

УДК 621.74

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УНІВЕРСАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКОГО МЕТАЛУ

О.І. Бондар, асп., **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславець**, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ugoris@ied.org.ua

За допомогою чисельного моделювання електромагнітних процесів у системі "універсальний індуктор – рідкий метал" визначено вплив конструктивних елементів відбивної печі для алюмінію на ефективність універсального електромагнітного перемішувача рідкого металу, що по чергово створює біжуче і пульсуюче магнітні поля. На прикладі універсального тристрижневого індуктора, прилаштованого до бокової стінки печі, досліджувався вплив на нього феромагнітного кожуха печі та металеві немагнітної ніші перемішувача. Оцінка впливу цих елементів здійснювалася шляхом визначення та співставлення інтегральних електромагнітних сил і потужності тепловиділення в рідкому металі. В результаті проведеного тривимірного моделювання встановлено, що вплив феромагнітного кожуха печі є незначним (не перевищує 10 %) і ним можна знехтувати. За наявності між індуктором та рідким металом металеві ніші ефективність перемішування може зменшуватися на 15 %. При цьому спостерігаються значні електричні втрати в ній, які можуть перевищувати тепловиділення в рідкому металі. Показано, що такі втрати, а також вплив ніші на ефективність перемішування можна суттєво зменшити за допомогою секціонування (виконання розрізів) металеві ніші, а також за рахунок зменшення частоти струму живлення універсального перемішувача. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: електромагнітне перемішування, рідкий метал, універсальний індуктор, конструктивні елементи печі, чисельне моделювання.

Перемішування рідкого металу в плавильних агрегатах – важлива технологічна операція, яка дає змогу покращити якість металу, що виплавляється, підвищити продуктивність плавильного обладнання, знизити втрати металу. Нині ця операція головним чином виконується за допомогою електромагнітних перемішувачів, побудованих на основі індукторів біжучого або обертового магнітних полів [3, 6]. Відома також пропозиція використати для цього пульсуюче магнітне поле [2]. Крім того, авторами свого часу був запропонований новий спосіб електромагнітного перемішування рідкого металу за рахунок по чергової силової дії біжучого і пульсуючого магнітних полів [4]. Для цього були запропоновані так звані універсальні індуктори, що реалізують зазначений спосіб перемішування. Найбільш ефективними серед них виявилися лінійні індуктори з двома та трьома стрижнями, на кожному з яких розміщена котушка. Прилаштування таких систем до бокової стінки ванни печі дає можливість залежно від типу живлення (одно- чи багатофазного) створювати в печі відповідно дво- або одноконтурний вихровий рух металу. Чергування за часом таких вихрових структур дає змогу більш ефективно перемішувати рідкий метал за рахунок того, що застійні зони, які виникають в одному режимі живлення, перемішуються в іншому. Проведені дослідження електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів у системі "універсальний індуктор – рідкий метал" для відбивної печі, що плавить алюміній, підтвердили високу ефективність такого способу перемішування [5].

Проте треба зазначити, що такі дослідження виконувалися без врахування конструктивних елементів печі, які тією або іншою мірою впливають на розподіл поля, створеного індуктором, що, зрештою, може позначитися на ефективності перемішування рідкого металу. Одним із таких елементів, зокрема, є металевий (феромагнітний) кожух печі. На сьогодні відомі два конструктивних варіанти (рішення) прилаштування електромагнітного перемішувача до бокової стінки ванни печі. Згідно з одним із них у стінці печі вирізається вікно, в яке вставляється перемішувач. Між ним і рідким металом встановлюється керамічна плита, виготовлена, наприклад, із карбіду кремнію товщиною приблизно 50 мм. За другим варіантом у зазначене вікно вставляється металеві ніша з тонколистової нержавіючої (немагнітної) сталі,

