

ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Галько Сергій Віталійович

УДК 621.036.6:669.187.2.036

**Оптимізація параметрів вторинного струмопідвода
електротехнічного комплексу дугової печі
за параметричним критерієм якості**

05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник	кандидат технічних наук, доцент Труфанов Іван Дмитрович Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок
Офіційні опоненти	доктор технічних наук, професор Лозинський Орест Юліанович Національний університет “Львівська політехніка”, завідувач кафедри електропривода і автоматизації промислових установок
	кандидат технічних наук, доцент Есауленко Володимир Олександрович, Донецький національний технічний університет, професор кафедри електромеханіки і теоретичних основ електротехніки
Провідна установа	ВАТ “Український науково-дослідний інститут силової електроніки “Перетворювач”, Міністерства промислової політики України, науково-технічний відділ, м. Запоріжжя

Захист відбудеться “20” червня 2002 р. о 13¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 11.052.02 Донецького національного технічного університету (ДонНТУ) за адресою: Україна, 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58,

1 навчальний корпус, к.201.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДонНТУ за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2 навчальний корпус.

Автореферат розісланий “15” травня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 11.052.02,
к.т.н., доц.

Ларін А.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні методологічні і математичні методи оптимізації параметрів енерготехнологічного обладнання дугових печей характеризуються: істотним дефіцитом апріорної інформації про досліджувані процеси у вторинному струмопідводі; некоректністю використання відомих методів параметричної ідентифікації при обробці експериментальної інформації; практичною відсутністю регуляризованих формальних методів згортки різних критеріїв оцінки якості роботи в єдиний інтегральний критерій при розробці безвитратних і низьковитратних заходів щодо реалізації високодинамічних технологічних процесів електросталеплавлення з низькими показниками енергоспоживання; важкопереборними методичними й обчислювальними факторами при побудові математичних моделей оптимального керування технологічним процесом за вектором енергозбереження; практичною відсутністю системо- і схемотехнічного забезпечення процесів енергозбереження засобами контролю технологічних режимів, що не руйнують, плавлення металів і сплавів на локальному рівні (на рівні плавильного агрегату).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до наукового напрямку кафедри “Електропривод і автоматизація промислових установок” Запорізького національного технічного університету в рамках темплану Міністерства освіти України, яка затверджена 28.05.1996 г. “Розробка нових методів управління складними динамічними системами і технологічними процесами” (номер держреєстрації теми 0194U015564).

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – підвищення енергетичної ефективності електротехнічного кола вторинного струмопідвода теплотехнічного тракту дугової сталеплавильної печі (ДСП) на рівні “короткої мережі” електропічного трансформатора, де основним функціональним елементом є електродна система.

Задачі дослідження:

1. Математично описати електричне коло вторинного струмопідвода дугової печі в функції несиметричних і нелінійних режимів навантаження.
2. Розробити методику оцінки динамічної стійкості електропічного трансформатора з нестаціонарним нелінійним навантаженням ДСП.
3. Дослідити експлуатаційну ефективність ніпельного з'єднання електродної “свічі” і його вплив на теплотехнічний тракт печі.
4. Розробити і експериментально дослідити пристрій оперативного контролю якості ніпельного з'єднання електродної “свічі”.

Об'єкт дослідження – процеси оптимізації вторинного струмопідвода як засіб підвищення якості динамічного функціонування електротехнічного тракту дугової печі.

Предмет дослідження – системи електротехнологічного обладнання потужних дугових печей, де виконавчим функціональним комплексом електрообладнання є вторинний струмопідвід електропічного трансформаторно-перетворювального агрегату.

Методи досліджень – використовуються сучасні методи нелінійної і мінімаксної ідентифікації динамічних об'єктів: стратегія пошуку оптимальних рішень Вальда, критерій максимального ризику Севіджа з розподілом рішень пріоритету за В. Блумбергом і В. Глущенко; методи диференціального аналізу несиметричних нелінійних багатофазних електричних магнітнозв'язаних кіл; методи матричного

аналізу теорії автоматичного регулювання на базі матриць Ганкеля і Безу та формальні методи запропонованого нами математичного алгоритму опису функціями динамічних ККД у формі інтегралів ймовірності з аргументами у виді поліноміальних рядів Бесселя 1-го і 2-го роду, виражених через параметри критеріальних чисел Фур'є, Біо, Кірпічова, Предводителєва; частотні методи аналізу теорії автоматичного регулювання на базі алгоритмів синтезу рекурсивних дискретних фільтрів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- *вперше* запропонований алгоритм багатокритеріальної оптимізації параметрів вторинного кола пічного трансформатора в змінних параметрах інтеграції і диференціації структурного, динамічного і регуляційних факторів у функції параметричного критерію якості вторинного струмопідвода на базі розробленої динамічної матричної моделі енергетичної і технологічної ефективності функціонування електродної “свічі”, яка *відрізняється* можливістю дослідження параметрів зазначених систем у динамічному режимі в порівнянні зі статичними моделями;

- *вперше* отримана “решітчаста” модель вторинного струмопідвода у функції нестационарного несиметричного багатофазного навантаження, на базі якої *можливе* створення системи керування режимами печі на основі моделі-спостерігача;

- *досліджена поведінка* енерготехнологічного і теплотехнічного тракту дугової печі в функції динамічних ККД і *показано* можливість керування ним в функції якості ніпельного з'єднання при неповній спостережливості координат системи.

- *вперше* *формалізована* в лінеаризованому вигляді математична модель амплітудної і фазової несиметрії вторинної електромагнітної системи електротехнічного тракту дугової печі, що *відрізняється* можливістю оцінки електричних втрат у ніпельному з'єднанні у змінних еліптичних функцій Якобі і Вейерштрасса в динамічному режимі;

- *розроблена нова* системо- і схемотехнічна структури вимірювальної системи об'ємного типу для контролю якості ніпельного з'єднання у функції параметрів анізотропії і текстури електродної маси “свічі”, з використанням відомого електропотенціального методу визначення дефектів у провідних матеріалах, що *відрізняється* можливістю виконання в переносному варіанті.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

1. Розробці алгоритмічної структури сенсорно-регулюючої підсистеми вимірювача якості ніпельного з'єднання електродної “свічі” як рекурсивного дискретного фільтра.

