

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ЯШИНА КСЕНІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 681.5:621.365.2.004.18

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ДУГОВОЮ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЮ ПІЧЧЮ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ**

Спеціальність:

05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електромеханіки Дніпродзержинського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний технічний університет
Міністерства освіти і науки України, проректор з наукової
роботи, завідувач кафедри електромеханіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Паранчук Ярослав Степанович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, професор кафедри
електроприводу та автоматизації промислових установок;

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Георгій Віталійович,
Державний вищий навчальний заклад «Національний
гірничий університет» (м. Дніпропетровськ)
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри
електроніки та обчислювальної техніки.

Захист відбудеться «_____» _____ 2011 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027 м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027 м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розіслано «_____» _____ 2011 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
к.т.н.

О.О. Азюковський

Підписано до друку 15.12.2010р. Формат 60x84 1/32. Папір друк.
Умовн. друк. арк. 1,0. Наклад 100 прим. Зам. № 336/10

Віддруковано друкарнею
Дніпродзержинського державного технічного університету
з комп'ютерного оригінал-макету пошукувача

51918, м. Дніпродзержинськ, ДДТУ, вул. Дніпробудівська, 2

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Питанням автоматизації дугових сталеплавильних печей присвячені роботи вчених: Маркова Н.А., Окорокова Н.В., Паранчука Я.С.

Однією з особливостей сучасного світового ринку сталі є зростання обсягів продукції, що виплавляється в дугових електросталеплавильних печах (ДСП) змінного струму. При цьому дугова електросталеплавильна піч залишається одним з найбільш енергоємних агрегатів, які застосовуються у чорній металургії. Існує два основних способи вирішення енергетичної проблеми дугових електросталеплавильних печей: застосування ДСП нових конструкцій і модернізація існуючих. При цьому доцільною з економічної точки зору слід визнати модернізацію ДСП шляхом створення сучасної системи керування, що базується на ефективному алгоритмі керування.

Зважаючи на велику кількість дестабілізуючих факторів (обвали шихти, обрив електричних дуг), якими характеризується виплавка сталі в ДСП, і неможливості точного моніторингу основних параметрів плавки (температура дуг, шихти, розплаву, шлаку, склад розплаву і шлаку) за допомогою вимірювальних приладів, доцільною є розробка алгоритму керування виправкою сталі в ДСП на основі моделювання процесів, які відбуваються в робочому просторі печі.

На сьогоднішній день існує низка побудованих за різними принципами моделей, які описують електричні та теплові процеси, що відбуваються в ДСП. При цьому комплексна модель, яка б враховувала характер протікання електричних, теплових і хімічних процесів, їх взаємозв'язок і взаємовплив, відсутня. Створення та застосування такої моделі дозволить у кожний момент плавки розрахувати адекватні матеріальний та енергетичний баланси печі, за допомогою яких може бути визначене раціональне значення активної потужності, що подається в піч у цей момент часу.

Відомо, що при заданому ступені напруги активна потужність, що подається в піч кожною фазою (P_i), є функцією від довжини дуги цієї фази (l_i). Проте, залежність P_i від l_i , яка може бути використана при синтезі системи керування роботою ДСП, до теперішнього часу отримана не була.

Таким чином, комплексне дослідження електричних, теплових і хімічних процесів, що відбуваються у ДСП змінного струму, виявлення їх взаємозв'язків, розробка на основі отриманих результатів нового алгоритму керування значенням активної потужності, яка подається в піч у період плавки, і синтез простої та надійної системи керування рухом електродів, що забезпечує досягнення заданого значення потужності, є актуальними і важливими науково-технічними задачами. Розв'язання цих задач дозволить визначити траєкторію зміни активної потужності, що подається в піч.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Основні положення та результати роботи використано у держбюджетній НДР Дніпродзержинського державного технічного університету за темою

«Комп'ютерне моделювання енергозберігаючої технології виплавки та доведення сталі в умовах сучасних міні-заводів» (№ 0106U000739), що фінансувалася із загального фонду державного бюджету Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження: зниження енерговитрат і часу виплавки сталі у дуговій електросталеплавильній печі змінного струму за рахунок мінімізації теплових витрат при збереженні якості продукції, що виробляється.

Для досягнення цієї мети в дисертації вирішені наступні задачі:

1. Розроблено комплексну модель електричних, теплових і хімічних процесів, що відбуваються у дугових електросталеплавильних печах змінного струму, виявлено їх взаємозв'язок з метою створення алгоритму керування роботою ДСП.

2. На основі теоретичного дослідження одержана залежність активної потужності, що подається в піч кожною фазою, від довжини дуги цієї фази та використано цю залежність при синтезі системи керування рухом електродів ДСП.

3. Здійснена розробка алгоритму керування процесом виплавки сталі в ДСП, який дозволяє в кожний момент плавки визначити значення активної потужності, що забезпечує максимальну енергетичну ефективність агрегату.

4. Визначена траєкторія зміни активної потужності, що подається в ДСП, яка забезпечує зниження питомих енергетичних витрат агрегату при незмінній якості продукції, що виплавляється.

5. Синтезована структура системи керування рухом електродів ДСП, що забезпечує досягнення необхідного значення активної потужності, яка подається в піч кожною фазою.

6. Виконана перевірка адекватності розробленої моделі та доцільності застосування створеного алгоритму керування.

Об'єкт дослідження - процес виплавки сталі у дуговій електросталеплавильній печі змінного струму.

Предмет дослідження - алгоритми керування процесом виплавки сталі у дуговій електросталеплавильній печі змінного струму, що забезпечують підвищення енергетичної ефективності агрегату при незмінній якості продукції, що виплавляється.

Методи досліджень. У роботі використані: методи математичного моделювання та чисельні методи при побудові комплексної моделі електричних, теплових, та хімічних процесів, які відбуваються в ДСП; метод динамічного програмування при розробці алгоритму керування активною потужністю; методи теорії оптимального керування та варіаційне числення при синтезі системи керування рухом електродів.

