

УДК 621.74:537.84

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДВОХ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКОГО МЕТАЛУ З ПОЧЕРГОВОЮ ДІЄЮ ПУЛЬСУЮЧОГО І БІЖУЧОГО МАГНІТНИХ ПОЛІВ

**Ю.М. Гориславець**, докт. техн. наук, **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **В.Ю. Максименко**, інж., **О.І. Бондар**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Проведено комп'ютерне 3D моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів для електромагнітних перемішувачів рідкого металу з дво- і тристрижневим магнітними осерддями, здатних створювати в ванні печі дво- і одноконтурну вихрові течії за рахунок дії пульсуючого або біжучого магнітних полів при їх відповідно одно- та багатофазному живленні. Моделювання електромагнітного поля для обох систем проводилося як при заданих струмах, так і при заданих напругах на котушках перемішувачів. Оцінка ефективності перемішувачів здійснювалася за допомогою усередненої за об'ємом ванни печі швидкості рідкого металу, а також розмірного критерію у вигляді відношення цієї швидкості до кореня квадратного з повної потужності перемішувача. Показано, що обидва перемішувачі більш ефективні в режимі біжучого магнітного поля з децю вищими показниками у тристрижневого перемішувача. В режимі пульсуючого магнітного поля, навпаки, більш ефективним виявився перемішувач з двострижневим осерддям. Для реалізації почергової зміни структури течій у ванні печі з метою більш якісного перемішування металу рекомендовано періодично міняти між собою одно- і багатофазне живлення котушок перемішувача. В останньому випадку зсув фаз між напругами сусідніх котушок має становити 120 ел. град. Бібл. 6, рис. 3, табл. 4.*

**Ключові слова:** електромагнітний перемішувач, рідкий метал, біжуче і пульсуюче магнітні поля, вихрова течія, комп'ютерне моделювання.

Перемішування рідкого металу – це важлива технологічна операція, яка виконується, зокрема, при плавленні та приготуванні металевих сплавів з метою інтенсифікації технологічних процесів та покращення якості металевих виробів. Таку операцію здійснюють в основному за допомогою три- чи двофазних електромагнітних перемішувачів, які створюють біжуче магнітне поле [5, 6]. У той же час успішну альтернативу їм можуть скласти однофазні перемішувачі рідкого металу з пульсуючим магнітним полем [4].

З метою покращення перемішування металевого розплаву в ванні відбивних печей авторами запропоновано використати почергову дію на метал біжучого і пульсуючого магнітних полів [1]. Відомо, що при дії біжучого поля в ванні печі створюється одноконтурний (в плані) вихровий рух рідкого металу, який ефективно перемішує в основному периферійні (пристінні бокові) шари металу. В центральній частині ванни у цьому випадку виникає застійна зона. У випадку пульсуючого магнітного поля створюється двоконтурна течія розплаву, яка більш ефективно перемішує саме центральну частину ванни печі. Зрозуміло, що якщо використати почергову дію біжучого і пульсуючого магнітних полів, тобто періодично чергувати в часі одно- і двоконтурну вихрові течії, то це дасть змогу більш якісно перемішувати рідкий метал у всьому об'ємі ванни печі. Застійні зони, що виникають при одному режимі роботи, будуть ефективно перемішуватися при другому режимі.

У роботі [1] проведено дослідження електромагнітного перемішувача, який здатний реалізувати зазначений спосіб перемішування металу, тобто почергово (періодично) створювати біжуче і пульсуюче магнітні поля. Електромагнітну систему такого перемішувача запропоновано створити на основі двострижневого (Π-подібного) феромагнітного осердя з двома котушками, які розміщені на стрижнях. Для такої системи виконано комп'ютерне 3D моделювання електромагнітного поля і гідродинаміки рідкого металу стосовно відбивної печі, що плавить алюміній. У результаті показано, що при живленні обох котушок від однофазної напруги в ванні печі виникає двоконтурна течія рідкого металу, а при живленні їх від на-

пруг, які зсунуті між собою на 60 ел. град., тобто при двофазному живленні, – одноконтурна течія. Визначено електромагнітні та гідродинамічні параметри такого перемішувача при роботі його в кожному режимі (для кожного режиму живлення). В результаті розв'язання нестационарної гідродинамічної задачі були також визначені характер та тривалість перехідних гідродинамічних процесів при переході від одного режиму роботи до іншого.

