

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПЕЧІ І АНАЛІЗ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

М.М. Гасик

Аалто Університет. 00076, м. Аалто, Еспоо, Фінляндія. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

Розглянуто модель трифазної електропечі, для якої розраховано об'ємний розподіл температури та електричного поля. Показано зони печі, в яких виникають екстремальні значення щільності струму і температури. Проведено порівняння результатів моделювання із реальними даними роботи печі потужністю 12 МВА у заводських умовах та обмірковано особливості функціонування печі при різних режимах. Бібліогр. 6, рис. 7.

Ключові слова: моделювання, піч, електричний режим, розподіл температури, щільність струму

Вступ. Рудновідновлювальні електропечі у виробництві феросплавів, штейнів, плавлених вогнетривів, шлаків та інших продуктів при високих температурах використовують струм високої потужності, працюючи у дуговому, бездуговому або змішаному електричному режимах [1, 2]. Бездуговий режим є типовим для багатошлакових процесів, де реакції протікають на поверхні розділу шлак–розплав, а електрична дуга практично відсутня. Прикладом такого процесу може бути дефосфорація марганцевого шлаку для виплавки силікомарганцю, вищих марок феромарганцю і металевого марганцю [2], процеси рафінування шлаків при виробництві міді, нікелю та металів платинової групи [3].

Незважаючи на відсутність електричної дуги у робочому об'ємі і пов'язаної з цим турбулентністю руху розплавів, аналіз таких теплових і електричних режимів печей є складною задачею, оскільки існує багато невизначених параметрів, а їхній прямий експериментальний вимір часто неможливий. Таким чином, моделювання роботи печі дозволяє оцінити і передбачити локальні значення важливих змінних (температуру, щільність струму, швидкість руху потоків металу і шлаку, кінетику хімічних реакцій тощо), якщо при моделюванні було застосовано відповідні параметри. Найкращий результат можна отримати при наявності експериментального підтвердження моделі у реальному часі, але у заводських умовах кількість даних, які реєструються, є доволі обмеженою. Раніше авторами було показано, що такі моделі можна використовувати з високою ефективністю при аналізі роботи електрокальцинаторів виробництва термоантрациту [4], де неможливо отримати прямі дані безпосередньо із об'єму кальцинатора.

З метою розробки обґрунтованої і скорельованої моделі в цьому дослідженні розглядається піч потужністю 12 МВА у бездуговому режимі, її

М.М. Гасик — <https://orcid.org/0000-0002-5782-7987>

електричні і теплові параметри, виміряні у режимі реального часу, і відповідний комп'ютерний клон (digital twin) для проведення розрахунків.

Модель печі і результати розрахунків. Модель трифазної електропечі, працюючої у режимі опору (бездуговий режим) діаметром 13 м, самозапикаючимися електродами діаметром 1100 мм і номінальною потужністю 12 МВА було побудовано за допомогою пакету COMSOL Multiphysics 5.4. Модель включає кожух печі з футеровкою, закритий колошник, об'єми розплавленого металу, шлаку і багатий коксом верхній прошарок (рис. 1). Всі матеріали мають задані рівняння тепло- і електропровідності, теплоємності, щільності тощо в залежності від температури, а для рідких фаз також додано рівняння в'язкості [5]. Тепловий режим печі у моделі впроваджено загальними диференціальними рівняннями теплопровідності і конвективного теплообміну, а електричний режим — системою рівнянь Максвелла–Ампера, де вектор щільності струму $\mathbf{J}$:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + i\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_{ext} \quad (1)$$

де $\mathbf{H}$ — вектор пружності магнітного поля; $\mathbf{E}$ — вектор напруги електричного поля; $\mathbf{v}$ — швидкість руху електропровідного середовища; $\mathbf{B}$ — вектор магнітної індукції; $\mathbf{D}$ — вектор електричного зміщення; $i = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ — кругова частота поля ($f = 50$ Гц); $\mathbf{J}_{ext}$ — щільність зовнішнього струму (у даному випадку відсутня); σ — електропровідність середовища. Диференційні рівняння з урахуванням напруги електричного поля $\mathbf{E} = -\nabla \phi$ мають вид:

$$\begin{aligned} & -\nabla \left((i\omega\sigma - \omega^2\epsilon\epsilon_0) \mathbf{A} - \sigma \mathbf{v} (\nabla \times \mathbf{A}) + \right. \\ & \left. + (\sigma + i\omega\epsilon\epsilon_0) \nabla \phi - (\mathbf{J}_{ext} + i\omega \mathbf{P}) \right) = 0; \\ & (i\omega\sigma - \omega^2\epsilon\epsilon_0) \mathbf{A} + \nabla \left((\mu\mu_0)^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M} \right) - \\ & - \sigma \mathbf{v} (\nabla \times \mathbf{A}) + (\sigma + i\omega\epsilon\epsilon_0) \nabla \phi = \mathbf{J}_{ext} + i\omega \mathbf{P}, \end{aligned} \quad (2)$$