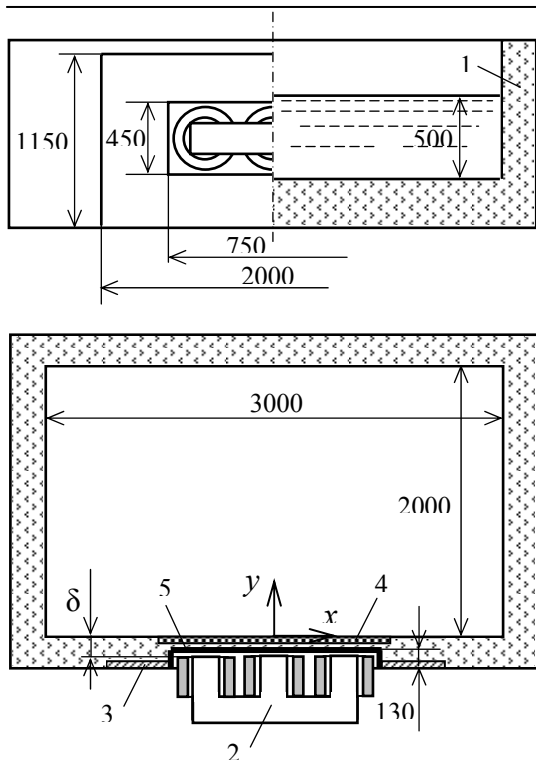


Рис. 1

На ньому позначено: 1 – ванна печі з рідким металом, 2 – універсальний індуктор, 3 – феромагнітний кожух печі, 4 – керамічна плита, 5 – металева ніша для перемішувача. За рахунок моделювання обох конструктивних рішень прилаштування перемішувача порізно досліджувалися впливи феромагнітного кожуха печі і металевої ніші перемішувача, тобто одна модель враховувала кожух печі, а інша – металеву нішу.

Обидві системи моделювалися у тривимірній постановці за безіндукційного наближення. Основні геометричні розміри їх наведено на рис. 1. У ванні печі знаходиться розплавлений алюміній об'ємом $(3 \times 2 \times 0,5) \text{ м}^3$. Розміри тристрижневого індуктора прийняті такими, як у роботі [1]. Відстань між ним і рідким металом (зазор δ) для всіх варіантів складала 0,1 м. Струмове навантаження (сумарні ампер-витки) індуктора прийнято рівним 60 кА (амплітудне значення), яке рівномірно розподілено по трьох котушках. Фазовий зсув струмів між сусідніми котушками при трифазному живленні універсального індуктора склав 120 ел. град., а при однофазному – 180 ел. град. Частота живлення в обох випадках приймалася рівною 50 Гц (за виключенням заключного розділу статті, де вона була змінною).

Вплив феромагнітного кожуха печі. В розрахунковій моделі враховувався кожух тільки однієї стінки печі, а саме стінки, до якої прилаштовано індуктор. З метою спрощення розрахунків реальний кожух печі, який насправді являє собою складний металевий каркас з обшивкою, було замінено еквівалентною металевою феромагнітною плитою. Габаритні лінійні розміри її були зменшені до такого рівня, при якому подальше їх збільшення практично не змінює вплив такої плити на електромагнітне поле системи. Еквівалентний реальному кожуху вплив зазначеної плити на поле системи можна отримати за рахунок підбору або визначення її товщини. Проте в цій роботі така задача не ставилася, її вплив тут оцінювався для різних значень товщини плити. В розрахунках враховувалася нелінійна залежність відносної магнітної провідності матеріалу кожуха, яким була сталь 1030, від напруженості магнітного поля.

У результаті проведеного таким чином моделювання отримано значення інтегральних електромагнітних сил F , що виникають у рідкому металі, а також потужностей тепловиділення в рідкому металі P_m і кожусі P_k печі залежно від товщини плити (умовного кожуха) Δ_k . На рис. 2 наведено зазначені залежності для двох режимів живлення перемішувача – однофазного (пунктирні криві) і трифазного (суцільні криві). Всі дані на

у яку в свою чергу поміщається перемішувач. Між нішею і рідким металом знаходиться тонкий шар теплоізоляції (футерування). За першим варіантом на електромагнітне поле перемішувача вплив здійснює тільки кожух печі, а за другим – і кожух, і металева ніша. Дослідженню впливу на ефективність універсального перемішувача саме таких двох елементів і присвячена ця стаття.

Мета роботи – на основі моделювання електромагнітних процесів у системі "універсальний індуктор – рідкий метал" визначити вплив конструктивних елементів відбивної печі для алюмінію на ефективність універсального електромагнітного перемішувача рідкого металу, який по чергово створює в печі біжуче і пульсуюче магнітні поля.

Дослідження проводилися на прикладі універсального тристрижневого індуктора, прилаштованого до бокової стінки печі симетрично як за довжиною, так і за висотою металу, що знаходиться у ванні печі (рис. 1). На цьому рисунку умовно показано обидва варіанти прилаштування індуктора, тобто з керамічною плитою і металевою нішею.