Створити електромагнітний перемішувач, здатний почергово реалізувати зазначені режими (структури течій), можна також на основі тристрижневого (Ш-подібного) магнітного осердя з трьома котушками. При живленні такої електромагнітної системи від однофазної напруги вона також створює в ванні печі двоконтурну вихрову течію, а у випадку трифазного живлення котушок – одноконтурну.

Мета цієї роботи – на основі комп'ютерного 3D моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів визначити електромагнітні та гідродинамічні параметри дво- і тристрижневого електромагнітних перемішувачів рідкого металу для двох режимів живлення (одно- і багатофазного), а також провести порівняльний аналіз цих конструктивних рішень. Дослідженню підлягали два перемішувачі, електромагнітні системи (індуктори) яких схематично (у двовимірному зображенні) представлено на рис. 1. Вважалось, що кожний з них пристикований до бічної стінки ванни печі, в якій знаходиться розплавлений метал (алюміній).

Моделювання електромагнітного поля для обох систем проводилося як при заданих струмах, так і при заданих напругах на котушках перемішувачів. Моделювання здійснювалося відповідно до методик чисельного тривимірного моделювання, представлених у роботі [3] (при заданих струмах) і в роботі [1] (при заданих напругах). У другому випадку розв'язувалася колопольова задача, що являє собою систему диференціальних рівнянь для векторного магнітного і скалярного електричного потенціалів, а також рівнянь балансу напруг для кожної котушки перемішувачів. У результаті розв'язання цих задач визначалися електромагнітні сили в рідкому металі, які потім використовувались як вихідні дані при розв'язанні гідродинамічних задач. Розподіл швидкості рідкого металу в об'ємі ванни печі визначався шляхом чисельного рішення стаціонарних нелінійних рівнянь Нав'є-Стокса з використанням  $k$ - $\varepsilon$  моделі турбулентності.

Оцінка ефективності обох перемішувачів для кожного режиму проводилася за допомогою усередненої по всій ванні швидкості рідкого металу  $W$ , а також за допомогою розмірного критерію  $W_s = W/S_{em}^{1/2}$ , який представляє собою усереднену швидкість, віднесена до кореня квадратного з електромагнітної потужності перемішувача  $S_{em}$  [2].

Моделювання проводилося за таких вихідних даних. Об'єм рідкого металу (алюмінію), що знаходиться в ванні печі, складає  $(3 \times 2 \times 0,5) \text{ м}^3$ . Кожний із індукторів (рис. 1) розміщений біля більшої бокової стінки ванни печі симетрично відносно металу як по довжині, так і висоті, на відстані від нього 0,1 м. Основні геометричні розміри, які позначені на рисунку, для обох індукторів приймалися однаковими. Вони склали: довжина осердя  $l = 0,6 \text{ м}$ , ширина  $b = 0,3 \text{ м}$ , висота – 0,3 м (на рисунку не показана), ширина і довжина стрижня  $b_c = 0,2 \text{ м}$  і  $l_c = 0,2 \text{ м}$ . Розміри всіх котушок однакові, їх довжина  $l_k$  дорівнює довжині стрижня  $l_c$ , а ширина поперечного перерізу  $b_k = 0,05 \text{ м}$ .

Усі розрахунки виконувалися при живленні котушок струмом промислової частоти. Для варіантів розрахунків, які виконувалися при заданих струмах, заданими приймалися сума-

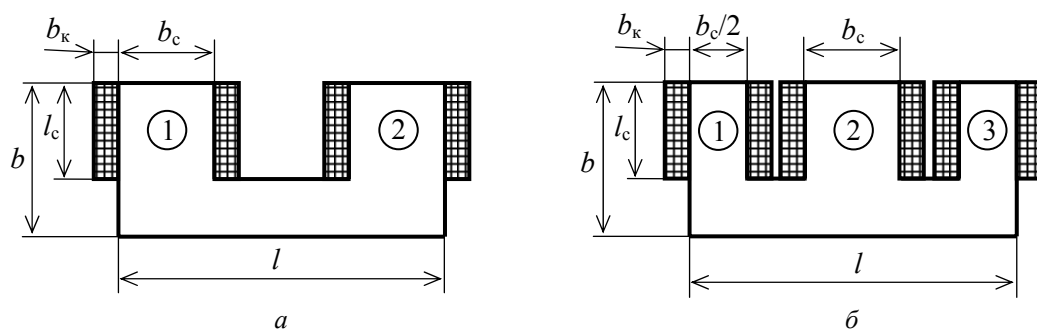


Рис. 1

рні ампервитки всіх котушок перемішувача, які рівномірно розподілялись по катушках. Було прийнято, що амплітудне значення цих ампервитків для кожного перемішувача

$\sum_{i=1}^n I_i w_i = 60 \text{ кА}$  ( $n$  – число котушок перемішувача). При цьому величина густини струму в роз-

рахунковій області котушок задавалася як  $J = I_i w_i / l_k b_k$ . У режимі пульсуючого магнітного поля струми в сусідніх катушках для обох перемішувачів були зсунуті між собою на кут  $\psi_I = 180$  ел. град., а в режимі біжучого поля розглядалися два варіанти, коли цей кут складав 60 і 120 ел. град.