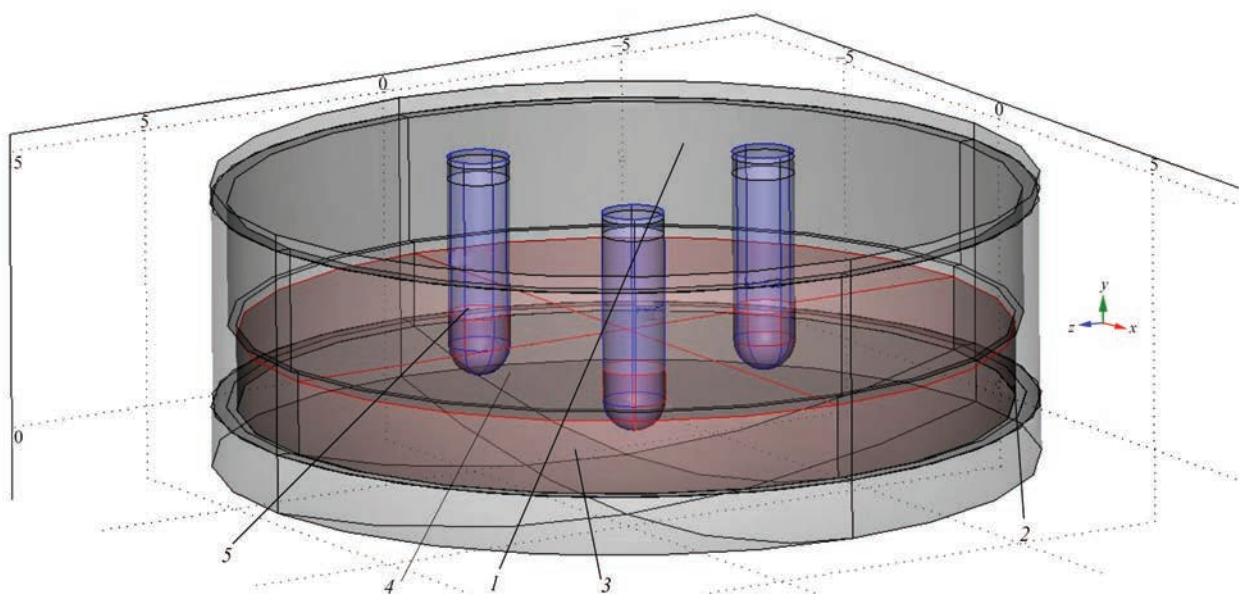


Рис. 1. Схема моделі трифазної печі (розміри координат у метрах): 1 — скліпіння; 2 — стінка; 3 — піддон; 4 — розплав; 5 — електрод

де $\mathbf{A}$ — векторний магнітний потенціал; φ — скалярний електричний потенціал; $\mathbf{M}$ — вектор магнетизації середовища; μ — відносна магнітна проникливість; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнітна проникливість вакууму. Необхідно підкреслити, що в розрахунках розглядається весь об'єм печі з електродами, футеровкою и кожухом, тому в рівняннях (1, 2) магнітний внесок для металевих елементів конструкції може бути вельми істотним. Ці рівняння не мають явного температурного внеску, але практично усі змінні залежать від температури. Теплова модель печі має внесок від електричної W_e і магнітної W_m енергій системи:

$$W_e = \int_{\Omega} \left(\int_0^T \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dt \right) d\Omega; \quad (3)$$
$$W_m = \int_{\Omega} \left(\int_0^T \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dt \right) d\Omega,$$

де Ω — об'єм печі (з електродами і футеровкою); $T = 1/f$ — період гармоніки струму (1/50 с). Часткові похідні від W_e і W_m по часу є відповідно електричними та магнітними потужностями, сума яких пов'язана з омичними (активними) і реактивними складовими теоремою Пойнтінга:

$$-\int_{\Omega} \left(\mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) d\Omega =$$
$$= \int_{\Omega} \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} d\Omega + \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} dS, \quad (4)$$