2. Створенні функціональної, структурної і принципової схем вимірювача якості ніпельного з'єднання об'ємного типу, в якому тестуючим сигналом є змінний струм промислової частоти варіанта, що носить, впровадження якого дозволяє знизити: інтегральні витрати електродів Ø300-400 мм, у середньому, на 83-87 г/1000 А·год роботи електродної “свічі” під струмовим навантаженням; питомі витрати електроенергії на розплавлення твердої завалки, у середньому, на 2,5-3,5 кВт·год/т “придатного”; ненормоване науглецьовування розплаву ванни на 2,5%; експлуатаційні поломки електродної “свічі” на 26%.

3. Розробці методики оцінки місцевого перегріву в ніпельному з'єднанні електродної “свічі” за рахунок впливу ступеня асиметрії анізотропії циліндричних ділянок “свічі”.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції “Плазмотехнологія-97” (м. Запоріжжя, 1997 р.), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці і електроенергетиці” (м. Львів, 1999 р.), 8-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика” (м. Алушта, Крим, 2000 р.), Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” (м. Харків, 2000 р.), Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Запорізького державного технічного університету в 1997, 1998, 1999 р.р., наукових семінарах кафедри “Електропривод і автоматизація промислових установок” Запорізького державного технічного університету в 1997, 1998, 1999 р.р.

Публікації. Основні положення і результати дисертації опубліковані в 9 наукових роботах, із них: 5- в наукових журналах, 2 – в збірниках наукових праць, 2 – наукових вісниках; тезах доповіді на науково-технічній конференції і патенті на винахід.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури з 111 найменувань, у тому числі 9 на іноземній мові і 5 додатків. Робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, включає 22 таблиці, 75 рисунків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відображене загальне становище і значення сталеплавління для гірничо-металургійного комплексу та енергетичної ситуації в умовах розвинутої ринкової економіки України, обґрунтована актуальність роботи, дана коротка характеристика, її новизна і практична цінність для металургійного виробництва, сформульовані мета і задачі досліджень.

У першому розділі проводиться оцінка впливу різноманітних енерготехнологічних параметрів на якість роботи вторинного струмопідвода дугових печей змінного (ДСП) і постійного (ДСППС) струму. Однією з причин недостатньо ефективної роботи електропечей є незадовільна якість функціонування електродної системи в процесі її роботи. Основним перетворювальним елементом теплотехнічного тракту ДСП і ДСППС є електродна “свіча”, яка складається з графітованих електродів. Витрата електродів є значною статтею витрат і складає близько 16% вартості 1 т електросталі.

На витратні характеристики електродів впливає безліч факторів, зв'язаних з коливаннями технологічного режиму (час плавки і знеструмлення печі, довжина конуса окислювання, сила струму і т.п.) і обумовлених нестаціонарністю стохастичних параметрів електросталеплавління. Для аналітичного визначення витрат електродів використовуються моделі на основі рівняння бічної витрати Ф. Шибера і торцевої витрати Баумана:

(1)

де D – діаметр електрода, $d_{ке}$ – діаметр кінця електрода, l_k – довжина конуса окислювання, $V_{ок}$ – середня питома швидкість окислювання, t_n – час плавки, I_{ϕ} – фазний струм, $\Delta t = t_{\phi} - t_n$ – час знеструмлення, t_{ϕ} – час від випуску до випуску.

Змінюючи I_{ϕ} , l_k , t_n , Δt , $V_{ок}$ можна одержати різні витратні показники з корекцією теплової моделі процесу. Аналіз витратних характеристик електродів показав, що загальна витрата електродів на ДСП складає 5-8 кг/т, а ДСППС – 1,77-2,56 кг/т при цьому вона розподіляється по окремих статтях у співвідношеннях, %: бічна витрата – 55-75; розпилення

в дузі – 15-25; недогарки і уламки – 10-20, при цьому близько 70 % загальної витрати приходить на період розплавлення.

Геометрична точність оброблених поверхонь електродів впливає на контактний електричний опір R_K . На рис 1. наведена залежність R_K у функції зусилля притиснення елементів ніпельного з'єднання F і тиску σ у місці з'єднання. Відомо, що зменшення R_K на 1 Ом·мм²/м скорочує питомі втрати електродів на 4-12% і втрати електроенергії на 30 кВт·год/т. Дані параметри повинні бути враховані при аналізі витратних характеристик електродів і в моделі (1). Дослідження практичного досвіду показує, що застосування моделі (1) виправдано у випадку експертних оцінок при проектуванні печей. При відомих значеннях I_{ϕ} , D , $d_{ке}$, l_k , t_n , Δt , t_{ϕ} , $V_{ок}$ можливо, з точністю до 95% (за критерієм Стюдента), визначити загальні втрати електродів, якщо дисперсія струму не більше 10%.

Сукупність факторів, що впливають, на витрати електродів, представимо як:

$$D = \{t_n, \Delta t, t_{\phi}, d_{ке}, d_{кв}, I_{\phi}, N_c, Q_n\}, \quad (2)$$

де d_e - діаметр електрода; $N_c = \{N_b, N_s, N_d\}$ - сумарна витрата електродів; N_d - динамічна витрата, обумовлена тепловою і гідродинамічною нестійкістю процесу горіння дуги; Q_n - продуктивність печі.

На першому етапі формується підмножина еталонів $D_l \subset D_e$, $D_e \subset D_{не}$ ($D_{не}$ - підмножина “негірших” крапок). Потім з $D_{не}$ формується підмножина раціональних варіантів S_{ij} за допомогою методу попарних порівнянь. В результаті проведеного аналізу витратних характеристик розроблена матрична модель енергетичної і технологічної ефективності функціонування електродної системи у функціях параметрів енергообладнання, технології, конструкційних матеріалів електродних секцій і ніпельів, основних і альтернативних енергетичних ресурсів, електротехнологічних режимів електроплавлення металів і сплавів, яка приведена в табл.1.

