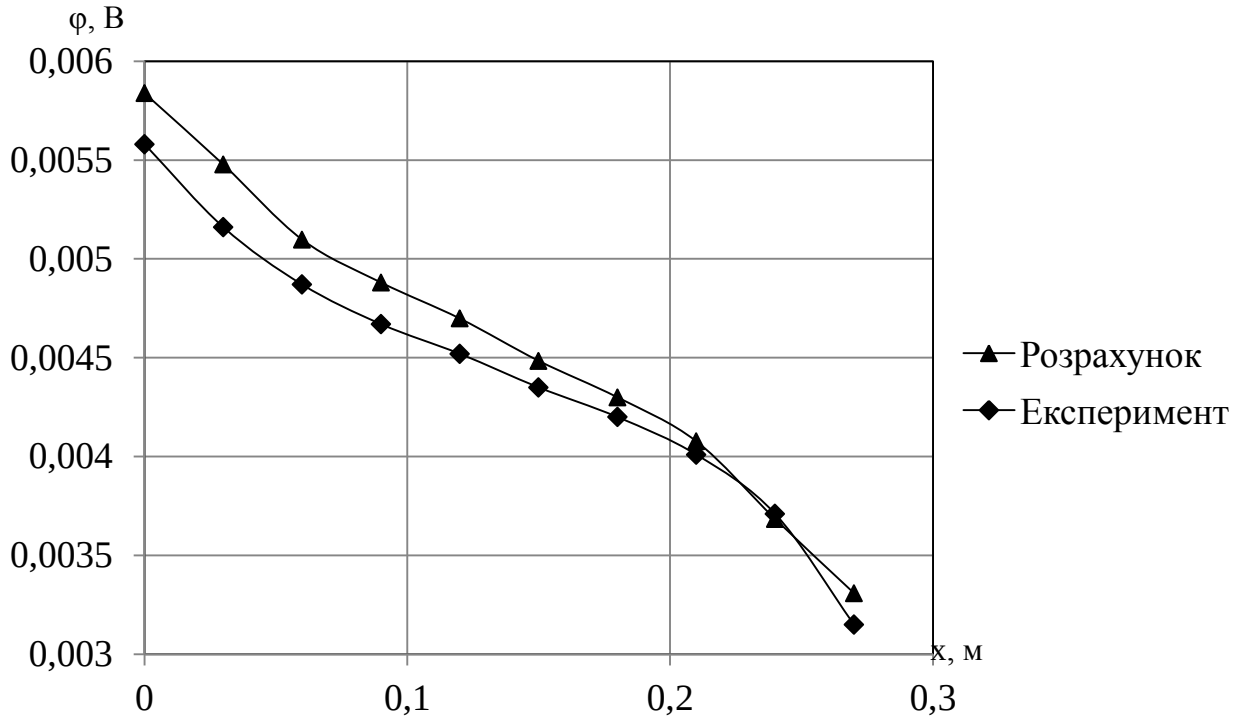


Рисунок 2.52 – Розподіл потенціалів у пластині між електродами 1 і 2 уздовж осі x для чотирьохелектродної системи, що отримано методом М-К (φ_{exp}) та при фізичному моделюванні (φ_{x1})

Об'ємною моделлю виступав алюмінієвий циліндр діаметром 82 мм та висотою 200 мм. Для цього було виготовлено його паперову розгортку, на якій розмічена сітка розбиття з вузлами для вимірювань. Основа циліндра поділена на 5 кіл з кроком Δr , а кожне коло розділено на 16 рівних частин. На бічній поверхні по 16 точок уздовж кола з кроком Δh (160 точок). Далі папір наклеювався на металевий циліндр, точки для вимірювань зачищались. Для моделювання джерела струму підключались до верхньої поверхні циліндра. У місцях підведення електродів було просвердлено отвори діаметром 3 мм, завглибшки 10 мм та нарізана різьба. Джерела струмів підключались у цих місцях болтовим з'єднанням. Було обрано наступні режими:

- а) обробка розплаву за допомогою двоелектродної системи;
- б) обробка розплаву за допомогою триелектродної системи;

в) обробка розплаву за допомогою чотириелектродної системи.



а



б

Рисунок 2.53 – Алюмінієвий циліндр з розміткою, що виступав як об'ємна модель: а – вид збоку, б – вид згори.

На рис. 2.54 – 2.56 показано отримані розподіли потенціалів для розгортки циліндричної моделі. Характер розподілу потенціалу демонструє наявність одного чітко вираженого локального максимуму поблизу позитивного електрода та одного локального мінімуму – в області негативного електрода. Поза цими областями потенціал зменшується досить плавно, формуючи широку область з невеликим градієнтом, що відповідає слабкій зміні потенціалу на віддаленні від точок підведення електродів. Це свідчить про відносно локалізоване збурення електричного поля поблизу електродів за збереження загального градієнта між джерелом і стоком. Для трьохелектродної системи розподіл потенціалу в даному випадку симетричний і характеризується наявністю двох локальних максимумів у областях підключення позитивних електродів та одного локального мінімуму – в області підведення негативного (рис 2.55). Максимальні значення потенціалів істотно нижчі, у порівнянні з двоелектродною системою. Такий розподіл струму призводить до зниження

щільності струму в кожній точці введення і, як наслідок, до зменшення локального збурення електричного поля.

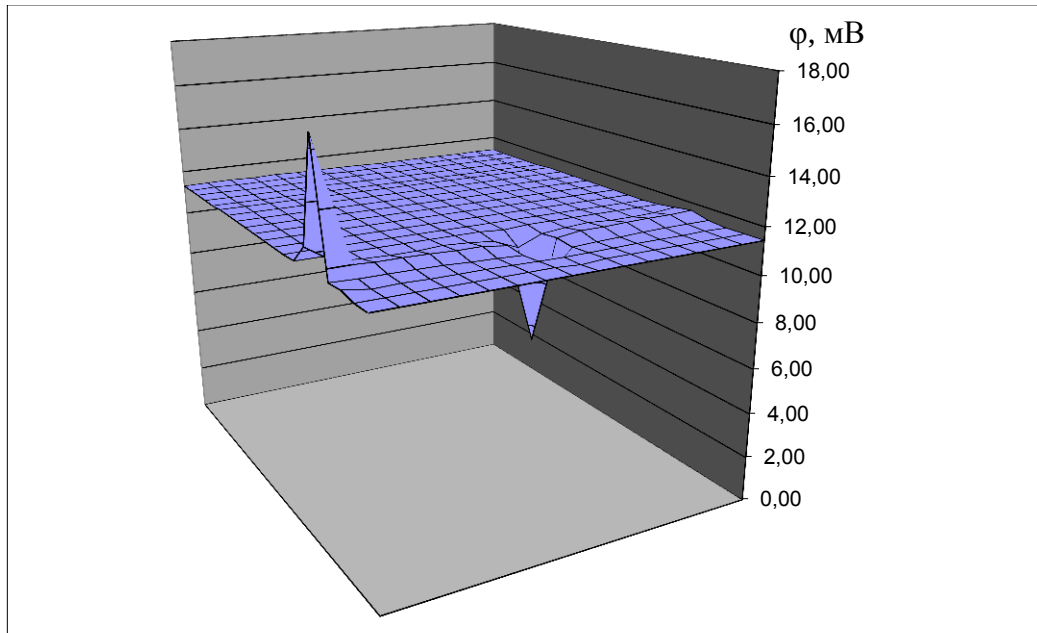


Рисунок 2.54 – Розподіл потенціалів на поверхні об’ємної моделі у випадку застосування двоелектродної системи

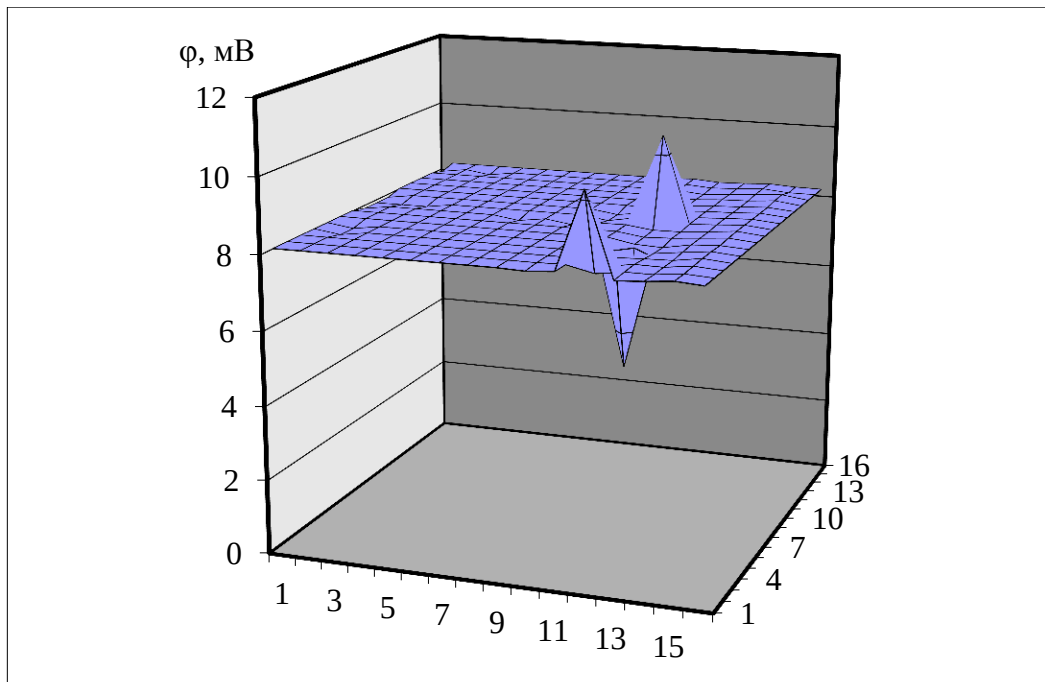


Рисунок 2.55 – Розподіл потенціалів на поверхні об’ємної моделі у випадку застосування трьохелектродної системи

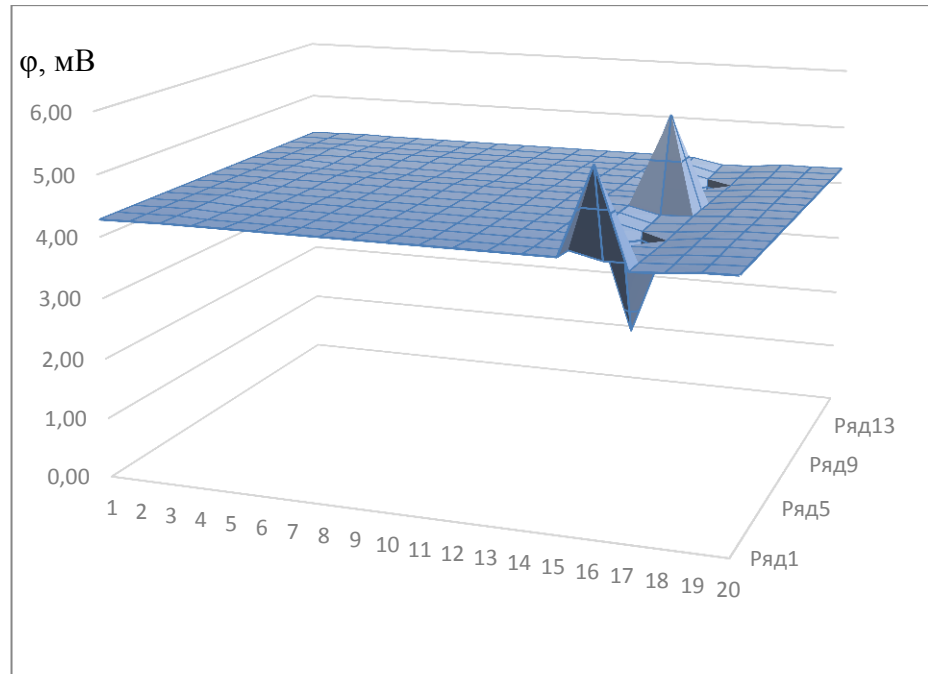


Рисунок 2.56 – Розподіл потенціалів на поверхні об’ємної моделі у випадку застосування чотириелектродної системи

При застосуванні чотириелектродної системи розподіл потенціалів більш симетричний і згладжений (рис. 2.56). Спостерігаються два локальних максимуми та два локальних мінімуми у місцях підведення електродів. Максимальні значення потенціалів значно менші у порівнянні з двох- та трьох електродною системами, що пов'язано з більш рівномірним розподілом струму. За межами локальних збурень розподіл потенціалів практично однорідний, що свідчить про зниження градієнтів електричного поля.

Результати, отримані за допомогою фізичного моделювання, добре узгоджуються з результатами моделювання методом М-К (рис 2.52), що підтверджує можливість його використання у першу чергу для попереднього визначення ГУ при застосуванні, наприклад МСЕ, а також для моделювання розподілу електромагнітних полів у об’ємі розплаву при його обробці електричним струмом.

2.5 Методологічні засади математичного моделювання процесів у електротехнічних пристроях

Положення даного підрозділу роботи показують принципи застосування комплексу різних методів для математичного моделювання явищ і процесів у матеріалах при їх обробці енергетичними методами, у тому числі при КЕСО. Як відомо, універсального методу не існує тому, що кожен з них має свої обмеження при постановці задач та розрахункових процедурах. Розглянемо такі відомі методи, як МСЕ, МСР, МІР і, звісно ж додамо сюди М-К, положення якого у даній роботі адаптовано, певним чином, для КЕСО. Викладені у цьому підрозділі положення методологічних засад можуть бути певним чином застосовані для будь-яких електротехнічних пристроїв, що їх орієнтовано для обробки матеріалів.

Щодо КЕСО, то накопичений науково-обґрунтований фактаж із застосуванням методів математичного моделювання надає змогу певним чином дослідити топологію всіх фізичних полів та їх характеристики. Але при цьому поки що обрано певним чином спрощені варіанти постановки задач, а також проаналізовано найбільш прості варіанти системи “типи струму – типи електродних систем”. Однак при моделюванні полів при несиметричному розташуванні електродів, особливо при 3D формалізації, а також при обробці неоднорідних матеріалів виникають розрахункові труднощі. Крім того, на теперішній час не висвітлено ситуації щодо формування та енергетичного регулювання в об’єкті обробки неоднорідного розподілу електричного та магнітного полів та термосилового впливу за рахунок змінення під час обробки характеристик струмів. Крім того, цікавим є для аналізу застосування електродів, бічна поверхня яких ізолювана фрагментами. Але, найважливішою проблемою математичного моделювання є врахування взаємообумовленості фізичних полів, яка є важливою ознакою мультифізичності задач [43]. До цього

слід додати, що термосиловий вплив на об'єкт обробки є суттєво нелінійним, як і нелінійною є його реакція на таке навантаження. Ну і, зрештою, поки що абсолютно відсутні наукові дані щодо впливу характеристик енергетичного навантаження при КЕСО на термодинамічні характеристики РМС.

Звісно ж, цей перелік не є кінцевим, але він вказує на деякі орієнтири стосовно найближчих досліджень.

2.5.1. Застосування гібридних методів математичного моделювання для дослідження процесів при КЕСО. В роботі розвинуто наукові основи М-К, який адаптовано певним чином до особливостей КЕСО та застосовано, перш за все, тільки для аналізу розподілу та характеристик у розплаві базових електричного та магнітного полів. Але його принципи дозволяють аналізувати розподіл і характеристики вторинних полів. Його основною перевагою перед МСЕ та МІР є те, що він дозволяє проводити експрес-аналіз досліджуваних явищ та процесів та визначати оригінальні граничні (ГУ) та початкові (ПУ) умови, які, як свідчать результати використання МСЕ та МІР, визначались інтуїтивно [16, 63].

