

УДК 621.35.035: 537.84

### ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ "ІНДУКЦІЙНА КАНАЛЬНА ПІЧ – РІДКОМЕТАЛЕВИЙ НАСОС" УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ ГРАНУЛ

**О.І. Глухенький**, канд.техн.наук, **Ю.М. Гориславець**, докт.техн.наук, **А.В. Токаревський**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.  
E-mail: ugoris@ied.org.ua

*Наведено переваги використання в теорії електромагнітного поля векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів як фізичних величин. Розглянуто особливості числового моделювання електромагнітних процесів в електротехнологічних системах (установках), принцип дії яких ґрунтується на електромагнітному перетворенні енергії. На основі тривимірного комп'ютерного моделювання визначено електромагнітні параметри системи "індукційна канална піч – рідкометалевий насос" магнітогідродинамічної установки для виробництва металевих гранул та проведено співставлення отриманих результатів з експериментальними даними. Виконано розрахунковий аналіз залежностей струмів, електромагнітного тиску та активних потужностей від кута зсуву фаз між напругами, що живлять індуктор печі та електромагніт насоса цієї установки.*

Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, комп'ютерне моделювання, електромагнітна система, індукційна канална піч, магнітогідродинамічний насос.

Необхідність отримання металевих гранул у значних (промислових) обсягах призвела до розроблення та створення різноманітних пристроїв та установок для їхнього виробництва. В Інституті електродинаміки НАН України з цією метою розроблено магнітогідродинамічну установку для виробництва гранул із свинцю та його сплавів [1]. Середня продуктивність її біля 300 кг гранул на годину. Вона дозволяє отримати кулеподібні (сферичні) гранули монодисперсного складу розміром від 1,5 до 5 мм у діаметрі. Функціонально установка поєднує в собі процеси плавлення металу в індукційній каналній печі, перемішування розплаву й підтримання стабільного його рівня за допомогою рідкометалевого насоса, формування циліндричних струменів рідкого металу і подрібнення їх за допомогою електромагнітного дозатора з утворенням монодисперсних сферичних частинок розплаву та кристалізацію останніх у водяних плівках, створених спеціальним кристалізатором. Таким чином, завантажуючи в цю установку твердий метал, наприклад, у вигляді чушок, на виході її отримують готові металеві гранули.

В конструктивному відношенні зазначена установка складається з двох практично однакових за складом та незалежних одна від одної електромагнітних систем: індукційної каналної печі з рідкометалевим насосом та електромагнітного дозатора. До складу кожної з цих систем входить індуктор, заповнений рідким металом, короткозамкнений канал та електромагніт. Силова дія на метал в обох системах забезпечується за рахунок взаємодії поздовжнього струму в каналі з поперечним магнітним полем електромагніта.

Мета цієї роботи – на основі тривимірного комп'ютерного моделювання визначити енергетичні та електромагнітні параметри системи "індукційна канална піч – рідкометалевий насос" установки для виробництва металевих гранул.

Складність розрахунку зазначеної електромагнітної системи зумовлена, перш за все, суттєво тривимірним характером розподілу електромагнітного поля у ній. Крім того, він ускладнюється наявністю індуктивного зв'язку між окремими елементами системи, що не дозволяє розглядати ці елементи окремо один від одного. Моделювання такої системи з врахуванням її складної геометрії та кусково-неоднорідної структури можливе лише із залученням числових методів.

Практична необхідність моделювання таких систем при заданій напрузі вимагає якісно нового підходу щодо формулювання та розв'язання задачі розрахунку електромагнітного поля для таких систем. Таким підходом може бути використання в розрахунках векторного магнітного і скалярного електричного потенціалів з наданням їм фізичного змісту.

**Запис системи рівнянь для розрахунку електромагнітного поля через потенціали.** Як відомо, в сучасній теорії електромагнітного поля векторний магнітний  $\mathbf{A}$  та скалярний електричний  $\varphi$  потенціали переважно використовуються у вигляді допоміжних функцій, які в деяких випадках спрощують пошук рішення задачі за рахунок зменшення кількості невідомих при розрахунках. У той же час надання їм фізичного змісту дозволяє більш повно та прозоро інтерпретувати електромагнітні явища.

Зокрема, у змінному в часі електромагнітному полі тільки через скалярний електричний потенціал може бути відображена така фізична величина як електрична напруга

$$U_{12} = -\int_1^2 \text{grad}\varphi d\mathbf{l} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1)$$

При цьому контур інтегрування між двома точками в просторі вибирається довільно, а  $\oint \text{grad}\varphi d\mathbf{l} = 0$ .