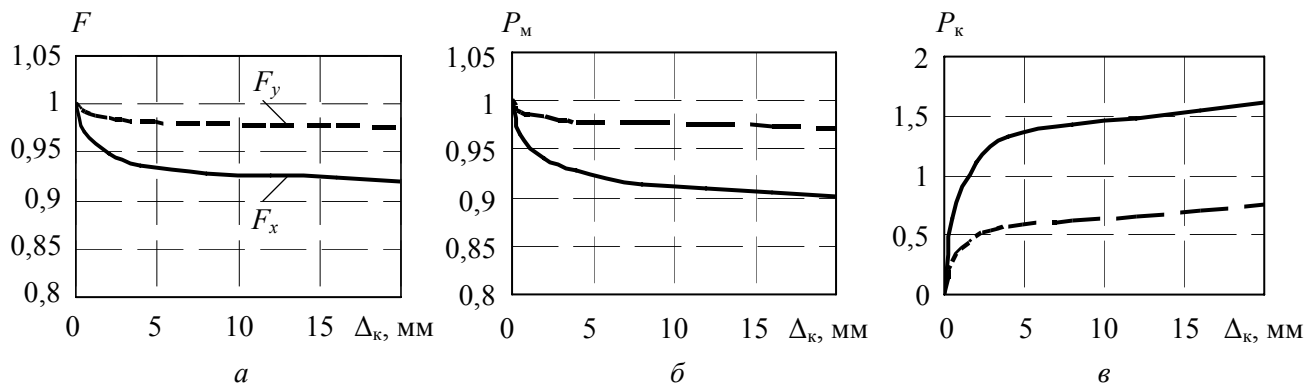


Рис. 2

цьому рисунку представлені у відносному вигляді. За базові значення прийнято значення відповідних величин у відсутності феромагнітного кожуха за виключенням потужності тепловиділення (втрат) у кожусі, яка була віднесена до потужності тепловиділення в рідкому металі у відсутності кожуха. З усіх трьох наявних компонент електромагнітних сил на рис. 2 а для кожного режиму представлена тільки одна (основна) компонента, а саме для трифазного режиму живлення, за яким у ванні печі створюється біжуче магнітне поле, що викликає одноконтурний рух рідкого металу. Такою є тангенціальна сила F_x , а у випадку однофазного режиму основною компонентою є нормальна сила F_y , яка за рахунок пульсуючого магнітного поля створює у ванні печі двоконтурний рух рідкого металу.

Аналіз даних, наведених на цьому рисунку, показує, що вплив феромагнітного кожуха печі на електромагнітне поле універсального перемішувача в цілому незначний. Так, у режимі однофазного живлення наявність кожуха печі зменшує силу F_y і потужність тепловиділення в рідкому металі P_m всього на декілька відсотків. Дещо більше зменшення цих величин спостерігається у випадку трифазного живлення. Проте і при такому живленні воно не перевищує 10 %. Що стосується залежностей цих величин від товщини плити Δ_k , то згідно з рис. 2, починаючи з товщини, яка є близькою до глибини проникнення електромагнітного поля у феромагнітну плиту, подальше збільшення Δ_k практично уже мало впливає на них, хоча втрати в плиті (кожусі) P_k зі збільшенням її товщини дещо зростають (див. рис. 2 в).

Вплив металевої ніші перемішувача. Як було зазначено вище, металеву нішу для перемішувача зазвичай виконують із нержавіючої немагнітної сталі. В розрахунках прийнято, що вона виконана із сталі 1X18N9T, лінійні розміри її позначені на рис. 1. Моделювання цієї системи проводилося для різної товщини Δ_n листової сталі, з якої виготовлено нішу.

По аналогії з кожухом печі оцінка впливу металевої ніші проводилася на основі визначення інтегральних електромагнітних сил F , що діють на рідкий метал, а також потужностей тепловиділення в рідкому металі P_m та в ніші перемішувача P_n . На рис. 3 наведено отримані в результаті моделювання залежності цих величин (у відносному вигляді) від товщини стінки ніші Δ_n (на рисунку вони позначені товстими лініями). По аналогії з рис. 2 суцільні криві тут відносяться до режиму трифазного живлення, а пунктирні – до однофазного. Порівнюючи ці дані з даними рис. 2, слід зазначити, що в цілому екрануючий вплив металевої ніші виявився більш суттєвим у порівнянні з кожухом печі. Так як і у випадку з кожухом, металева ніша дещо сильніше впливає на роботу перемішувача в режимі біжучого магнітного поля, тобто при трифазному живленні, ніж при однофазному. Слід також звернути увагу на більш суттєві втрати в ніші у порівнянні з кожухом печі. Починаючи приблизно з товщини $\Delta_n = 1$ мм, вони перевершують потужність тепловиділення в рідкому металі, яка у відсутності ніші за прийнятих вихідних даних приблизно складає 4,5 кВт у випадку трифазного живлення і 6,4 кВт в однофазному режимі. Зрозуміло, що з метою скорочення цих втрат, а також зменшення впливу ніші на роботу універсального перемішувача товщина її стінки Δ_n має бути якомога меншою.