Крім того, застосовуючи МСЕ та МІР при дослідженнях аналізувались різні варіанти елементів системи “типи електродних систем – типи струмів”. Це потребувало значного розрахункового часу. Але, якщо застосовувати гібридний принцип, за яким попередньо за допомогою М-К виконати експрес-аналіз ситуацій, що досліджуються, та визначити оригінальні ГУ та ПУ, то для багатоваріантних задач можливо свідомо перейти до розв’язування таких, які показують попередньо найбільш ефективні принципи обробки. На рис. 2.57 показано процедуру застосування гібридного методу математичного моделювання процесів при енергетичній обробці матеріалів.

Розглянемо приклади застосування гібридного М-К та МІР. МІР показав себе, як достатньо ефективний інструмент для досліджень деяких аспектів

КЕСО [62]. Його основна перевага полягає у розрахунковій інтенсивності. Але і для нього виникають попередні проблеми визначення ГУ та ПУ. Якщо застосовувати попередньо М-К, то цієї проблеми можна уникнути і далі переходити до методів моментів або вторинних джерел [64, 65]. Метод моментів передбачає апроксимацію розв'язування за допомогою розкладання в ряд (наприклад через ортогональні функції), щоб побудувати системи лінійних рівнянь. Їх розв'язок надає розподіл електричних та магнітних полів. Метод вторинних джерел дозволяє аналізувати складні конфігурації полів, а використовуючи принцип суперпозиції можна вираховувати сумарне поле, що утворюється додаванням від вторинних джерел.

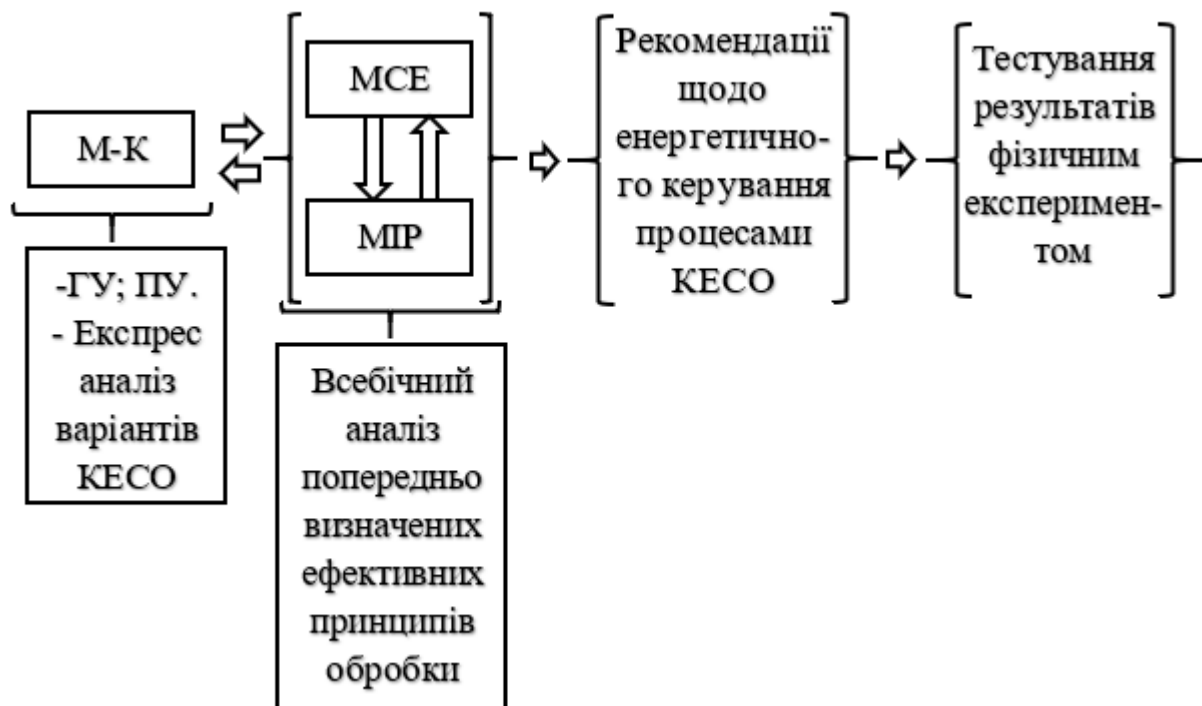


Рисунок 2.57 – Принципове відображення етапів досліджень із застосуванням гібридного методу математичного моделювання

Викладений у цьому підрозділі матеріал тільки вказує на принципи побудови алгоритмів при використанні гібридних методів математичного моделювання процесів і явищ у електротехнічних технологічних пристроях, що

відбуваються при енергетичній обробці. Безумовно, їх реалізація потребує відповідних досліджень. Але при цьому було показано, що М-К має більш широкі багатоваріантні перспективи застосування, аніж тільки для автономного розв'язування задач енергетичної обробки матеріалів.

2.5.2 Застосування М-К та МСЕ для моделювання електромагнітного поля у розплаві. Як було зазначено раніше у цьому розділі, застосування М-К дозволяє визначати розподіли струмів і потенціалів на границях ємності з розплавом при його кондукційній електрострумовій обробці. У цьому пункті розглянуто можливий варіант сумісного застосування М-К та МСЕ.

Розглянемо циліндричну ємність (рис. 2.58) з розплавом висотою (H), діаметром (D), з зануреними в розплав і паралельно розташованими електродами 1 і 2. Відстань від осі симетрії ємності з розплавом до центрів електродів ($L_e/2$). Як об'єкт впливу розглядався найбільш поширений в ливарному виробництві сплав А356 в рідкому стані, матеріал електродів – титан.

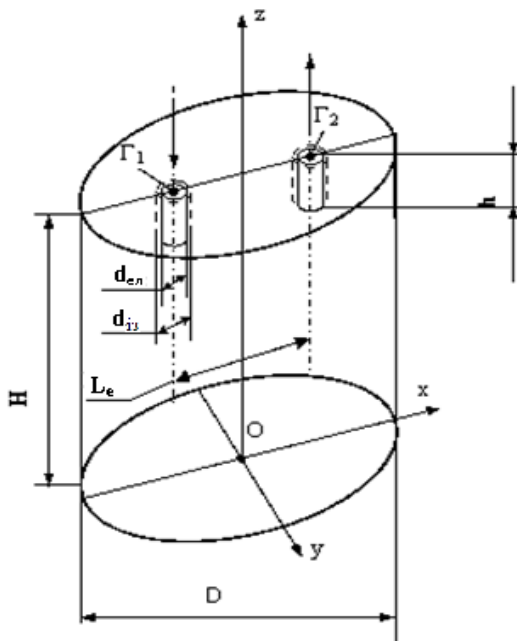


Рисунок 2.58 – Геометрична модель задачі

Електроди діаметром ($d_{ел}$) занурені в розплав на глибину (h). Бічна поверхня електродів може бути електроізолюваною з зовнішнім діаметром ізоляції ($d_{із}$). Не знижуючи загальності задачі, виконаємо розрахунки при наступних геометричних параметрах: $H = 100$ мм; $D = 100$ мм; $L/2 = 25$ мм; $d_{ел} = 5$ мм; $d_{із} = 6$ мм. Величина h варіювалася від 10 до 90 мм для кожного електрода. Різниця потенціалів підводиться до перетинів Г1 і Г2, тобто через них проходить струм в напрямку від Г1 до Г2.

Для моделювання із застосуванням М-К циліндрична ємність з розплавом апроксимується кубічними комірками. Такий підхід дещо зменшує точність моделювання, проте значно спрощує його реалізацію. Це пов'язано з тим, що при розбитті циліндричної форми на сегменти, навіть для ізотропного середовища, з кожним кроком уздовж радіуса їх розміри будуть змінюватись, а отже змінюються й параметри електричних кіл, які потім заміщують такі комірки. Таким чином дещо ускладнюється розрахунок резистивних елементів схем заміщення і значно ускладнюється визначення еквівалентних індуктивних елементів, якщо вони застосовуються. Саме з цим і пов'язано рішення використовувати апроксимацію прямокутними (кубічними) комірками.

Для наочності, на рис. 2.59 наведено таку апроксимацію для розбиття на діаметрі циліндру на 10 комірок. Цей приклад не використовувався для розрахунків, оскільки він дає надто грубе наближення.

При моделюванні застосовувались розбиття із значно більшою кількістю комірок. На рис 2.60 для прикладу наведено теплову карту розподілу потенціалів на поверхні розплаву при пропусканні електричного струму. Отримані з такої моделі значення потенціалів та струмів далі застосовуються як граничні умови для МСЕ.

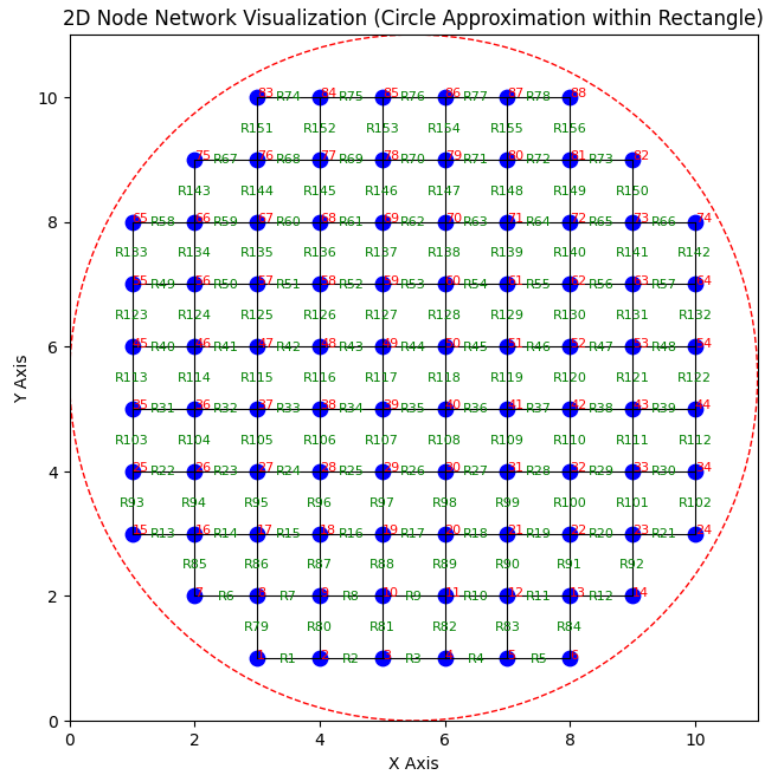


Рисунок. 2.59 – Вид згори апроксимованого прямокутними комірками циліндра

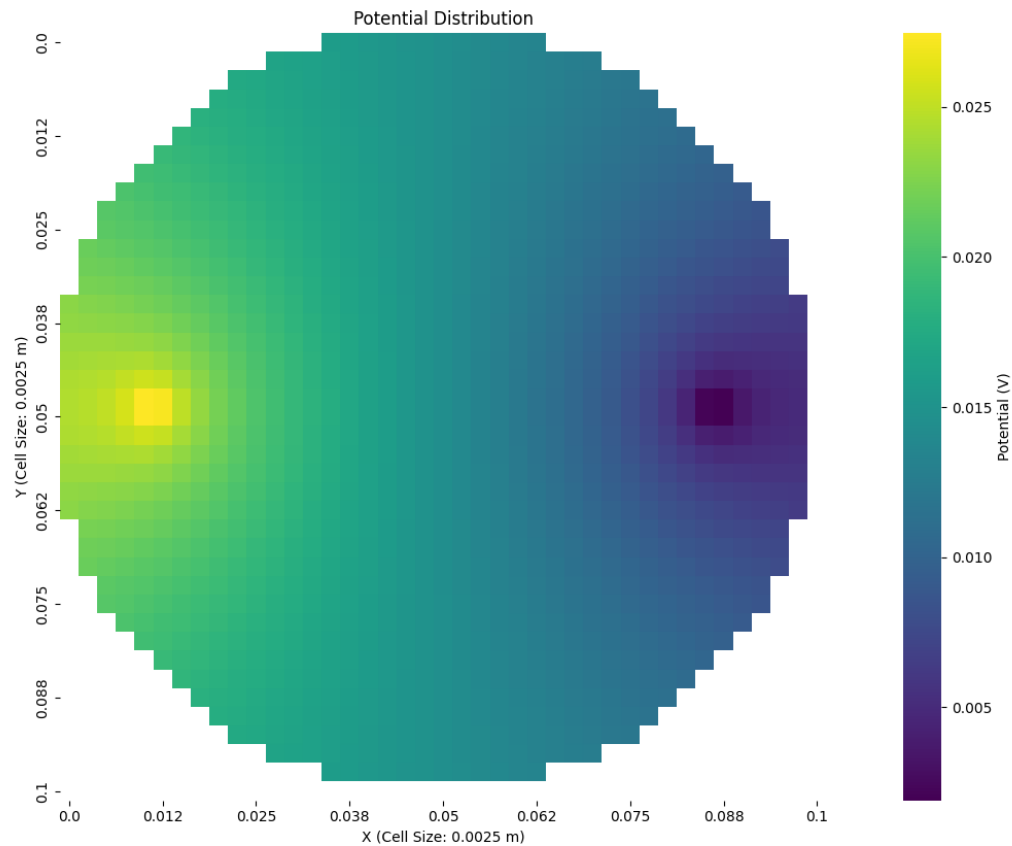


Рисунок 2.60 – Теплова карта розподілу потенціалів на поверхні розплаву

Моделювання електромагнітних полів із застосуванням методу скінченних елементів проводилося шляхом розв'язання системи рівнянь Максвелла для квазістаціонарного випадку [1, 16].

У загальному випадку для квазістаціонарного електромагнітного поля система рівнянь записується в такий спосіб:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J = \sigma (E + v \times B) + J^e; \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \nabla \cdot B = 0; \\ \nabla \cdot J = 0, \end{cases} \quad (2.22)$$

де ∇ – оператор набла; H – напруженість магнітного поля у розплаві, А/м; J – густина струму, А/м²; σ – питома електрична провідність, См/м; E – напруженість електричного поля у розплаві, В/м; v – швидкість розплаву, м/с; B – індукція магнітного поля у розплаві, Тл; J_e – густина наведених струмів, А/м².

Виникаюча при цьому об'ємна електромагнітна сила визначається з виразу:

$$\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2.23)$$

Граничні та початкові умови для електромагнітної задачі:

1. Вхід струму (верхній перетин електрода Г1) – величина електричного потенціалу, який визначався за допомогою М-К.

2. Вихід струму (верхній перетин іншого електрода Г2) – величина електричного потенціалу, який визначався за допомогою методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки.

3. Струмова ізоляція (бічна поверхня обох електродів – стінки ємності з розплавом та верхня поверхня розплаву), нульовий градієнт густини електричного струму нормалі до стінки.

4. Магнітна ізоляція (зовнішній шар повітря) – густина магнітного потоку дорівнює нулю.

На рис. 2.61 наведено приклади розподілу магнітного (кольорова гама) та електричного (лінії) полів.