Враховуючи, що переважна більшість електротехнічних установок живиться від джерел напруги, можливість прямого моделювання такої ситуації є надзвичайно важливою. Намагання представлення електричної напруги через напруженість електричного поля  $\mathbf{E}$ , на наш погляд, є помилковим. Адже інтеграл по замкненому контуру від  $\mathbf{E}$  в загальному випадку не дорівнює нулю ( $\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\partial\Phi/\partial t \neq 0$ ), а у відповідності до другого закону Кірхгофа сума напруг по замкненому контуру повинна дорівнювати нулю.

За допомогою векторного магнітного потенціалу електрорушійна сила (ЕРС) електромагнітної індукції може бути представлена як в інтегральному ( $-\oint (\partial\mathbf{A}/\partial t) d\mathbf{l}$ ), так і локальному ( $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ ) виглядах. Вважається [4], що без потенціалів неможливо прозоро та логічно описати роботу навіть простого трансформатора. Зокрема, неможливо відобразити досвід холостого ходу, коли у вторинній обмотці ЕРС електромагнітної індукції врівноважується створеною напругою. За допомогою тільки напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$ , значення якої при цьому буде близьким до нуля, ці процеси відобразити нереально.

Нарешті, використання потенціалів дозволяє отримати альтернативний вектору Пойнтінга вираз для густини потоку електромагнітної енергії [6]

$$\mathbf{S}_{A\varphi} = \varphi \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \times \mathbf{H}, \quad (2)$$

який, на відміну від традиційного вектора Пойнтінга, виключає отримання некоректних результатів. Погодження з відомими механізмами передачі енергії в провідних середовищах як при постійному, так і при змінному струмах дозволяє віддати йому перевагу.

За участі потенціалів система рівнянь, що відтворює основні електромагнітні явища, може мати, наприклад, наступний вигляд:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial\mathbf{D}/\partial t; \quad (3) \quad \text{div}\mathbf{D} = \rho; \quad (7)$$

$$\text{rot}\mathbf{A} = \mathbf{B}; \quad (4) \quad \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}; \quad (8)$$

$$\text{div}\mathbf{A} = 0; \quad (5) \quad \mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}; \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t - \text{grad}\varphi; \quad (6) \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}. \quad (10)$$

По відношенню до аналогічної загальновідомої системи рівнянь теорії електромагнітного поля різниця полягає у введенні трьох "нових" рівнянь (4)-(6) замість двох "старих"

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t; \quad (11) \quad \text{div}\mathbf{B} = 0. \quad (12)$$

Інші рівняння залишаються без змін. До того ж, виходячи з нової системи, рівняння (11) може бути отримано як похідне від рівняння (6), а рівняння (12) є прямим наслідком рівняння (4). Принагідно зазначити, що наведена система диференціальних рівнянь приблизно в такій формі з самого початку була представлена Максвелом у своїй заключній праці "Трактат про електрику та магнетизм" як основоположна система рівнянь для електромагнітного поля.

Безпосередня присутність потенціалів у "новій" системі рівнянь позиціонує їх як фізичні величини, що дозволяє при постановках задач розрахунку електромагнітного поля в електротехнічних пристроях користуватися такими прозорими фізичними поняттями як електрорушійна сила, електричний струм та електрична напруга.

Виразивши в рівнянні (3)  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{J}$  і  $\mathbf{D}$  через потенціали, отримуємо в загальному вигляді основне розрахункове рівняння для електромагнітного поля

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \sigma \operatorname{grad}\varphi + \varepsilon \frac{\partial(\operatorname{grad}\varphi)}{\partial t} = \mathbf{J}_e. \quad (13)$$

Густина зовнішнього струму  $\mathbf{J}_e$  додатково введена в праву частину рівняння (13) задля надання спільності при необхідності формулювання на практиці задач з наперед заданим (відомим) розподілом густини струму, наприклад, в багатовиткових котушках.