Суттєвого зменшення зазначеного впливу, а також втрат у цьому конструктивному елементі печі можна досягти за рахунок виконання у ньому розрізів, які зменшують вихрові

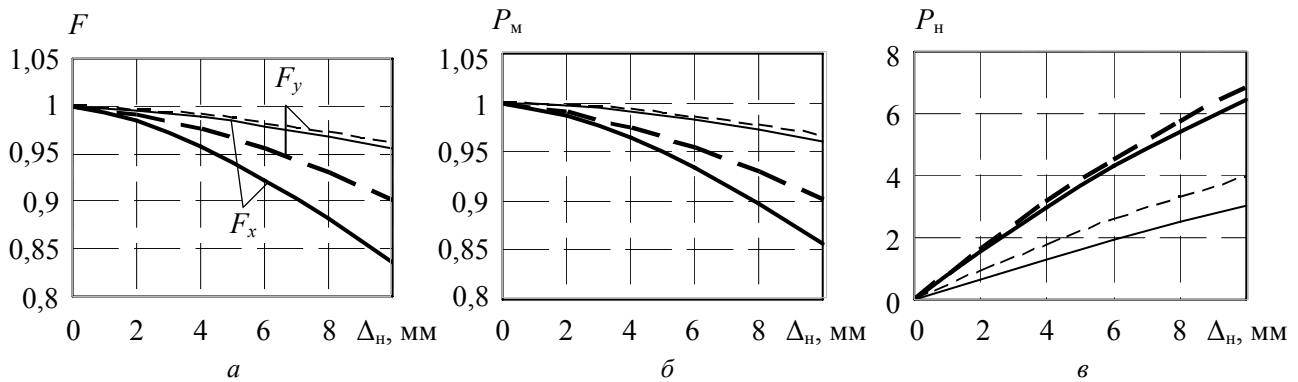


Рис. 3

струми, що в ньому наводяться. Цього можна досягти насамперед за рахунок розрізу, який знаходиться в перерізі, що проходить через осі всіх трьох котушок, тобто розділяє нішу за висотою на дві рівні половини. Саме для такого варіанту виконання ніші було проведено моделювання системи, результати якого представлені на тому ж рис. 3 більш тонкими (суцільними і пунктирними) кривими. Порівнюючи результати моделювання системи з нішею у відсутності розрізу і нішею з розрізом, слід зазначити, що втрати у ніші у другому випадку виявилися суттєво меншими (рис. 3 в). Наявність розрізу дала можливість зменшити втрати приблизно у два рази. Що стосується екрануючого впливу ніші на рідкий метал, який можна оцінити за рівнем електромагнітних сил, що розвиваються в металі, та потужності тепловиділення в ньому, то, як видно з рис. 3 а, б, використання металевої ніші з розрізом мало впливає на інтегральні показники універсального перемішувача. Інтегральні електромагнітні сили і потужність тепловиділення в рідкому металі за наявності такої ніші для обох режимів живлення зменшуються всього на декілька відсотків.

На завершення зупинимось на питанні впливу розглянутих конструктивних елементів відбивної плавильної печі на роботу універсального перемішувача рідкого металу залежно від частоти струму живлення. Це важливо знати з тієї точки зору, що у багатьох випадках електромагнітні перемішувачі рідкого металу живляться струмами низької частоти. Оскільки екрануючий вплив конструктивних елементів печі при зниженні частоти має зменшуватися, то розглядати вплив кожуха печі на електромагнітне поле перемішувача при низькій частоті недоцільно, адже навіть на частоті 50 Гц він виявився незначним. Що стосується металевої ніші, то важливим тут у першу чергу постає питання, яким чином частота живлення впливає на втрати в ній.