Таблиця 1

Матриця енергетичної і технологічної ефективності функціонування електродної системи ДСП

		Енергетичний матеріал	Електро д	Електротехнічний параметр									
9	Роки	Вугілля	ЕГОО	$K_{ин}$	K_0	M_{92}	M_{93}	M_{94}	M_{95}	M_{96}	M_{97}	M_{98}	M_{99}
8	Енергообладнання	Мазут	ЕГО	$\delta, \%$	K_1	M_{82}	M_{83}	M_{84}	M_{85}	M_{86}	M_{87}	M_{88}	M_{89}
7	Технологія	Природний газ	ЕГООА	m_p	K_2	M_{72}	M_{73}	M_{74}	M_{75}	M_{76}	M_{77}	M_{78}	M_{79}
6	Конструкційні матеріали	Кисень	ЕГОА	$\cos \phi$	K_3	M_{62}	M_{63}	M_{64}	M_{65}	M_{66}	M_{67}	M_{68}	M_{69}
5	Конструкції	Продукти шлакоутворення	ЕГА	$K_{ге}$	K_4	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	M_{56}	M_{57}	M_{58}	M_{59}
4	Робочі параметри	Продукти відновлення	ЕГ	$\Delta U, СКВ$	K_5	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	M_{46}	M_{47}	M_{48}	M_{49}
3	Функції виробу	Продукти окислювання	ПЗ	$\Delta U, \%$	K_6	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	M_{36}	M_{37}	M_{38}	M_{39}
2	Завод, фірма	Шихтові матеріали	Кб	$K_{ис U}$	K_7	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{26}	M_{27}	M_{28}	M_{29}
1	Країна-виробник	Електроенергія	Охл	$K_{ис I}$	K_8	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}	M_{17}	M_{18}	M_{19}

Матриця приведена стосовно до вітчизняних електродів марок ЕГОО, ЕГООА, ЕГО, ЕГОА, ЕГ, ЕГА Ø 300, 400, 500, 555 мм, а також закордонних із захисним покриттям (ПЗ) Ø 508 мм, комбінованих (Кб) Ø 457 мм, водоохолоджувальних (Охл) Ø 600 мм. Коефіцієнти K

K_{opz} , $K_{фр}$, K_{ic} , $K_{фв}$ представлені у вигляді множини коефіцієнтів динамічного функціонування “короткої мережі”, куди складовою частиною входить “свіча”. Вони виражені підматрицями з елементів: $K_{opz} = \{K_{in}, m_p\}$; $K_{фр} = \{K_{sc}\}$; $K_{ic} = \{\delta, \%, \cos\phi\}$; $K_{фв} = \{\Delta U, \%, \Delta U, CKB; K_{ncU}; K_{ncI}\}$, що мають наступні значення: K_{ncU} , K_{ncI} - коефіцієнти несинусоїдності напруги і струму; ΔU - відхилення напруги від директивних норм; ΔU , CKB - середньоквадратичне відхилення напруги від директивних норм; K_{sc} - коефіцієнт гармонійних складових i - их гармонік; $\cos\phi$ - коефіцієнт потужності; m_p - математичне очікування активних втрат у тракці “електродотримач - електрод - “дзеркало” ванни”; $\delta, \%$ - дисперсія потужності теплових втрат у тракці “трубошини - електродотримач - електрод - “дзеркало” ванни”; K_{in} - коефіцієнт оціночних показників зміни якості динамічного функціонування ДСП за кожним параметром.

За критерієм Вальда приймається стратегія пошуку оптимальних рішень по економії електродів, що забезпечує максимальне значення критерію збереження:

$$W = \max_i \min a_{ij} \quad (3)$$

де a_{ij} - максимальне можливе значення економії електродів по i -ій стратегії економії при j -ому стані конструктивно-технологічного рішення комплексу технічних засобів (КТЗ) електросталеплавильного агрегату.

Якщо рішення приймається в умовах невизначеності станів технологічної системи і КТЗ використовуємо критерій Севіджа, за яким вибирається рішення, що забезпечує мінімальне значення максимального ризику з усіх можливих рішень :

$$W_s = \min \max r_{ij} = \min \max (\max a_{ij} - a_{ij}), \quad (4)$$

де r_{ij} - мінімальне значення i -го максимального ризику при реалізації j -ої ситуації (рішення).

Виходячи з вищевикладеного маємо:

$$1, \dots, m; j = 1, \dots, N \quad ; \quad \text{EMBED Equation.3} \quad ; K_j \in \{1, 0\}; i = \quad (5)$$

Так як по деяких параметрах задані обмеження, то модель (5) приймає вид:

(6)

Рішення (5) проводиться з урахуванням обмежень на параметри (6) у вигляді моделі

булевого програмування: $\text{opt}(Z = \quad)$ при умовах:

(7)

Таким чином, оптимізація параметрів системи (табл. 1.) проводиться на основі перетворення багатокритеріальної задачі (5) в однокритеріальну (7) .

В другому розділі отримана узагальнена математична модель вторинного струмопідвода ДСП, яка виражена через повний вектор стану електричного кола, де у вторинну обмотку трансформатора включені: “коротка” гнучка мережа на базі водоохолоджувальних кабелів МКЕ-500, рухливі башмаки “короткої” мережі, трубошини, електродотримачі, електродна

“свіча”, кількість секцій якої є змінним і складає від 1 до 5-6. Зв'язок між струмами і напругами кожної фази трансформатора в першому наближенні визначається системою диференціальних рівнянь (без обліку ємнісної складової імпедансу ЕПТ):

(8)

де індекси 1 і 2 відносяться до первинної і вторинної обмоток трансформатора; L, M - коефіцієнти само- і взаємоіндукції; $u_1(t), u_2(t)$ - напруги на обмотках 1, 2.

Оцінка впливу імпедансів первинної і вторинної обмоток на амплітудно-фазочастотні параметри струмів вторинного струмопідвода проводиться за рівнянням:

(9)

де

В ідеалізованому випадку (при рівності усіх взаємоіндукцій) еквівалентна принципова схема триобмоткового ЕПТ, замкненого через “ванну” печі, приведена на рис. 2. З урахуванням згасання вільних складових у вторинних колах величина струму дорівнює:

(10)

Розглянемо кілька випадків роботи ЕПТ.

