

В. П. Метельський, Ю. Е. Пачколін

## Електродинамічні сили в електротехнічних комплексах з індукційно-дуговим перетворення електроенергії

*Досліджені електродинамічні сили, діючі у поверхневому шарі на розплав металу для електротехнічного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електроенергії. Здійснено якісний аналіз впливу зазначених сил на прискорення розплавлювання металу під дією електромагнітних полів індуктора й електричних дуг.*

### Вступ

Існуючий електрометалургійний комплекс є надзвичайно енергоємним та малоєфективним. В останні роки приділяється велика увага вирішенню питань, які пов'язані з розробкою та створенням електротехнічного устаткування з покращеними техніко-економічними показниками роботи. Одним з нових перспективних є напрямок науково-технічних розробок для створення електротехнічного устаткування, що дозволяють заощадити енергоносії, підвищити продуктивність та підняти на якісно новий рівень систему керування технологічними процесами, а також вирішити багато техніко-економічних і екологічних задач, які не мали задовільного розв'язання іншими методами.

Необхідність у модернізації існуючих та створенні нових електроплавильних комплексів обумовлена сучасними вимогами до енергозбереження та якості готової продукції. Напрямок на покращення енергоєфективності існуючих технологічних процесів, а також на створення та використання нових більш прогресивних технологій та сучасного електроустаткування дасть змогу значно підвищити конкурентоспроможність вітчизняного металургійного та ливарного виробництва.

Як відомо, вивченням електрофізичних процесів в дугових та індукційних печах займаються як в Україні, так й за її межами. Великий вклад в розробку теорії електросталеплавлення внесли вітчизняні вчені Тельний С. І., Морозенський Л. І., Окороков М. В., Хитрик С. І., Чуйко М. М., Хасін К. М., Єгоров А. В., Швабе В., Капуста А. Б., Шамота В. П., Шидловський А. К., Борисов Б. П., Гориславець - Ю. М., Лозинський О. Ю., Подольцев А. Д., Кучаєв А. А., Марущак А. Ю. та закордонні Ernst R., Mortimer J. H., Lenguel L. L., Speith K., Ende H. та інші.

Вперше спробу удосконалення дугової сталеплавильної печі, вводячи до неї додаткове магнітне поле, здійснив проф. С. І. Тельний. Вплив додаткового магнітного поля на роботу дугової сталеплавильної печі полягав у тому, щоб поле створило електродинамічні сили, які б впливали на струм в дузі та на рідкий метал. Електродинамічні сили, що діють на дугу, здійснює відхилення її в той або інший бік. Ті ж сили, діючи на струм в рідкому металі, викликають його рух, який призводить до перемішування розплаву. Звідси й виникли два напрямки використання додаткового магнітного поля в дуговій печі: а) для впливу на електричні дуги (обертання дуг, зміну напрямку їх виведення), яке отримало загальну назву «електромагнітне керування дугами»; б) для руху металу, тобто «електромагніт-

ного (індукційного) перемішування». Додаткове магнітне поле не дозволяє дузі перекинутися на стінку водоохолоджувального кристалізатора й пропалити її, що призвело би до вибуху, при цьому інтенсивне перемішування розплавленого металу поліпшує теплопередачу в металі.

На протязі багатьох років проводилися розробка та вдосконалення електромагнітних індукторів, які створювали обертові магнітні поля. Найбільш поширені це:

1. Навколо ванни рідкого металу в горизонтальній площині за колом котушка розташовуються три або шість котушок, які живляться трифазним струмом та створюють обертове в горизонтальній площині магнітне поле, яке наводить у ванні індуквані струми. Механічна сила між потоком котушок та індукваними струмами приводить метал до руху в напрямку обертання магнітного потоку котушок. Система подібна асинхронному двигуну: котушки – статор, а рідкий метал – ротор; метал обертається в горизонтальній площині [1].

2. Конічна ванна та циліндричний вільний простір над нею, що закритий склепінням, через яке проходять три електроди: середній – вертикальний, а два крайні – нахилені з можливістю деякої зміни кута нахилу. Пічний трансформатор – двофазний, причому нахилі електроди приєднуються до виводів фаз, а середній вертикальний електрод – до нульової точки трансформатора. Завдяки можливості змінювати нахил крайніх електродів можна мати три незалежні дуги між кожним електродом та ванною або загальну незалежну дугу на бажаній висоті над ванною. Конічна ванна оточена кільцевим магнітопроводом, з трьома магнітними полюсами, які зсунуті між собою по колу на  $120^\circ$  та вупуклими всередину до ванни. На кожному полюсі насаджена плоска котушка, а на кільцевому магнітопроводі між полюсами – кільцеві котушки. Ті й інші живляться трифазним струмом стандартної частоти, й отже, створюють двополюсне магнітне поле, яке обертається в горизонтальній площині [2].