Розрахункове рівняння з врахуванням швидкості руху  $\mathbf{u}$  електропровідного середовища, наприклад, рідкого металу, відносно комплексних амплітуд векторного магнітного  $\dot{\mathbf{A}}$  та скалярного електричного  $\dot{\varphi}$  потенціалів матиме наступний вигляд:

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1}\operatorname{rot}\dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} - \sigma\mathbf{u} \times (\operatorname{rot}\dot{\mathbf{A}}) + (\sigma + j\omega\varepsilon)\operatorname{grad}\dot{\varphi} = \dot{\mathbf{J}}_e. \quad (14)$$

**Конструктивна будова електромагнітної системи.** Детальний опис конструкції та принцип дії магнітогідродинамічної установки для виробництва металевих гранул, моделювання якої проводиться в цій роботі, наведено в [1]. На рис. 1 показано окремий її фрагмент, а саме, електромагнітну систему у складі індукційної каналної печі і рідкометалевого насоса. Індукційна піч включає в себе канал 1 круглого поперечного перерізу діаметром 50 мм з товщиною стінки 3 мм, ванну (плавильний відсік) 2 та індуктор печі у складі безкаркасної кільцевої котушки 3 і замкненого шихтованого магнітопроводу 4. Ванна і канал печі виготовлені з нержавіючої (немагнітної) сталі. Нагрів та плавлення металу в ній здійснюється за рахунок теплової дії електричного струму  $I_{\text{кп}}$ , що наводиться індуктором в короткозамкненому контурі (каналі печі). Котушка має 98 витків, поперечний переріз магнітопроводу –  $(0,1 \times 0,1) \text{ м}^2$ .

Рідкометалевий насос установки – це відомий насос магнітодинамічного типу [3], який складається з каналу 5 та електромагніта змінного струму у вигляді котушки 6 і розімкненого феромагнітного осердя 7. Функціонально до складу насоса також належить ділянка каналу печі, що знаходиться у проміжку електромагніта. Для зменшення цього проміжку зазначена ділянка на відміну від решти каналу виконана плоскою з поперечним перерізом  $(20 \times 60) \text{ мм}^2$ . Проміжок електромагніта складає 30 мм. Котушка електромагніта в цій установці виконана каркасною, кількість її витків – 340.

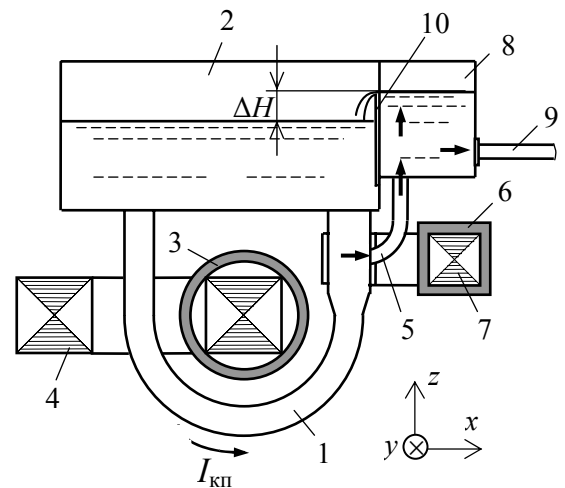


Рис. 1

Принцип дії магнітодинамічного насоса ґрунтується на взаємодії струму в каналі печі  $I_{\text{кп}}$  з магнітним полем електромагніта. Магнітодинамічний насос є фазочутливим. Ефективність його максимальна за відсутності зсуву фаз між струмом у каналі печі та індукцією магнітного поля у проміжку електромагніта. За допомогою насоса рідкий метал з каналу печі 1 через канал 5 надходить у відсік електромагнітного дозатора 8, а звідти частина металу поступає в електромагнітний дозатор (через канал 9), а інша перетікає в плавильний відсік через гідролінійну засувку (рухому перегородку) 10. Насос забезпечує напір (тиск), величина якого перевищує різницю рівнів металу  $\Delta H$  між плавильним відсіком і відсіком дозатора. При цьому надлишок розплаву, що утворюється у відсіку дозатора, перетікає в плавильний відсік через гідролінійну рухома перегородку, яка встановлюється на потрібну для роботи електромагнітного дозатора висоту. Тим самим за рахунок переливу забезпечується стабілізація рівня металу в робочому відсіку дозатора незалежно від його рівня в плавильному відсіку, де він постійно змінюється в процесі роботи в результаті витрати рідкого металу (через канал дозатора) та періодичного завантаження у ванну печі твердого металу (чушок).

**Особливості числового моделювання тривимірною електромагнітного поля.** З урахуванням обмежених обчислювальних можливостей сучасної комп'ютерної техніки 3D моделювання представленої електромагнітної системи можливе тільки за прийняття відповідних припущень. В першу чергу це стосується спрощеного представлення гетерогенних структур, якими є шихтовані магнітопроводи та багатовиткові котушки.