Для розгляду цього питання моделювалася система з металевою нішею без розрізу, товщина стінки Δ_n якої склала 4 мм. На рис. 4 представлені результати цього моделювання у вигляді залежностей від частоти живлення ν інтегральних електромагнітних сил F (рис. 4 а), потужності тепловиділення в рідкому металі P_m (рис. 4 б) та втрат у ніші перемішувача P_n (рис. 4 в). Як і раніше, ці результати представлені у відносному вигляді. З отриманих таким чином даних випливає, що зі зменшенням частоти вплив металевої ніші на основні інтегра-

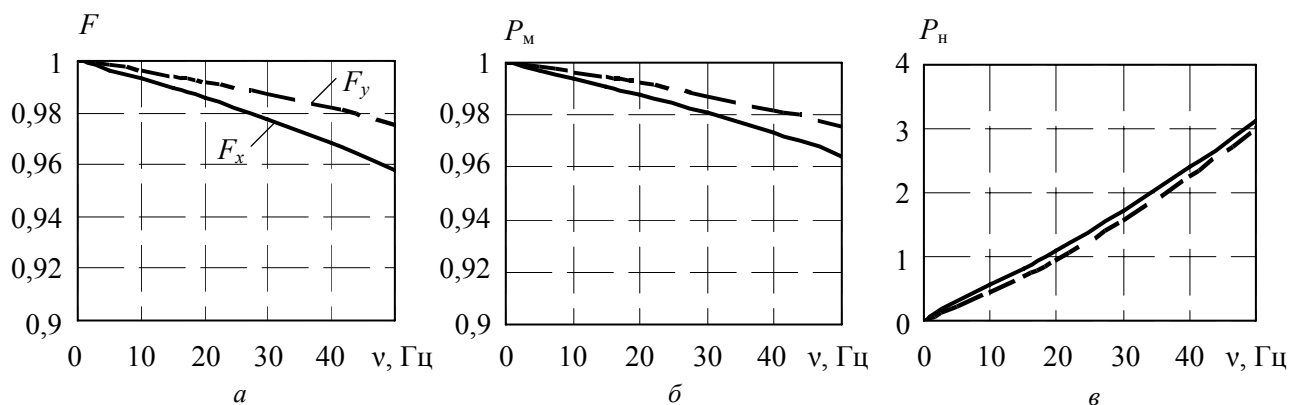


Рис. 4

льні параметри універсального перемішувача рідкого металу зменшується. На частотах $\nu \leq 10$ Гц впливом конструктивних елементів плавильної печі на ефективність електромагнітного перемішувача рідкого металу взагалі можна знехтувати. При низьких частотах суттєво також зменшуються електричні втрати, що виділяються у ніші перемішувача. При $\nu < 10$ Гц вони стають меншими потужності тепловиділення в об'ємі розплаву.

Висновки. 1. У практичному плані впливом металевого (ферромагнітного) кожуха плавильної печі на ефективність універсального електромагнітного перемішувача рідкого металу можна знехтувати.

2. Суттєвого зменшення впливу металеві ніші, в яку вставляється перемішувач, на його ефективність, а також зменшення втрат у ній можна досягти за рахунок секціонування її, тобто виконання розрізів стінок ніші, які зменшують вихрові струми в ній, а також за рахунок зменшення частоти живлення перемішувача.

1. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславець Ю.М. Моделирование физических процессов у пічному агрегаті з електромагнітним перемішуванням рідкого металу // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 92–94.
2. Дубоделов В.И., Фикссен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
3. Тур Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.
4. Пат. 89970 Україна, МПК F27D 27/00. Спосіб електромагнітного перемішування рідкого металу / Ю.М. Гориславець, О.І. Глухенький, В.Ю. Максименко, А.В. Токаревський; Власник Інститут електродинаміки НАН України. – № u291313053; Заявл. 11.11.2013; Опубл. 12.05.2014. – Бюл. № 9.
5. Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of travelling and pulsating magnetic fields // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 605–608.
6. *Non ferrous casting: Equipment MHD Technology.* – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

УДК 621.74

А.И. Бондар, асп., **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Влияние конструктивных элементов плавильной печи на эффективность универсального электромагнитного перемешивателя жидкого металла

С помощью численного моделирования электромагнитных процессов в системе "универсальный индуктор - жидкий металл" определено влияние конструктивных элементов отражательной печи для алюминия на эффективность универсального электромагнитного перемешивателя жидкого металла, поочередно создающего бегущее и пульсирующее магнитные поля. На примере универсального трехстержневого индуктора, пристыкованного к боковой стенке печи, исследовалось влияние на него ферромагнитного кожуха печи и металлической немагнитной ниши перемешивателя. Оценка влияния этих элементов осуществлялась путем определения и сопоставления интегральных электромагнитных сил и мощности тепловыделения в жидком металле. В результате проведенного трехмерного моделирования установлено, что влияние ферромагнитного кожуха печи незначительно (не более 10 %) и им можно пренебречь. При наличии между индуктором и жидким металлом металлической ниши эффективность перемешивания может уменьшаться на 15 %. При этом наблюдаются значительные электрические потери в ней, которые могут превышать тепловыделение в жидком металле. Показано, что такие потери, а также влияние ниши на эффективность перемешивания можно существенно уменьшить с помощью секционирования (выполнения разрезов) металлической ниши, а также за счет уменьшения частоты тока питания универсального перемешивателя. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: электромагнитное перемешивание, жидкий металл, универсальный индуктор, конструктивные элементы печи, численное моделирование.