а) *Режим роботи всіх трьох вторинних фаз* (трьох електродів). При цьому результуюча операторна реактивність являє собою коефіцієнт пропорційності між струмом відповідної обмотки і її потокозчепленням з урахуванням магнітнозв'язаних обмоток:

(11)

Опір аналогічний, але при первинній обмотці закороченій на реактивність розсіювання, що рівнозначно приєднанню реактивності розсіювання x_l паралельно реактивності взаємоіндукції.

б) *При довільному числі включених електродів* (для багатоелектродної печі):

(12)

Через нестаціонарність параметрів ніпельних з'єднань в електродній “свічі”, електро- газо- і гідродинамічних процесів горіння електричної дуги навантаження ЕПТ є стохастичним, при цьому гнучкі кабелі, рухливі “башмаки” гірлянди гнучких кабелів, трубошини, контактні “щокі” електродотримачів, ніпельні з'єднання електродних “свіч” мають нестаціонарні значення електричних опорів, що викликає несиметрію навантаження в широкому діапазоні.

На підставі узагальнених моделей розроблені моделі несиметрії ЕПТ з використанням методу симетричних складових, що дозволило розглядати багатозфазну несиметричну систему як симетричну. Вихідна електрична схема представляється за допомогою незалежних схем заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей, а несиметрична багатозфазна система описується у вигляді системи рівнянь, складених на підставі законів Ома і Кірхгофа у відповідності зі схемами заміщення, що зводиться до визначення невідомих симетричних складових струмів і напруг.

Розглядаючи, стосовно до однієї фази, електричне коло навантаження ЕПТ з ізолюваною нейтраллю за умови, що взаємодукція між елементами навантаження фаз відсутня (рис. 3), закон Ома при цьому має вигляд:

$$U = I \cdot Z \quad (13)$$

де E - ЕРС джерела живлення; Z - комплексна провідність, що враховує провідності джерела живлення і вторинних обмоток ЕПТ; U - падіння напруги на ділянці продольної несиметрії.

Для симетричних складових струми кіл між вузлами i, m визначаються:

$$(14)$$

Для врахування неповнофазних режимів ("дикої" і "мертвої" фази), взаємних зв'язків у продольних несиметричних навантаженнях і ін., складається решітчаста схема еквівалентного однофазного трансформатора (рис. 4), яка описується рівняннями зв'язку між струмами і напругами щодо затисків наступного вигляду:

$$(15)$$

де i, k, p, q - індекси затисків трансформатора; Y_{ik} - еквівалентна провідність трансформатора;
 Y_{ip} - провідності кіл, що з'єднують затиски трансформатора з вузлами мережі; k_T - коефіцієнт трансформації; W_1, W_2 - приведені числа витків первинної і вторинної обмоток.

На рис. 5 приведені структури решітчастих три фазних ЕПТ із з'єднанням обмоток "зірка-зірка" (рис. 5,а) і "зірка-трикутник" (рис. 5,б). У дисертації приведені співвідношення параметрів системи. При наявності зв'язків між нейтраллями і землею в модель додатково вводяться кола і провідності. Далі решітчаста модель доповнюється після точок p, q провідностями $Y_{ГК}, Y_{РБ}, Y_{ТШ}, Y_{ЩЕ}, Y_{Д}, Y_{В}, Y_{Е}$ (рис. 6), де провідності $Y_{ГК}$ і $Y_{ТШ}$ (гнучких кабелів і трубошин) приймаються постійними, а $Y_{РБ}, Y_{ЩЕ}, Y_{Е}, Y_{Д}, Y_{В}$ (рухливих башмаків, "щік" електродотримача, електрода, електричної дуги, ванни) доповнені елементами відповідних провідностей з індексом "м" ($Y_{ГКм}, Y_{РБм}, Y_{ТШм}, Y_{ЩЕм}, Y_{Дм}, Y_{Вм}, Y_{Ем}$). Значимість зазначеного фактора в частині $Y_{Е}$ визначається тим, що оптимізація $Y_{Е}$, зокрема зменшення електричного опору "свічі" на 10% знижує питомі втрати електроенергії на 30-100 кВт·год/т і електродів на 4-12% на 1 т "придатного".

Рис 9. Умови збереження режиму синхронної передачі навантаження при його

Математичне моделювання напружено-деформованого стану в області ніпельного з'єднання проводиться з використанням методу кінцевих елементів. В результаті математичних перетворень отримана залежність моменту скручування електродів з його геометричними параметрами з'єднання (рис. 7), коефіцієнтом тертя і контактним тиском на торцевих поверхнях і в різьбленні:

(16)

де n – число витків у зачепленні; f_p, f_m – сила тертя між витками різьблення і торцями електродів; q_p, q_m – тиск на одиницю поверхні контакту між витками різьблення і торцями електродів.

Умовою *максимальної струмопровідності* ніпельного з'єднання, повинно бути $q_0: \min \{q_p, q_m\} \geq q_0$. Необхідне значення моменту скручування електродів для різного діаметра приведені на (рис. 8), при якому досягається найбільша струмопровідність ніпельного з'єднання. Для поверхні контакту, обробленої різцем $q_0 = 0,7$ МПа, шліфуванням і фрезеруванням - 0,5 і 0,6 МПа відповідно.

У третьому розділі запропонована методика оцінки електроенергетичної стійкості ЕПТ у функції параметрів електротехнічного обладнання теплоенергетичного тракту ДСП для визначення припустимих параметрів: коротких замкнень, “диких” і “ледачих” фаз і ін. ЕПТ працює з несиметричним вторинним струмопідводом. З статичних і динамічних режимів стійкості розглядається *асинхронний режим*, при цьому ЕПТ працює з деяким

еквівалентним кутом . Для статичної електромагнітної машини, , рівняння електромагнітної рівноваги має вигляд:

(17)

де - неповний еліптичний інтеграл 1-го роду раціональної функції двох змінних (струму і напруги) у вигляді полінома 4-ого ступеня без кратних нулів у нормальній формі Лежандра.