3. Статори, що розташовані під подиною дугової печі, живляться струмом зниженої частоти. Статор – двофазний, причому обмотка крайньої фази розділена на дві котушки, які розташовані на кінцях. Статор створює бігуче поле, яке, наводячи у печі індуквані струми, змушує метал в нижній частині печі рухатися за напрямом бігучого поля, а у верхній частині – в протилежний бік. Метал переміщується в горизонтальному та вертикальному напрямках [3].

В роботах [1, 2, 3] міститься інформація про застосування електромагнітного перемішування в електро-дугових печах з метою інтенсифікації процесу плавлення. Всі автори відзначають наявність позитивних результатів електромагнітного перемішування. Такі пропозиції використовують на практиці, але вони не дають можливості реалізувати всі наявні резерви підвищення ефективності роботи електропечей. А саме, за допомогою додаткових електромагнітних полів створюються електродинамічні сили в розплаві металу, які викликають його рухи в одній площині, що недостатньо для якісного перемішування та розчинення як самого металу, так й домішок.

Запропонована робота присвячена дослідженню впливу електромагнітного поля та створених ним електродинамічних сил на процес плавлення та надання особливих властивостей якості металу. Особливістю даного дослідження є визначення сумісного електромагнітного поля від електромагнітного індуктора та електричних дуг для якісного аналізу впливу електродинамічних сил на розплав металу в поверхневих шарах, які викликають його рух в тривимірному просторі.

### Математична модель

На рис. 1. показана конструкція електротехнічного комплексу з індукційно-дуговим перетворення електричної енергії в теплову, яка складається з електродів 1, індуктора 2 та магнітопроводу 3 [4].

У відповідності до конструкції, виконано аналіз процесів енергоперетворення в комплексі. В результат встановлено, що на початковому етапі (до проходження точки Кюрі) доцільно використовувати лише електромагнітний індуктор, так як він має найбільший ККД. Після проходження точки Кюрі доцільно використовувати електричні дуги для прискорення процесу розплавлення шихти. При цьому в порожнині створені відповідні умови для запалення електричної дуги (відсутня необхідність використовувати природний газ для попереднього нагрівання). При виконанні експериментальних досліджень було відмічено значне зменшення кількості аварійних ситуацій, пов'язаних з обвалами шихти, тобто під дією сил шихта відштовхується від футерування, що не дає створюватися глибоким

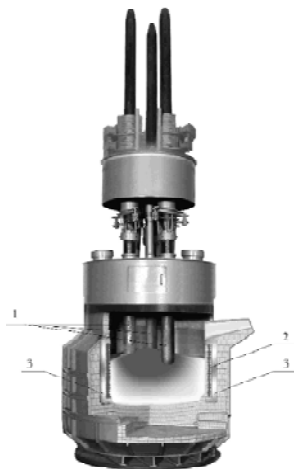


Рис. 1. Загальний вигляд електротехнічного комплексу з індукційно-дуговим перетворення електроенергії

колодязям. Після повного розчинення розплаву, для придання відповідних властивостей металу, додаються спеціальні домішки, які повинні якісно розчинитися у всьому розплаві металу. Далі наступає процес металургійної обробки (витримки) розплаву при відповідній температурі. Для цього достатньо використовувати лише індуктор.

У відповідності до запропонованого алгоритму роботи електротехнічного комплексу виконується дослідження електромагнітних процесів в поверхневому шарі розплаву металу (рідкий стан). При розробці моделі для розрахунку та аналізу електромагнітних процесів в електротехнічному комплексі використовувалися наступні вихідні припущення та положення.

1. Задача розрахунку електромагнітного поля вирішується у відповідних двовимірних просторах: окремо для індукційної (рис. 2) та дугової (рис. 3) частин. Це припущення справедливо у випадку, коли в місцях сумісного впливу в поверхневому шарі розплаву металу електромагнітні параметри набагато менші за мак-

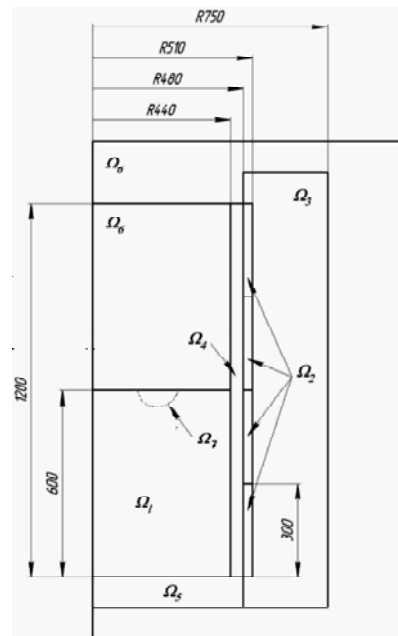


Рис. 2. Розрахункова область дослідження електромагнітних полів, створених індуктором

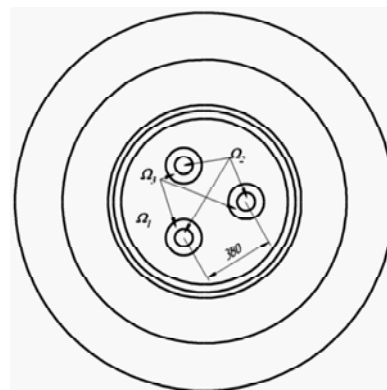


Рис. 3. Розрахункова область дослідження електромагнітних полів, створених електричною дугою

симальні значення на всьому перерізі, що досліджується та суттєво не впливають на загальний результат.