Наукові положення, новизна одержаних результатів

Наукові положення:

1. подача активної потужності до дугової сталеплавильної печі за траєкторією, що апроксимується поліноміальною функцією, складові якої визначаються на основі матеріального і енергетичного балансів печі, на

відміну від підтримування системою автоматизованого керування фіксованих значень потужності на кожній стадії плавки, забезпечує зниження питомих енергетичних витрат агрегату при збереженні якості продукції, яка виробляється.

2. Миттєва активна потужність кожної фази дугової сталеплавильної печі змінного струму прямо пропорційна квадратному кореню довжини дуги цієї фази, що покладено в основу побудови системи автоматичного керування потужністю печі за траєкторією, яка визначається комплексною моделлю і забезпечує зниження питомих енергетичних витрат агрегату.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Виконане тривимірне дослідження теплових процесів, що відбуваються у дугових сталеплавильних печах, при якому вперше враховувались форма печі, кількість тепла хімічних реакцій, склад шихти, розплаву, шлаку, пічного газу, значення потужності, яка подається в піч кожним електродом, дозволило до 12% підвищити точність розрахунку основних теплових характеристик процесу виплавки сталі в ДСП, отримати достовірну інформацію про температуру шихти, розплаву, шлаку в різних місцях робочого простору печі у будь-який момент плавки.

2. Взаємозв'язок електричних, теплових і хімічних процесів, що відбуваються в дугових електросталеплавильних печах змінного струму, дозволив вперше створити комплексну модель, яка описує виплавку сталі в ДСП. Використання цієї моделі забезпечує отримання достовірної інформації про характеристики плавки (електричні, теплові, хімічні), її стадію і стан.

3. Визначена траєкторія зміни активної потужності, що подається в піч, забезпечує скорочення часу плавки та підвищення енергетичної ефективності агрегату при збереженні якості продукції, що виробляється.

4. Синтезована система керування рухом електродів дугових електросталеплавильних печей, яка заснована на отриманій вперше залежності активної потужності, що подається в піч кожною фазою, від довжини дуги цієї фази забезпечує досягнення заданого значення активної потужності, яка надходить у робочий простір ДСП.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і результатів підтверджуються коректністю прийнятих в математичних моделях припущень, збігом результатів математичного моделювання і експериментальних досліджень з точністю до 94%.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблена методика, яка забезпечує в кожен момент процесу плавки отримання інформації про склад розплаву, шлаку, пічного газу і кількість тепла хімічних реакцій, дозволила здійснити контроль якості продукції, що виробляється, й скласти точний енергетичний баланс печі на різних стадіях виплавки сталі.

2. Запропонований алгоритм, заснований на комплексній моделі процесу виплавки сталі в ДСП, дозволяє визначити сукупність матеріального і

енергетичного балансів печі, що забезпечують максимальну енергетичну ефективність агрегату.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети й постановці задач досліджень, розробці комплексної моделі процесів, що відбуваються у дугових сталеплавильних печах, обґрунтуванні запропонованого алгоритму керування, встановленні залежності миттєвої активної потужності кожної фази від довжини дуги цієї фази, синтезі системи керування рухом електродів, аналізі отриманих результатів і формулюванні висновків. Автор не використовував у роботі ідей і розробок, що належать співавторам опублікованих робіт.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджені в проектну практику ТОВ НІП «ДІЯ» при розробці систем автоматизованого керування роботою дугових сталеплавильних печей змінного та постійного струму, а також у навчальний процес Дніпродзержинського державного технічного університету при вивченні дисциплін «Теоретичні основи сталеплавильних процесів», «Технологія виплавки сталі», «Комп'ютерне забезпечення металургійних процесів».

Апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця 2008р.), міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (м. Львів 2009р.), міждержавній науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2008-2009р.), міжнародному форумі-конкурсе молодих учених «Проблеми недропользования» (м. Санкт-Петербург, 2009р.), регіональному науковому семінарі Придніпровського наукового центру НАН України «Сучасні проблеми управління і моделювання складних систем» (м. Дніпропетровськ, 2010р.).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 12 друкованих працях, з них 8 – у виданнях, затверджених ВАК України, 3 – матеріали конференції, 1 стаття в інших виданнях. Три наукові праці написані без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел зі 147 найменувань на 11 сторінках і 3 додатків на 15 сторінках. Загальний обсяг дисертації - 179 сторінок, що включають основний текст - 125 сторінок, рисунків - 62, таблиць - 16.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі освітлені питання розробки сучасних систем автоматизованого керування виправкою сталі у дугових печах. Обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, наведений зв'язок роботи з державними програмами, викладені наукова новизна, практична цінність і реалізація одержаних результатів, зазначений особистий внесок здобувача, наведені отримані результати.

У першому розділі дисертації здійснений аналіз стану сучасного електросталеплавильного виробництва, розглянуто шляхи зменшення його енергоспоживання, існуючі алгоритми керування процесом виплавки сталі в ДСП, моделі процесів, що відбуваються в печі, системи керування рухом електродів агрегату, зроблений висновок про доцільність розробки та дослідження системи автоматизованого керування ДСП на основі комплексної моделі, сформульовані наукові задачі та шляхи їх розв'язання.

У другому розділі проведений аналіз технічних та технологічних особливостей роботи дугових печей. Розроблена комплексна модель електричних, теплових і хімічних процесів, що відбуваються у робочому просторі ДСП під час плавки за сучасною технологією, особливостями якої є використання «болота» та металізованих матеріалів.

Створена модель отримує зовнішню інформацію про початкову температуру й склад шихтових матеріалів і «болота» та дозволяє у будь-який момент плавки обчислити основні електричні, теплові та хімічні характеристики процесів, що відбуваються в ДСП, з урахуванням їх взаємного впливу та взаємозв'язку (рис. 1).