На рис. 9 представлені умови збереження режиму синхронної передачі навантаження при його миттєвому змінненні від до . Граничне навантаження відповідає рівню прямої 2. Якщо пряма перетинає криву інтеграла в точці , то це відповідає неузгодженості синхронного руху передачі енергії від первинного контуру до вторинного, тому що в цьому випадку не існує іншого кута , при якому величина . Межа динамічної стійкості передачі енергії відповідає випадку, коли пряма є дотичною до кривої. У цьому випадку , тобто співвідношення між кутами вказують на ступінь стійкості розглянутого режиму ЕПТ.

Для подальшого аналітичного дослідження застосовується залежність і

(18)

Інтеграл у (18) – залежність часу від кута , виражається в еліптичних функціях Якобі.

Для дослідження параметрів оптимальної роботи ЕПТ у функції якості нпелнього з'єднання електродів необхідно виразити поточне значення кута α у функції кутів β у вигляді:

- кут тракту до накиду навантаження; β - кут, що відповідає прикладеному навантаженню при $\alpha = 0$; γ - максимальний кут коливання;

- модуль еліптичних функцій;

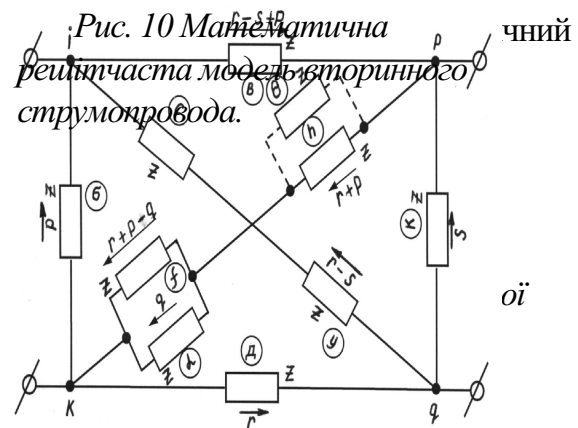
При хитливій роботі ЕПТ (виникнення експлуатаційного к.з., "дикої" фази і т.д.):

При накиду навантаження, що відповідає межі динамічної стійкості ($\tau=1$):

EMBED Equation.3 . При коливальному навантаженні з великою амплітудою:

інтеграл першого роду;

EMBED Equation.3 - повний еліптичний інтеграл для параметра k ; b_i - амплітуда i -гармоніки. При врахуванні нестандартного значення провідності електричної дуги



, дорівнює:

Граничне значення часу τ протягом якого можливий накид навантаження, що не приводить до порушення динамічної стійкості, буде відповідати куту α і знайдеться:

EMBED Equation.3

EMBED Equation.3 . (19)

З цього випливає, що будь-яке навантаження N може бути прикладене до ЕПТ більш ніж τ на час, що не перебільшує τ .

У четвертому розділі проводиться оцінка якості динамічного функціонування електротехнічного тракту вторинного струмопідводу ЕПТ і енергетичної ефективності теплотехнічних процесів перетворення електроенергії в теплоту плавлення металу. Для аналізу теплоенергетичних процесів, решітчаста модель (рис.4) перетворюється до моделі виду (рис. 10), де

i – відповідно варіативні параметри ніпельних з'єднань “свічі” і електродної дуги. Діапазони зміни варіативних параметрів ніпельних з'єднань і електричної дуги, що є функціями температурного режиму нагрівання, описуються системою:

- координати поточної точки профілю різьблення в нагрітому стані ніпеля й електрода;
- координати поточної точки профілю різьблення в холодному стані: а) – для навантаженої грані ; б) – для вільної грані (i – номер витка різьблення;
- координати поточної крапки профілю різьблення; - координати крапки початку відповідної сторони витка різьблення; - функції, що враховують температуру (T_i) нагрівання відповідного шару, і термічні коефіцієнти лінійного розширення поперек і уздовж осі електрода і ніпеля відповідно.

Ефективність динамічного функціонування вторинного струмопідвода як електротехнічного комплексу теплотехнічного тракту оцінюється через відповідні ККД, де параметри теплоенергетичних потоків виражаються через критеріальні числа термодинаміки

. На підставі рівняння Фур'є: і граничних умов виду а) б)

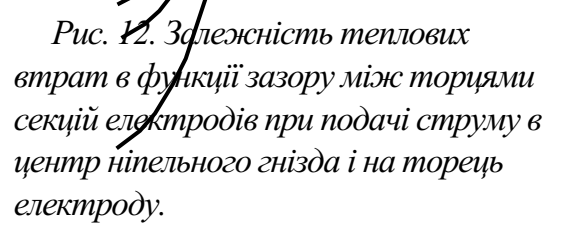
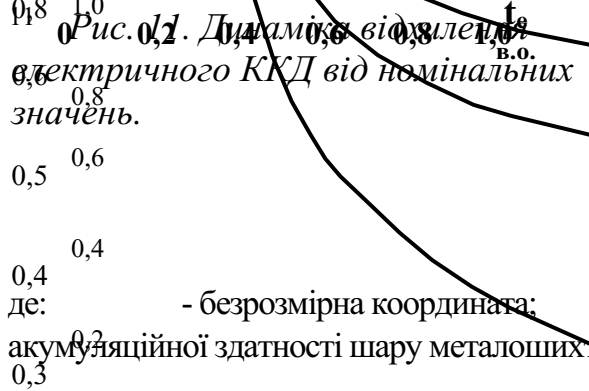
в) (a – коефіцієнт температуропроводності; - час; - лінійна координата; - коефіцієнт теплопроводності; q - питомий тепловий потік; ω – кількість тепла, що поглинається, в одиницю часу в одиниці об'єму тіла (насипного шару металошихти чи розплав ванни); c - питома теплоємність; γ - щільність; τ – температура в точці з координатою l для моменту часу τ , - оператор Лапласа), отримано вираження ККД , які виражені через критеріальні числа: - число Біо (- коефіцієнт теплопередачі);

- число Фур'є; - число Кірпічова; - число

Предводителева для випадку, коли температура є експонентною функцією часу;
- число Предводителева для випадку, коли температура є лінійною функцією часу.