2. Струми розтікання в розплаві не враховуються, так як точка дотику електричної дуги до розплаву металу знаходиться в нижній точці колодязю, який, як відомо, має місце при дуговому способі плавлення металу. В свою чергу, переріз, в якому будуть проводитися дослідження, знаходиться між точкою дотику електричної дуги до розплаву металу та поверхнею.

3. Втрати на вихрові струми та гістерезис в магнітопроводі, а також струми зміщення та об'ємні заряди не враховувалися.

4. Розглядається випадок підключення секцій електромагнітного індуктора до однофазного змінного струму, а трьох електродів до симетричної трифазної системи змінного струму.

Розрахункова область для індукційної частини електротехнічного комплексу наведена на рис. 2 і складається з наступних підобластей:  $\Omega_1$  – розплав металу;  $\Omega_2$  – секції індуктора, виконані з водоохолоджуваної мідної труби з прямокутним перерізом;  $\Omega_3$  – шихтований магнітопровід з електротехнічної сталі;  $\Omega_4$  – керамічне не струмопровідне футерування;  $W_5$  – не струмопровідна подина;  $\Omega_6$  – повітря;  $\Omega_7$  – «колодязь», утворений електродинамічними силами. В якості початкових параметрів вибираємо миттєвий струм секції індуктора 1537,5 А при напрузі 920 В. Увімкнено дві нижні секції індуктора.

Розрахункова область для вирішення електромагнітної задачі показана на рис. 3, складається з наступних підобластей:  $\Omega_1$  – розплав металу;  $\Omega_2$  – електрична дуга між електродом та струмопровідною рідиною;  $\Omega_3$  – «колодязь», утворений електродинамічними силами. В якості початкових параметрів вибираємо симетричну мережу живлення з миттєвими струмами в фазах електричних дуг в комплексній формі: фаза  $\dot{A} - 3629 \dot{A}$ ; фаза  $\dot{B} - (-1814,5 - 3142j) \dot{A}$ ; фаза  $\dot{C} - (-1814,5 + 3142j) \dot{A}$ .

Електромагнітні процеси в таких системах описуються системою рівнянь, які складаються з рівнянь для векторного магнітного потенціалу  $\bar{A}$  [5]

Для зручності проведення досліджень електромагнітного поля здійснено перехід до безрозмірних величин, для чого вводимо характерні масштаби: магнітна індукція  $\hat{A}_0 = 2 \text{ 0e}$ , розмір  $R_0 = 440 \text{ 0i}$  (радіус циліндричної печі), швидкості  $\bar{u}_0 = \omega_0 R_0$  ( $\omega_0$  – обертова швидкість поля при живленні під промислової мережі живлення), часу  $T_0 = 1/\omega_0$  (відношення характерного розміру до характерної швидкості), густини електричного струму  $J_0 = B_0/(\mu R_0)$ , векторного магнітного потенціалу  $A_0 = B_0 R_0$  та об'ємної електродинамічної сили  $F_0 = J_0 B_0 / \rho$ . Тоді рівняння (1) перетворюється до безрозмірного виду:

$$\Delta \bar{a} = \bar{\omega} \left( \frac{\partial \bar{a}}{\partial t} - \bar{u} \times \text{rot } \bar{a} \right), \quad (2)$$

$$\bar{j} = -\bar{\omega} \left( \frac{\partial \bar{a}}{\partial t} - \bar{u} \times \text{rot } \bar{a} \right), \quad (3)$$

$$\bar{b} = \text{rot } \bar{a}, \quad (4)$$

$$\bar{f} = \bar{j} \times \bar{b}, \quad (5)$$

де  $\bar{a}$  – векторний магнітний потенціал у відносних одиницях, який складається з трьох складових: радіальної  $a_r$ , азимутальної  $a_\varphi$  та осьової  $a_z$ ;  $\bar{u}$  – безрозмірна швидкість обертання магнітного поля;  $t$  – безрозмірний час;  $\bar{j}$  – безрозмірна густина електричного струму;  $\bar{b}$  – безрозмірна магнітна індукція;  $\bar{\omega} = \mu_0 \mu \sigma \times \omega_0 R_0^2 / 1$  – відносна частота, яка має фізичний смисл квадрату відношення радіуса порожнини до глибини проникнення магнітного поля в рідкий провідник;  $\bar{f}$  – електродинамічні сили, що діють на розплав металу в безрозмірному вигляді;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна стала, Гн/м;  $\mu$  – магнітна проникливість рідини;  $\sigma$  – струмопровідність рідини.