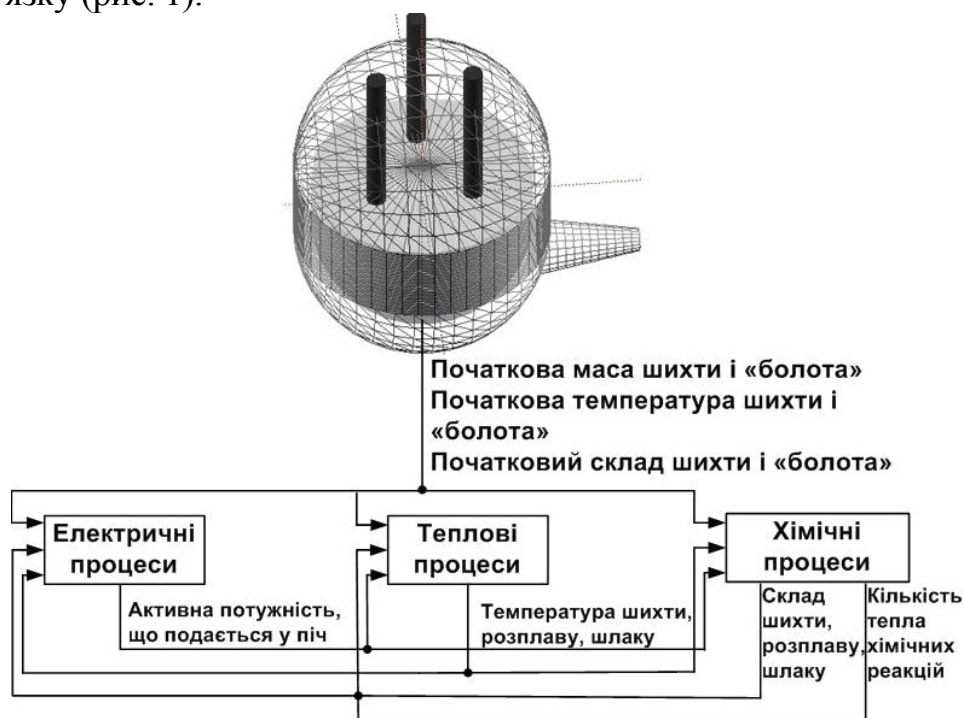


Рис. 1. Взаємозв'язок процесів, які відбуваються в ДСП

Моделювання електричних процесів здійснено на основі схеми заміщення трьохфазного ланцюга ДСП з урахуванням нелінійності та динамічних властивостей дуги. При цьому розглянуті два випадки:

1. Опір шихти введено у ланцюг послідовно опором «болота» (рис. 2).
2. Опір шихти введено у ланцюг паралельно опорам дуги (рис. 3).

Активна потужність, що подається у піч i електродом у момент часу t дорівнює:

$$P_i(t) = i_{Ai}^2(t)R_{Ai}(t) + i_{\emptyset i}^2(t)R_{\emptyset i}(t) + i_{Ai}^2(t)R_{Ai}(t), \quad i = 1..3$$

(1)

де i_{Ai} - струм дуги; $i_{\emptyset i}$ - струм шихти; i_{Ai} - струм «болота»; R_{Ai} - активний опір дуги; $R_{\emptyset i}$ - активний опір шихти; R_{Ai} - активний опір «болота».

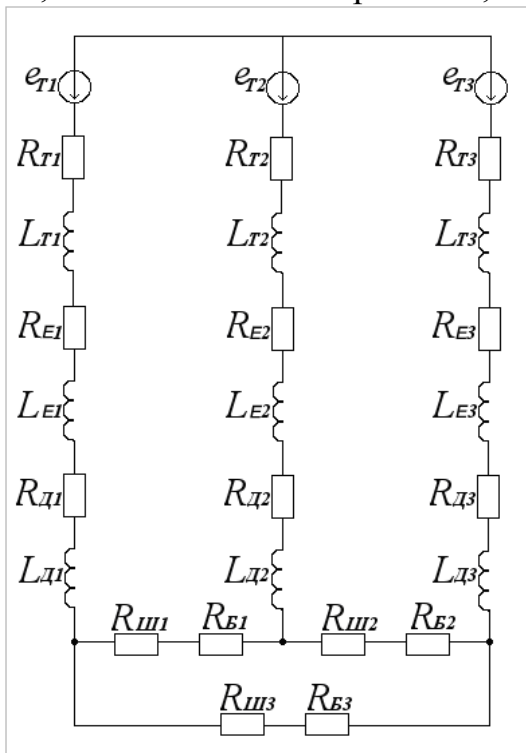


Рис. 2. Електрична схема дугової сталеплавильної печі (опір шихти введено послідовно опорю «болота»)

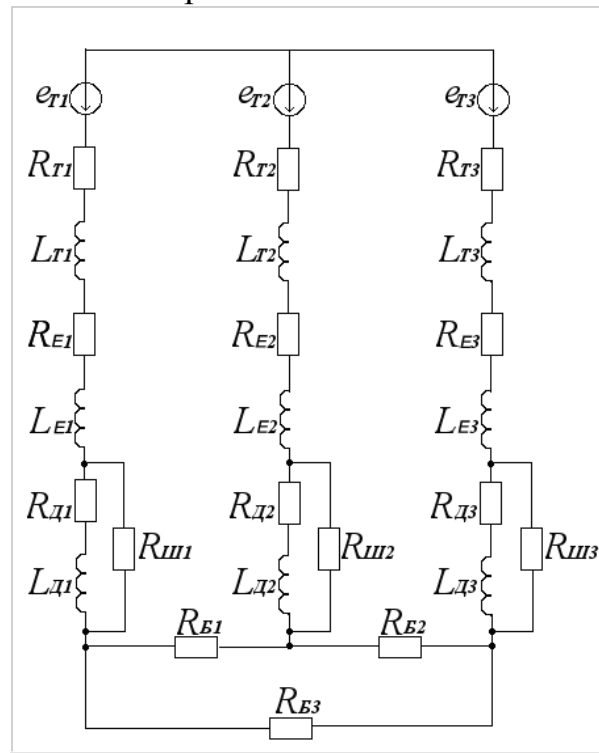


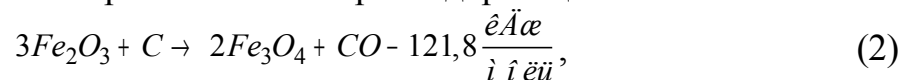
Рис. 3. Електрична схема дугової сталеплавильної печі (опір шихти введено паралельно опорам дуги)