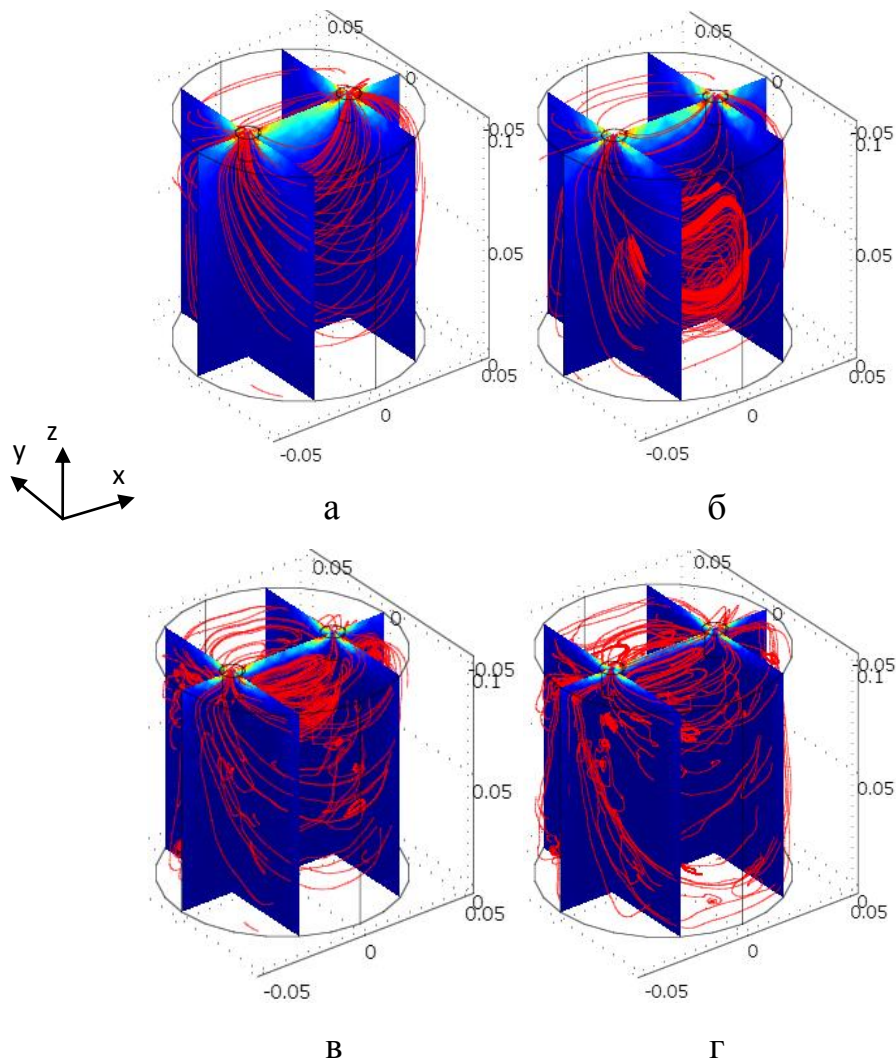


Рисунок 2.61 – Розподіл електричного та магнітного поля в при використанні неізованими бічними поверхнями при різних частотах струму (кольорова гама – магнітне поле, лінії – електричне поле): а – постійний струм; б – частота струму 500 Гц; в – частота струму 5000 Гц; г – частота струму 25000 Гц.

Розрахунки виконано відповідно для постійного струму і синусоїдального струму частотою 500 Гц, 5000 Гц, 25000 Гц при використанні електродів з неізованою бічною поверхнею, заглибленими на 10 мм. На графіку (рис 2.62) зображені залежності відносних максимальних значень електричного поля (E^*),

магнітного поля (H^*) та об'ємної електромагнітної сили (F_{em}^*) від частоти струму.

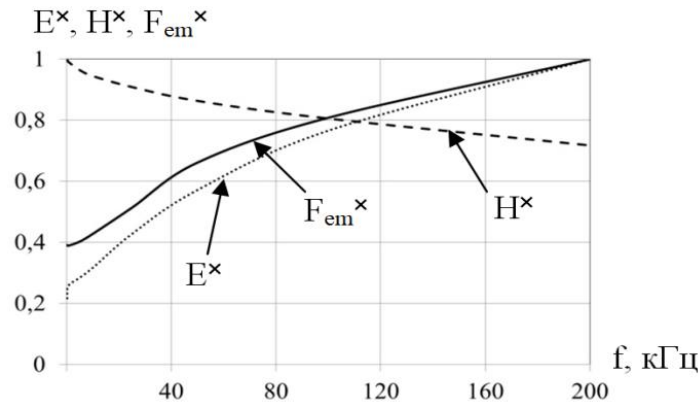


Рисунок 2.62 – Залежності відносних максимальних значень електричного поля (E^*), магнітного поля (H^*) та об'ємної електромагнітної сили (F_{em}^*) від частоти струму

З наведених на рис. 2.61 (а – г) картин поля можна побачити, що частота струму суттєво змінює розподіл, а виходячи з цього, сам процес формування електромагнітних полів у розплаві. На рис. 2.61 (б) добре видно вторинні (індуковані) електричні поля в об'ємі розплаву, які формуються при частотному навантаженні. Але після приблизно 25 кГц первинні та вторинні поля концентруються переважно поблизу поверхні розплаву та біля електродів. Це призводить до певного зменшення амплітуди магнітного поля, тому що зменшується обсяг поверхні, яку пронизує потік магнітного поля, але це компенсується підвищенням значень густини струму та, як результат, все ж таки підвищенням значень об'ємної електромагнітної сили. Найбільша ступінь зростання від початкового значення при постійному струмі об'ємної електромагнітної сили (рис. 2.62) спостерігається до частоти 100 кГц, більш ніж у два рази. Далі при підвищенні частоти майже до 200 кГц хід кривої, тобто зростання, суттєво уповільнюється. Тобто ми цілком логічно маємо очікувати

певного "насичення". Тому перевищувати частоту струму вище 125 кГц за для цілей КЕСО в цьому випадку не є раціональним.

Щоб уникнути розтікання струму з поверхні електродів, розширити сферу впливу струму, підвищити концентрацію електромагнітного поля та, відповідно, термосилових впливів на рідкометалеву систему, є спосіб, який полягає у електричній ізоляції бокових поверхонь електродів [1, 16]. Продемонструємо, як цей підхід дає змогу без додаткових енерговитрат вирішити ті проблемні питання, які озвучені вище. На рис. 2.63 та 2.64 наведено розподіл і числові характеристики електромагнітного поля.

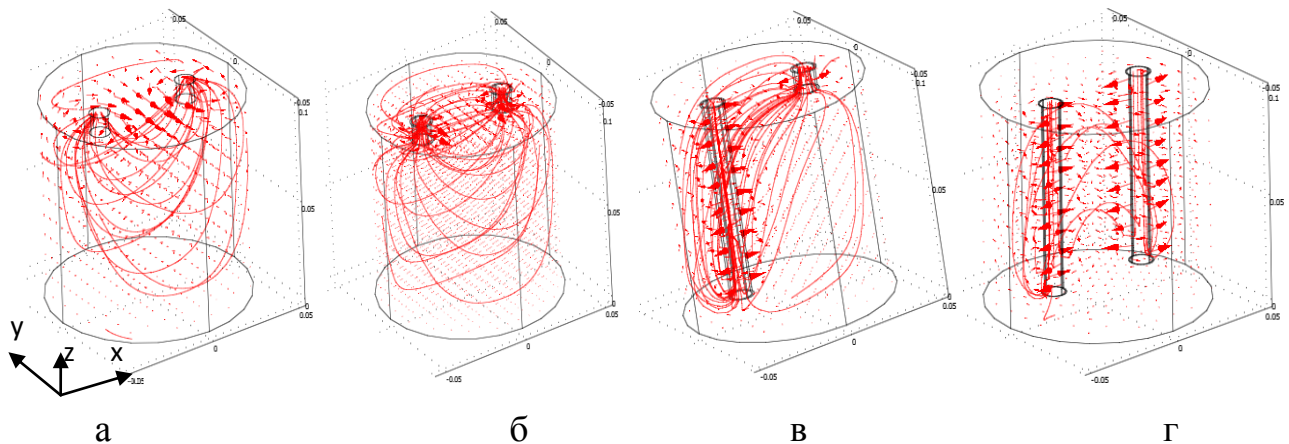


Рисунок 2.63 – Розподіл електричного та магнітного полів при використанні електродних систем різних типів при частоті струму 50 Гц (стрілки – магнітне поле, лінії – електричне поле): а – система з неізольованими електродами, заглибленими на 10 мм; б – система з ізольованими електродами, заглибленими на 90 мм; в – система з різно заглибленими ізольованими електродами (10 мм та 90 мм); г – система з рівнозаглибленими ізольованими електродами, заглибленими на 90 мм

З наведених на рис. 2.63, 2.64 даних можна побачити, що за рахунок застосування ізольованої бічної поверхні вдалося підвищити значення амплітудних характеристик електричного, магнітного та силового поля на 10..25%. Найбільш доцільною щодо використання для КЕСО є електродна

система з електродами, які заглиблено на різну глибину (рис. 2.63 в, 2.64 в). Завдяки такому розташуванню електродів утворюється найбільш нерівномірний асиметричний розподіл електромагнітного поля, що згідно з [7], повинно призводити до більш активної дії на розплав.

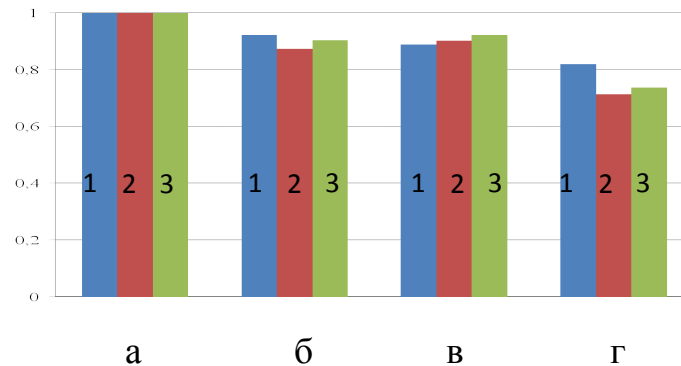


Рисунок 2.64 – Максимальні відносні значення електричного поля 1, магнітного поля 2 та об'ємної електромагнітної сили 3 для різних типів електродних систем (частота струму 50 Гц): а – система з ізолюваними електродами, заглибленими на 10 мм; б – система з ізолюваними електродами, заглибленими на 90 мм; в – система з різнозаглибленими ізолюваними електродами (10 мм та 90 мм); г – система з неізолюваними електродами, заглибленими на 10 мм.

Проаналізуємо, як поводить себе електродна система з різнозаглибленими електродами з ізолюваною боковою поверхнею при частотному навантаженні. Результати моделювання наведені на рис. 2.65.

З результатів моделювання (рис. 2.65) можна побачити якісне та кількісне зміння характеристик E^* , H^* та F_{em}^* від частоти струму. Ізоляція бокових поверхонь електродів дає змогу уникнути зменшення амплітуди магнітного поля за рахунок створення зон локального підвищення значень електричного та магнітного полів. Як результат, маємо практично лінійну криву F_{em}^* після частоти струму 25 кГц, підвищення амплітудних значень електромагнітної сили приблизно на 30% в порівнянні з постійним струмом або струмом промислової частоти (50 Гц).

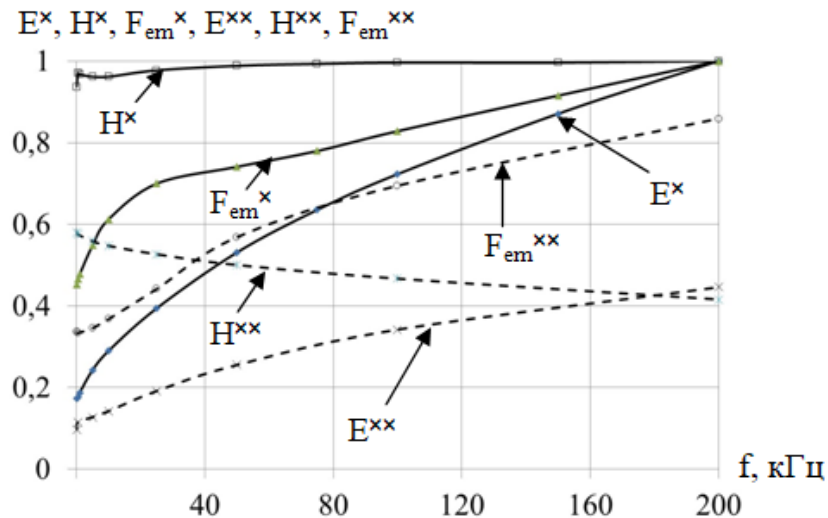


Рисунок 2.65 – Залежності відносних максимальних значень електричного поля (E^*), магнітного поля (H^*) та об'ємної електромагнітної сили (F_{em}^*) від частоти струму при використанні електродної системи з різнозаглибленими електродами з ізолюованою бічною поверхнею та з неізолюованою бічною поверхнею (E^{**}), (H^{**}) (F_{em}^{**}) відповідно.

1. Представлено варіант успішної реалізації сумісного застосування методів М-К та МСЕ для моделювання електромагнітних полів у розплаві при його кондукційній електрострумовій обробці.

2. Методами чисельного моделювання в 3D постановці було встановлено особливості розподілу електричного та магнітного полів, а також характеристик силового впливу в об'ємі розплаву ливарного доевтектичного силуміну при проходженні крізь нього синусоїдального струму різної частоти з використанням паралельних електродів різних типів.

3. Встановлено, що при підвищенні частоти струму за умов використання електродів з неізолюованою бічною поверхнею відбувається зменшення амплітуди магнітного поля більш ніж на 25%, але відповідне підвищення значень електричного поля все ж таки дає приріст амплітудних значень об'ємної електромагнітної сили. При підвищенні частоти майже до 200 кГц хід кривої,

тобто зростання, суттєво уповільнюється. Тому доцільний для КЕСО діапазон частот у цьому випадку до 125 кГц.

4. Доведено, що використання електродів з ізолюваною боковою поверхнею дає змогу варіювати просторовим розподілом електромагнітного поля, а значить і інших фізичних полів, що генеруються при КЕСО. А також підвищити їх амплітудні значення, не змінюючи частоти та амплітуди струму. Так, при частоті струму 50 Гц вдалося підвищити значення амплітудних характеристик електричного, магнітного та силового поля на 10..25%.

5. Встановлено, що при використанні електродної системи з різнозаглибленими електродами з ізолюваною бічною поверхнею маємо практично лінійну криву максимальних відносних значень амплітуди об'ємної електромагнітної сили після частоти струму 25 кГц, а також підвищення амплітудних значень характеристик електричного, магнітного та силового полів більш ніж на 30% в порівнянні з постійним струмом, або струмом промислової частоти (50 Гц).

Висновки до розділу 2

1. Адаптований до особливостей КЕСО М-К дозволяє з достатньою точністю і при значно менших витратах часу визначати розподіл базового електромагнітного поля у металевому розплаві при його обробці електричним струмом. Забезпечуючи валідацію та верифікацію результатів, у комплексі, наприклад з МСЕ, М-К може суттєво вплинути на розширення наукового доробку щодо термосилової дії на розплав. Його функціональні можливості дозволяють аналізувати розподіл характеристик електромагнітного поля у форматах як 2D, так і 3D. Перший у тестових числових експериментах дає змогу визначати можливі сценарії у розподілі електричних характеристик поля

в металевому розплаві. Другий має суттєві переваги при більш точному відтворенні характеристик поля в об'ємі розплаву.

2. Запропоновано для коректного визначення граничних умов при дослідженні розподілу базового електричного поля в рідкометалевому середовищі при проходженні через нього електричного струму використовувати М-К. Показано, що розподіл потенціалів та струмів на межах ємності з розплавом залежно від типу електродної системи має якісні та кількісні відмінності. Такі обставини визначають їхню багатоваріантність. Це дозволяє знаходити сприятливі умови термосилового навантаження об'єкта обробки.

3. Проведений фізичний експеримент на плоских та об'ємних моделях підтвердив результати моделювання із застосуванням М-К. Показано, що різниця у значеннях відповідних потенціалів не перевищує 6%.

4. Запропоновано для дослідження мультифізичних процесів у металевому розплаві при його кондукційній електрострумовій обробці використовувати гібридний метод моделювання, який передбачає сумісне використання методів М-К, МСЕ та МІР. Такий підхід дозволяє подолати обмеження, що виникають при окремому застосуванні перерахованих методів, зменшити розрахункові витрати та має багатоваріантні перспективи застосування. Наведено приклад сумісного застосування М-К та МСЕ для моделювання електромагнітного поля у розплаві при протіканні електричного струму.

Матеріали розділу опубліковані у працях [1-4, 6-8] (Додаток А).