Так як при розрахунках індукційної частини електротехнічного комплексу, згідно до рис. 2, використовуємо симетрію відносно осі (вісь Z), то для опису електродинамічних процесів достатньо задати одну  $j$ -складову векторного магнітного потенціалу  $a_\varphi(r, z, t)$ , яка залежить від радіусу  $r$ , висоти  $z$  порожнини комплексу та часу  $t$ , від якого залежить миттєвий струм, що протікає в секціях індуктора. Після проведення моделювання рівняння (2), згідно до рис. 2, за рівняннями (3) та (4) визначаємо:

$$\bar{j}_1 = \left\{ 0 \quad j_{\varphi 1} \quad 0 \right\}, \quad (6)$$

$$\bar{b}_1 = \left\{ b_{r1} \quad 0 \quad b_{z1} \right\}. \quad (7)$$

Так як при розрахунках дугової частини електротехнічного комплексу, згідно з рис. 3, використовуємо нескінченно малий за висотою переріз ( $\Delta z \rightarrow 0$ ), то для опису електродинамічних процесів достатньо задати одну  $z$ -складову векторного магнітного потенціалу  $a_z(r, \varphi, t)$ , яка залежить від радіусу  $r$ , кута  $\varphi$  порожнини комплексу та часу  $t$ , від якого залежить миттєвий струм, що протікає в секціях індуктора. Після проведення моделювання рівняння (2), згідно з рис. 3, за рівняннями (3) та (4) визначаємо:

$$\bar{j}_2 = \left\{ 0 \quad 0 \quad j_{z2} \right\}, \quad (8)$$

$$\bar{b}_2 = \left\{ b_{r2} \quad b_{\varphi2} \quad 0 \right\}. \quad (9)$$

Всі розрахунки (індукційної та дугової частин електротехнічного комплексу) виконувалися за однією математичною моделлю (1)–(3), тому для розрахунку об'ємних електродинамічних сил у поверхневому шарі розплаву металу за рівнянням (4) використовуємо наступну систему рівнянь

$$\bar{b} = \left\{ b_{r1} + b_{r2} \quad b_{\varphi2} \quad b_{z1} \right\}, \quad (10)$$

$$\bar{j} = \left\{ 0; \quad j_{\varphi1}; \quad j_{z2} \right\}. \quad (11)$$

Граничні умови для здійснення розрахунків в даній роботі визначаються конструктивними особливостями електросталеплавильних комплексів зі змінним магнітним полем. Область, в якій знаходиться розподілення електромагнітного поля, являє собою круговий циліндр, заповнений рідким провідником струму (розплавом металу). Ця область обмежена за висотою, однак у нашому випадку скінченністю висоти посуду можна знехтувати, що значно спрощує частину подальшого аналізу. Електромагнітне поле займає, як правило, значно більшу область простору печі, що складається з сукупності вкладених один в один співвісних кілець та циліндрів з різними фізичними властивостями [6]. При цьому з'являються межі розділу, на який повинні виконуватися наступні умови.

Неперервність нормальної складової вектора магнітної індукції  $B_{n1}|_r = B_{n2}|_r$ ;

Дотична складова напруженості магнітного поля на границі розділу двох середовищ (з різними електромагнітними властивостями) може змінюватися на величину, яка дорівнює лінійній густині поверхневого струму  $NI$ . Отже, якщо на деякій поверхні розподілені провідники, по яких пропускається електричний струм, то  $\bar{n} \times (\bar{H}_2 - \bar{H}_1)|_r = NI$ , де  $\bar{n}$  – одиничний вектор нормалі до границі розділу, який направлений з першого середовища в друге;  $N$  – число витків на одиницю довжини;  $I$  – сила струму;  $\bar{H}_1$  та  $\bar{H}_2$  – напруженості магнітного поля першого та другого середовища відповідно.

Граничні умови для векторного магнітного потенціалу поля  $\bar{A}$  утворюються з урахуванням умови, що  $\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}$

та  $\bar{B} = \text{rot } \bar{A}$ , звідки 
$$\bar{n} \times \left( \frac{\text{rot } \bar{A}_2}{\mu_2} - \frac{\text{rot } \bar{A}_1}{\mu_1} \right) \Big|_r = \mu_0 NI$$

З умов неперервності нормальної складової вектора магнітної індукції впливає неперервність дотичної складової векторного потенціалу магнітного поля

$$\bar{A} \text{ на границі розділу двох середовищ } A_{r1}|_r = A_{r2}|_r.$$

Наведені граничні умови записані в розмірному вигляді. Однак з них легко отримати умови для безрозмірних величин. Числовий розрахунок (для конкретних граничних умов, що відповідають рис. 1–рис. 4) рівняння (2), переведений попередньо в комплексну форму, здійснювався методом кінцевих елементів, який був реалізований в програмному пакеті Femlab 2.3 [7].