Шихтовані магнітопроводи (осердя) в даному випадку моделювалися неелектропровідним середовищем з постійною магнітною проникністю. Втратами на гістерезис і вихрові струми нехтувалося (вони можуть бути враховані окремо у відповідності до відомих емпіричних виразів).

Реальна неоднорідна структура котушок, що містить електропровідні (провідники) та неелектропровідні (каркас котушки, ізоляція, повітря) елементи, представлялася однорідним непровідним середовищем з рівномірно розподіленою заданою густиною струму

$$\mathbf{J}_e = \dot{I}w/S, \quad (15)$$

де  $\dot{I}$  – струм у котушці,  $w$  і  $S$  – відповідно кількість витків і площа поперечного перерізу котушки. При такому представленні в об'ємі котушки не враховуються джоулеві тепловиділення, втрачається реальний розподіл скалярного електричного потенціалу, нехтується екрануванням магнітного потоку та наведенням вихрових струмів у провідниках. Однак зберігається головне – загальна локалізація розподілу електричних струмів, що збуджують магнітне поле.

При прийнятому спрощенні у випадку розв'язання електромагнітної задачі при заданій напрузі формулюється так звана коло-польова задача. До рівняння (14) додається диференціальне рівняння балансу напруг у відповідності до другого закону Кірхгофа для активно-індуктивного кола

$$\dot{U} = \dot{I}R + j\omega\dot{\Psi}, \quad (16)$$

де  $R$  – активний опір котушки,  $\dot{\Psi}$  – її потокозчеплення. Потокозчеплення багатовиткової котушки у відповідності до методу масивного витка [2] може бути представлено як  $\dot{\Psi} = w\dot{\Psi}_{\text{MB}}$ , де  $w$  – кількість витків котушки,  $\dot{\Psi}_{\text{MB}}$  – потокозчеплення масивного витка з поперечним перерізом, що відповідає перерізу всієї котушки.

Звідси струм у котушці визначається як

$$\dot{I} = (\dot{U} - j\omega\dot{\Psi})/R, \quad (17)$$

а густина струму, як і раніше, – рівнянням (15). Таким чином, значення густини струму в котушці при цьому задається не явно, а через величину напруги та кількість витків котушки.

Розглянемо особливості завдання при чисельному 3D моделюванні джерел електромагнітного поля.

Для каркасної котушки електромагніта, витки якої мають прямокутну форму, її об'єм розбивається на чотири підобласті, в кожній з яких напрям струму є однаковим. Для кожної підобласті єдина просторова складова густини струму  $\mathbf{J}_e$  задається з необхідним для створення замкненого контуру знаком. Напрямок обходу контура може бути довільним.

Потокозчеплення такої котушки

$$\dot{\Psi} = \frac{w}{S} \sum_{i=1}^4 \int_{\Omega_i} \pm \dot{A}_j dV, \quad (18)$$

де  $\dot{A}_j$  – декартова компонента векторного магнітного потенціалу, що співпадає з напрямом струму в  $i$ -тій підобласті ( $\Omega_i$ ) котушки. Знак у підінтегральному виразі для кожної із підобластей визначається з врахуванням прийнятого напрямку обходу контура та правила скалярного множення векторів при визначенні потоку через циркуляцію векторного магнітного потенціалу ( $\Phi = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}$ ).

У випадку безкаркасної котушки індуктора печі, витки якої мають вигляд кільця, напрям густини струму  $\mathbf{J}_e$  є тангенціальним. Декартові складові густини струму в області котушки задаються наступним чином:

$$J_{ex} = -J_e \sin \alpha, \quad J_{ez} = J_e \cos \alpha, \quad (19)$$

де  $\alpha = \arctan((z - z_0)/(x - x_0))$  – полярний кут точки  $(x, z)$  в системі координат з початком у центрі котушки з координатами  $(x_0, z_0)$ , який визначається з врахуванням знаків чисельника та знаменника в аргументі арктангенса. В розбитті об'єму котушки на підобласті тут необхідності немає.

Потокозчеплення цієї котушки може бути знайдено шляхом інтегрування по об'єму котушки тангенціальної складової векторного магнітного потенціалу  $\dot{A}_t$

$$\dot{\Psi} = \frac{w}{S} \int_{\Omega_i} \dot{A}_t dV. \quad (20)$$

Зв'язок між  $\dot{A}_t$  та декартовими складовими векторного потенціалу встановлюється наступним чином:

$$\dot{A}_t = \dot{A}_z \cos \alpha - \dot{A}_x \sin \alpha . \quad (21)$$

За результатами розрахунку (отриманим розподілом векторного магнітного і скалярного електричного потенціалів) знаходилися значення електромагнітних сил у рідкому металі, а також такі інтегральні величини як напруги, струми, активна, реактивна і повна потужності для печі і насоса, потужність тепловиділення в рідкому металі та ін. Нижче наведено вирази для їхнього визначення.