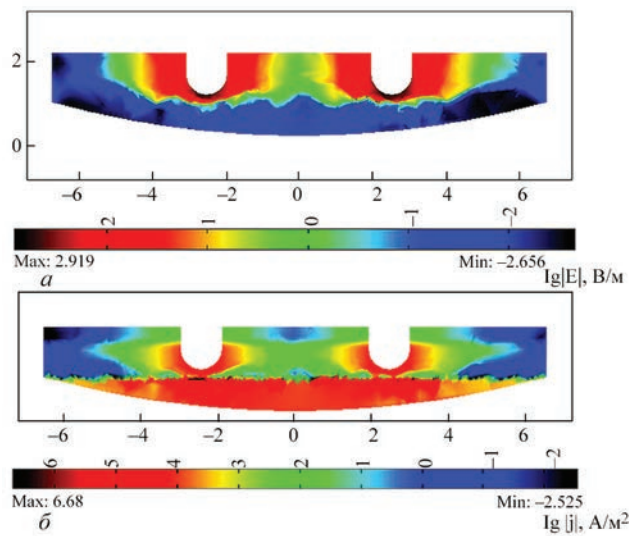


Рис. 2. Логарифми амплітуди градієнта електричного поля (а) і щільності струму у поперечному розрізі печі (б). Цифри кольорової шкали — логарифми відповідно градієнта електричного поля (В/м) і щільності струму (А/м²)

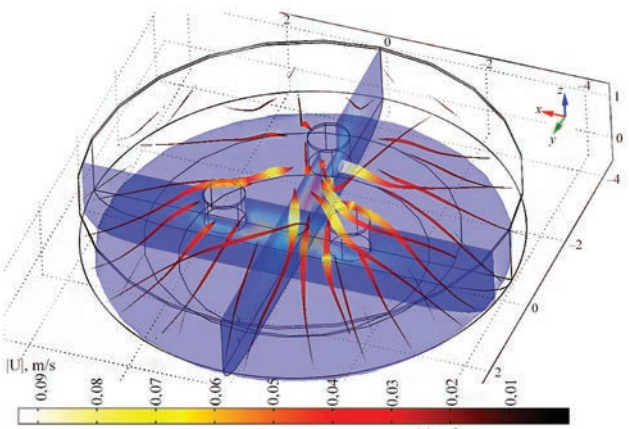


Рис. 3. Амплітуда швидкості руху розплаву у моделі трифазної печі

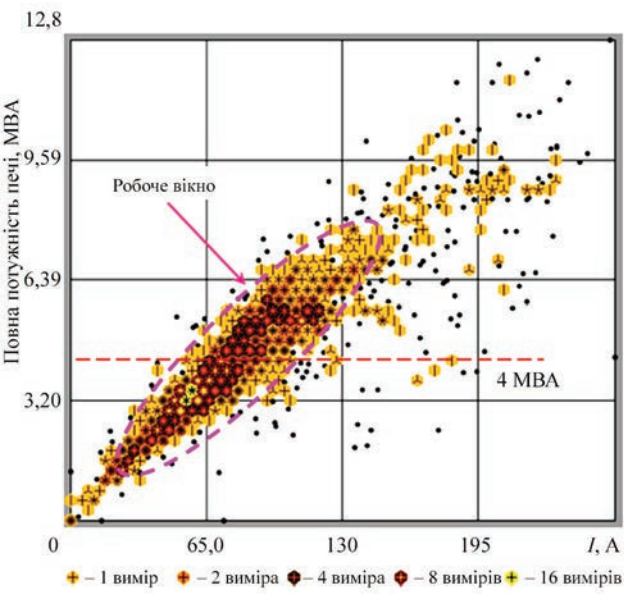


Рис. 4. Потужність як функція первинного струму трансформатора (дані з журналів роботи печі у реальному часі*)

де $\mathbf{n}$ — нормаль-вектор до поверхні S , обмежуючий об'єм Ω печі. Перший член у правій частині рівняння (4) є омичними втратами (Джоулево тепло), а другий — реактивними і радіаційними електромагнітними втратами. Омичні втрати додаються до рівнянь теплопередачі як генеруєма теплова потужність разом з ентальпією хімічних реакцій. Таким чином, система основних диференціальних рівнянь є нелінійною і це вимагає