При моделюванні теплових процесів розглянутий складний теплообмін у робочому просторі ДСП на кожній стадії плавки. Розподіл температур в об'ємах шихти та «болота» описується тривимірними рівняннями теплопровідності у циліндричних координатах з урахування кількості тепла хімічних реакцій. На межах дотику шихти та «болота» зі стінами або дном печі задані граничні умови третього роду. Замкнену систему тіл, що беруть участь у теплообміні випромінюванням, на кожній стадії плавки складають поверхні зведення, стін, шихти, електродів. Для розрахунку результуючого випромінювання на кожен з цих поверхонь використаний зональний метод. При обчисленні значень густини, питомої теплоємності та теплопровідності шихти, «болота», розплаву й шлаку врахований їх склад. Крім того, при розрахунках температури дуг враховано значення активних потужностей, що подаються в піч кожною фазою.

Моделювання хімічних процесів здійснене за допомогою розгляду основних

хімічних реакцій, що відбуваються в ДСП. Теплові коефіцієнти цих реакцій при температурі 298 K знайдені за законом Гессе.

Принцип моделювання розглянемо на прикладі реакції



Швидкість реакції знайдена за формулою:

$$w = \frac{n_{Fe_2O_3} n_C \sigma_{12}^2 \left[8\pi kT \left(\frac{1}{\mu_{Fe_2O_3}} + \frac{1}{\mu_C} \right) \right]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_A}{RT}}}{N_A}$$

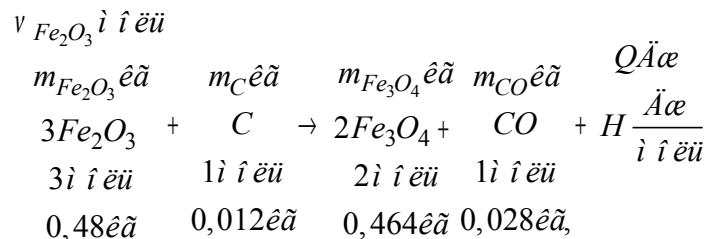
де $n_{Fe_2O_3}$ - кількість молекул Fe_2O_3 в 1 м^2 поверхні взаємодії; n_C - кількість молекул Fe_2O_3 в 1 м^3 об'єму взаємодії; σ_{12} - середній ефективний діаметр при зіткненні молекул; k - стала Стефана-Больцмана, T - температура реагентів, $\mu_{Fe_2O_3}$ - маса молекул Fe_2O_3 , μ_C - маса молекул C ; E_A - енергія активації реагентів; R - універсальна газова стала; N_A - число Авагадро.

Кількість речовини та масу Fe_2O_3 , що бере участь у реакції (2) за деякий час τ , знайдені за допомогою виразів:

$$v_{Fe_2O_3} = wS\tau, \quad m_{Fe_2O_3} = v_{Fe_2O_3} M_{Fe_2O_3}.$$

де S - площа поверхні зіткнення Fe_2O_3 та C .

Масу C , Fe_3O_4 , CO , що бере участь у реакції (2), та кількість теплоти, що поглинається під час її протікання, знайдені за допомогою рівняння реакції:



де H - тепловий коефіцієнт реакції при заданій температурі, знайдений за законом Кірхгофа.

$$m_C = \frac{m_{Fe_2O_3} \times 0,012}{0,48}, \quad m_{Fe_3O_4} = \frac{m_{Fe_2O_3} \times 0,464}{0,48}, \quad m_{CO} = \frac{m_{Fe_2O_3} \times 0,028}{0,48}, \quad Q = v_{Fe_2O_3} \times H.$$

Таким чином, створена комплексна модель забезпечує отримання достовірної інформації про основні характеристики плавки у будь-який її момент.

Третій розділ присвячений розробці алгоритму, який дозволяє знайти раціональне значення активної потужності, що подається у піч (P^*), та синтезу системи керування, яка забезпечує досягнення P^* . Крім того, за допомогою виконаного дослідження електричних процесів, що відбуваються в ДСП, у розділі отримана залежність значення активної потужності, яка подається в піч кожною фазою, від довжини дуги цієї фази.

Запропонований алгоритм знаходження значення активної потужності, яке забезпечує зменшення енергетичних витрат агрегату, базується на складанні матеріального та енергетичного балансів печі (табл. 1).

Таблиця 1

Статті матеріального та енергетичного балансів ДСП

Статтями матеріального балансу є:	Статтями енергетичного балансу є:
маса та склад шихти;	тепло, що потрапляє в піч з шихтою;
маса та склад розплаву;	тепло, що потрапляє в піч з «болотом»;

маса та склад шлаку.

тепло, що подається в піч електричними дугами.

Значення статей матеріального балансу формуються до початку плавки, виходячи з початкових умов, протоколів попередніх плавок, режимних карт.

Кількість тепла, що потрапляє в піч з шихтою або «болотом», обчислена за формулами:

$$Q_{\text{ш}}^* = \sum_{i=1}^N \tilde{n}_i^{i \times} \times M_i^{i \times} \times T_i^{i \times}, \quad Q_{\text{б}}^* = \sum_{i=1}^M \tilde{n}_i^{i \times} \times M_i^{i \times} \times T_i^{i \times},$$

де $M_i^{i \times}$ - маса i елементу, який завантажується в піч; $T_i^{i \times}$ - початкова температура i елементу; $\tilde{n}_i^{i \times}$ - теплоємність i елементу при температурі $T_i^{i \times}$; N - кількість хімічних елементів (з'єднань) у шихті; M - кількість хімічних елементів (з'єднань) у «болоті».