Об'ємні електромагнітні сили в рідкому металі визначалися у відповідності до виразу

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re} (\dot{\mathbf{J}} \times \dot{\mathbf{B}}^*), \quad (22)$$

де  $\dot{\mathbf{J}} = \sigma(-\nabla\phi - j\omega\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{u} \times \dot{\mathbf{B}})$  – густина струму провідності в рідкому металі,  $\dot{\mathbf{B}}^*$  – спряжений комплекс індукції магнітного поля.

Потужність енергії, що виділяється в рідкому металі у вигляді тепла, визначалася шляхом об'ємного інтегрування локальних тепловиділень в об'ємі металу  $V_M$

$$P_M = \frac{1}{2} \int_{V_M} \frac{\dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{J}}^*}{\sigma} dV . \quad (23)$$

Механічна потужність, тобто потужність, що затрачується на збудження руху рідкого металу, знаходилася інтегруванням скалярного добутку електромагнітної сили на швидкість руху металу

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{V_M} (\dot{\mathbf{J}} \times \dot{\mathbf{B}}^*) \mathbf{u} dV . \quad (24)$$

Комплексна потужність печі (насоса) може бути визначена у відповідності до рівняння

$$\tilde{S} = \frac{1}{2} \int_{V_k} \frac{\dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{J}}^*}{\sigma} dV + j\omega \frac{1}{2} \int_{V_k} \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{J}}^* dV , \quad (25)$$

де  $V_k$  – об'єм відповідної котушки.

Перший доданок правої частини рівняння (25) відповідно до закону Джоуля-Ленца представляє собою активну потужність, що виділяється у вигляді теплоти в котушці індуктора чи електромагніта. У нашому випадку, коли котушки представлені непровідним середовищем з рівномірно розподіленою заданою густиною струму, втрати в них визначалися наближено у відповідності до виразу

$P_k = 0,5 \dot{I}^2 R$ , де опір котушки  $R$  обчислювався виходячи з кількості витків, середньої довжини витка, його перерізу та питомої електропровідності проводу котушки.

Другий доданок правої частини рівняння (25) в загальному випадку є комплексним числом, що має дійсну та уявну складові. Оскільки втрати в котушці зі струмом вже враховані першим доданком, дійсна частина другого доданка буде відповідати потужності енергії, що виділяється у рідкому металі, та витратам потужності на приведення його у рух. За наявності декількох індуктивно зв'язаних електричних кіл, що приєднані, як в нашому випадку, до різних джерел живлення, можливою є також передача активної потужності (енергії) з одного джерела в інше. Загальний баланс активної потужності будеться на відповідності потужності, що споживається з мережі, витратам на тепловиділення та рух.

Уявна частина другого доданка рівняння (25) представляє собою реактивну потужність. Потужністю енергії електричних зарядів у розглянутій електромагнітній системі нехтується, зважаючи на її мізерність.

Іншою можливістю визначення комплексної потужності системи є знаходження спочатку напруги у відповідності до рівняння (17) (при заданому струмі) або струму (при заданій напрузі), а вже потім обчислення потужності

$$\tilde{S} = 0,5 \dot{U} \dot{I}^* . \quad (26)$$

**Результати комп'ютерного моделювання.** Розрахунок тривимірної електромагнітної задачі в роботі проводився методом скінченних елементів за допомогою пакета мультифізичного моделювання Comsol 3.4 [5]. Геометрична модель системи "індукційна канална піч – електромагнітний насос" із скінченно-елементним сітковим розбиттям показана на рис. 2. Ця модель доповнювалася зовнішньою

областю (на рисунку не показана) у вигляді прямокутного паралелепіпеда, на поверхнях якого задавалися граничні умови електричної та магнітної ізоляції.

З метою спрощення задачі у ній не враховувалися електропровідні (феромагнітні і неферомагнітні) конструкційні елементи каркасу установки, внесок яких у розподіл електромагнітного поля попередньо оцінювався як незначний. Розрахунок виконувався в безіндукційному наближенні, тобто без врахування руху рідкого металу ( $\mathbf{u} = 0$ ). Підставою для цього була оцінка магнітного числа Рейнольдса  $Re_m$ , яка показала, що його значення для цієї системи виявилось набагато меншим одиниці ( $Re_m \ll 1$ ).