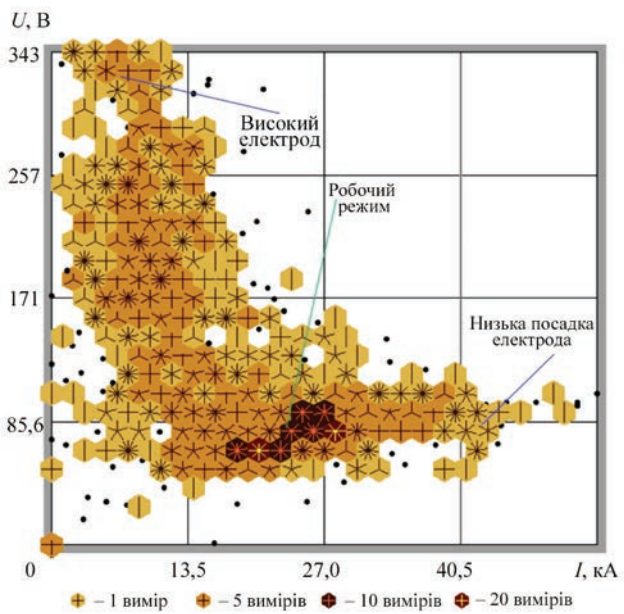


Рис. 5. Напруга між першим електродом і подиною печі та струм на першому електроді (дані з журналів роботи печі у реальному часі)

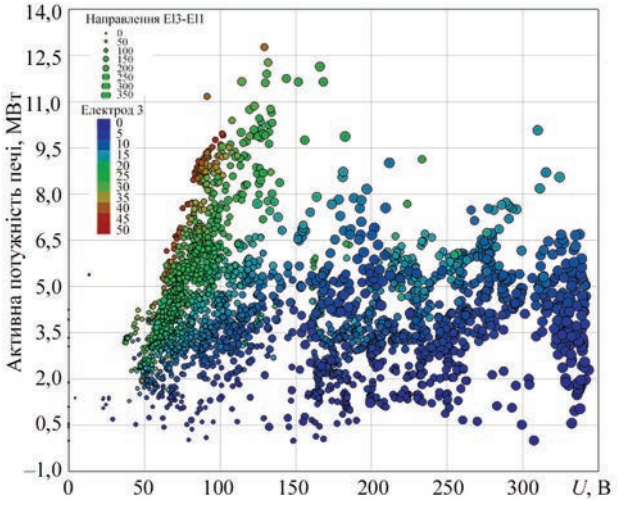


Рис. 6. Активна потужність як функція напруги між третім електродом і подиною печі (дані з журналів роботи печі у реальному часі представлені у 4D-форматі)

ітеративних рішень разом із рівняннями тепло- і масообміну [4, 5].

На електроди у моделі цього дослідження була подана гармонічна фазова напруга амплітудою 140 В і частотою 50 Гц і при цих параметрах було розраховано розподіли градієнта електричного поля $|E|$ у об'ємі (рис. 2, а) і щільності струму

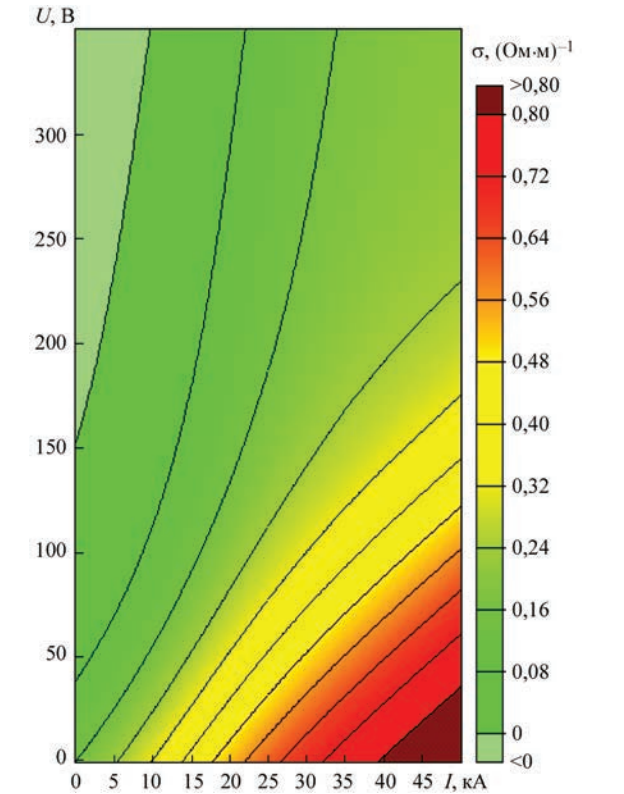


Рис. 7. Залежність ефективної електропровідності від напруги між електродами і струму електрода за результатами обчислення нейромережі [6]