### Результати розрахунків

У відповідності до результатів чисельного моделювання методом кінцевих елементів з урахування реальних співвідношень розмірів та початкових даних, отриманих за рівнянням (2), на рис. 4 в якості ілюстрації показано розподілення електромагнітного поля у вигляді ізоліній векторного магнітного потенціалу: а – індукційна; б – дугова частини електротехнічного комплексу. Всі розміри на рис. 4, а відповідають рис. 2 та на рис. 4, б відповідають рис. 3.

Для дослідження обираються найбільш характерні перерізи: для індукційної частини, на висоті  $Z=595$  мм, при висоті розплаву металу  $Z=600$  іі (за висоту  $Z=0$  прийнята границя між розплавом металу та подиною), від осі комплексу ( $R=0$  іі – вісь) до футерування ( $R=440$  іі – границя між розплавом металу та футеруванням), який показано на рис. 4, а лінією А; для дугової частини у перерізі, який повністю відповідає перерізу в індукційній частині, від центру (осі –  $R=0$  іі) комплексу через геометричний центр відповідної фази електричної дуги ( $R=220$  іі) до футерування ( $R=440$  іі), які показані на рис 4, б лініями А, В та С відповідно. В результаті отримуємо три лінії дослідження розподілення електродинамічних сил у поверхневому шарі розплаву металу (перша лінія з координатами в циліндричній системі з точки  $[0, 0, 595]$  до точки  $[440, 0, 595]$ , друга – з точки  $[0, 120^0, 595]$  до точки  $[440, -120^0, 595]$  та третя – з точки  $[0, -120^0, 595]$  до точки  $[440, -120^0, 595]$ ).

Виходячи з результатів моделювання двох окремих частин комплексу за допомогою рівнянь (3) та (4), у відповідних перерізах, визначаються характерні параметри електромагнітного поля (магнітна індукція – рівняння (4) та густина струму – рівняння (3)), які необхідні для подальшого визначення електродинамічних сил. В результаті отримуємо розподілення модульного значення магнітної індукції в індукційній (радіаль-

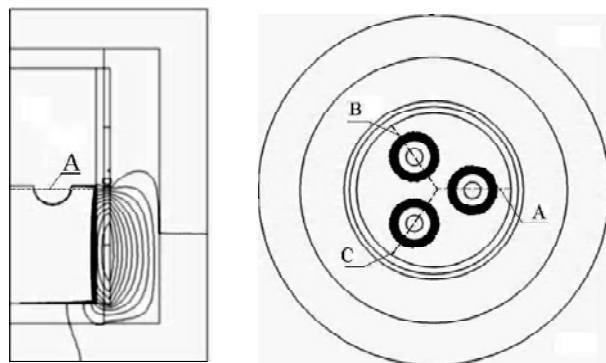


Рис. 4. Контури векторного магнітного потенціалу для індукційної (а) та дугової (б) частин електротехнічного комплексу

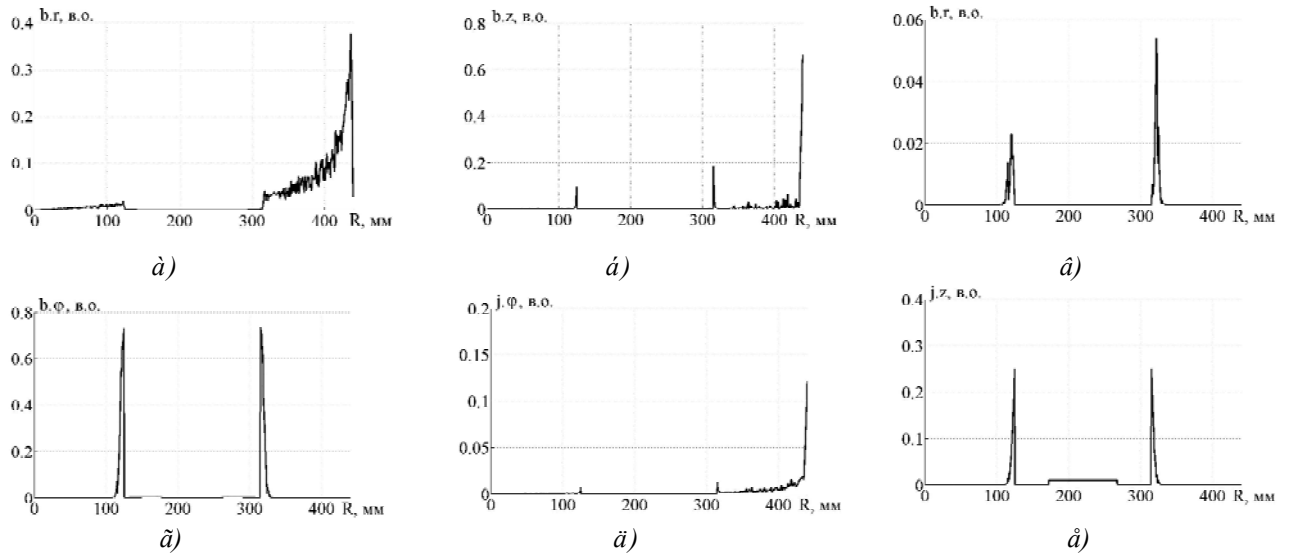


Рис. 5. Розподілення модульних значень параметрів електромагнітного поля в дуговій та індукційній частинах