Координата l є аргументом величин і у вираженні (16), що визначають характер контактного опору ніпельного з'єднання, теплові втрати і, відповідно, електричний і тепловий ККД вторинного струмопідвода. На рис.11. показано відхилення величини електричного ККД () від номінального значення необхідного за ГОСТ 13109-87. Крива 1 побудована по динамічним характеристикам вигляду:

а крива 2 -



де: K_e - безрозмірна координата; K_e - безрозмірне число, що характеризує відношення акумуляційної здатності шару металу шихти до акумуляційної здатності розплаву металу ванни, рівне K_e . Функція K_e - інтеграл ймовірності.

Динаміка теплових втрат в електродній "свічі" описується рівнянням:

$$Q_{\text{теп}} = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{K_e}{K_{e0}} \right) \quad (20)$$

Характер і величина теплових втрат (зміна теплового ККД) електродної "свічі" є функцією величини зазору з'єднаних секцій "свічі" і описуються моделлю вигляду:

(21)

Залежності побудовані по (21) при різних значеннях K_e приведені на рис. 12.

У п'ятому розділі розроблена структура, технічно реалізована, досліджені параметри і робочі характеристики контрольно-вимірювальної системи об'ємного типу для контролю якості з'єднання графітованих електродів. Для розробки структурно-алгоритмічної схеми системи застосовані частотні методи синтезу теорії автоматичного керування. Складний нестационарний характер процесу сканування електромагнітним полем анізотропної структури електродів викликає стохастичний характер динамічних перекручувань (ДП). Для компенсації ДП у фазовимірювальній системі розроблені рекурсивні динамічні фільтри (РДФ), що є регуляторами добротності системи. РДФ реалізують операцію зворотної фільтрації. Схема структурно-алгоритмічна інформаційно-вимірювальної системи контролю якості електродів приведена на рис. 13. Z - передавальна функція ланки (ланки попередження) на стадії проектування принципової схеми приймалася $Z=1$; параметри ланок, приймалися стосовно до електродів серії ЕГ по ТУ 48-12-41-91 і ТУ 48-12-52-93 і приведені в табл. 2, при цьому дослідження проводилися за умови і варіюванні структури (рис. 13). В результаті чого отримано вісім різновидів структур РДФ. Ланки прийняті як пропорційні з коефіцієнтом передачі.

Таблиця 2

Чисельні значення параметрів системи (рис 13).

K_b S_g	Номер структури							
	1	2	3	4	5	6	7	8
K_1	0,17	0,092	0,077	0	0,088	0,088	0,11	0,077
K_2	0,13	0	1,33	0	1,08	0	1,36	1,42
K_3	0,22	0	0,002	0,72	0	0,72	0,76	0,73

	0,087	-0,068 ₁₀	-0,002	0,17	0	-0,17	0,025	-0,025
	-0,136	-0,064	0,01	-0,13	-0,16	1,33	0,133	-0,336
	-0,61	-0,066 ⁰	0,003	0,604	0,036	0,056	0,056	0,057

У таблиці 2 позначено: S_i – параметрична чутливість ДП.

Для кожної структури РДФ побудовані логарифмічні амплітудні характеристики (ЛАХ) приведені на рис. 14 (номера ЛАХ відповідають номеру структури РДФ). Аналіз ЛАХ показав, що кращими середньочастотними ділянками володіють структури 3 і 8, при цьому частоти зрізу складають відповідно 54,7 і 46,4 Гц, тому до подальшої розробки принципової схеми вимірювача для електродів Ø 300-350 мм прийнята структура 3, а структура 8 – для електродів Ø 500-710 мм.

На базі структурно-алгоритмічної схеми РДФ, що покладена в основу розробки експериментальної підсистеми контролю якості електродної “свічі” у виді вимірювача якості ніпельного з’єднання електродної “свічі”, схема структурно-алгоритмічна якого приведена на рис. 15, визначені параметри операторної передавальної функції регулюючої частини системи контролю. Вимірювач виконаний у виді портативного варіанта, що носить, і може застосовуватися як на верстатах ручного так і механічного скручування електродів у “свічу”. Розроблений вимірювач об’ємного типу дозволяє робити експериментальні дослідження якості ніпельного з’єднання на базі *електропотенціального методу* урахування поширення еквіпотенціальних ліній у провідних дефектних і бездефектних матеріалах з анізотричними структурними складовими, якими є графітовані електроди. Експериментальні дослідження вимірювача проводилися на дугових печах ВАТ електрометалургійного заводу “Дніпроспецсталь”, м. Запоріжжя, на “свічах” Ø 300 - 400 мм, які складені з електродів марки ЕГ-1.

Інтегральні витрати електродів Ø 300 мм на печі ДСП-6, контроль якості з’єднання в “свічу” яких проводився за допомогою вимірювача, склав, у середньому 83-87 г/1000 А·год роботи електродної “свічі” під струмовим навантаженням. Подібний показник відповідно до вимог ОСТ 48-274-84 складає 103 – 105 г/1000 А·год.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень у дисертації вирішена задача підвищення енергетичної ефективності вторинного струмопідвода ДСП за рахунок поліпшення якості ніпельного з’єднання графітованих електродів і:

1. *Вперше* отримана матрична модель енергетичної і технологічної ефективності динамічного функціонування електродної “свічі” у змінних параметрах електрообладнання, технології конструкційних матеріалів електродних секцій і ніпельів, основних і альтернативних енергетичних ресурсів і матеріалів, електротехнологічних режимів плавлення металів у ДСП.

2. *Проведена розробка комплексного критерію* енерготехнологічної оцінки якості динамічного функціонування вторинного струмопідвода ДСП на основі значущих оцінок і факторів нерегламентованої додаткової витрати графітованих електродів на дугових печах.

3. *Вперше розроблена функціональна схема ресурсозбереження* в змінних параметрах інтеграції і диференціації структурного, динамічного і регуляційних факторів інтегрального критерію енергозбереження у вторинному струмопідводі.

4. *Вперше розроблена “реши́тчаста” модель* вторинного електричного кола для встановлення і кількісної оцінки динамічних нелінійних зв’язків між нейтралями, ванною

розплаву і “землею” при різному функціональному способі з'єднання обмоток.