*Середнє значення потужності печі у аналізованому місяці склало близько 4 МВА (червона лінія). Овал окреслює область первинного струму трансформатора і потужності печі, при яких піч працювала найбільшу кількість часу.

(рис. 2, б). Як показують результати (рис. 2), найбільша щільність струму спостерігається близько кінців електродів між електродами і всередині розплавленого металу ($>10^6$ А/м²), тоді як поблизу футеровки печі вона знижується до 0,003 А/м².

Оскільки питомий електричний опір металу набагато нижче, ніж у шлаку або прошарку коксу, активна потужність і відповідно теплова потужність там також має низькі значення. Таким чином, найбільша теплова потужність має місце безпосередньо у зоні занурених у шлак електродів (на рис. 2 саме там, де присутні найбільш червоні зони для електричного поля і щільності струму одночасно).

Нерівномірний розподіл потужності і температури призводить до конвекційного руху розплавів металу і шлаку, максимум якого (до 0,1 м/с) спостерігається поблизу електродів як результат більш низької в'язкості і більших градієнтів температури у цих зонах (рис. 3).

Аналіз роботи реальної печі. Для електричної печі, яка аналогічна вищепоказаній моделі, були зібрані експериментальні дані (приблизно 4000 рядків даних температурного і електричного журналів, зібраних за один календарний місяць) у реальних заводських умовах. Піч номінальною потужністю 12 МВА експлуатується для рафінування шлаку в обмеженому діапазоні температур і тому зазвичай працює при набагато меншому електричному навантаженні порівняно з номінальною потужністю. Пунктирною лінією еліпса (рис. 4) окреслено робоче вікно електричного режиму печі (найбільша статистична кількість даних), але є і більш віддалені точки за різних причин (зависання електродів, коротке замикання, неправильний рух або поломка електрода, інші причини, технічне обслуговування тощо).

Нетрадиційний формат графіка (рис. 4) допомагає охопити загальну картину роботи печі. Наприклад, точка жовтого кольору із шістьма «пелюстками» тут позначає 96(16×6) вимірів, оскільки одна пелюстка дорівнює 16-тьом вимірам, маючи одне і теж значення. Для темно-жовтої точки одна пелюстка дорівнює одному виміру, для чорної — чотирьом вимірам і т.д. Це дозволяє показати дані високої розмірності на 2D-графіку. На рис. 5 в такому ж форматі показані дані напруги між першим електродом і подиною печі та струму на першому електроді. Ці дані вказують зокрема частоту перебування печі з високим або низьким електродом, а також область найбільшої кількості випадків нормальної роботи (наприклад при 70...120 В і 20...30 кА).

Дані роботи печі можна також представити у 4D-форматі (рис. 6), де по осі абсцис позначено

напругу між третім електродом і подиною печі, по осі ординат — активну потужність, а колір кожної точки відповідає величині струму на електроді у той момент і розмір точки відповідає напрузі між першим і третім електродами.

Результати рис. 6 вказують на істотні речі у функціонуванні печі. Так, червоні точки (великий струм до 50 кА) показують ліміт потужності і напруги, що регулюються загальним електричним опором печі у конкретний момент виміру. Великі сині точки вказують на високу посадку електрода (низький струм і підвищена напруга), а малі сині точки — випадки підняття і вимкнення електродів (мала активна потужність при низьких струму і напрузі).

Електрична система живлення печі базується на трансформаторах, що перетворюють вхідну мережеву високу напругу і малий струм на первинній стороні до рівня, придатного для роботи печі [1]. При нормальній роботі всі три трансформатора мають однакові параметри, що забезпечують симетричні умови роботи печі. Якщо виникають зміщені налаштування (точки рис. 4–6, які істотно відхиляються від робочої зони), це призводить до циркулюючих незбалансованих струмів у трикутних з'єднаннях [5], які можуть бути невиявлені при стандартних вимірюваннях, що може вивести електрообладнання з ладу (за винятком випадків нормального технологічного обслуговування).