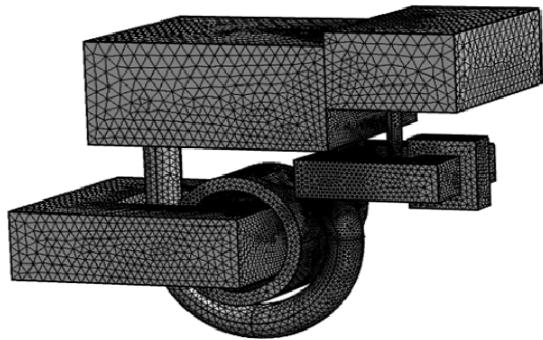


Рис. 2

У таблиці наведено отримані за окремого живлення напругою  $U$  котушок індуктора печі та електромагніта насоса розрахункові значення струму  $I$ , активної потужності  $P$  кожного елемента (печі та насоса), а також ЕДС взаємоіндукції  $E_m$ , що наводиться в розімкненій котушці одного з елементів при живленні іншого. У цій таблиці представлені також експериментальні значення цих величин, які отримані на діючій установці. Вимірювання їх здійснювалося лабораторними приладами класу 0,5.

	Піч				Насос			
	$U_n, \text{В}$	$I_n, \text{А}$	$P_n, \text{кВт}$	$E_{mn}, \text{В}$	$U_n, \text{В}$	$I_n, \text{А}$	$P_n, \text{кВт}$	$E_{mn}, \text{В}$
Розрахунок	220	49,7	10,16	13,2	220	6,61	0,092	99,4
Експеримент	220	47,8	9,76	11,9	220	5,57	0,129	107

Порівнюючи розрахункові та експериментальні значення параметрів печі, можна відзначити, що їхня відмінність знаходиться в межах 5 %, в той час як для насоса вона сягає 20-30 %. Відмінність значень ЕДС взаємоіндукції знаходиться на рівні 10 %. Вірогідним поясненням значного розходження параметрів насоса, на наш погляд, все ж таки є нехтування при моделюванні наявними конструктивними елементами установки, особливо феромагнітними, які його оточують. Вплив їх на поле електромагніта може бути суттєвим через відносно значний немагнітний проміжок та розміщення котушки (з теплових міркувань) далеко від нього (на спинці феромагнітного осердя). Зрозуміло, що врахування цих елементів при моделюванні призвело б до зменшення струму та збільшення активних втрат.

Для підтвердження цього припущення були проведені вимірювання параметрів насоса, відокремленого (ізолюваного) від установки. Для цього з установки знімався електромагніт, а в його проміжку встановлювалася шина з нержавіючої сталі, яка моделювала (імітувала) канал печі (відомо, що питома електропровідність нержавіючої сталі у твердому стані приблизно дорівнює питомій електропровідності рідкого свинцю). Розміри цієї шини в поперечному перерізі відповідали розмірам ділянки каналу печі, яка знаходиться у проміжку електромагніта. Порівняння отриманих у результаті вимірювання на такому "наосі" експериментальних даних з представленими у таблиці розрахунковими параметрами показало, що їхня розбіжність не перевищує 12 %.

З метою зменшення дисперсії металевих гранул наразі установка для їхнього виробництва оснащується додатковою системою стабілізації рівня рідкого металу в електромагнітному дозаторі, яка за рахунок фазового керування рідкометалевим насосом дозволяє підвищити точність стабілізації. З огляду на це, важливо знати, яким чином змінюються параметри електромагнітної системи в залежності від кута зсуву фаз  $\psi_U$  між напругами, що живлять піч і насос.

На рис. 3 показано розрахункові залежності струмів печі  $I_n$  та насоса  $I_n$  в залежності від кута  $\psi_U$  (в електричних градусах). Діючі значення обох напруг при моделюванні приймалися 220 В. В результаті отримано, що при зміні кута  $\psi_U$  від 0 до 360 ел. град. за рахунок взаємоіндуктивного зв'язку між елементами системи струм печі змінюється у діапазоні (47 ... 53) А, а струм насоса – у діапазоні (3,2 ... 9,2) А. Максимальні значення струмів досягаються: для печі при  $\psi_U \approx 180$  ел. град., для насоса при  $\psi_U \approx 260$  ел. град.