РОЗДІЛ 3

ПАРАДИГМА ПОБУДОВИ СИСТЕМИ НАСКРІЗНОГО КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Трансформація будь-якої технічної новації до рівня інновації завжди спіткається з вирішенням комплексу технічних, економічних та юридичних проблем, щоб досягти важливої ознаки інновації. Вона повинна відповідати актуальним потребам ринку, маючи, як мінімум, можливість бути конкурентоспроможною та комерціалізованою з метою отримання прибутку [66-68]. Для підсилення важливості такої ознаки потрібно певним чином для новації визначити умови та засоби керування якістю кінцевої продукції. Така проблематика, яка у загальному випадку містить фізичні, кібертехнічні, аналітичні та програмні аспекти, для свого вирішення потребує комплексного системного підходу. Для цього, як мінімум, потрібно визначити та всебічно проаналізувати й структурувати об'єкт керування; обрати обчислювальну та комунікаційну апаратуру; знайти ефективні алгоритми обробки інформації та відповідне програмне забезпечення. Особливо якщо це стосується такого складного, багатостадійного та багатфакторного виробництва як ливарне. Його етапи традиційно окреслюють тріадою “шихта-розплав-випуск” (ШРВ). Щодо її середньої ланки, яка охоплює рідкий та двофазний температурні стани, застосовують різні методи та засоби обробки з метою нівелювати шкідливі наслідки шихти та забезпечити ефективне пакування твердої фази. Але універсальних методів обробки розплавів не існує, як і не існує (поки що) загальноприйнятої стратегії наскрізного керування якістю випуску, охоплюючи усі три складові тріади ШРВ. Тому відомі різні підходи до розв'язання цієї проблеми локально, наприклад [69-72]. Звісно ж, вони поки що не визначають умови наскрізного керування якістю випуску та не враховують особливості, механізми і характеристики методів обробки розплаву, основне завдання яких –

забезпечити високі показники якості виливка. Бо саме вони формують керуючі функції дії на об'єкт обробки.

3.1 Загальні проблеми керування якістю

Сучасні дефініції поняття “якість” наступні. З філософської точки зору – це властивість, яка проявляється з різним ступенем інтенсивності [73]. Міжнародний стандарт МС ISO 9000 прагматично визначає якість як сукупність характеристик об'єкта, яка належить до його здатності задовольняти виявлені та такі, що передбачаються, потреби користувача [74]. У цих визначеннях поняття “якість”, “інтенсивність” та “потреби” належать до категорії абстрактних. Тобто таких, які складно виміряти та визначити кількісно з певними однаковими ознаками. Але вони дозволяють приймати персоналу нетривіальні рішення, які враховують конкретні умови виробництва і його концепцію прагнення до цілі. Слід відзначити, що існує розбіжність у характеристиці якості виливка. З точки зору його виробника, якісна – це бездефектна продукція. З точки зору користувача – це така, що задовольняє його потреби [75], які можливо тестувати також абстрактним поняттям “конкурентоспроможність”. Нетривіальність його визначення полягає в тому, що довести конкурентоспроможність якісної продукції в окремих сегментах ринку не завжди можливо через те, що вона визначається не тільки якістю та вартістю продукції, а й репутацією постачальника (виробника) [75, 76].

У першій половині ХХ ст. почали розробляти емпіричні методи кількісної оцінки абстрактного поняття “якість”. Це надало поштовх до створення наукового напрямку кваліметрії [77], в рамках якого якість промислової продукції розглядається як техніко-економічна категорія. Тобто монада “якість” може бути розширеною до тріади “якість-вартість-конкурентоздатність” (ЯВК).

Для цього кваліметрія ввела поняття “колообіг якості”, що охоплюється іншою тріадою “проектування-виготовлення-споживання” (ПВС) продукції.

Сучасні фундаментальні дослідження в академічній постановці певним чином дозволяють на принципах системного підходу об’єднати ці дві тріади в рамках іншої “керування-система-інформація” (КСІ) [78-80]. Але за умов, якщо забезпечити наступне: визначити причини та цілі керування, визначити сферу керуючих факторів та параметри оптимізації функцій керування, узгодивши у сукупності підцілі, що дозволяють досягати цілі. Такий доробок дозволяє сформувати фундаментальний підхід до алгоритму керування, який буде містити множину цілей $\{Ц\}$, функцій $\{Ф\}$, робіт $\{Р\}$ та команд $\{К\}$ для того, щоб створити наближення до функції керування $\Psi = \{\{Ц\}, \{Ф\}, \{Р\}, \{К\}, \}$.

Таким чином монада “якість”, що відповідає кінцевій меті ШРВ, яка структурується конкретними однозначними матеріальними поняттями та визначеннями, переходить у площини абстрактних формалізацій підсистем ЯВК, ПВС, КСІ. Згідно понять методології системного аналізу, ці підсистеми досягають підцілей, які відображають свої складові концепції досягнення кінцевої цілі [78]. Підсистема ЯВК дозволяє визначити те, до чого прагнемо у відповідності до загальної стратегії дослідження якості та її досягнення. ПВС дозволяє визначити шляхи їх реалізації. У свою чергу КСІ дозволяє обрати альтернативи цих шляхів, за якими реально можливо досягти цілі.

Нажаль, для ливарного виробництва така наскрізна система керування, що складається вказаними підсистемами, є складною, багатофакторною та погано визначеною [81]. Можливо припустити, що великим компаніям її побудова під силу. Але, все ж, навряд чи вона може бути універсальною.

Тому у лабораторіях та на виробництві поки що основну увагу приділяють пошуку локальних систем керування якістю, звертаючи основну увагу на організацію ефективного та стабільного виробництва а також на виявлення резервів підвищення якості. При цьому, за можливістю, необхідно

виявити спільні інтереси тих, хто виготовляє та хто використовує ливарну продукцію.

3.2 Парадигма спрощеної системи наскрізного керування якістю виливка при застосуванні методу кондукційної електрострумової обробки розплаву

Кругообіг якості у ланцюжку системи “проектування – виготовлення – споживання” розглянемо у спрощеному вигляді, керуючись набутим науковим доробком, який частково викладено вище. У цьому випадку принципи керування якістю можливо розглядати у двох аспектах. Це організаційні заходи, які забезпечують на етапах ПВС отримання якісного виливка та технічні, які за допомогою спеціальних пристроїв виконують завдання керування у режимі online автоматично за заданим алгоритмом, або без участі оператора або при його втручанні.

На стадії проектування, завдання якого полягає в організації умов ефективного керування якістю, логічно запропонувати для аналізу потенційних функціональних можливостей та цільових наслідків використання методу енергетичної обробки розплаву систему відповідних умов та факторів (рис. 3.1). Така система на стадії проектування дозволяє знаходити раціональні практичні рішення для створення відповідного технологічного модуля та технологічних регламентів. При цьому визначаються умови та фактори для отримання високоякісних виливків. Певна роль на цьому етапі відводиться принципам імітаційного та фізичного моделювання процесів, параметрів впливу, структурних та фазових перетворень тощо. Саме за їх допомогою визначаються умови та характеристики надійного, стабільного та ефективного функціонування технологічного модуля.

Що стосується КЕСО, то отриманий науковий доробок дозволяє свідомо обрати тип струму для одиничної обробки та типи струмів і електродну систему для поліваріантного методу КЕСО. Звісно ж, для цього обираються відповідні джерела струмів, які не потрібно проектувати через те, що для різних електротехнологій спроектовано широкий їх спектр.

Також на стадії проектування потрібно визначити величину дози електричної енергії, яка вводиться у розплав (W_B). У випадку поліваріантного методу КЕСО величина W_B складатиметься сумою характеристик струмів.



Рисунок 3.1 – Узагальнена система ознак для вибору методу енергетичного впливу на розплав: МЕВР – методи енергетичного впливу на розплав

Як зазначалось, для методів імітаційного моделювання використовують МСЕ, МСР, МІР та М-К [1, 2, 6, 12, 15, 21, 48]. Варто зазначити, що саме останній дозволяє проводити експрес-аналіз характеристик базового електромагнітного поля за допомогою простої розрахункової процедури. У попередніх розділах викладена його методологія та окремі результати.

Наведемо дані, які отримано методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки (рис. 3.2). Вони свідчать про те, що зони активації флуктуацій зосереджуються біля електродів. Для РМС, яка є хиткою та флуктуаційною, ефект збільшення флуктуацій, навіть в окремих зонах, постає вагомим інструментом термосилового впливу на об'єкт обробки.

Рис. 3.2 свідчить про те, що поліваріантний метод КЕСО є більш ефективним аніж метод обробки одним струмом для генерування в окремих зонах РМС більш активних флуктуацій.

Також на стадії проектування потрібно застосувати методи натурних експериментів. При їх постановці логічно використовувати М-К, який надає змогу визначати на принципах експрес-аналізу можливі сценарії розвитку процесів, що досліджуються. Результат натурних експериментів надасть змогу тестувати дані імітаційного моделювання та показати умови та фактори, за яких отримується бездефектна продукція – виливок.

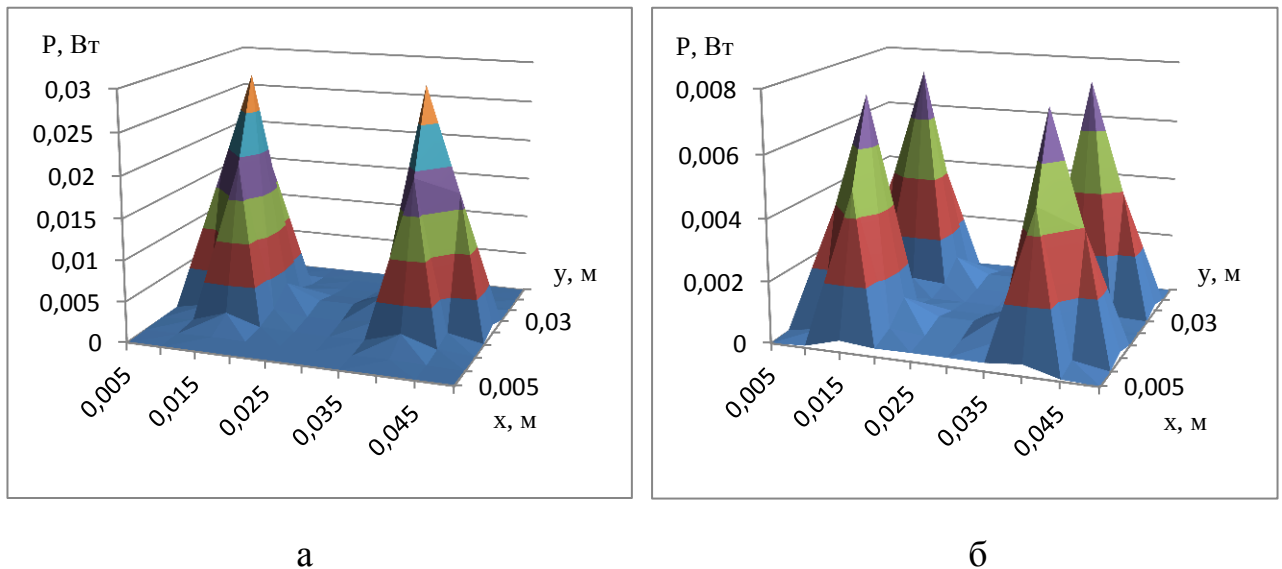


Рисунок 3.2 – Електрична потужність у площині підведення електродів при обробці розплаву алюмінієвого сплаву одним та двома струмами: а – двоелектродна система, постійний струм 100 А; б – чотириелектродна система, постійний струм 50 А на кожній парі електродів.

Обов'язковими умовами на стадії проектування є аналіз конкретних особливостей металургійного перероблення, підготовка персоналу та технологічних інструкцій.

Що стосується стадії виготовлення ливарної продукції, то саме для неї потрібно визначити принципи керування якістю в режимі online.

Враховуючи багатофакторність, багатофункціональність самого виробництва та мультифізичні ознаки процесів у РМС слід проблему керування звузити до проблеми регулювання. Підставою для цього є те, що для розв'язування проблеми керування в режимі online проблематично (поки що) використовувати процедури оптимізації у реальному часі, без яких керування за допомогою автоматизованих комплексів неможливо. Навпаки, проблема регулювання розв'язується як проблема стійкості та якості (інтенсивності) процесів, що відбуваються у системі “об’єкт – регулятор” [81].

Для використання процедури регулювання в залежності від поставлених завдань, можливо застосовувати один із його фундаментальних принципів: розімкненого регулювання, регулювання за збуренням, регулювання за відхиленням.

Перший з них застосовують, якщо збурююча дія на систему, якою керують, не призводить до значної зміни її працездатності. Загальну функціональну схему такої системи показано на рис. 3.3.

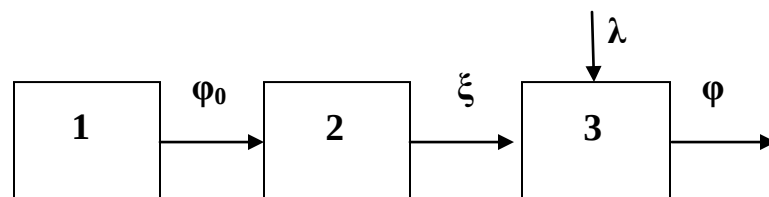


Рисунок 3.3 – Загальна функціональна схема системи розімкненого керування: 1 – задавач програми; 2 – керуючий пристрій; 3 – об’єкт впливу; ϕ_0 – алгоритм функціонування; ξ – керуючий вплив; λ – збурююча дія; ϕ – вихідний елемент.

Близькість φ_0 та φ ($\varphi_0 - \varphi \approx 0$) забезпечується тільки конструкцією та підбором фізичних закономірностей, які діють у всіх елементах.

Другий принцип використовують, коли збурююча дія значна. Тобто $\varphi = F_1(\xi, \lambda)$, тоді $\Delta\varphi = \varphi_0 - F_1(\xi, \lambda) \approx 0$. Загальна функціональна схема системи показана на рис. 3.4.

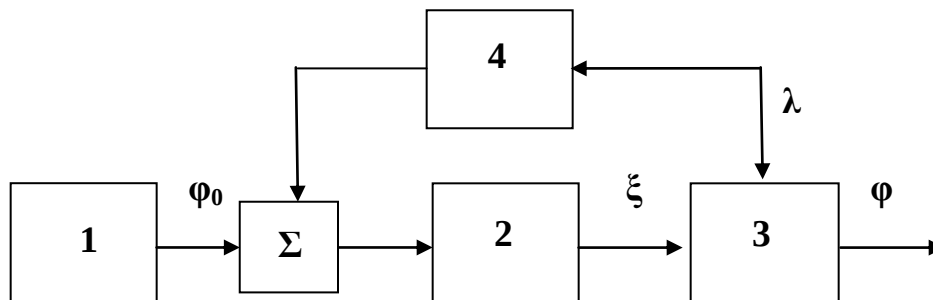


Рисунок 3.4 – Загальна функціональна схема системи керування за збуренням:

1 – задавач програми; 2 – керуючий пристрій; 3 – об’єкт впливу; 4 – вимірювальний пристрій; φ_0 – алгоритм функціонування; ξ – керуючий вплив; λ – збурююча дія; φ – вихідний елемент; Σ – суматор.