На рис. 4 і 5 видно, яким чином зміна позиції електрода впливає на напрямок ходу струму і потужність. У свою чергу, зона біля кінців електродів (рис. 2) є більш гарячою і має менший опір, тож потрібно уникати прямого занурення в розплавлений метал, оскільки це приведе до електричного обриву.

Результати показують, що навіть прості електротехнічні журнальні дані містять значну кількість інформації, яка при необхідній візуалізації може вказати на багато істотних параметрів щодо відхилень від оптимальних режимів і можливі шляхи вдосконалення роботи печі. Цікавим також є узгодження модельних величин з реальними даними, що дає можливість створити т.зв. цифровий клон (digital twin) печі та симулювати її роботу у комп'ютерних мережах. На рис. 7 наведено розраховану ефективну електропровідність залежно від напруги між електродами і струму електрода, що було згенеровано обчисленням нейромережі за прикладом роботи [6] на базі реальних даних печі, наведених вище (рис. 4–6) і запропонованої комп'ютерної моделі (рис. 1–3).

Результати рис. 7 показують, що при низький позиції електрода (високий струм, низький перепад напруги) ефективна електропровідність (вра-

ховуючи метал, шлак і прошарок коксу) найвища і вона є суттєво нелінійною стосовно електричних параметрів печі. Такими інструментами можна проводити симулювання різних ситуацій печі для визначення її оптимальної роботи.

Висновки

1. Розроблено і показано модель рудовідновлювальної печі 12 МВА, для якої розраховано розподіли градієнта електричного поля у об'ємі, щільності струму і руху рідких металу і шлаку внаслідок перепаду температури і властивостей розплавів.

2. Паралельно з моделюванням проаналізовано журнальні дані печі у заводських умовах у режимі реального часу і представлено варіанти візуального аналізу цих даних, що допомагає розумінню роботи печі і причин відхилення електричного режиму від заданого.

3. Комбінацією моделі і реальних даних показана можливість створення цифрового клону печі, де можна проводити розрахунки параметрів і си-

мулювати різні ситуації печі для визначення оптимальної роботи.

4. Проведений аналіз показує можливості застосування сучасних обчислювальних інструментів для контролю роботи металургійних агрегатів і їх подальшого вдосконалення.

Список літератури/References

1. Gladkykh, V.A., Gasyk, M.I., Ovcharuk, A.M., Projdak, Yu.S. (2004) *Design and equipment of electric steel making and ferroalloy shops*. Dnipropetrovsk, Systemni Tekhnologii [in Ukrainian].
2. Gasik, M.I. (1992) *Manganese*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Larsen, B. (2012) Electrode models for Söderberg electrodes. In: *Proc. SAIMM «Platinum 2012», South Africa, Johannesburg*, 275–286.
4. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Urazlina, O.Yu., Kutuzov, S.V. (2010) Modelling and optimisation of anthracite treatment in an electrocalcinator. In: *Proc. of 12th Inter. Ferroalloys Congr. INFACON, Helsinki, Finland*, 1, 339–347.
5. Gasik, M. (2013) *Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
6. Gasik, M.M., Gasik, M.I. (2010) Multi-variation analysis and optimisation of electrical conductivity of MnO–CaO–SiO₂ slags. In: *Proc. of 12th Inter. Ferroalloys Congr. INFACON, Helsinki, Finland*, 2, 537–545.

SIMULATION OF ELECTRIC ARC MODE OF ELECTRIC FURNACE AND ANALYSIS OF ITS OPERATION IN REAL TIME

M.M. Gasik

Aalto University. 00076, AALTO, Espoo, Finland. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

A model of a three-phase electric furnace is considered, for which the distribution of temperature and electric field over the volume is calculated. Areas of the furnace are shown, in which extreme values of current density and temperature occur. The simulation results are compared with the real data of the 12 MVA furnace operation in factory conditions, and the features of the furnace operation in various modes are discussed. 6 Ref., 7 Fig.

Keywords: simulation, furnace, electrical mode, temperature distribution, current density

Отримано 18.02.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 25.03.2024

Прийнято 10.06.2024



**VII INTERNATIONAL
CONFERENCE ON WELDING
AND RELATED TECHNOLOGIES**

7-10 October 2024, Ukraine

www.wrt2024.com.ua