Початкове значення кількості теплоти, що подається в піч електричними дугами знайдене за виразом:

$$Q_{\text{д}}^* = \sum_{i=1}^N \tilde{n}_i^{i \times} \times M_i^{i \times} \times (T_i^{\text{Ді}} - T_i^{i \times}),$$

де $T_i^{\text{Ді}}$ - температура розплавлення i елементу.

Тоді початкове значення активної потужності однієї фази:

$$P^* = \frac{Q_{\text{д}}^*}{3t_{\text{Ді}}}, \quad (3)$$

де $t_{\text{Ді}}$ - бажаний час розплавлення, який задається до початку плавки.

Після початку плавки через деякий проміжок часу τ перераховується значення P^* . Для цього обчислюються наступні величини:

$$Q_{\text{в}}(t) = Q_{\text{в}}(t-\tau) + \tilde{Q}_{\text{в}}(t), \quad Q_{\text{р}}(t) = Q_{\text{р}}(t-\tau) + \tilde{Q}_{\text{р}}(t), \\ \dot{M}_{\text{ш}}(t) = \dot{M}_{\text{ш}}(t-\tau) + \tilde{M}_{\text{ш}}(t), \quad \dot{M}_i(t) = \dot{M}_i(t-\tau) + \tilde{M}_i(t),$$

де $Q_{\text{в}}(t)$ - сумарні теплові витрати за час t з початку плавки; $Q_{\text{р}}(t)$ - сумарне тепло хімічних реакцій за час t з початку плавки; $\dot{M}_{\text{ш}}(t)$ - маса шихти, яка розплавилася за час t з початку плавки; $\dot{M}_i(t)$ - маса i елементу, яка розплавилася за час t з початку плавки; $\tilde{Q}_{\text{в}}(t)$ - теплові витрати у проміжок часу від $t-\tau$ до t ; $\tilde{Q}_{\text{р}}(t)$ - тепло хімічних реакцій у проміжок часу від $t-\tau$ до t ; $\tilde{M}_{\text{ш}}(t)$ - маса шихти, яка розплавилася у проміжок часу від $t-\tau$ до t ; $\tilde{M}_i(t)$ - маса i елементу, яка розплавилася у проміжок часу від $t-\tau$ до t .

З урахуванням значень $Q_{\text{в}}(t)$ та $Q_{\text{р}}(t)$ кількість теплоти, що потрапляє в піч завдяки електричним дугам, у даний момент часу обчислюється за виразом:

$$Q_{\text{д}}^* = \sum_{i=1}^N \tilde{n}_i (M_i(t) - \dot{M}_i(t)) (T_i^{\text{Ді}} - T_i(t)) + Q_{\text{в}}(t) + Q_{\text{р}}(t),$$

де $M_i(t)$ - маса i елементу, що не розплавилася за час t з початку плавки; $T_i(t)$ - температура i елементу; \tilde{n}_i - теплоємність i елементу при температурі T_i .

Час розплавлення перераховується за допомогою значення $\dot{I} \frac{dI}{d\tau} (t)$:

$$t_{D\dot{I} \dot{I}} = \frac{(M_{\dot{I}} - \dot{I} \frac{dI}{d\tau})}{\dot{I} \frac{dI}{d\tau}}.$$

З урахуванням отриманих значень $Q_{\dot{I}}^*$ і $t_{D\dot{I} \dot{I}}$ активна потужність однієї фази в даний момент часу перераховується за виразом (3).

Значення $\tilde{Q}_{\dot{I} \dot{I}}(t)$, $\tilde{Q}_{\dot{I} \dot{I}}(t)$, $\tilde{M}_{\dot{I} \dot{I}}(t)$, $\tilde{M}_{\dot{I} \dot{I}}(t)$ у будь-який момент плавки обчислюються за допомогою розробленої комплексної моделі процесів, які відбуваються у печі.

Таким чином, створений алгоритм керування дозволяє у кожний момент плавки знайти значення активної потужності, що подається в піч кожною фазою, яке забезпечує мінімізацію теплових витрат, ефективний нагрів шихти та протікання хімічних реакцій. Досягнення необхідного значення P^* при заданому ступені напруги здійснюється системою руху електродів ДСП.

Структурна схема механізму переміщення електроду зображена на рис.4. Коефіцієнт пропорційності $K_{\dot{I}}$ знаходиться за допомогою отриманої залежності активної потужності кожної фази від довжини дуги цієї фази. Якщо функція $P_i(l_i)$ лінійно апроксимована за методом січних, так як це показано на рис. 5, то

$$K_{\dot{I}} = K_{D\dot{I} \dot{I}} \frac{\Delta P}{\Delta l} = K_{D\dot{I} \dot{I}} \frac{P_1 - P_0}{l_1 - l_0},$$

де $K_{D\dot{I} \dot{I}}$ - коефіцієнт передачі редуктора.

Для керування рухом електродів синтезовано регулятор, який забезпечує досягнення заданого значення активної потужності кожної фази, реалізуючи алгоритм керування:

$$U_{D\dot{I}} = sat[k_1(A_{11}(\frac{P^* - P}{P_{MAX}}) - A_{12} \frac{\omega}{\omega_{MAX}} - A_{13} \frac{I}{I_{MAX}} - A_{14} \frac{E_{\dot{I}}}{E_{\dot{I} MAX}})].$$

Крім того, для зниження динамічного навантаження на електрод система керування містить регулятор струму двигуна, який формує керуючий вплив за алгоритмом:

$$U_{DC} = sat[k_3(A_{32} \frac{\omega}{\omega_{MAX}} + (A_{33} + \frac{A_{30}}{p})(\frac{I^* - I}{I_{MAX}}) - A_{34} \frac{E_{\dot{I}}}{E_{\dot{I} MAX}})].$$