Третій принцип не передбачає необхідності вимірювати збурюючий вплив. Корективи в алгоритм керування вносяться за фізичним значенням координат в системі. Вимірювальний пристрій 4 (рис. 3.5) подає на вхід керуючого пристрою 2 сигнал, який пропорційний відхиленню $(\varphi_0 - \varphi)$. Суматор Σ виконує функцію $(\varphi_0 - \varphi)$. У цьому випадку

$$\xi = f\left(\Delta\varphi, \frac{d\varphi}{dt}, \int_0^t \Delta\varphi dt\right).$$

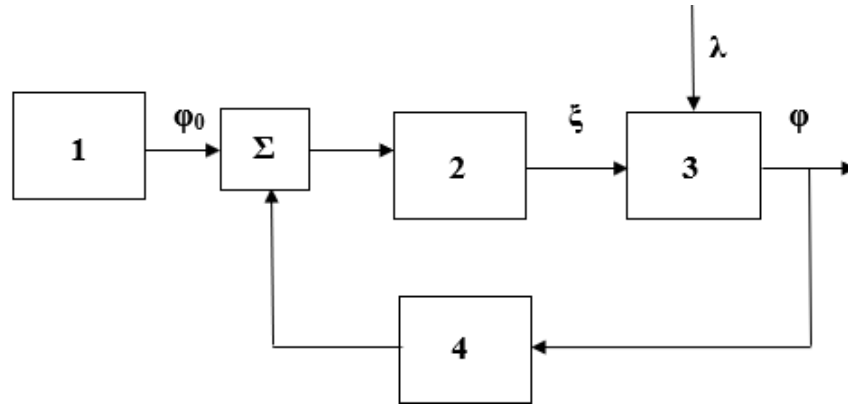


Рисунок 3.5 – Загальна функціональна схема системи регулювання за відхиленням: 1 – задавач програми; 2 – керуючий пристрій; 3 – об’єкт впливу; 4 – вимірювальний пристрій; ϕ_0 – алгоритм функціонування; ξ – керуючий вплив; λ – збурююча дія; ϕ – вихідний елемент; Σ – суматор.

При розв’язанні задачі регулювання потрібно при обробці підтримувати стабільне значення величини енергії, яка вводиться у розплав W_B (розділ 1).

Для КЕСО доцільно використовувати саме третій фундаментальний принцип – регулювання за відхиленням (рис. 3.5). Таким чином, процедура регулювання стабільного збудження РМС електромагнітним полем при КЕСО визначається тільки параметрами джерела струму при конкретній електродній системі. Час обробки t визначається формулами (1.1) та (1.2). Таке регулювання можна назвати електромагнітним. Оскільки при цьому підтримується стабільне значення енергії, що вводиться в розплав, його також можна назвати енергетичним. Воно дає принципову змогу організації сприятливого термодинамічного стану у РМС, за яким утворюються умови покращення її кристалізаційної здатності у напрямку забезпечення ефективної кристалізації литва так, щоб отримати високу якість виливка.

На третій стадії (споживання) характеристики якості вже готового виливка вибірково тестуються з позицій виробника на бездефектність. Звісно ж, в умовах ливарного виробництва такий підхід дозволяє тільки *post factum* їх

виявляти та відбраковувати неякісні виливки. А кінцеве тестування виробу на його якість проявляється його конкурентоспроможністю.

Таким чином, парадигма спрощеної системи наскрізного керування якістю технічної новачії у ливарному виробництві може бути інтегрована у когнітивній карті (рис. 3.6). Її зміст – це основні дані про систему, що її обрано для аналізу та яка інформаційно зв’язана причинно-наслідковою мережею умов, процесів та факторів. Саме їх синтез у системі, яка досліджується, покаже ступінь інтенсивності системи, який визначається інформаційною складовою та оптимальними шляхами обміну інформацією.



Рисунок 3.6 – Орграф наскрізного керування якістю на базі платформи абстрактної системи ПВС

Висновки до розділу 3

1. Аналіз особливостей керування якістю у технологічних застосуваннях та особливостей КЕСО показав, що глобальна наскрізна система керування

якістю поки що не має достатнього наукового доробку задля її застосування у ливарному виробництві.

2. Тому у роботі запропоновано використовувати тільки одну підсистему глобальної наскрізної системи – ПВС, яка має ознаки абстрактної. Показано, що вона є достатньо інтенсивною з точки зору своєї інформативності та дозволяє як прогнозувати ефекти підвищення якості, так і регулювати процеси електромагнітного збудження під час КЕСО. Абстрактна ознака ПВС дозволяє знаходити альтернативні рішення для забезпечення якості виливка.

3. Для керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки задля отримання виливків високої якості запропоновано алгоритм регулювання, який названо електромагнітним. Згідно з ним із застосуванням фундаментального принципу регулювання за відхиленням при обробці підтримується стабільне значення величини енергії, яка вводиться у розплав. Таким чином, процедура регулювання стабільного збудження рідкометалевої системи електромагнітним полем при кондукційній електрострумовій обробці визначається тільки параметрами джерела струму при конкретній електродній системі, що дає принципову змогу організації сприятливого термодинамічного стану у рідкометалевій системі, за яким утворюються умови покращення її кристалізаційної здатності у напрямку забезпечення ефективної кристалізації литва так, щоб отримати високу якість виливка.

4. Подальшого наукового доробку потребує аналіз умов керування якістю у ливарному виробництві на базі сукупності абстрактних підсистем ЯВК, ПВС, КСІ.

5. Необхідним є й подальший розвиток методу М-К імітаційного моделювання процесів у РМС при КЕСО для експрес-аналізу умов та факторів, за яких утворюється інтегральний екстремум електромагнітного збудження елементів РМС.

Матеріали розділу опубліковано у праці [5] (Додаток А).

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗПЛАВУ

Для перевірки енергетичного регулювання параметрів розплаву було проведено серію експериментального тестування результатів математичного моделювання явищ та процесів, які притаманні поліваріантному методу кондукційної електрострумової обробки сплавів на основі Al. Вони дозволили визначити функціональні можливості такого впливу на РМС. Було знайдено співставлення елементів системи «Електродні системи – Типи струмів», за якими при характеристиках струмів, що їх було обрано на підставі математичного моделювання, отримано найбільш інтенсивний та ефективний термосиловий вплив. У попередніх розділах було показано, що за окремих умов та факторів у РМС потрібно генерувати суттєво нелінійне неоднорідне термосилове навантаження. У цьому випадку відповідна реакція РМС утворює за законами самоорганізації перебудову енергетичних зв'язків на базових рівнях структури (атомарному, кластерному). Це змінює хімічну активність атомів розплаву, та, як наслідок, дозволяє в об'ємі РМС утворювати асоціати хімічних елементів, які компактуються та утворюють зародки кристалізації. Таким чином можливо реалізувати суттєве покращення кристалізаційної здатності РМС, а на фінішному етапі металургійного перероблення отримати виливок з покращеними показниками якості. Важливим фактом ефективного обґрунтованого термосилового впливу на РМС є те, що за рахунок її самоорганізації енерговитрати при поліваріантній кондукційній електрострумовій обробці скорочуються.

Зробимо деякі пояснення, що їх було враховано при постановці задачі експериментального тестування. В роботі [47] викладено принципові можливості КЕСО проводити одночасно декількома струмами, де показано, що

такий підхід може мати інноваційну перспективу. У роботах [16, 44, 61] методами математичного моделювання показано, що хитка флуктуаційна відкрита РМС за умов її нелінійного неоднорідного термосилового навантаження спроможна додавати до зовнішнього навантаження додатковий енергетичний вплив автоколивальними процесами, що виникають як реакція відкритої термодинамічної системи. Основною умовою таких ефектів є активація флуктуаційних процесів, навіть у окремих зонах РМС. За рахунок гідродинамічних методів відбувається перемішування об'ємів більш активованої РМС з такими, що перебували під меншим впливом. Результати аналізу швидкостей течій підтверджують, що таку можливість можна реалізувати протягом часу обробки [61].

За допомогою М-К було вперше показано, що додаткова активація термосилового впливу зосереджена в районах, що сусідять з бічною поверхнею електродів (розділ 3, рис. 3.2). Таким чином, потенційно можливо скоротити час обробки, враховуючи формули для визначення величини масштабного фактора (розділ 1, формули 1.1, 1.2). При цьому енерговитрати на обробку зменшуються, що позитивно відбивається на її вартості.

Виходячи з цього, задача експериментального тестування полягала перш за все в тому, щоб підтвердити цей факт та показати, як при цьому змінюються властивості та структура вилівка.

4.1 Методика експерименту

Електрострумова обробка розплаву виконувалась на експериментальній установці, зображення якої наведено на рис. 4.1. Виплавлялась чушкова шихта ливарних доєвтектичних сплавів на основі Al в шахтній печі опору у металевих футерованих тиглях при температурі розплаву від 1000 К до 1020 К. Температура контролювалась терморегулятором ТК-4к та хромель-

алюмелевими термопарами. Маса сплаву для однієї порції виплавляння складала $\approx 0,6$ кг. Видалявся шлак, міксування розплаву виконувалось протягом 30 с. Через 15 хв. ізотермічної витримки знову видалявся шлак та проводилось міксування. Потім виконувалась обробка струмом при вказаній температурі та заливка у форми. Для отримання контрольних зразків заливався не оброблений струмом розплав. Маса сплаву вистачало для отримання стандартних зразків для дослідження мікроструктури та механічних властивостей литого металу. Для аналізу мікроструктури було використано циліндричний кокіль, що містить 30 г сплаву. Для аналізу механічних властивостей з випробуванням на розривання застосовувалась стандартна форма (ГОСТ1497-84). Форма для зразків нагрівалась до 200°C , температура заливки становила $\approx 910\text{ K}$. Для КЕСО було використано паралельні тонкі різнозаглиблені електроди з ізольованими бічними поверхнями. Торець аноду практично досягав дна ємності з розплавом, а катоду – заглиблювали до 5 мм. Матеріал електродів – Ті. Контроль електричних характеристик КЕСО виконувався відповідно методичним вказівкам [82]. Структура зразків досліджувалась за допомогою оптичного мікроскопа «РЕММА-102». Попередньо зразки припарувались за стандартною процедурою [83]. Випробування на розривання виконувались на установці.

У серії експериментів оброблявся чушковий сплав АК7 (ГОСТ 1583-93), хімічного складу: Si (7,3%); Fe (0,5%); Cu (0,5%); Mn (0,07%); Mg (0,07%); Zn (0,2%); Pb (0,01%), основа Al. Для КЕСО було використано одну пару електродів, а також два джерела струму: AC (50 Гц) і DC (100 Гц). Порівнювались результати обробки одним типом струму і одночасно двома. Для цього використано величину струму по 40 А для кожного типу струму в разі обробки одним джерелом і по 20 А за одночасного впливу. Час обробки обирався з урахуванням масштабного фактора (становив 16 хвилин).

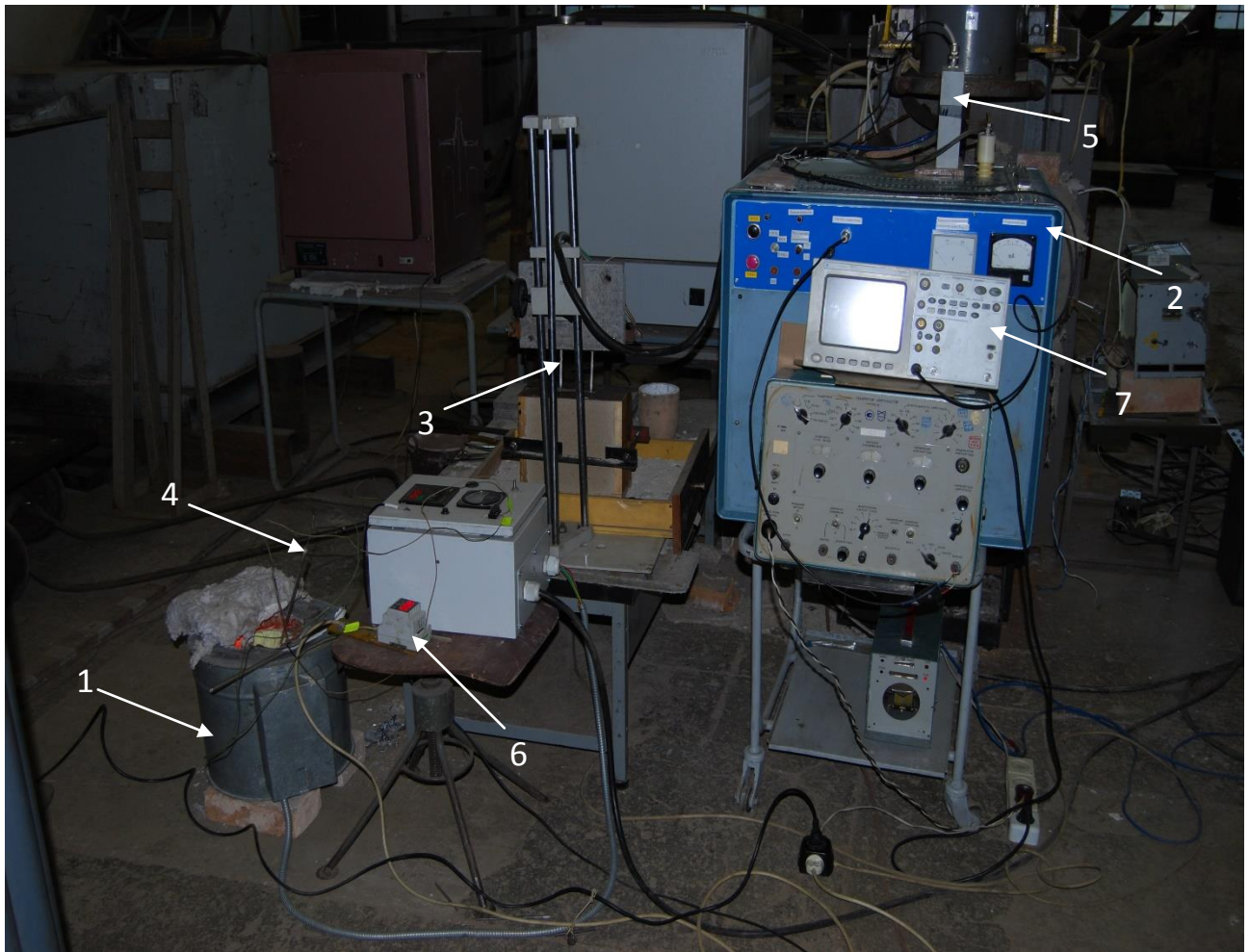


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд експериментального стану для КЕСО алюмінієвих сплавів: 1 – електроніч опору; 2 – джерело струму; 3 – електродна система; 4 – хромель-алюмелева термопара; 5 – пояс Роговського; 6 – терморегулятор; 7 – цифровий запам'ятовуючий осцилограф.

Співставлялись результати обробки одним типом струму з результатами обробки за принципами П-Р. Дотримувалась рівність величини дози густини енергії, що введена у розплав $W=2 \cdot 10^8$ Дж/м³, яка складала ту саму величину, як при КЕСО одним із двох типів струму, так і сумарно, при застосуванні П-Р. Час обробки відповідно до масштабного фактора складав $t=16$ хв. Додатково виконано обробку П-Р протягом 10 хв та 5 хв, тобто при менших енерговитратах, відповідно $W=1,25 \cdot 10^8$ Дж/м³ та $W=0,7 \cdot 10^8$ Дж/м³ для перевірки

гіпотези про вплив ефекту підсилення флуктуацій при КЕСО, який потенційно спроможний скоротити час обробки.

4.2 Результати експериментальних досліджень

Контрольний зразок має відносно однорідну структуру з розгалуженою евтектикою, яка містить морфологію, що відповідає локальному (неоднорідному) скупченню елементів сплаву та їх інтерметалідам. Показники міцності та пластичності відповідають стандартним значенням. Обробка тільки одним типом струму по-різному вплинула на елементи структури, в першу чергу, на морфологію евтектики. Але, як і було показано раніше [10], пульсуючий струм (DC) показав кращий результат обробки, аніж змінний (AC).

Обробка суперпозицією електричних полів обраних типів показала її перевагу над КЕСО одним типом струму, навіть при простій схемі введення електричного струму у розплав однією парою електродів.