на  $(b. r)$  – рис. 5, а та осьова  $(b. z)$  – рис. 5. б складові у відповідності до рівняння (7) та дуговій (радіальна  $(b. r)$  – рис. 5, в та азимутальна  $(b. \varphi)$  – рис. 5. г) складові у відповідності до рівняння (7) частинах комплексу, а також розподілення модульних значень густини струмів (в індукційній частині азимутальна складова  $(j. \varphi)$ , у відповідності до рівняння (6) – рис. 5, д та в дуговій частині осьова складова  $(j. z)$  у відповідності до рівняння (8) – рис. 5, е) відповідно.

З рис. 5 видно, що розподілення модульних значень магнітної індукції та густини струмів повністю відповідають ізолініям векторного магнітного потенціалу (рис. 4). А саме, в індукційній частині густина струму (рис. 5, д) розповсюджується в безпосередній близькості до футерування ( $R=400-440$  мм); в дуговій частині густина струму (рис. 5, е) розповсюджується в безпосередній близькості до колодязя ( $R=110-125$  мм та  $R=315-330$  мм). У відповідності до рівняння (10), накладання модульних значень радіальних складових магнітної індукції (рис. 5, а та рис. 5, в) відбувається в безпосередній близькості до колодязя. При цьому, ці значення на порядок менші за осьову складову розподілення магнітної індукції (рис. 5, б) в індукційній частині та азимутальну складову розподілення магнітної індукції (рис. 5, г) в дуговій частині комплексу.

Для подальшого визначення електродинамічних сил, формуються матриці, у відповідності до рівнянь (6)–(9) з відомих розподілень, наведених на рис. 5 та об'єднуємо у модель для визначення результуючих електродинамічних сил (рівняння (10)–(11)).

У відповідності до рівняння (5) визначаємо складові електродинамічних сил (з урахуванням того, що одночасно працює індуктор та електричні дуги, а також від електричних дуг існує явище «колодязь») в поверхневому шарі розплаву металу, який розташований між поверхнею розплаву металу ( $Z=600$  мм) та нижньою точкою «колодязя» ( $Z=510$  мм) в перерізі від осі комплексу через геометричний центр фази «А» до футерування, а саме радіальна  $f. r$  (рис. 6, а), азимутальна  $f. j$  (рис. 6, б), осьова  $f. z$  (рис. 6, в) складові та

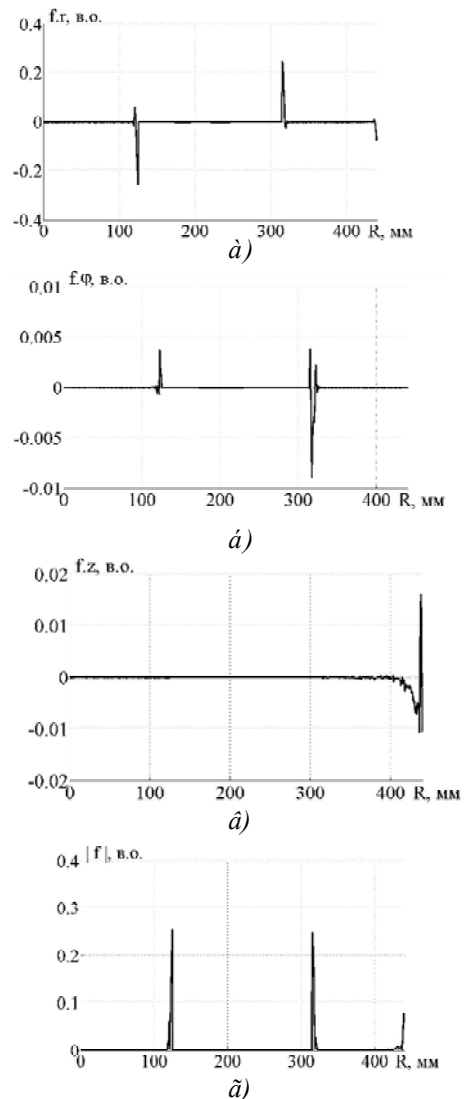


Рис. 6. Розподілення електродинамічних сил в поверхневому шарі розплаву металу через фазу «А»

модульне значення  $|f|$  (рис. 6, г). Для порівняння результатів в перерізах між іншими геометричними фазами електричних дуг (фази «А» та «Н») проводимо відповідні розрахунки (як для електричної дуги фази «А») та наводимо модульні значення електродинаміч-