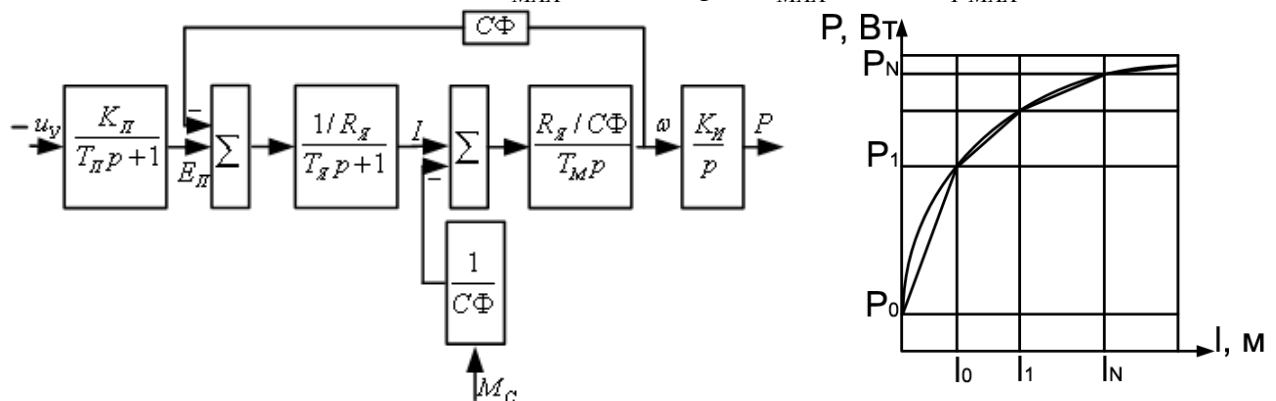


Рис. 4. Структурна схема електромеханічної системи переміщення електроду

Рис. 5. Лінійна апроксимація функції $P_i(t_i)$

Таким чином, розроблена система керування роботою ДСП, яка базується на комплексній моделі процесів, що відбуваються в печі. Ця система дозволяє у кожний момент плавки знайти раціональне значення активної потужності, яка подається в піч, та забезпечує досягнення цього значення.

Четвертий розділ присвячений перевірці адекватності розробленої комплексної моделі процесам, що відбуваються в ДСП, підтвердженню ефективності створеного алгоритму керування та визначенню траєкторії зміни активної потужності, яка подається в піч.

При цьому розглянуті плавки у дуговій сталеплавильній печі ємністю 100 т при 20 т «болота». Для завдання початкових маси, складу й температури шихти та «болота» використані протоколи плавки печі ДСП-3 Білоруського металургійного заводу. Електричні, теплові й хімічні характеристики процесу розраховані за допомогою розробленої моделі. При цьому точність обчислення основних параметрів плавки склала не менше 94%.

У табл. 2 наведені затрати енергії на виплавку кордової сталі у ДСП-3 Білоруського металургійного заводу (БМЗ) та затрати енергії на виплавку аналогічної марки сталі за допомогою створеного алгоритму керування.

Таблиця 2

Витрати енергії на проведення плавки (МДж)

Виплавка сталі (1 завантаження шихти)		Виплавка сталі (2 завантаження шихти)		Виплавка сталі (3 Завантаження шихти)	
Типова діаграма БМЗ	Розрахунок	Типова діаграма БМЗ	Розрахунок	Типова діаграма БМЗ	Розрахунок
225840	195976	184620	159400	149143	129820

Запропонований алгоритм керування дозволяє на 13-14% скоротити витрати енергій на проведення плавки незалежно від її технологічних особливостей. Крім того, у роботі показано, що якість сталі при цьому залишається незмінною.

На рис. 6 наведені типові енерготехнологічні діаграми виплавки сталі у ДСП-3 БМЗ та аналогічні діаграми, одержані за допомогою розробленого алгоритму керування. Отримані залежності активної потужності можуть бути апроксимовані поліномом Лагранжу з точністю до 98,42%. Тобто, траєкторія зміни активної потужності, що подається в піч, яка забезпечує зниження енергетичних витрат агрегату при незмінній якості продукції, що виплавляється, може бути представлена у вигляді:

$$P(t) = \sum_{j=0}^N P_j \prod_{i=0, i \neq j}^N \frac{t-t_i}{t_j-t_i},$$

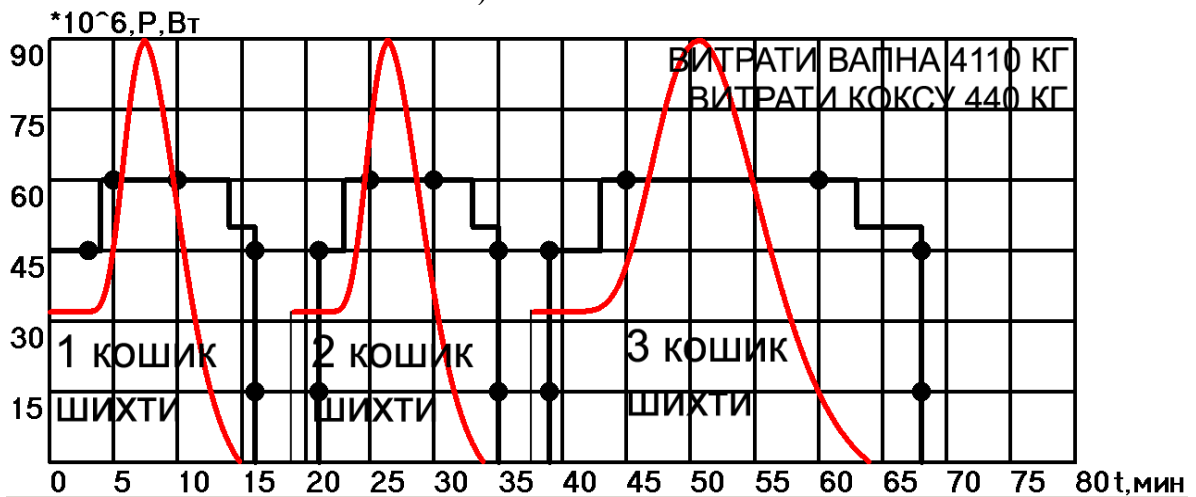
де P_j - значення активної потужності, що подається в піч у момент часу t_j , яке розраховується за допомогою складання матеріального та енергетичного балансів печі; N - число точок розбиття за часом.