На цьому рисунку також представлена залежність електромагнітного тиску  $p_{em}$ , що створює магнітодинамічний насос. Цей тиск визначався шляхом інтегрування  $x$ -складової електромагнітних

сил у рідкому металі для ділянки каналу печі, що знаходиться у проміжку електромагніта. Як видно, максимальне значення електромагнітного тиску досягається при  $\psi_U \approx 70$  ел. град. З рисунка випливає також, що в розглянутій електромагнітній системі фазове керування електромагнітним тиском (від нульового до максимального значення) можливе у двох діапазонах кута  $\psi_U$ : від 300 (-60) до 70 ел. град. та від 210 до 70 ел. град.

Розрахункові залежності активних потужностей печі  $P_{\text{п}}$ , насоса  $P_{\text{н}}$  та тепловиділень у рідкому металі  $P_{\text{м}}$  від кута  $\psi_U$  показано на рис. 4. Згідно з цим рисунком у діапазоні кута від  $\sim 270$  (-90) до  $\sim 60$  ел. град. маємо від'ємні значення активної потужності насоса, що свідчить про передачу в цьому діапазоні (за рахунок взаємодукції) активної енергії від джерела живлення печі до джерела живлення насоса.

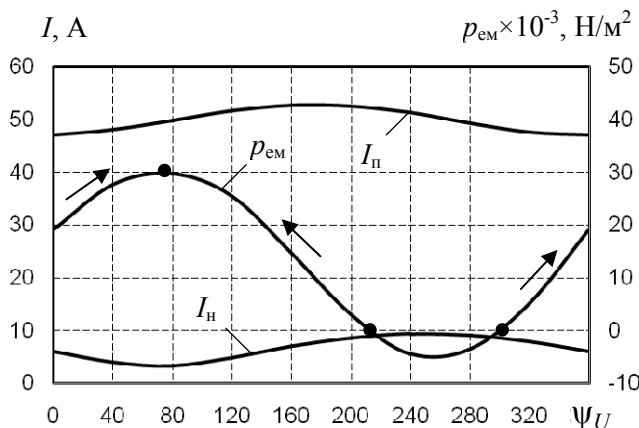


Рис. 3

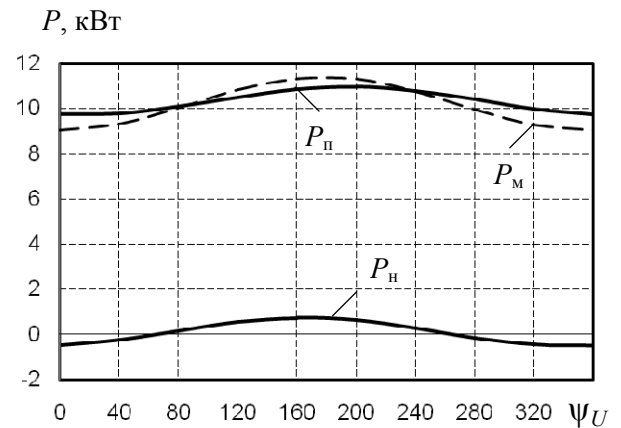


Рис. 4

При зміні кута  $\psi_U$  від 0 до 360 ел. град. потужність тепловиділення в рідкому металі змінюється в діапазоні (9,02 ... 11,32) кВт. У першому діапазоні фазового керування електромагнітного тиску (від -60 до 70 ел. град.) ця потужність змінюється на 0,72 кВт, що в процентному відношенні складає  $\pm 3,8\%$  при середньому рівні тепловиділень 9,38 кВт. У другому діапазоні керування (від 205 до 70 ел. град.) вона змінюється на 1,58 кВт, що складає  $\pm 7,5\%$  при середній потужності 10,53 кВт. Якщо виходити з необхідності підтримання в процесі роботи установки стабільного рівня тепловиділення, що витрачається на плавлення та підігрівання металу, перевагу слід надати першому діапазону фазового керування рідкометалевого насоса.

#### Висновки.

1. Використання потенціалів дозволяє відобразити в теорії електромагнітного поля такі фізичні величини як електрична напруга, локальна ЕРС електромагнітної індукції та запропонувати альтернативний вектору Пойнтінга вираз для густини потоку електромагнітної енергії, який виключає отримання некоректних результатів.

2. Відсутність значних розходжень розрахункових та експериментальних значень параметрів індукційної каналної печі магнітогідродинамічної установки для виробництва металевих гранул свідчить про те, що прийняття при моделюванні безіндукційного наближення та припущень відносно спрощеного відображення гетерогенних структур (котушок, магнітопроводів) можна вважати допустимими.