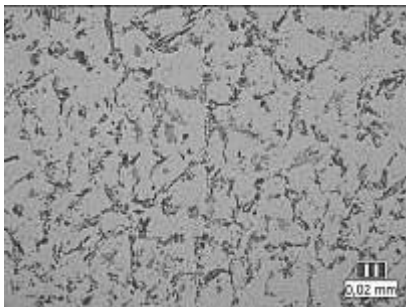
Важливо відмітити, що найкращий результат отримано при скороченні часу обробки практично у три рази, тобто при суттєвому скороченні енерговитрат. Отримано однорідну структуру зі зменшеними зернами α -Al, які до того ж мають здебільшого округлу форму, а також здрібнені елементи евтектики. Це відбилось на показниках механічних властивостей. Тимчасовий опір σ_b виріс на 13%, відносні видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносне звуження ψ – отримано на рівні 4,4%, що було зафіксовано тільки при суперпозиції полів, показало суттєве покращення пластичності матеріалу.

Попередньо за допомогою М-К вперше показано суттєве збільшення потужності термосилового навантаження у локальних зонах біля електродів. На підставі цього висунуто гіпотезу, що цей факт дозволяє зменшити час обробки

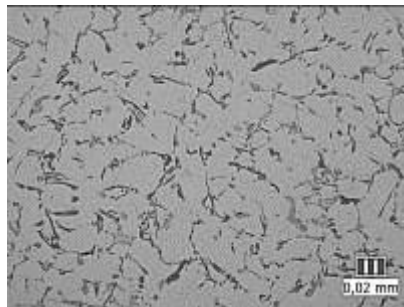
при КЕСО. Для перевірки цього факту, додатково відпрацьовано 10 і 5 хвилин. На рис 4.2 наведено мікроструктури зразків, а в табл. 4.1 – результати механічних випробувань. Як свідчать дані табл. 4.1, отримано зменшення енерговитрат у 3 рази при $W=0,7 \cdot 10^8$ Дж/м³, що відповідає енерговитратам на обробку на рівні 50 кВт·год/т з урахуванням ККД кожного з джерел струму. Цей результат показує, що у описаному випадку енерговитрати на обробку є меншими у декілька разів у порівнянні, наприклад, з магнітно-гідродинамічною обробкою [38].

Таблиця 4.1 – Механічні властивості зразків

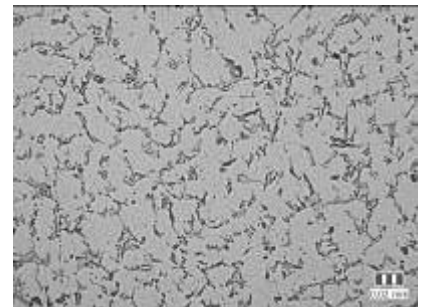
Принцип обробки	Тимчасовий опір розриву, σ_B , МПа	Межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження, ψ , %
Без обробки	161	103	2,0	-
АС(50 Гц), $t=16$ хв.; $W=2 \cdot 10^8$ Дж/м ³	145	102	2,4	-
ДС (100 Гц), $t=16$ хв., $W=2 \cdot 10^8$ Дж/м ³	176	111	3,0	-
АС + ДС, $t=16$ хв., $W=2 \cdot 10^8$ Дж/м ³	162	125	2,4	3,6
АС + ДС, $t=10$ хв., $W=1,25 \cdot 10^8$ Дж/м ³	163	120	2,0	1,6
АС + ДС, $t=5$ хв., $W=0,7 \cdot 10^8$ Дж/м ³	182	102	3,0	4,4
ГОСТ 1583-93	157	-	2,0	-



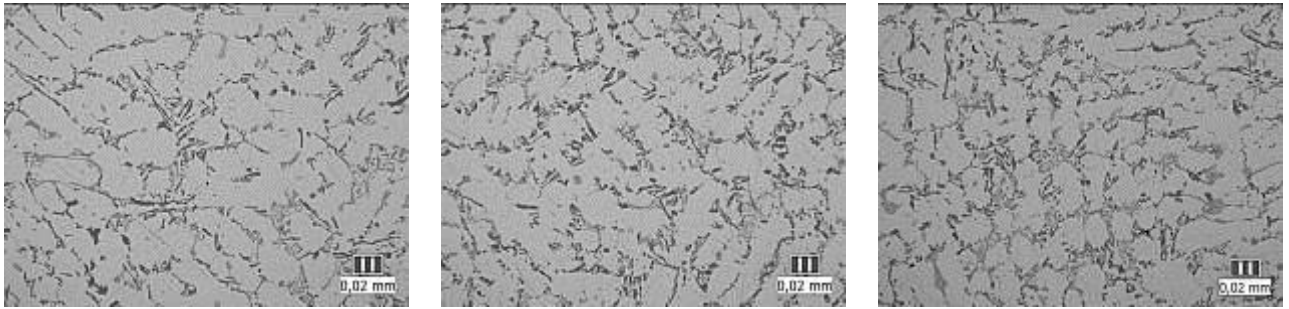
а



б



в



г

д

е

Рисунок 4.2 – Мікроструктури зразків: а – без обробки, контрольний; б – АС, частота 50 Гц, амплітуда 40 А, $t=16$ хв; в – DC, частота 100 Гц, амплітуда 40 А, $t=16$ хв; г – одночасна обробка АС+DC, амплітуда по 20 А, $t=16$ хв; д – одночасна обробка АС+DC, амплітуда по 20 А, $t=10$ хв; е – одночасна обробка АС+DC, амплітуда по 20 А, $t=5$ хв.

4.3 Рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва

Грунтуючись на отриманих розрахункових та експериментальних даних, виявивши значущі фактори та керуючі параметри КЕСО, алгоритм вибору доцільних параметрів обробки представлений на рис. 4.3.

Методика вибору параметрів КЕСО алюмінієво-кремнієвих сплавів за даним алгоритмом наступна:

1. Початковими даними для вибору параметрів КЕСО розплаву є маса, об'єм, геометричні розміри об'єкта обробки. Вони визначаються технологією виробництва виливків у конкретному випадку. Також проводиться визначення температурного інтервалу обробки, що дає змогу оцінити час роботи обладнання.



Рисунок 4.3 – Алгоритм вибору параметрів кондукційної електрострумової обробки алюмінієво-кремнієвих сплавів

2. На другому етапі, використовуючи метод М-К для експрес оцінки процесів електрострумової обробки з урахуванням особливостей їх енергетичного навантаження, визначаються ефективні режими обробки розплаву. Можливе додаткове застосування МСЕ окремо або сумісно з М-К для подальшого дослідження режимів обробки, що їх відібрано за допомогою М-К. Далі, з урахуванням масштабного фактору (розділ 1, формули 1.1, 1.2)

обираються тип електродної системи, кількість електродів, типи струмів та час обробки.

3. Третім кроком є безпосередньо розрахунок параметрів, вибір елементної бази і схемна реалізація обладнання для кондукційної електрострумової обробки алюмінієво-кремнієвих сплавів.

Згідно з описаним підходом, представлено гнучкий варіант блочної компоновки технологічного модуля для КЕСО розплаву алюмінієво-кремнієвого сплаву (рис. 4.4), який залежно від мети обробки дозволяє впливати на розплав у печі, проміжній ємності, у жолобі та у формі. При цьому можуть реалізовуватись різні режими струму, як для КЕСО одним типом струму, так і одночасної обробки різними типами струмів. Для комерціалізації такого модуля необхідно орієнтуватися на завдання обробки розплаву і враховувати співвідношення системи «Ціна-Якість».

Джерела струму для КЕСО доцільно реалізувати на базі тих, що застосовувались в експериментальних дослідженнях, адже в них уже реалізовані вдалі технічні рішення. Перший з таких малопотужний генератор імпульсних струмів потужністю 120 Вт. Даний пристрій генерує імпульс струму з енергією до 3 Дж при частоті проходження імпульсів від 1 до 1600 Гц з робочою напругою 480 В. Генератор може працювати у двох режимах:

- режим формування монополярного імпульсу, який являє собою напівхвилю з тривалістю $t=15$ мкс та амплітудою струму $I_{\max}$;
- режим формування біполярного імпульсу, який є загасаючою синусоїдою з амплітудою $I_{\max}$, періодом коливань $T=30$ мкс. Перемикання між режимами здійснюється ключем SA2 (рис. 4.5, 4.6).

Технічні дані малопотужного генератора імпульсних струмів:

1. Параметри мережі живлення:

- напруга мережі 220 В;
- частота мережі 50 Гц.

2. Номінальна потужність $P_H = 120$ Вт.

3. Робоча напруга $U_H = 480$ В.

Режими роботи малопотужного ГІС на різних частотах наведено у таблиці 4.2

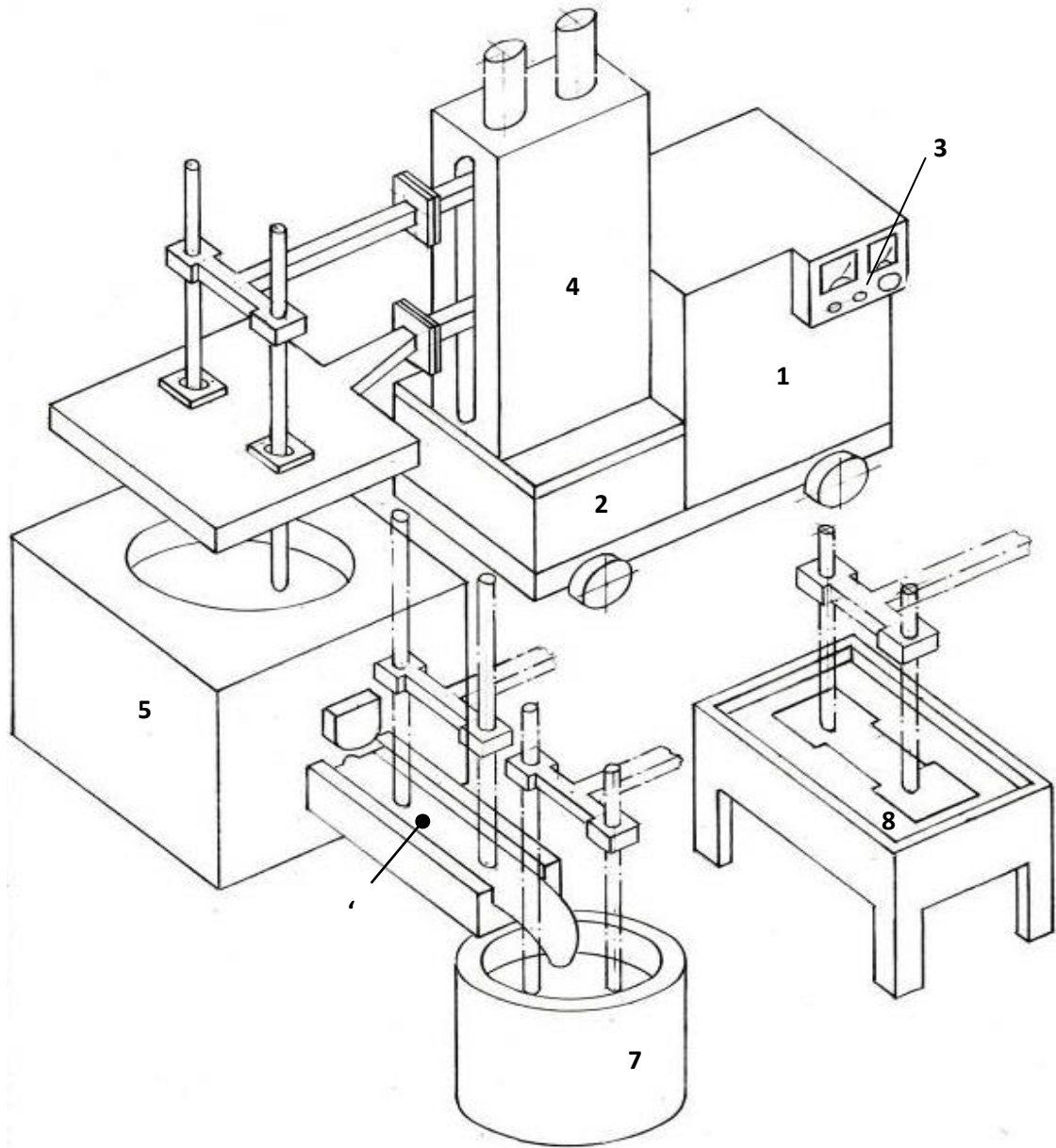


Рисунок 4.4 – Блочна компоновка технологічного модуля для КЕСО розплаву: 1 – джерело струму №1; 2 – джерело струму №2; 3 – пульт керування; 4 – система переміщення електродів; 5 – плавильна піч; 6 – жолоб; 7 – проміжна ємність; 8 – форма.

Таблиця 4.2 – Режими роботи малопотужного ГІС на різних частотах

№ п/п	Частота слідування імпульсів f , Гц	Енергія в імпульсі W , Дж	Амплітуда струму $I_{\max}$, А	Ємність конденсатора C , мкФ	Період коливань T , мкс
1.	до 40	3	800	25	30
2.	800	0,15	220		
3.	1600	0,075	52		

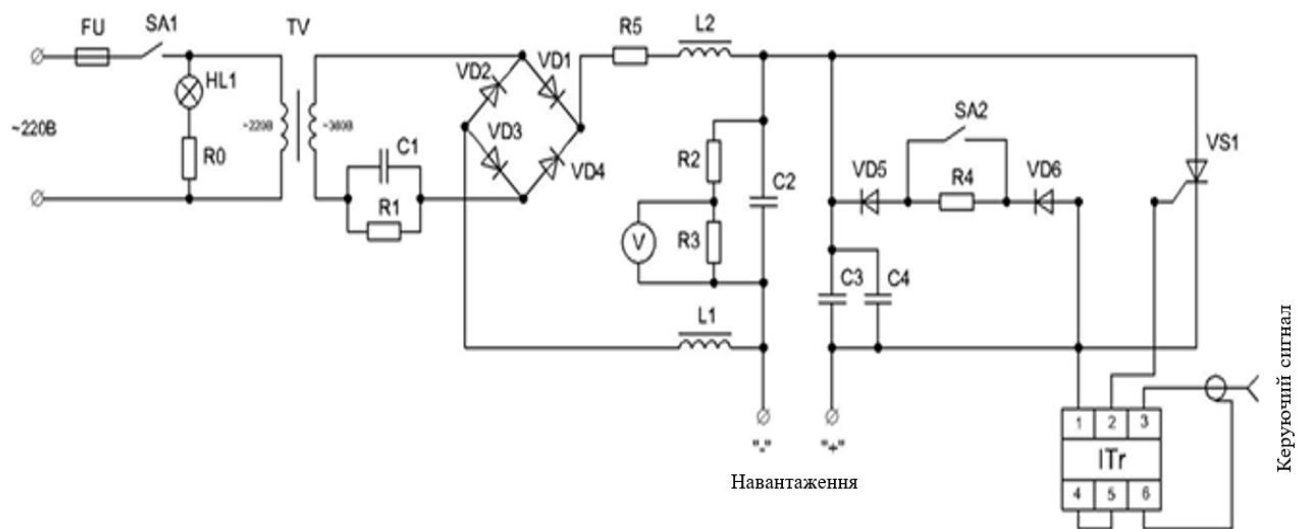


Рисунок 4.5 – Принципова електрична схема генератора імпульсних струмів малої потужності

Генератор працює у режимі формування біполярного імпульсу, який є загасаючою синусоїдою з амплітудою , періодом коливань $T=30$ мкс.

Технічні дані генератора:

Параметри мережі живлення:

- напруга мережі 380 В;
- частота мережі 50 Гц;
- максимальна споживана потужність $S = 7,5$ кВА;
- номінальна потужність $P_H = 6,8$ кВт;
- робоча напруга $U_H = 515$ В.