O.I. Bondar, O.I. Glukhenkyi, Y.M. Goryslavets

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The influence of structural elements of melting furnace on efficiency of versatile electromagnetic stirrer of liquid metal

With the help of numerical modelling of electromagnetic processes in system "versatile inductor – liquid metal" the influence of structural elements of reflection furnace for aluminum on efficiency of versatile electromagnetic stirrer of liquid metal that alternatively creates travelling and pulsing magnetic fields have been determined. On the example of versatile three core inductor, attached to the side wall of furnace, the influence of ferromagnetic plating of furnace and metal nonmagnetic pocket of stirrer was investigated. Estimation of influence of such elements performed by the way of

determining and comparison integral electromagnetic forces and heat power in liquid metal. As a result of 3D modelling it was found that influence of ferromagnetic plating of furnace is insignificant (not exceed 10 %) and it can be neglected. In the presence of metal pocket between inductor and liquid metal the efficiency of stirring may be reduced to 15%. At the same time there are significant electrical losses in pocket which could exceed heat power in liquid metal. It is shown that such losses and also influence of pocket on efficiency of stirring can be significantly reduced with the help of sectioning (performing of cuts) of metal pocket, and also by reducing of frequency of power supply of versatile stirrer. References 6, figures 4.

Key words: electromagnetic stirring, liquid metal, versatile inductor, structural elements of furnace, numerical modelling.

Надійшла 07.09.2017

Received 07.09.2017

УДК 621.316

ОЦІНЮВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРШОГО І ДРУГОГО РОДУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ШВИДКОСТІ РУХУ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА

В.М. Кутін, докт. техн. наук, **О.Є. Рубаненко**, канд. техн. наук, **С.В. Мисенко**, канд. техн. наук
Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна
e-mail: rubanenkoAE@ukr.net

Проведено оцінку помилок першого та другого роду при визначенні швидкості руху рухомої контактної системи елегазового вимикача при використанні комбінованого методу діагностування високовольтних вимикачів та визначено ймовірність безпомилкової роботи системи діагностування. Бібл. 12, рис. 8, таблиця.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, локальні електричні системи, втрати активної потужності.

Вступ. Одними з найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичної системи, є високовольтні вимикачі. Під час виникнення аварійних ситуацій при пошкодженнях високовольтного обладнання завдання з їх локалізації в першу чергу виконують вимикачі. На сьогодні в Україні парк високовольтних вимикачів значно поповнився великою кількістю закордонних різних конструкцій і виробників, робота яких у більшості випадків залежить від технічного стану дугогасильної камери та приводу. Для визначення технічного стану вимикача використовують методи постійного та періодичного контролю [10, 12], найбільш інформативною формою представлення результатів яких є залежності швидкості руху рухомих контактів від часу. Проте їх отримання обмежено конструктивними особливостями, а саме місцями приєднання сенсорів кутового та лінійного переміщення [1, 2]. Запропоновано для визначення технічного стану дугогасильної камери і приводу використати метод накладання тестового високочастотного сигналу на коло, яке містить контакти камер елегазових вимикачів під час їх спрацювання.

Мета і задачі дослідження. При здійсненні контролю швидкості руху рухомої контактної системи відбуваються збір та обробка струму тестового високочастотного сигналу, який змінюється під час руху рухомої контактної системи. Вимірювання необхідної фізичної величини забезпечують відповідні вимірювальні канали, до складу яких входять первинні та нормуючі перетворювачі, засоби обробки та виведення вимірювальної інформації, тому отримане значення фізичної величини відрізнятиметься від дійсного за рахунок наявності похибок, які вносять елементи вимірювальних каналів [3, 9]. Найбільший вплив на результат контролю швидкості руху рухомої контактної системи мають похибки вимірювання струму тестового високочастотного сигналу, тому будемо вважати, що похибки визначення швидко-