У результаті проведених таким чином розрахунків з'ясовано, що обидва перемішувачі у випадку однофазного живлення ( $\psi_I = 180$  ел. град.) створюють у ванні печі двоконтурну вихрову течію рідкого металу, а при багатофазному (як при  $\psi_I = 60$  ел. град., так і при  $\psi_I = 120$  ел. град.) – одноконтурну. На рис. 2 представлено розраховані течії металу в середньому за висотою перерізу об'єму рідкого металу:  $a$  і  $б$  демонструють перемішувач з двострижневим осердям, а  $в$  і  $г$  – тристрижневий перемішувач. Представлені на цих рисунках течії отримано при одно- (рис. 2  $a$  і  $в$ ) і багатофазному (рис. 2  $б$  і  $г$ ) живленні котушок з кутом  $\psi_I = 60$  ел. град.

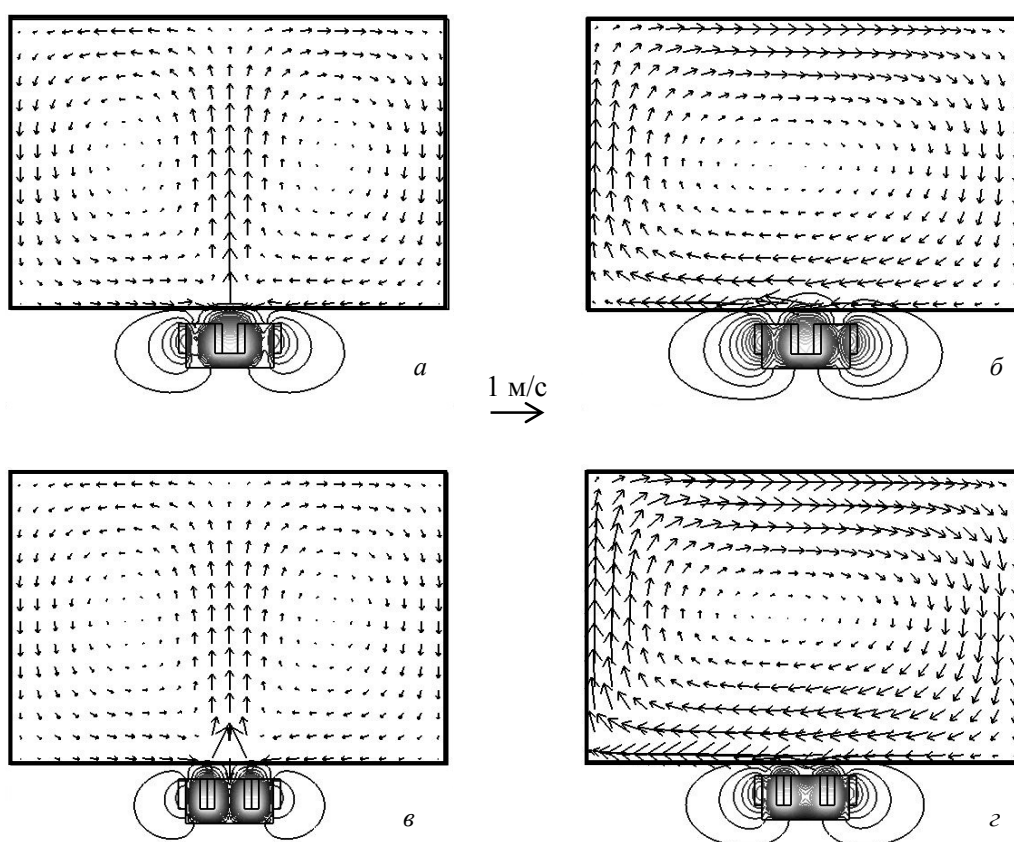


Рис. 2

У табл. 1 і 2 наведено числові значення деяких параметрів перемішувачів, які були при цьому отримані. У цих таблицях позначено:  $P$ ,  $Q$  і  $S$  – активна, реактивна і повна потужності перемішувача відповідно;  $P_m$  – потужність, що виділяється в рідкому металі у вигляді джоулевого тепла;  $B_{сер}$  – середня індукція магнітного поля в осерді. Аналізуючи дані цих таблиць, необхідно зазначити, що обидва перемішувачі більш ефективні в режимі біжучого магнітного поля (при багатофазному живленні). Це видно як за усередненою швидкістю  $W$ , так і за критерієм  $W_s$ . Якщо порівняти ці перемішувачі між собою, то в режимі пульсуючого магнітного поля більш ефективним є перемішувач з двома стрижнями, а в режимі біжучого поля – тристрижневий перемішувач. Що стосується багатофазного режиму живлення з різними фазовими кутами  $\psi_I$ , то, якщо виходити з критерію  $W_s$ , більш ефективною згідно з отриманими даними є робота обох перемішувачів при  $\psi_I = 60$  ел. град.

Таблиця 1

Режим	$\psi_l$ , ел. град.	$W$ , м/с	$W_s$ , м/(с·кВА <sup>1/2</sup> )	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$P_m$ , кВт	$B_{сер}$ , Тл
1	180	0,1	0,0054	410	18,9	409,5	14,9	0,87
2	60	0,12	0,0076	254,5	11,2	254,2	7,1	0,53
3	120	0,118	0,0062	358,1	16,4	357,7	12,3	0,77

Таблиця 2

Режим	$\psi_l$ , ел. град.	$W$ , м/с	$W_s$ , м/(с·кВА <sup>1/2</sup> )	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$P_m$ , кВт	$B_{сер}$ , Тл