3. Дещо вищі розбіжності параметрів насоса установки, електромагніт якого має розімкнене осердя з відносно великим немагнітним проміжком, виникають внаслідок нехтування при моделюванні оточуючими феромагнітними конструктивними деталями установки, що створюють додаткові шляхи для замикання магнітних потоків розсіювання навколо котушки електромагніта.

4. При фазовому керуванні електромагнітним тиском насоса установки діапазон зміни фазового кута напруги живлення його електромагніта (по відношенню до напруги індуктора печі) доцільно вибирати в межах від -60 до 70 ел. град.

1. Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Михальський В.М., Токаревський А.В. Установка для електромагнітного дозування рідкого металу підвищеної продуктивності // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 74–80.

2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

3. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К., Дубоделов В.И., Погорский В.К., Тrefняк В.А. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. – К.: Наук. думка, 1989. – 256 с.
4. Поливанов К.М. К 100-летию "Трактата об электричестве и магнетизме" Дж.К. Максвелла // Электричество. – 1974. – № 2. – С. 1–4.
5. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>.
6. Lai C.S. Alternative choice for the energy flow vector of the electromagnetic field // Am. J. Phys. – 1981. – No. 49(9). – Pp. 841–843.

УДК 621.35.035: 537.84

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ "ИНДУКЦИОННАЯ КАНАЛЬНАЯ ПЕЧЬ – ЖИДКО-МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ НАСОС" УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ**

**А.И.Глухенький, канд.техн.наук, Ю.М.Гориславец, докт.техн.наук, А.В.Токаревский**

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. E-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)**

*Приведены преимущества использования в теории электромагнитного поля векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов в качестве физических величин. Рассмотрены особенности численного моделирования электромагнитных процессов в электротехнологических системах (установках), принцип действия которых основан на электромагнитном преобразовании энергии. На основе трехмерного компьютерного моделирования определены электромагнитные параметры системы "индукционная каналная печь – жидкометаллический насос" магнетогидродинамической установки для производства металлических гранул и проведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными. Выполнен расчетный анализ зависимостей токов, электромагнитного давления и активных мощностей от угла сдвига фаз между напряжениями, питающими индуктор печи и электромагнит насоса этой установки. Библи. 6, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, компьютерное моделирование, электромагнитная система, индукционная каналная печь, магнитодинамический насос.

**THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF SYSTEM "INDUCTION CHANNEL FURNACE - LIQUID METAL PUMP" OF INSTALLATION FOR PRODUCTION OF METAL GRANULES**

**O.I.Glukhenkyi, Yu.M.Goryslavets, A.V.Tokarevskyi**

**Institute of Elektrodynamics National Academy of Science of Ukraine**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. E-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)**

*The advantages of using of vector magnetic and electric scalar potentials in the theory of electromagnetic field as physical quantities have been presented. The features of numerical modeling of electromagnetic processes in electro-technological systems (installations), whose operation is based on electromagnetic energy conversion, have been considered. Electromagnetic parameters of system "induction channel furnace - liquid metal pump" of magnetohydrodynamic installation for production of metal granules have been defined on the basis of three-dimensional computer simulation and comparison of the results with experimental data have been performed. Numerical current dependency analysis, electromagnetic pressure dependency analysis and active powers dependency analysis depending on phase shift angle between the voltages, that feed furnace coil and electromagnet of the pump of this installation, have been done. References 6, figures 4, table 1.*

**Key words:** electromagnetic field, computer simulation, electromagnetic system, induction channel furnace, magnetodynamic pump.

1. Goryslavets Yu.M., Glukhenkyi O.I., Mykhalskyi V.M., Tokarevskyi A.V. Installation for electromagnetic batching of liquid metal with high productivity // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 74–80. (Ukr)
2. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Inductance Calculation. – Leningrad: Energoatomizdat, 1986. – 488 p. (Rus)
3. Polishchuk V.P., Gorn M.P., Dubodelov V.I., Pogorskiy V.K., Trefniak V.A. Magnetodynamic pumps for liquid metals. – Kyiv: Naukova dumka, 1989. – 256 p. (Rus)
4. Polivanov K.M. To century of "A treatise on electricity and magnetism" by J.C. Maxwell // Elektrichestvo. – 1974. – No 2. – Pp. 1–4. (Rus)
5. Comsol Multiphysics. – Available at: <http://www.comsol.com>
6. Lai C.S. Alternative choice for the energy flow vector of the electromagnetic field // Am. J. Phys. – 1981. – No 49(9). – Pp. 841–843.

Надійшла 25.12.2014  
Остаточний варіант 06.02.2015