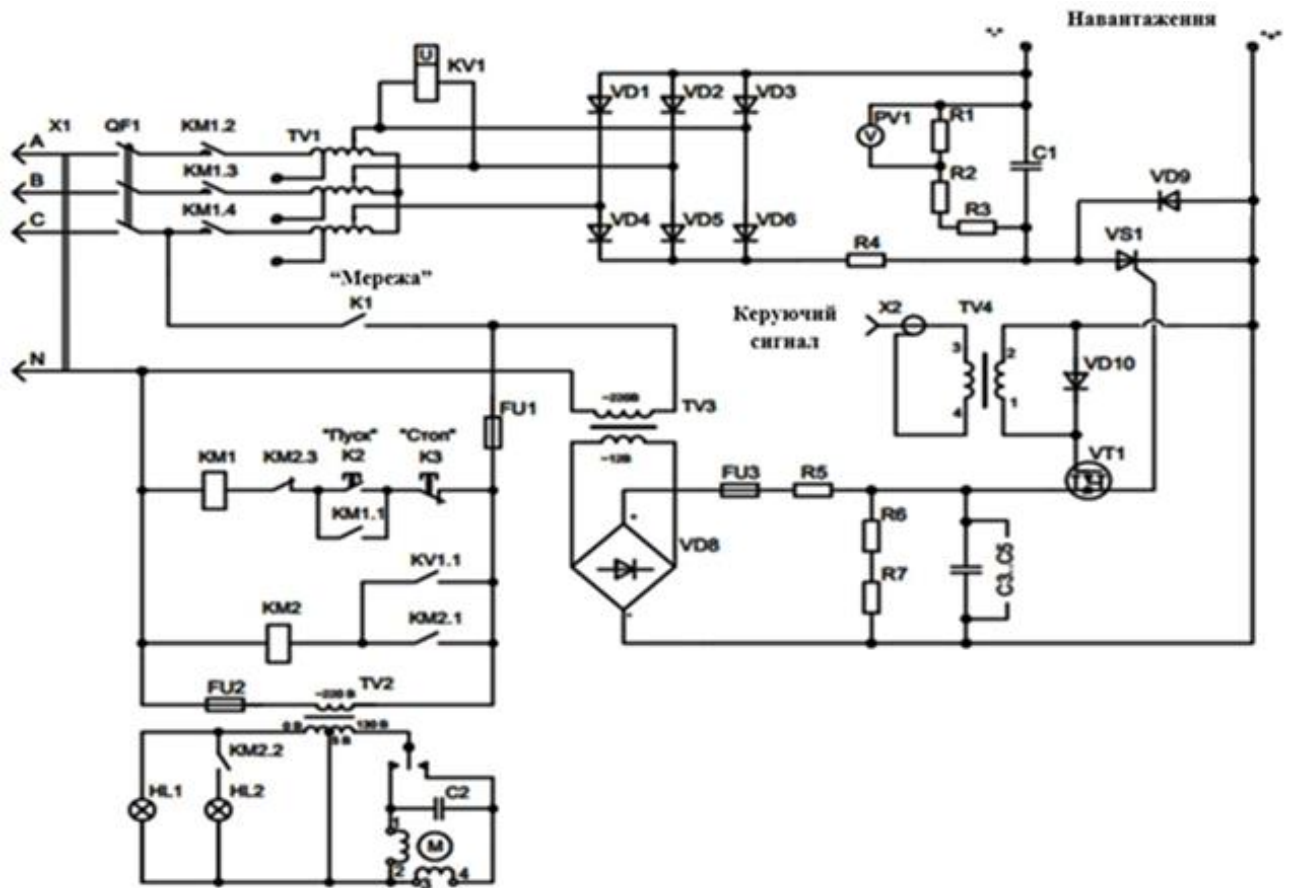


Рисунок 4.6 – Принципова електрична схема низьковольтного трифазного генератора імпульсних струмів

Таблиця 4.3 – Режими роботи трифазного генератора низьковольтного імпульсів струму

Частота слідування імпульсів f , Гц	Амплітуда струму $I_{\max}$, А	Енергія в імпульсі W , Дж
От 1 до 3200	До 800	1,7

Розмір пульсації амплітуди струму – трохи більше 6%.

Враховуючи те, що М-К для умов КЕСО у ливарному виробництві досліджено тільки у даній роботі, а отриманий відповідний науковий доробок було орієнтовано на досягнення мети роботи, запропоновані рекомендації не

можуть претендувати на їх повноту, щоб задовольнити будь-якого виробника ливарної продукції. Це можна пояснити тим, що для кожного виробника існує своя стратегія кінцевої мети комерціалізації новації.

Висновки до розділу 4

1. Експериментальні дослідження показали, що при застосуванні КЕСО одночасно різними типами струму можливо отримати результат, що за своїми показниками перевищує результат обробки одним типом струму. При цьому більш активно зростають показники міцності та пластичності виливка.

2. Механізм таких ефектів можна пояснити активацією флуктуацій енергії навколо бічної поверхні ізольованих електродів. Така флуктуація виникає за рахунок утворення у цих зонах підвищення ефективності базового електромагнітного поля.

Матеріали розділу опубліковані у працях [2, 9] (Додаток А).

ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу науково-технічної інформації обґрунтовано, що удосконалення методів моделювання фізичних полів у металевому розплаві при його енергетичній обробці, а саме методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки, а також розробка відповідних алгоритмів керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки є актуальною науковою задачею.

В дисертації удосконалено метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки, що підвищило ефективність його використання для експрес-аналізу електричних і магнітних характеристик електромагнітного поля, яке вводиться у розплав при кондукційній електрострумовій обробці та яке генерує вторинні фізичні поля, а їх сукупна термосилова дія спроможна позитивно змінювати термодинамічний стан рідкометалевої системи.

2. Основними особливостями використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки в умовах протікання електричного струму різного типу через масивний провідник є параметризація об'єкта обробки і можливість визначати розподіл струмів та потенціалів на границях ємності з розплавом. Вони можуть бути використані як граничні умови для інших розрахункових методів, зокрема, для методу скінченних елементів, що дозволить спростити розрахункові процедури.

3. Розроблені в рамках роботи методологічні засади та програмна реалізація матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки дозволяють досліджувати процеси електрострумової обробки металевих розплавів у 2D та 3D форматах з урахуванням особливостей їх енергетичного навантаження для визначення ефективних режимів обробки.

Вперше запропоновано для всебічного аналізу процесів, що генеруються при кондукційній електрострумовій обробці, використовувати гібридну тріаду методів розбиття масивних провідників на елементарні комірки, скінченних елементів та інтегральних рівнянь, для якої призначення методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки полягає у визначенні граничних та початкових умов, а також у попередньому експрес-аналізі можливих сценаріїв розвитку процесів термосилового навантаження рідкометалевої системи.

4. Проведено перевірку удосконаленого методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки шляхом порівняння результатів моделювання процесів при обробці струмом металевого розплаву з відповідними результатами, отриманими методом скінченних елементів і методом фізичного моделювання. Адаптований до особливостей кондукційної електрострумової обробки метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки дозволяє з достатньою точністю і при значно менших витратах часу визначати розподіл базового електромагнітного поля у металевому розплаві при його обробці електричним струмом. Забезпечуючи валідацію та верифікацію результатів, у комплексі, наприклад з методом скінченних елементів, він може суттєво вплинути на розширення наукового доробку щодо термосилової дії на розплав. Його функціональні можливості дозволяють аналізувати розподіл характеристик електромагнітного поля у форматах як 2D, так і 3D. Перший у тестових числових експериментах дає змогу визначати можливі сценарії у розподілі електричних характеристик поля в металевому розплаві. Другий має суттєві переваги при більш точному відтворенні характеристик поля в об'ємі розплаву.

Визначено умови та фактори, за яких застосування удосконаленого методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки забезпечує достатній рівень верифікації отриманих результатів, що дає можливість ефективного використання даного методу при моделюванні процесів електрострумової обробки розплавів.

5. Для керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки задля отримання виливків високої якості запропоновано алгоритм регулювання, який названо електромагнітним. Згідно з ним із застосуванням фундаментального принципу регулювання за відхиленням при обробці підтримується стабільне значення величини енергії, яка вводиться у розплав. Таким чином, процедура регулювання стабільного збудження рідкометалевої системи електромагнітним полем при кондукційній електрострумовій обробці визначається тільки параметрами джерела струму при конкретній електродній системі, що дає принципову змогу організації сприятливого термодинамічного стану у рідкометалевій системі, за яким утворюються умови покращення її кристалізаційної здатності у напрямку забезпечення ефективної кристалізації литва так, щоб отримати високу якість виливка.

6. Показано, що рекомендації, які отримано удосконаленим в роботі методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки, дали змогу виконати ефективну обробку розплаву, після якої експлуатаційні характеристики виливка суттєво покращились. Це відбилось на показниках механічних властивостей, а саме: тимчасовий опір σ_b виріс на 13%, відносні видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносне звуження ψ – отримано на рівні 4,4%.

7. Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо проектування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва. Згідно з ними, представлено гнучкий варіант блочної компоновки технологічного модуля для кондукційної електрострумової обробки розплаву алюмінієво-кремнієвого сплаву, який залежно від мети обробки дозволяє впливати на розплав у печі, проміжній ємності, у жолобі та у формі як для обробки одним типом струму, так і одночасної обробки різними типами струмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dmitry G. Eskin, Mi Jiawei. (2018). Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. *Springer Series in Materials Science* <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3/>
2. Gui Wang, Matthew Dargusch, Mark Easton, David StJohn (2018). Fundamentals of Aluminium Metallurgy. Chapter 9 – Treatment by External Fields, 279-332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00009-6>.
3. Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y. *et al* (2021). Investigating the Grain Refinement Mechanisms of Pulsed Electric Current, Ultrasonic and Melt Stirring Solidification of Pure Aluminium. *JOM*, 73, 3873–3882, <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
4. Liang, C.-L., Lin, K.-L (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review. *Material Characterization*, 145, 545-555, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>.
5. Balasubramani N., Venezuela J., StJohn D., Wang G., Dargusch M. (2023). A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current, and ultrasonic treatments, *Journal of Materials Science & Technology*, 144, 243-265, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.067>.
6. Jiang, W., Fan, Z., Chen, X., Wang, B. & Wu, H. (2014). Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting. *Mater. Sci. Eng. A*, 619, 228–237, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.102>
7. Liu, G., Karim, M., Wang, S., Eskin, D. & McKay, B. (2022). Processing of SiC nano-reinforced AlSi₉Cu₃ composites by stir mixing, ultrasonication and high pressure die casting. *J. Mater. Res. Technol*, 18, 2384–2398, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.132>

8. Shabestari, S. G. & Malekan, M. (2010). Assessment of the effect of grain refinement on the solidification characteristics of 319 aluminum alloy using thermal analysis. *J. Alloys Compd*, 492, 134–142, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.122>
9. Z. Liu, Z. Dong, X. Cheng, Q. Zheng, J. Zhao, Q. Han (2018). On the supplementation of magnesium and usage of ultrasound stirring for fabricating in situ TiB₂/A356 composites with improved mechanical properties. *Metall. Mater. Trans. A*, 49, 5585–5598, <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4883-x>
10. Nuradinov A. S., Prigunova A. G., Sheigam V. Yu., Vernidub A. G., Nuradinov I. A. (2020). Physical methods of control of formation of metal structure. *Metal and Casting of Ukraine*. 2 (321), 41-48.
11. Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, Soong-Keun Hyun, Moon-Jo Kim. (2021). Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum. *Journal of materials research and technology*, 12, 818-830, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.040>
12. Zhang, Y. H., Xu, Y. Y., Ye, C. Y., et al (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports* 8, 3242. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>.
13. Guo J, Wang F, Zhang S, Zhou Y, Zhu L. (2024). Effect of High-Frequency Electric Pulse on the Solidification Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al-Si Alloy. *Materials*, 17(2):468. <https://doi.org/10.3390/ma17020468>
14. Prigunova, A. & Koshelev, M. & Borisov, A. (2022). Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Materials Science and Technology*. 38. 1-8. DOI:10.1080/02670836.2022.2037059

15. F Jianhong Ma, Jie Li, Yulai Gao, Qijie Zhai. (2009). Grain refinement of pure Al with different electric current pulse modes. *Materials Letters*, 63(1), 2009, 142-144, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.036>.
16. Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, New York: Nova Science Publishers, 1-114.
- 17 Li, Ning et al. (2019). The Role of Electric Current-Associated Free Energy and Forced Convection on Grain Refinement in Pure Aluminum under Electropulsing. *Materials*, 12,23 3846, <https://doi.org/10.3390/ma12233846>
18. Choi, S.J., Kim, D., La, M. *et al.* (2023). Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification. *Sci Rep* 13, 3382. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y>
19. Kim Moon Jo; Kim Dong Eung (2023). Casting method using direct current applied molten metal control and device therefor (South Korea Patent No. KR102707693) Korean Intellectual Property Office.
20. Goettsch, J., Gladstein, A., Weiss, D., Shahani, A., Taub, A. (2023). Secondary Phase Refinement in Molten Aluminum via Low Power Electric Current Processing. In: Broek, S. (eds) *Light Metals 2023*. TMS 2023. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_61
21. Kosenkov, V.M., Ivanov, A.V. (2024). Formation of Wave Fields in a Metal Melt under the Action of Magnetic-Pulse Loading and Discharge Current Pulses. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol.60, 838–843. <https://doi.org/10.3103/S1068375524700443>
22. Kazhikenova S. (2021). The unique solvability of stationary and non-stationary incompressible melt models in the case of their linearization. *Archives of Control Sciences*, 2(31), 307-332.

23. Ivanchenko D. V., Leonov D. S. (2023). Strengthening of Aluminium Alloys with Zirconium. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 45 (7), 901-907. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0901>
24. Sheretskiy V. O., Jianglong Yi, Chaika A. A., Yulyugin V. K., Demjanov O. I. (2020). The Effect of Comodification by Scandium and Zirconum of Alunium Alloys of the Al-Mg-Cu System on the Casting Properties. *Casting processes*, 141(3), 19-26. <https://doi.org/10.15407/plit2020.03.019>
25. Anas N.M., Zakaria S.A., Anasyida A.S., Mohamad H., Dhindaw B.K. (2023). Influence of Semisolid and Strontium Addition on Dry Sliding Wear Behavior of Hypoeutectic Al-Si Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 68, 1, 307-317, <https://doi.org/10.24425/amm.2023.141507>
26. Sigworth, G.K. (2008). The Modification of Al-Si Casting Alloys: Important Practical and Theoretical Aspects. *Inter Metalcast* 2, 19–40, <https://doi.org/10.1007/BF03355425>
27. C.L. Xu, Q.C. Jiang, Y.F. Yang, H.Y. Wang, J.G. Wang. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Volume 422, (1–2), <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.03.128>
28. Qiuju Zheng, Lili Zhang, Hongxiang Jiang, Jiuzhou Zhao, Jie He (2020). Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 47, 142-151, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.021>.
29. Yu-Chou Tsai, Sheng-Long Lee & Chih-Kuang Lin (2011). Effect of trace Ce addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (AL–7SI–0.35 Mg) aluminum alloys. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 34(5), 609-616 <https://doi.org/10.1080/02533839.2011.577598>
30. Yuanhang Jiang, Huiting Zheng, Fei Liu, Haidong Zhao (2023). Effect of Zn Addition on the Microstructural Heterogeneity and Mechanical Properties of

Vacuum-Assisted High-Pressure Die Casting Al–Si–Mg–Cu alloys. *Advanced Engineering Materials*, 25: 2201457, <https://doi.org/10.1002/adem.202201457>

31. Pandey, P., Gourlay, C.M., Belyakov, S.A. et al. (2014) Eutectic Morphology of Al-7Si-0.3Mg Alloys with Scandium Additions. *Metall Mater Trans A*, 45, 4549–4560. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2395-x>

32. Jaime, R.F., Puga, H., Prokic, M. et al. (2024). Fundamentals of Ultrasonic Treatment of Aluminum Alloys. *Inter Metalcast*, 18, 2783–2807 <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01253-w>

33. Грабовий В. М. Наукові і технологічні основи електрогідроімпульсної дії на структуру і властивості виливків із сплавів на основі заліза і алюмінію: автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2007. 42 с.