а) 1 завантаження



б) 2 завантаження



в) 3 завантаження

Рис. 6. Порівняння енерготехнологічних діаграм виплавки сталі - розрахунок; • типова діаграма

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нове рішення актуальної наукової задачі отримання нових наукових знань щодо автоматизації процесів керування дуговими сталеплавильними печами змінного струму, яка базується на комплексній моделі електричних, теплових та хімічних процесів, що відбуваються в печі, та забезпечує зменшення питомих енергетичних витрат агрегату за рахунок мінімізації теплових втрат при збереженні якості продукції, яка виробляється.

Основні наукові і практичні результати, висновки і рекомендації роботи полягають у наступному:

1. Дані проведеного дослідження теплових процесів, які відбуваються у дугових електросталеплавильних печах, з урахуванням форми печі, кількості тепла хімічних реакцій, складу шихти, розплаву, шлаку, пічного газу, значення активної потужності, що подається в піч кожним електродом, дозволили створити адекватну тривимірну теплову модель ДСП, за допомогою якої у будь-який момент плавки може бути отримана інформація про її основні теплові характеристики: температуру шихти, розплаву, шлаку.

2. Результати дослідження основних хімічних реакцій, що протікають в робочому просторі дугових електросталеплавильних печей, забезпечили отримання інформації про склад шихти, розплаву, шлаку, пічної атмосфери, кількість тепла, що поглинається або виділяється в результаті хімічних перетворень, які протікають у ДСП. Це дозволило побудувати просту адекватну модель хімічних процесів, які відбуваються в робочому просторі дугових сталеплавильних печей.

3. Створена комплексна модель, що описує виплавку сталі в ДСП, забезпечує отримання достовірної інформації про електричні, теплові й хімічні характеристики плавки, її стадію та стан.

4. Проведене дослідження електричних процесів, що відбуваються у дугових електросталеплавильних печах змінного струму, дозволило вперше отримати залежність миттєвої активної потужності, що подається в піч кожною фазою, від довжини дуги цієї фази. Ця залежність використана при синтезі системи керування рухом електродів ДСП.

5. Запропонований алгоритм, заснований на комплексній моделі процесу виплавки сталі в ДСП, дозволяє визначити сукупність матеріального і енергетичного балансів печі, що забезпечують максимальну енергетичну ефективність агрегату.

6. Визначена траєкторія зміни активної потужності, що подається в піч, забезпечує скорочення часу плавки та підвищення енергетичної ефективності агрегату при збереженні якості продукції, яка виплавляється.

7. Синтезована система керування рухом електродів дозволяє при певному ступені напруги досягти заданого значення активної потужності, що подається в піч кожною фазою, шляхом зміни довжини дуги цієї фази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Яшина К. В. Усовершенствование способов автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели для снижения энергозатрат и повышения производительности агрегата / К. В. Яшина, В. Ю. Болотов, Ю. А. Болотова // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2007. – №8. – С. 217 – 221.

2. Яшина К. В. Качественная оценка способа автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели / К. В. Яшина, В. Ю. Болотов, Ю. А. Болотова // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2008. – №1(9). – С. 14 – 19.

3. Яшина К. В. Усовершенствование способов автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели для снижения энергозатрат и повышения производительности агрегата / К. В. Яшина, В. Ю. Болотов // Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. – 2008. – №3 - 4. – С. 99 – 101.

4. Яшина К. В. Исследование влияния электрических параметров дуговых сталеплавильных печей на режим их тепловой работы / А. В. Садовой, К. В. Яшина // Вісник НУ «ЛП» «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2009. - № 654. – С. 192 – 199.

5. Яшина К. В. Исследование электрических процессов в дуговых электросталеплавильных печах / А. В. Садовой, К. В. Яшина // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2009. - № 1(4Е). – С. 156 – 164.

6. Яшина К. В. Комплексная модель тепловых процессов, происходящих в дуговых электросталеплавильных печах / К. В. Яшина, А. В. Садовой // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – №2(24). – С. 26 – 33.

7. Яшина К. В. Усовершенствование способа управления работой дуговых электросталеплавильных печей на основе комплексной математической модели / К. В. Яшина // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. - №3(16). – С. 53 – 58.

8. Яшина К. В. Алгоритм расчета интенсивности химических реакций в дуговых электросталеплавильных печах / К. В. Яшина, А. В. Садовой // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2010. – №1(14). – С. 20 – 25.

9. Яшина К. В. Усовершенствование способов автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели для снижения энергозатрат и повышения производительности агрегата / К. В. Яшина, В. Ю. Болотов // Проблемы математического моделирования : межгос. науч.-метод. конф., 28 – 30 мая 2008 г. : тезисы докл. – Днепродзержинск, 2008. – С. 170 – 172.

10. Яшина К. В. Математическая модель электрических процессов в дуговых электросталеплавильных печах / К. В. Яшина, А. В. Садовой //

Проблемы математического моделирования : межгос. науч.-метод. конф., 27 – 29 мая 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 117 – 119.

11. Яшина К. В. Математическая модель электрических процессов в дуговых электросталеплавильных печах / К. В. Яшина // Проблемы недропользования : междунар. форум- конкурс молодых ученых, 22 – 24 апреля 2009 г. : тезисы докл. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 126 – 127.

12. Яшина К. В. Один из способов управления технологическим процессом дуговой сталеплавильной печи / К. В. Яшина // Математичне та комп'ютерне моделювання: Технічні науки. – 2008. – Вип.1. – С. 197 – 202.