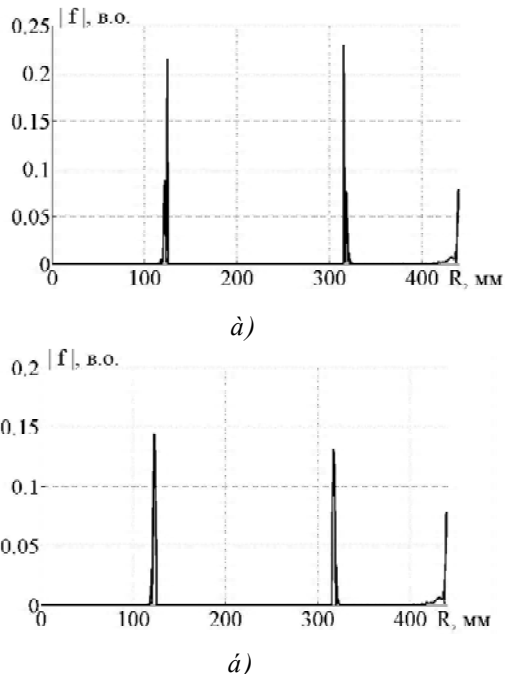


Рис. 7. Модульні значення розподілення електродинамічних сил через фази «В» та «С»

них сил (рис. 7, а та рис. 7, б відповідно).

В результаті проведених досліджень отримуємо, що радіальна та осьова складові електродинамічних сил від електромагнітного індуктора та електричної дуги, що живляться від мережі живлення частотою 50 Гц підсилюються одна за рахунок іншої і діють одночасно на розплав металу. При цьому спільною координатою індукційної та дугової частин є радіальна складова магнітної індукції. Від неї залежать азимутальна та осьова складові електродинамічних сил. В результаті в зоні накладання магнітних індукцій ( $R=315\text{--}330$  мм) зазначені електродинамічні сили дуже малі, і суттєво не впливають на результати. Ці явища досить чітко проявляються навколо «колодязя». Взаємна дія електродинамічних сил призводить до руху розплаву металу за межами області дії електродинамічних сил. Накладання цих рухів призводить до більш інтенсивного й різнонаправленого (турбулентного) руху не тільки в поверхневому шарі розплаву металу, а й всього об'єму. Азимутальна складова електродинамічних сил від електромагнітного індуктора та електричних дуг (за найменшою довжиною) залежить від взаємодії двох полів та призводить до появи різноманітних змін в структурі руху розплавленого металу, що породжує багаточисельні вторинні ефекти, один з яких це якісна інтенсифікація процесу плавлення металу та якісне перемішування розплаву, що в свою чергу призводить до очищення розплаву від газів та неметалевих включень та більш однорідної моноструктури. При цьому значно зменшується виго-

ряння металу та досягається постійне підтримання однакової температури у всьому розплаві металу. Результати моделювання підтверджуються експериментальними плавленнями в умовах ВАТ «Мотор Січ».

## Висновки

1. Встановлено розподілення електродинамічних сил в залежності від перерізів (через фази «А», «А» та «Н») в поверхневому шарі розплаву металу в електротехнічному комплексі з індукційно-дуговим перетворенням електричної енергії.

2. Визначено, що при одночасній дії індуктора й дуг присутня взаємодія радіальної та окрема дія азимутальної та осьової складових електродинамічних сил, так як вони діють окремо біля свого джерела, хоча й одночасно діють на розплав металу кожен зі свого боку, що підтверджує припущення, зроблені при визначенні теоретичної моделі для визначення електромагнітних полів та електродинамічних сил. В той же час дія цих сил викликає складні інтенсивні рухи (від індуктора утворюється відоме двозонне перемішування, шляхом відштовхування розплаву металу від футерування та від центру дуг утворюються відштовхуючі сили, утворюючи явище колодязя) на поверхні розплаву металу.

3. Запропонована методика якісного визначення розподілення електродинамічних сил може бути використана для наступного вирішення магнітогідродинамічних задач з визначення руху розплаву металу в поверхневому шарі.

4. В результаті експериментальних досліджень виявлені складні інтенсивні рухи на поверхні розплаву металу, що дають постійне перемішування в поверхневому шарі по всій порожнині печі, що значно прискорило процес плавлення та сприяло рівномірному розчиненню корисних домішок в рідкому металі з одночасним виведенням газів та неметалевих часток з металу.

5. Результати про якість металу підтверджені висновками «експрес-лабораторії», яка проводила постійний контроль розплаву під час експериментальних плавлень.