1	180	0,08	0,0043	358	9	357,5	6,6	0,94
2	60	0,24	0,0185	164	6,8	163,5	4,4	0,56
3	120	0,27	0,0155	301	9,2	300,6	6,8	0,86

Моделювання електромагнітних перемішувачів при заданих напругах на котушках хоча і є більш складною задачею, але отримані при цьому результати мають більшу практичну цінність, оскільки відповідають реальному підключенню їх до промислової мережі. При розрахунках напруга на кожній котушці приймалася рівною  $U = 380$  В (ефективне значення). У режимі пульсуючого магнітного поля напруги на сусідніх котушках для обох перемішувачів були зсунуті між собою на кут  $\psi_U = 180$  ел. град., а в режимі біжучого поля розглядалися два варіанти, коли цей кут складав  $\psi_U = 60$  і  $120$  ел. град. Такі значення кутів, як відомо, може забезпечити трифазна електромережа.

Для того щоб можна було порівняти отримані результати з наведеними вище даними, для кожного варіанту підбиралася така кількість витків у кожній котушці, яка б забезпечувала приблизно рівні значення струму в кожній з них, а сумарні ампервитки всіх котушок (струмове навантаження) для кожного перемішувача складали б, як і раніше,  $\sum_{i=1}^n I_i w_i = 60$  кА.

У табл. 3 і 4 наведено результати цих розрахунків. Цифрові індекси величин у цих таблицях означають номери стрижнів для кожного перемішувача, позначені на рис. 1. Наведені дані показують, що, як і в попередньому випадку, ефективність перемішувача при однофазному живленні більша для двострижневого перемішувача, а при багатофазному – для тристрижневого. Єдина відмінність – це та, що при багатофазному живленні (у випадку біжучого поля) більш оптимальним з точки зору ефективності є живлення їх від системи напруг з кутом  $\psi_U = 120$  ел. град., а не  $60$  ел. град. Це можна пояснити тим, що, незважаючи на однакове струмове навантаження, його силова дія при заданих струмах і заданих напругах є різною за рахунок різних фазових кутів струмів. Так, наприклад, для двострижневого перемішувача при живленні його котушок від напруг з кутом  $\psi_U = 60$  ел. град. фазовий кут зсуву між струмами цих котушок складає  $\psi_l = 32$  ел. град., а не  $60$  ел. град., як це було у випадку живлення їх від заданих струмів.