5. *Розроблені моделі динамічного функціонування електротехнічного тракту дугової печі у функції мінімуму електричних втрат у ніпельних з'єднаннях електродної “свічі” з урахуванням нестаціонарного значення провідності електричної дуги в перемінних еліптичних функцій Якобі і Вейерштрасса.*

6. *Знайдена структура лінійно-комбінаційних рівнянь регресії, придатних для розробки системо- і схемотехнічної структури вимірювальної системи для контролю якості ніпельного з'єднання в функції анізотропії і текстури електродної маси, яка працює на змінному струмі промислової частоти.*

7. *Отримані оцінки ефективності динамічного функціонування вторинного струмопідвода як елемента теплотехнічного тракту функціями динамічних ККД, аргументами яких є критеріальні числа Фур'є, Біо, Кірпічова, Предводителева.*

8. *Розроблені функціональна і структурно-алгоритмічна дискретна схеми вимірювача якості ніпельного з'єднання об'ємного типу і фізично реалізований дослідно-експериментальний зразок такого вимірювача, що пройшов лабораторні і виробничі іспити в умовах діючого електросталеплавильного агрегату.*

9. *Дослідно-експериментальними дослідженнями підтверджена працездатність розробленого вимірювача якості ніпельного з'єднання електродної “свічі” в умовах діючого електросталеплавильного виробництва і адекватність розроблених математичних алгоритмів і моделей реальним умовам динамічного функціонування вторинної електротехнологічної системи дугових печей.*

10. *Впровадженням розробленого вимірювача вдалося досягти зниження: а) питомої втрати електроенергії на розплавлення твердої завалки в середньому на 2,5-3,5 кВт·год/т; б) ненормованого науглерожування ванни на 2,5%; в) експлуатаційних поломок електродної “свічі” на 26%; г) можливості “розкриття” стику.*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Труфанов И.Д., Галько С.В., Годецкий Е.В., Шаблий М.Ф. Разработка модели качества соединения графитированных электродов дуговых печей // Придніпровський науковий вісник: Технічні науки.- Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1998.-№36(103).- С.50-53.

2. Труфанов И.Д., Галько С.В. Динамика низкотемпературной плазмы электрической дуги и разработка модели расхода графитированных электродов ДСП // Плазмотехнология-97: Сб. научных трудов. – Запорожье: ЗГТУ, 1997. – С. 207-210.

3. Труфанов И.Д., Галько С.В., Безкровный М.Г. Статика и динамика электромагнитного взаимодействия проводников «короткой сети» дуговых металлургических печей // Придніпровський науковий вісник: Машинобудування.-Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1997.-№32(43). – С. 32-38.

4. Галько С.В. Экспериментальные исследования измерителя объемного типа качества соединения графитированных электродов // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства / Питання електрифікації сільського господарства.- Вип.3.-Харків: ХДТУСГ, 2000.-С. 50-55.

5. Андрияс И.А., Пачколин Ю.Э., Галько С.В. Методика экспертного управления электросталеплавлением на основе интегрального критерия энергосбережения // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Вып. 113.- Харьков: ХГПУ, 2000.-С. 304-310.

6. Галько С. В., Труфанов И. Д. Разработка математической модели многокритериальной оптимизации параметров экономии графитированных электродов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗДТУ, 1999.- №1 – С. 87 – 91.

7. Галько С.В. Анализ повышения точности оценки интегрального качества графитированных электродов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - Запоріжжя: ЗДТУ, 1999.-№2 – С. 89 – 93.

8. Галько С.В. Синтез системи аналізу і обчислення показників якості графітованих електродів дугових сталеплавильних печей // Праці Таврійської державної агротехнічної академії.- Вип.1.- Т11. – Мелітополь: ТДАТА, 1999.- С.80-83.

9. Труфанов И.Д., Галько С.В., Богданова Л.Ф. Оптимизация параметров регуляризирующих алгоритмов оценки качества электродной системы дуговых металлургических печей // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.– Запоріжжя: ЗДТУ, 2000.- №2– С. 76-83.

10. Декларацийний патент України №37487 А. Україна, МКИ G 01 R31/02, G 01 N27/02, G01 F13/00, H 05 B7/085. Вимірювач об'ємного типу якості ніпельного з'єднання графітованих електродів/ С.В. Галько, І.Д. Труфанов, Є.В. Годецкий.-20с., іл.; вид. 15.05.01

11. Труфанов И., Галько С., Пирожок А. Математическое моделирование энергосбережения в электросталеплавлении // Тези доповідей 3-ї Міжнародної наук.-техн. конф. “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці”.- Львів: ДУ “Львівська політехніка”.-1999.- С. 269-270.

Особистий внесок здобувача. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні розробки: способи зниження витрат графітованих електродів дугових печей [1]; математичні алгоритми опису енергетичних параметрів горіння електричної дуги як низькотемпературної плазми в змінних електронної і термічної іонізації плазменого стовпа на основі кінетичного рівняння Больцмана для функції розподілу енергетичних рівнянь, при цьому умови розрядної атмосфери приймалися в наближенні Борна-Оппенгеймера і параметри розсіювання електронів обчислювалися по методу Чена [2]; математичні моделі відцентрової сили взаємодіючих провідників “короткої мережі” при різких кидках струму ДСП [3] і багатокритеріальної оптимізації параметрів економії графітованих електродів [6]; рішення алгоритму динамічного функціонування електросталеплавильних агрегатів, оптимізованих по інтегральному критерію енергозбереження [5]; граф ієрархічної системи оцінки якості ніпельного з'єднання на базі об'ємного вимірювача якості графітованих електродів і цільова функція якості ніпельного з'єднання [9]; структура, розробка і реалізація вимірювача об'ємного типу якості ніпельного з'єднання графітованих електродів [10]; методологія моделювання енергозбереження (графітованих електродів та інш. енергетичних ресурсів) в електросталеплавлінні на основі двофакторного експерименту [11].

АНОТАЦІЯ

Галько С.В. Оптимізація параметрів вторинного струмопідвода електротехнічного комплексу дугової печі за параметричним критерієм якості.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.-Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2002.