## Перелік посилань

1. Тельный С. И. Электрическая печь с вращающейся вольтовой дугой. // Инженерный работник.— 1924. — т. 1–2. — 435 с.
2. Окорков Н. В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. — М.: Metallurgizdat, 1961. — 176 с.
3. Furnace with bottom induction coil: Пат. 6693950 США, МПК7 F 27 D 23/04, H 05 B 6/34. Oleg S. Fishman, Vitaly A. Peysakovich; Inductotherm Corp. — № 10/153049; Заяв. 21.05.2002; Опубли. 02.01.2003, НПК 373/146, 373/153. — 14 с.
4. Сталеплавильный комплекс: Пат. № 6644 Україна, МПК7 С 21 С 5/00. Ю. Е. Пачколин, І. Д. Труфанов, О. С. Левада, Ю. Л. Гура, О. О Бондаренко, І. А. Андріяс, В. В. Луньов, Ю. П. Петруша, В. П. Метельський. — № 20041008595; заявл. 21.10.2004; опубл. 16.05.2005, бюл. № 5.
5. Капуста А. Б., Шамота В. П. Жидкий металл в переменном электромагнитном поле // Магнитная гидродинамика. — 1990. — № 4. — С. 131–134.

6. Капуста А. Б. Шамота В. П. Вращательное течение проводящей жидкости в переменном электромагнитном поле // Магнитная гидродинамика. – 1991. – № 4. – С. 116–119.

7. FEMLAB User's Guide and Introduction. – FEMLAB 2.3. – COMSOL, Inc., 1994–2002. – 436 p.

Поступила в редакцию 09.10.06 г.

После доработки 24.10.06 г.

*Исследованы электродинамические силы, действующие в поверхностном слое на расплав металла для электротехнического комплекса с индукционно-дуговым преобразованием электроэнергии. Осуществлен качественный анализ влияния указанных сил на ускорение расплавления металла под действием электромагнитных полей индуктора и электрических дуг.*

*The electro-dynamic forces acting in a superficial layer on metal fluid for electro-technical complex with inductor-arc transformation of the electric power are investigated. The qualitative analysis of the given forces influence on metal fusion acceleration under the action of the inductor and electric arcs electromagnetic fields is carried out.*

УДК 621.313

В. А. Волков

## Анализ стационарных электромагнитных процессов в активном преобразователе тока с широтно-импульсной модуляцией

*С применением методов обобщенных векторов и операторного изображения исследованы стационарные электромагнитные процессы для активного преобразователя тока.*

Последние годы характеризуются появлением нового вида преобразовательных устройств, предназначенных для улучшения электромагнитной совместимости существующего электротехнического оборудования с промышленной питающей сетью. Одним из таких наиболее эффективных и перспективных устройств (обеспечивающих приближение формы потребляемых из сети токов к синусоидальной, а входного коэффициента мощности электротехнического оборудования – к единице) являются активные преобразователи напряжения и тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1, 2]. Применение указанных устройств (иногда еще называемых в современной научно-технической литературе «активными фильтрами») позволяет уменьшать электрические потери в сетях электроснабжения промышленных предприятий и повысить качество сетевого напряжения. Это очень актуально в условиях происходящего удорожания электроэнергии и широкого применения электрооборудования на основе различных силовых преобразовательных устройств (выпрямителей, тиристорных преобразователей напряжения и др.), заметно искажающих сетевые токи и напряжения.

Для осуществления эффективного автоматического управления активными преобразователями с ШИМ необходимо проведение предварительного анализа электромагнитных процессов, происходящих в данных устройствах. Если электромагнитные процессы в активных преобразователях напряжения с ШИМ к настоящему времени в достаточной степени исследованы [1, 3], то для активных преобразователей тока – остаются мало

исследованными (несмотря на увеличенное внимание к данному вопросу в последние годы [2, 4, 5]).

На рис. 1 приведены электрические схемы реверсивного (а) и неререверсивного (б) активных преобразователей тока (АПТ), каждый из которых состоит из

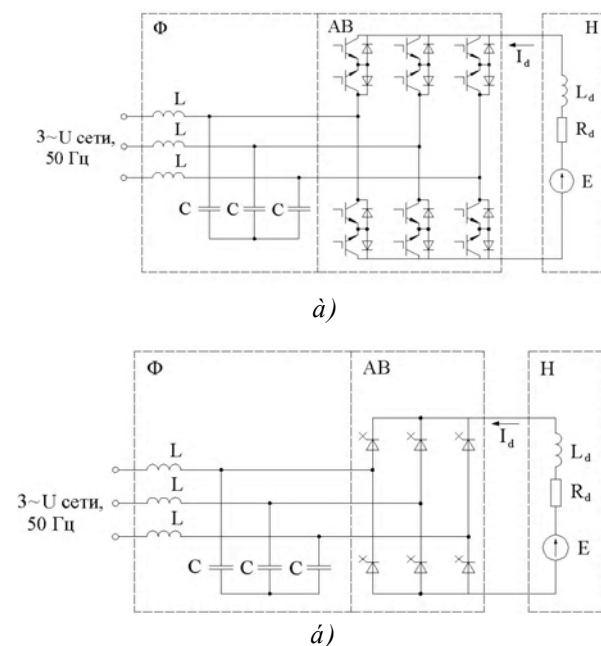


Рис. 1. Электрическая схема реверсивного (а) и неререверсивного (б) АПТ