34. Lebon, B., Tzanakis, I., Pericleous, K., & Eskin, D. (2019). Numerical Modelling of the Ultrasonic Treatment of Aluminium Melts: An Overview of Recent Advances. *Materials*, 12(19), 3262. <https://doi.org/10.3390/ma12193262>

35. Narizhna T. M., Donii O. M., Voron M. M. (2020). Influence of external magnetic field on structure formation of Al–Si system aluminum alloy with high iron content. *Casting processes*, 2(140), 22-29. <https://doi.org/10.15407/plit2020.02.022>

36. Kolesnichenko A. F., Podoltsev A. D. Kucheryava I. N. (1994). Action of Pulse Magnetic Field on Molten Metal. *ISIJ International*, 34 (9), 715-721, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.715>

37. Narivsky A.V., Smirnov O.M., Panarin V.E., Skorobagatko Yu.P., Goryuk M.S., Tverdokhvalov V.O., Lomakin V.M. (2021). Influence of MHD – plasma melt processing on the structure and properties of cast aluminum alloy A390. *Metal Science & Treatment of Metals*, 27 (4), 24-32. <https://doi.org/10.15407/mom2021.04.024>

38. Дубодєлов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві

системи: світовий та український досвід. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2 т. Т 2, 24-50. Київ, Академперіодика

39. Смірнов О. М., Березіна А. Л., Монастирська Т. О., Фікссен В. М., Ященко О. В., Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С., Семенко А. Ю., Карпухі Є. О., Рудь О. Д. Особливості легування та термічного оброблення високоміцних ливарних алюмінійово-мідних стопів. *Металофізика та новітні технології*. 2024. т. 46, с. 559-573.

40. Qinglei Wang, Haoran Geng, Fulan Wang, Xiangze Lin, Chongyang Wang (2016). Effect of Parameters of Thermal-Rate Treatment of Melt on Iron-Containing Phases in Alloy Al – 15% Si – 2.7% Fe. *Metal Science and Heat Treatment*, 7-8, 405-410. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-0025-5>

41. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Tsurkin V.N. (2011). Electric current treatment of liquid and crystallization alloys in casting technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 5, 456-464.

42. Tsurkin V. N., Ivanov A.V. (2022). Functional Capabilities of Electromagnetic-Acoustic Transformations in Current Mode in the Metal Melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 58 (3), 239–247. doi: 10.3103/S1068375522030139.

43. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences.

44. Ivanov, A. V., & Tsurkin, V. N. (2019). Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes. *Surf. Eng. Appl. Electrochem*, 1, 53–64.

45. Kyung-Hyun Kim, Sim Hyun Suk, Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zhdanov O.O., Gumenenko M.K., Chestnykh M.V., Degtev Yu.N. (2020). Influence of electric current treatment of B95пч aluminum alloy melt on mechanical properties and

structure of cast state taking into account additional heat treatment. *Metal and Casting of Ukraine*, 28 (4), 32-41.

46. Спосіб обробки металевого розплаву сплаву на основі алюмінію: пат. 153619 Україна. №u202301165; заявл. 21.03.2023; опубл. 26.07.2023, Бюл.№30.

47. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zaporozhets Yu.M., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 60, 31-41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>

48. Zaporozhets, Yu. M. (2024). The Novel Mathematical Model and Methodology for Computer Simulation of Magnetic Field in a Nonlinear Medium. *Sci. innov.*, 20(1), 15 – 34. <https://doi.org/10.15407/scine.20.01.015>

49. Samarskii A.A. (2001). *The Theory of difference schemes*. New York. CRC. Press. (1st Edition). <https://doi.org/10.1201/9780203908518>

50. Davies A.J. (2011). *The Finite Element Method. An Introduction with Partial Differential Equations* (2nd Edition). 308 p.

51. O.C, Zienkiewicz & Taylor, R. & Zhu, J. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands

52. G. Kron (1945). Numerical Solution of Ordinary and Partial Differential Equations by Means of Equivalent Circuits. *Journal of applied physics*, 16, 172 172-186.

53. Casper, T., Duque, D., Schöps, S. *et al.* (2019). Automated netlist generation for 3D electrothermal and electromagnetic field problems. *J Comput Electron* 18, 1306–1332, <https://doi.org/10.1007/s10825-019-01368-6>

54. Fukushima, K.; Kabir, M.; Kanda, K.; Obara, N.; Fukuyama, M.; Otsuki, A. (2022). Simulation of Electrical and Thermal Properties of Granite under the Application of Electrical Pulse Using Equivalent Circuit Models. *Materials*, 15, 1039. <https://doi.org/10.3390/ma15031039>

55. Yamashita, Chikara & Nemoto, Koki & Ohara, Takuya. (2022). Estimation Method of Melting Volume of Current Collecting Materials under Current Flowing Condition in Electric Railway. *Tribology Online*. 17. 300-305. 10.2474/trol.17.300.
56. Q. Min, E. -P. Li and J. -M. Jin (2019). Lumped 3-D Equivalent Thermal Circuit Model for Transient Thermal Analysis of TSV Array. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Shanghai, China, 1-3, doi: 10.1109/COMPEM.2019.8779007.
57. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M., Zolotarev V.M., Bilianin R.V. (2021). Two approaches to the computation of electrothermal processes at induction heating of moving ingots – by field theory and thermal circuit theory. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 59, 5-10. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005>
58. Benmessaoud, Y., Belguerras, W., Dubas, F., Hilairret, M. (2020). 3-D Generic Magnetic Equivalent Circuit Taking into Account Skin Effect: Magnetic Field and Eddy-Current Losses. In: Zamboni, W., Petrone, G. (eds) *ELECTRIMACS 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 697. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56970-9_22
59. M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat (2021). "A Parameterized Linear 3D Magnetic Equivalent Circuit for Analysis and Design of Radial Flux Magnetic Gears–Part I: Implementation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2894-2902, Dec. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3061635.
60. Leitner, M., Leitner, T., Schmon, A. et al. (2017). Thermophysical Properties of Liquid Aluminum. *Metall Mater Trans A*, vol. 48, 3036–3045. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4053-6>
61. Ivanov, Artem. (2020). Distribution Features of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields in the Conductive Electric-Current Treatment of Melts Using

Parallel Electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 56. 327-333. 10.3103/S1068375520030072.

62. Chestnykh, M.V., Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., and Chernov, O.O. (2021). Modeling the distribution of the electric field in a metal melt by the method of distributing a conductor on elementary components, *Electromechanical and energy saving systems*, 56(4), 35-45. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.4.56.35-45

63. Zaporozhets, Yu., Ivanov, A., Kondratenko Yu., Tsurkin, V. Computer modeling of cyber-physical system based on digital twins of melt electric current treatment modes. ICST 12th International Conference Information Control Systems & Technologies, Odesa, Ukraine, 2024, pp.146-157.

64. Roger F. Harrington (1993). *Field computation by Moment Method*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.

65. Voloboev V.P., Klymenko V.P. (2020). The method of secondary sources in electrical engineering science and ill-conditioned matrices. *Mathematical machines and systems*, 4, 82-94. DOI: 10.34121/1028-9763-2020-4-82-94

66. Grynyov B.V., Gusev V.A., Redko V.V. (2003). *Innovative prospects of Ukraine*. Kharkiv: SSI "Institute for Single Crystals".

67. Tsybulov P.M, Korsun V.F. (2011). On commercialization of the researches' results by scientific institutes of Ukraine. *Science and Innovation*, 7(2), 45-53.

68. Grayson, C. J., Jr., & O'Dell, C. (1988). *American business: A two-minute warning*. Free Press. 368 p.

69. Naidek V.L. Lysenko T.V., Stanovsky O.L. (2006). Synchronizing control of heat and mass transfer processes in the “casting-mold” system. *Casting Processes*, 4, 78-83.

70. Slyn'ko G.I. (1998). Automated control system for the cast iron structuring process. *Metal and casting of Ukraine*, 3-4, 30-34.

71. Mamishev V.A. (2004). Rheothermic concept for controlling the crystalline structure of cast products. *Casting Processes*, 3, 43-48.
72. Pelykh S. G., Ponomarenko O.I., Radchenko A.A. (2001). Modeling of physical fields in casting technology control. *Casting Processes*, 3, 66-69.
73. Shynkaruk V.I., Bystrytskyi Ye.K., Bulatov M.O. (2002). *Philosophical encyclopedic dictionary*. Kyiv: H.Skovoroda Institute of Philosophy.
74. Czinkota, M. R., Kotabe, M., Vrontis, D., & Shams, S. M. R. (2021). *Marketing Management. Springer Texts in Business and Economics*. doi:10.1007/978-3-030-66916-4
75. Quality management systems: Fundamentals and vocabulary. ISO 9000:2015.
76. Litvaj I., Ponisciakova O. (2014). Entrepreneurship and quality management. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 1. 204-209. doi:10.9770/jesi.2014.1.4(2).
77. Pinchuk S.I. (2002). What do we know about qualimetry? *Theory and practice of metallurgy*, 29 (3), 69-72.
78. Zghurovsky M.Z. Pankratova N. D. (2011). *System analysis. Problems, methodology, applications*. Kyiv.
79. Starish, O.G. (2005). *Systemology*. Kyiv.
80. Jurdjevic V. (1997). *Geometric control theory*. Cambridge.
81. (1987). Handbook of automatic control theory (Ed. Krasovsky A.A.). Kyiv: Nauka.
82. Вовченко О.І., Цуркін В.М. (2004). Вимірювання імпульсних струмів і напруг при електричному розряді в рідині. Методичні вказівки. Миколаїв. 31 с.
83. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V., Degtev Yu.N., Kharytonova T.G. (2023). Experimental study of the effect on the quality indicators of castings of the simultaneous treatment of the melt with different currents. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 3 pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.021>

Додаток А

Список опублікованих праць здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Честних М.В., Цуркін В.М., Іванов А.В., Черно О.О. Моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 4/2021 (56). С. 35-45. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.4.56.35-45.

Режим доступу: https://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/04_35_45_%d7%e5%f1%f2%ed%e8%f5_%d6%f3%f0%ea%b3%ed_%b2%e2%e0%ed%ee%e2_%d7%e5%f0%ed%ee.pdf (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України).

2. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zaporozhets Yu.M., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60, pp. 31-41. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

3. Chestnykh N.V., Ivanov A.V. (2024). Simulation Modeling of the Characteristics of the Primary Electric Field at the Boundaries of a Liquid Metal Object Treated by Passing an Electric Current. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60, №4. pp. 626–632. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524700224> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

4. Іванов А.В., Честних М.В. (2024). Тривимірне моделювання особливостей розподілу електромагнітних полів та характеристик силової дії під час кондукційної електрострумової обробки розплавів у частотних режимах. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. №2 (65), с. 8-13. DOI:

<https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.1> (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України).

5. Tsurkin V.M., Chestnykh M.V., Ivanov A.V., Cherny O.O. (2025) The paradigm for building a simplified end-to-end quality management system for technical innovation in foundry production. *Science and innovation*. Vol. 2, pp. 54-63. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine21.02.054> (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Честних М.В. (2022). Результати моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції, 27-28 жовтня 2022 року (форма участі – дистанційна). https://www.nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2022/10/Innovation_2022_print_23_10_2022.pdf

7. Честних М.В. (2023). Фізичне моделювання розподілу електричного поля в металевому провіднику. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Автоматика та електротехніка”, 13-14 листопада 2023 року (форма участі – дистанційна). https://www.researchgate.net/publication/375715743_Conference_AE_2023

8. Честних М.В., Іванов А.В. (2024). Особливості розподілу електромагнітних полів у розплаві при обробці електричним струмом у частотних режимах та використанні різних електродних систем. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції, 25-26 вересня 2024 року (форма участі – дистанційна). <https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Materiali-konferencii.pdf>

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Tsurkin V.M., Ivanov A.V., Zhdanov O.O., Chestnykh M.V., Degtev Yu.N., Kharytonova T.G. (2023). Experimental study of the effect on the quality indicators of castings of the simultaneous treatment of the melt with different currents. *Metal and Casting of Ukraine*. №3, pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.021>

Додаток Б

Акт впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор Інституту імпульсних
 процесів і технологій НАН України
 Член-кор. НАНУ, д.т.н., професор

 Олександр ВОВЧЕНКО
 2025г.

АКТ

застосування результатів досліджень кандидатської дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії М.В.Честних
 “Матрична формалізація розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму”

На основі досліджень, що були проведені М.В. Честних в рамках підготовки дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії при виконанні у Науковому відділі імпульсної обробки металевих матеріалів відомчих тем, у яких здобувач був виконавцем: НДР “Дослідження процесів, що супроводжують одночасну обробку розплаву силумінів різними типами струмів, та визначення умов і параметрів електромагнітного навантаження розплаву, яке забезпечує підвищення показників якості литого металу”. Номер держреєстрації 0121U109433; НДР “Дослідження процесів електрострумової обробки ливарних сплавів на основі алюмінію під час плавлення та кристалізації, які забезпечують сприятливу морфологію залізовмісної фази та підвищення службових характеристик виливків”. Номер держреєстрації 0118U000341, НДР “Розробка гібридного методу кондукційної електрострумової та індукційної магнітно-імпульсної обробки розплаву, який забезпечить підвищення показників якості литого сплаву”. Номер держреєстрації 0124U000815, а також висновків, які представлено в дисертаційній роботі, здобувачем визначено вплив керуючих параметрів кондукційної електрострумової обробки на її ефективність та видані відповідні рекомендації щодо їх вибору.

Це надало змогу побудувати відповідну методологію, за якої при кондукційній електрострумовій обробці ливарних алюмінієвих сплавів отримано для сплаву АК7 підвищення тимчасового опору σ_b на 13%, збільшено відносне видовження δ у 1,5 рази, а відносне звуження Ψ отримано на рівні 4,4%. Для сплаву АК9М2 σ_b виріс на 10%, інтерметаліди суттєво здрібнено. Крім того розроблено відповідні технологічні модулі з енерговитратами 30 кВт·ч/т, які суттєво менше, аніж для відомих традиційних методів обробки розплаву перед заливанням у форму.

В.о. зав. Наукового відділу
 імпульсної обробки металевих матеріалів
 с.н.с., к.т.н.



Артем ІВАНОВ

Додаток В

Засоби вимірювальної техніки, що використовувалися при проведенні дисертаційних досліджень

Назва, тип прибору	Контрольована величина	Одиниця виміру	Діапазон вимірювань	Допустима похибка, клас	Діапазон очікуваних значень
Секундомір СОП пр-2а-2-010 “Агат” 4282Н ТУ 25-1819.0021-90	час	с	від 0 до 1800	кл. т. 2	від 1 до 500
Термопара хромель-алюмель, ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94)	температура	°C	від 0 до 1100	кл. т. 1	від 450 до 800
Ваги лабораторні квадрантні, ВЛК-500г-М ТУ 25-06.1101-79	маса	г	до 500	± 20 мг	до 500
Оптичний метало-графічний мікроскоп «РЕММА-102»	лінійний розмір	мкм	від 0,1 до 1000	± 5%	від 0,5 до 500
	площа	%	від 0,1 до 100	± 2%	від 0,1 до 100
Вимірювач-регулятор Овен ТРМ 202	температура	°C	від мінус 200 до плюс 1300	±0,25%	від 20 до 900
Амперметр М2001-М1 ТУ25-04-607-72	струм	А	від 0 до 100	±2,5%	до 40
Вольтметр В7-22А	напруга	В	Від 100 мкВ до 1000В	±[0.35+0.15(U _k /U _x – 1)]%	до 100 мВ
Мультиметр Ц4352	напруга	В	від 0 до 900	±1,5%	до 10
Шунт 75ШСМ	струм	А	від 0 до 100	±0,5%	до 40
Лінійка вимірювальна ДСТУ ГОСТ 427:2009	довжина	мм	від 0 до 500	ціна поділки	від 1 до 100