На рис. 3 наведено векторні діаграми напруг і струмів у котушках для електромагнітних перемішувачів з двома (*a* і *b*) і трьома (*v* і *z*) стрижнями при багатофазному їх живленні. Рис. 3 *a* і *v* отримані при живленні котушок від напруг з кутом  $\psi_U = 60$  ел. град., а рис. 3 *b* і *z* – з кутом  $\psi_U = 120$  ел. град. Всі напруги і струми на цих рисунках представлено в одному масштабі. Видно, що за рахунок різного взаємного впливу котушок одна на одну, навіть для трикотушкової системи при живленні її від трифазної симетричної системи напруг ( $\psi_U = 120$  ел. град.), струми в котушках є суттєво несиметричними. Це призводить, як видно з табл. 3 і 4, до нерівномірного розподілу складових потужностей по котушках. Особливо це стосується активної потужності. В обох перемішувачах відбувається навіть перекачування активної енергії з однієї фази мережі до іншої. Енергія перекачується від фази мережі, що живить котушку, для якої кут між напругою і струмом складає більше  $90$  ел. град., до фази котушки, для якої цей кут є меншим  $90$  ел. град. (див. рис. 3). Таке перекачування для двострижневого перемішувача, певна річ, відбувається між фазами сусідніх стрижнів, а для тристрижневого –

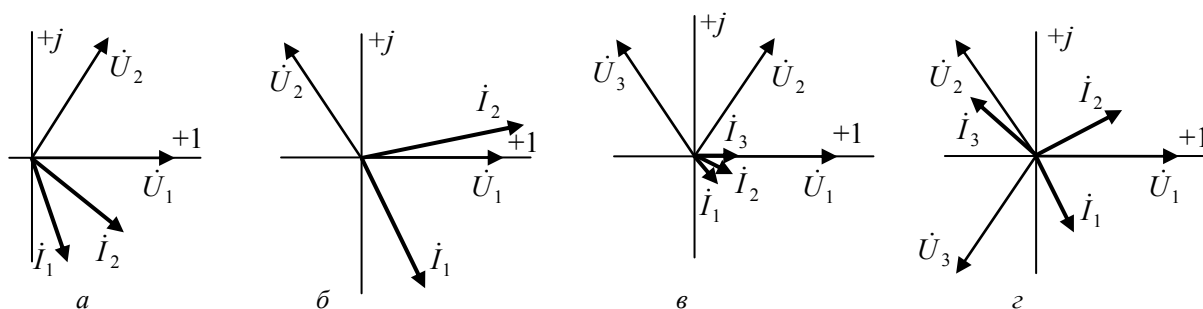


Рис. 3

між фазами, що живлять котушки, які розміщені на бокових (першому і третьому згідно з рис. 1) стрижнях. В табл. 3 і 4 активні потужності цих котушок мають різні знаки.

Таблиця 3

Режим	$\psi_U$ , ел. град.	$W$ , м/с	$W_S$ , м/(с·кВА <sup>1/2</sup> )	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт
1	180	0,111	0,0054	416,7	19,3	9,6	9,7
2	60	0,087	0,0058	222	9,6	32,6	-23
3	120	0,133	0,0077	294,4	13,2	58,5	-45,3

Продовження табл. 3

Режим	$Q$ , квар	$Q_1$ , квар	$Q_2$ , квар	$P_M$ , кВт	$V_{сер}$ , Тл	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$w_1$	$w_2$
1	416,2	416,2	208,2	15,1	0,87	579,6	550,3	39	39
2	221,9	221,9	112	5,4	0,41	302,5	302,1	71	71
3	294	294	144,1	9	0,63	412,5	411,3	52	52

Таблиця 4

Режим	$\psi_U$ , ел. град.	$W$ , м/с	$W_S$ , м/(с·кВА <sup>1/2</sup> )	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$P_3$ , кВт	$Q$ , квар
1	180	0,07	0,0041	329	8,2	2,8	2,6	2,8	328,7
2	60	0,161	0,0157	104,6	5	21,5	2,1	-18,6	104,5
3	120	0,273	0,017	256	8,7	33,5	3,6	-28,4	255,9

Продовження табл. 4

Режим	$Q_1$ , квар	$Q_2$ , квар	$Q_3$ , квар	$P_M$ , кВт	$V_{сер}$ , Тл	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$w_1$	$w_2$	$w_3$
1	109,6	109,8	109,4	5,8	0,89	289,4	290,1	288,6	56	36	56
2	31,5	39,3	33,7	2,6	0,34	100,7	103,9	101,8	140	140	140
3	80,7	90,4	84,8	6,3	0,78	230,5	239	236,2	64	54	64

Виходячи з отриманих у результаті моделювання даних, для кожного перемішувача можна рекомендувати робочі режими для реалізації почергової дії на метал пульсуючого і біжучого магнітних полів. Згідно з табл. 3 і 4 для обох перемішувачів це можуть бути режими 1 ( $\psi_U = 180$  ел. град.) і 3 ( $\psi_U = 120$  ел. град.) Оскільки при живленні їх від однакових за величиною напруг ( $U = 380$  В) числа витків у котушках на різних режимах будуть різними, доцільно виготовляти їх секційними (з відпайками) і перемикаати при переході від одного режиму до іншого.