Особистий внесок здобувача до всіх наукових праць, опублікованих із співавторами

У роботах, написаних у співавторстві, дисертанту належить: у [1, 3, 9] розробка принципів керування ДСП на основі комплексної математичної моделі; у роботі [2] отримання та дослідження результатів моделювання роботи дугової сталеплавильної печі на стадії проплавлення колодязів з використанням алгоритму керування на основі комплексної моделі; у роботах [4, 5, 10, 11] дослідження електричних процесів, що відбуваються у ДСП змінного струму з урахуванням температури та складу шихти і розплаву; у публікації [6] комплексне дослідження теплових процесів, що відбуваються у дугових сталеплавильних печах на різних стадіях процесу виплавки з урахуванням складу шихти, розплаву, шлаку, пічного газу та значення активної потужності, що подається у робочій простір агрегату кожною фазою; у роботі [8] розробка та дослідження моделі хімічних процесів, які відбуваються у ДСП.

АНОТАЦІЯ

Яшина К.В. «Автоматизація процесу керування дуговою сталеплавильною піччю на основі комплексної моделі». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07. – Автоматизація процесів керування. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2010.

У роботі отримані нові наукові знання щодо процесів керування дуговими сталеплавильними печами (ДСП) змінного струму.

Проведено дослідження електричних, теплових та хімічних процесів, які відбуваються в ДСП, вперше виявлені їх взаємозв'язки та розроблена комплексна модель виплавки.

На основі створеної моделі розроблено алгоритм керування, який дозволяє в кожний момент плавки визначити раціональне значення активної потужності. Для досягнення цього значення синтезована система керування рухом електродів печі, в основу якої покладена отримана вперше залежність значення активної потужності кожної фази від довжини дуги цієї фази.

Підтверджена адекватність розробленої моделі та ефективність використання створеного алгоритму керування, визначена траєкторія зміни активної потужності, яка забезпечує зниження енергетичних витрат агрегату при незмінній якості продукції, що виплавляється.

Ключові слова: дугова електросталеплавильна піч, комплексна модель, алгоритм керування активною потужністю, керування рухом електродів.

АННОТАЦІЯ

Яшина К.В. «Автоматизация процесса управления дуговой сталеплавильной печью на основе комплексной модели».- Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2010.

В работе получены новые научные знания процессов управления дуговыми сталеплавильными печами (ДСП) переменного тока, которые базируются на комплексной модели процессов, происходящих в печи, и обеспечивают сокращение удельных энергетических затрат агрегата при неизменном качестве выплавляемой продукции.

Проведено комплексное исследование электрических, тепловых и химических процессов, происходящих в ДСП, при котором учитывались: нелинейность и динамические свойства дуг, состав шихты, расплава, шлака, количество тепла химических реакций, значение активной мощности, подаваемой в печь каждым электродом. Результаты этого исследования позволили впервые выявить взаимосвязи процессов, протекающих в рабочем пространстве дуговых сталеплавильных печей, и разработать комплексную модель, полноценно описывающую выплавку стали в ДСП. С помощью этой модели в любой момент времени может быть получена информация об основных характеристиках плавки (электрических, тепловых, химических).

На основе созданной комплексной модели разработан алгоритм управления активной мощностью, подаваемой в рабочее пространство ДСП в ходе плавки. Этот алгоритм предполагает составление рациональных материального и энергетического балансов печи на различных стадиях плавки и позволяет в каждый момент процесса определить значение активной мощности, подаваемой в ДСП каждой фазой, обеспечивающее минимизацию тепловых потерь и полноценное протекание химических реакций восстановления железа и шлакообразования.

В работе впервые установлено, что мгновенная активная мощность, подаваемая в дуговую электросталеплавильную печь каждой фазой, прямо пропорциональна квадрату корню длины дуги этой фазы. Полученная зависимость использована при синтезе системы управления перемещением электродов печи. Эта система обеспечивает достижение необходимого значения активной мощности, подаваемой в печь, с точностью не менее 98%.

В диссертации выполнено сравнение данных об электрических, тепловых и химических характеристиках выплавки, полученных с помощью протоколов плавки, режимных карт и проводимых ранее экспериментов, с аналогичными данными, полученными с помощью разработанной комплексной модели. При этом погрешность расчетов не превышает 6%, что подтверждает адекватность созданной комплексной модели процессов, происходящих в ДСП.

Кроме того, в диссертации приведены данные о затратах энергии на проведение плавки с помощью существующих энерготехнологических диаграмм и с использованием разработанного алгоритма управления. Применение предлагаемого алгоритма позволяет сократить расход энергии на плавку на 13 – 14%, качество выплавляемой стали при этом остается неизменным.

На основе полученных результатов определена траектория изменения активной мощности, подаваемой в печь, которая обеспечивает сокращение удельных энергетических затрат агрегата при неизменном качестве получаемой продукции. Доказано, что снижение удельных энергетических затрат дуговых сталеплавильных печей достигается путем подачи в агрегат активной мощности по траектории, аппроксимируемой полиномиальной функцией, составляющие которой определяются на основании материального и энергетического балансов печи.

Ключевые слова: дуговая электросталеплавильная печь, комплексная модель, алгоритм управления активной мощностью, управление перемещением электродов.

SUMMARY

K.V. Yashina “Automation of control process of electric arc furnace on the basis of unifying model” – Manuscript

Dissertation for the degree of Candidate of technical sciences in speciality 05.13.07. – Automation of control processes. – National Mining University, Dnipropetrovsk, 2010.

The work yields new scientific knowledge on the process of control of alternate current electric arc furnaces.

The comprehensive research into the processes taking place in EAF entitled us to be the first to show their correlations and develop an adequate model which gives a full description of the steel smelting in arc furnace and allows getting valid information on its stage, condition and major electrical, thermal and chemical characteristics at any time during the process.

The unifying model was the basis for an algorithm of control of active power fed to the working chamber of EAF. This algorithm allows determining active power fed to the furnace during each stage which provides minimization of thermal loss and proper behavior of chemical reactions.

To obtain the necessary value of active power, a system of movement control of electrodes was synthesized. This system is based upon dependence of instant value of active power of each phase on the arc's length of this phase.

Key words: electric arc furnace, unifying model, algorithm of control of active power, electrodes movement control.