Дисертація присвячена питанням оптимізації параметрів вторинного струмопідвода дугової печі, де основним елементом якості роботи є електродна “свіча”. Містить результати теоретичних та експериментальних досліджень зміни параметрів вторинного струмопідводу при експлуатаційних нестационарних режимах роботи печі. Встановлено, що ніпельне з’єднання є основним фактором впливу на якість динамічного функціонування вторинного електротехнічного тракту печі. Запропоновано для діагностування якості з’єднання використовувати динамічні амплітудні і фазові характеристики електродів, що дозволяють оцінити анізотропію, якість кристалографії, порушення морфології та ін. показники. Для діагностування цих показників розроблені структури вимірювальних систем і експериментальний зразок вимірювача якості ніпельного з’єднання об’ємного типу.

Ключові слова: дугова піч, вторинний струмопідвід, графітований електрод, електродна “свіча”, якість з’єднання, вимірювач.

АННОТАЦІЯ

Галько С.В. Оптимизация параметров вторичного токоподвода электротехнического комплекса дуговой печи по параметрическому критерию качества.- Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.-Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2002.

Диссертация посвящена вопросам оптимизации параметров вторичного токоподвода дуговой печи, где основным элементом влияющим на качество его работы является электродная “свеча”. Содержит результаты теоретических исследований изменения параметров вторичного токоподвода дуговой печи при эксплуатационных нестационарных режимах работы плавления металлов с учетом стохастически аномальных и неполнофазных режимов работы печи. Произведена оценка влияния этих параметров на качество динамического функционирования вторичного токоподвода с учётом эксплуатационных воздействий (эксплуатационных к.з., возникновения “дикий” и “мертвой” фазы и др.) и условий номинального режима работы. Установлено, что основным фактором влияющим на качество динамического функционирования вторичного электротехнического тракта, является фактор качественного нипельного соединения графитированных электродов в “свечу”, в конечном итоге от которого зависит качество выходного продукта (металла). Предложено в качестве диагностических параметров, характеризующих качество графитированных электродов и их соединение, использовать динамические амплитудные и фазовые характеристики, позволяющие оценить анизотропию, качество кристаллографии, нарушение морфологии и др. показатели качества электродов. Обосновано, что качество соединения электродов в “свечу” определяется максимальной токопроводимостью в месте их соединения, что обеспечивает минимальные потери энергии в соединении и получено условие максимальной токопроводимости с использованием параметрического критерия, в функции момента свинчивания. Получены параметры оценки уровня местного перегрева в нипельном соединении электродной “свечи” за счет

воздействия степени динамической анизотропии цилиндрических участков “свечи”, влияющих на длительность ее работы. Разработана структура линейно-комбинированных уравнений регрессии в переменных нестационарных эксплуатационно-технологических факторов вариации контактного омического сопротивления электродной “свечи” в функциях деформации профиля контактной поверхности ниппельного соединения и момента свинчивания. Предложена “решетчатая” модель электрической цепи вторичного токоподвода, позволяющая учесть вариативность параметров всех элементов электрической цепи дуговой печи, на базе которой получены модели нестационарных процессов изменения переходного электрического сопротивления электродной “свечи” и алгоритмы вычисления аргументов эллиптических функций параметров вторичной цепи электропечного агрегата, где аргументами являются текущие значения напряжений ступеней РПН или ПБВ, интегрально го контактного сопротивления ниппельного соединения, параметры температурного режима. Доказано, что достаточным информативным показателем, по которому можно судить о качестве ниппельного соединения в производственных условиях, является полное переходное контактное сопротивление, определенное в месте соединения.

Для диагностирования вышеназванных показателей разработаны системо- и схемотехнической структуры измерительной системы качества ниппельного соединения, анизотропии и текстуры электродной массы на переменном токе промышленной частоты, на базе которых разработаны функциональная и структурно-алгоритмическая дискретная схемы измерителя качества ниппельного соединения объемного типа и физически реализован опытно-экспериментальный образец такого измерителя, прошедшего лабораторные и производственные испытания в условиях действующего электростале-плавильного агрегата.

Проведенные исследования по контролю качества ниппельного соединения в процессе эксплуатации позволили установить, что при превышении переходного контактного сопротивления в ниппельном соединении более чем в 10 раз сопротивления цельного электрода, происходит поломка “свечи” при первом же касании ее о шихту, а при превышении более чем в 5 раз – происходит разогрев ниппельного соединения, что в конечном итоге приводит к поломке “свечи” из-за выгорания витков резьбы, которая разрушается за счет местных перегревов.

Выполненные экспериментальные и производственные исследования подтвердили предположения о том, что о качестве соединения необходимо судить по полному электрическому сопротивлению и показали, с одной стороны, хорошую сходимость теоретических выкладок с практическими результатами, а, с другой стороны – повышение эксплуатационной надёжности электродной “свечи” и улучшение культуры труда электротехнического персонала.

Ключевые слова: дуговая печь, вторичный токоподвод, графитированный электрод, электродная “свеча”, качество соединения, измеритель.

ANNOTATION

Galko S.V. Optimisation of arguments of the secondary current lead of an electrotechnical complex of an arc furnace by parametric criterion quality.- Manuscript.

Thesis on deriving of a scientific degree of the candidate of engineering science behind a speciality 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems.-Donetsk nationale technical university, Donetsk, 2002.

The thesis is dedicated by a problem of optimisation of arguments of the secondary current lead of an arc furnace, where the key element of quality of its operation is electrode "gas bleeder". Contains results of theoretical and experimental researches of variation of arguments of the secondary current lead at operation non-steady furnace conditions. Is established, that the sleeve connection is by a pacing factor influencing on quality of dynamic operation of a secondary electrotechnical path of the oven. The junction is offered for diagnosing quality to use dynamic amplitude and phase characteristics of electrodes, which one enable to estimate an anisotropy, quality of a crystallography, violation of morphology etc. indexes. For diagnosing these indexes the structures of measuring systems and experimental sample of a meter of quality of a sleeve connection of a volumetric type are designed.

Keywords: an arc furnace, secondary current lead, grafites an electrode, electrode "gas bleeder", quality of junction, meter.

Підп. до друку 27. 02. 2002 р. Формат 60 90/16

Обсяг 1,0 авт. арк. Тираж 100 прим. Зам. № 302

Надруковано в типографії Таврійської державної агротехнічної академії
72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр. Б.Хмельницького, 18.