Що стосується вибору тієї чи іншої конструкції перемішувача з метою її практичного використання, то це питання має розглядатися з врахуванням технологічних аспектів (режимів) перемішування металу в печі, технічних можливостей системи електроживлення та інших особливостей. Наведений аналіз показує, що обидва конструктивні рішення електромагнітного перемішувача можуть бути використані на практиці.

1. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Максименко В.Ю. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла с поочередным действием бегущего и пульсирующего магнитных полей // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 123–125.
2. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Максименко В.Ю., Токаревский А.В. Расчетное исследование влияния конструктивных параметров на эффективность однофазного перемешивателя жидкого металла // Пр. Ин-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2014. – Вип. 39. – С. 114–120.
3. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 77–84.
4. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
5. Тур Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.
6. *Non ferrous casting: Equipment MHD Technology.* – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

УДК 621.74:537.84

**Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук, **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **В.Ю. Максименко**, инж., **А.И. Бондарь**, инж.  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Сравнительный анализ двух конструктивных решений электромагнитного перемешивателя жидкого металла с поочередным действием пульсирующего и бегущего магнитных полей**

*Проведено компьютерное 3D моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов для электромагнитных перемешивателей жидкого металла с двух- и трехстержневым магнитными сердечниками, способных создавать в ванне печи двух- и одноконтурные вихревые течения за счет действия пульсирующего или бегущего магнитного поля при их соответственно одно- и многофазном питании. Моделирование электромагнитного поля для обеих систем проводилось как при заданных токах, так и при заданных напряжениях на катушках перемешивателей. Оценка эффективности перемешивателей осуществлялась с помощью усредненной по объему ванны печи скорости жидкого металла, а также размерного критерия в виде отношения этой скорости к корню квадратному из полной мощности. Показано, что оба перемешивателя более эффективны в режиме бегущего магнитного поля с несколько более высокими показателями для трехстержневого перемешивателя. В режиме пульсирующего магнитного поля, наоборот, более эффективным оказался перемешиватель с двухстержневым сердечником. Для реализации поочередной смены структуры течений в ванне печи с целью более качественного перемешивания металла рекомендовано периодически менять между собой одно- и многофазное питание катушек перемешивателя. В последнем случае сдвиг фаз между напряжениями соседних катушек должен составлять 120 эл. град. Библиограф. 6, рис. 3, табл. 4.*

**Ключевые слова:** электромагнитный перемешиватель, жидкий металл, бегущие и пульсирующее магнитные поля, вихревое течение, компьютерное моделирование.

**Yu.M. Horyslavets, O.I. Hluhenkyi, V.Yu. Maksymenko, O.I. Bondar**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Comparative analysis of two constructive solutions of electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of pulsing and traveling magnetic fields**

*Computer 3D modeling of electromagnetic and hydrodynamic processes for electromagnetic stirrers of liquid metal with two- or three-rod magnetic core, which are able to create in furnace bath double circuit and single circuit vortex stream due to the action of pulsing or traveling magnetic fields in case of their proper single-phase and multiphase power supply, was held. Simulation of electromagnetic field for both systems was held as for given currents and for given voltages on stirrer coils. Evaluation of the effectiveness was performed by means of averaged over the volume of the furnace bath speed of liquid metal, and of dimensional criteria as a ratio of this speed to square root of the full power of the stirrer. It is shown, that both stirrers are more effective in mode of traveling magnetic field with slightly higher indicators of three-rod stirrer. On the contrary, in mode of pulsing magnetic field two-rod stirrer is more effective. For implementation of alternate change of flows' structure in furnace bath for more qualitative metal mixing it is recommended to periodically change between themselves single-phase and multiphase power supply on stirrer coils. In the last case phase's shift between voltages of nearby coils has to be 120 el. deg. References 6, figures 3, tables 4.*

**Key words:** electromagnetic stirrer, liquid metal, traveling and pulsing magnetic fields, vortex stream, computer modelling.

Надійшла 3.11.2014

Received 3.11.2014