

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

А. В. Люта

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ
ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Монографія

Затверджено
на засіданні вченої ради
Протокол № 6 від 30.01.2020

Краматорськ
ДДМА
2020

Рецензенти:

Кухтик Т. В., д-р техн. наук, професор, Донбаський інститут техніки і менеджменту Міжнародного технічного університету;

Толочко О. І., д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Люта А. В.

Л-96 Удосконалення систем управління приводом переміщення електродів дугових сталеплавильних печей: монографія / А. В. Люта. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 147 с.
ISBN 978-966-379-924-7

У монографії розглянуто вирішення науково-технічної задачі підвищення ефективності роботи дугових сталеплавильних печей шляхом удосконалення систем управління приводом переміщення електродів. Наведено розроблену математичну модель електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі, яка відрізняється тим, що дозволяє врахувати вплив електромеханічних коливань гнучких кабелів на стабільність горіння електричних дуг. Розроблена удосконалена система управління приводом переміщення електродів ДСП на основі паралельної фаззи-корекції сигналів управління, що надало змоги підвищити ефективність роботи печі.

Монографія може бути використана при написанні дипломних проектів та для вивчення дисциплін «Сучасні інструменти моделювання та проектування», «Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів».

УДК 681.52: 621.365.2

© А. В. Люта, 2020

© ДДМА, 2020

ISBN 978-966-379-924-7

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗУВАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДАМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ.....	7
1.1 Технологічний процес виробництва сталі в дугових печах змінного струму.....	7
1.2 Системи приводів переміщення електродів ДСП.....	9
1.3 Принципи побудови типових систем управління приводом переміщення електродів ДСП	11
1.3.1 Система управління приводом переміщення електродів ДСП зі струмовими регуляторами.....	14
1.3.2 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з диференційними регуляторами.....	15
1.3.3 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з імпедансними регуляторами.....	17
1.3.4 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з комбінованим законом регулювання	18
1.4 Збурення в системах управління приводом переміщення електродів.....	19
1.5 Аналізування методів компенсації зовнішніх електромеханічних збурень у системах управління приводом переміщення електродів ДСП.....	23
1.6 Аналізування математичних моделей електромеханічних систем управління приводом переміщення електродів ДСП	28
1.7 Методи досліджень електричного ланцюга ДСП	29
1.8 Методи оптимізації електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП.....	30
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП.....	32
2.1 Розроблення математичної моделі електричного ланцюга ДСП	33
2.2 Реалізація математичної моделі трифазного електричного ланцюга ДСП у програмному середовищі MatLab.....	37
2.3 Розроблення математичної моделі електромеханічних коливань гнучких кабелів.....	39
2.3.1 Гнучкі кабелі як об'єкт коливань	39
2.3.2 Визначення рівняння провисання гнучкого кабелю ДСП	40
2.3.3 Визначення законів коливань гнучких кабелів	44
2.4 Розроблення моделі системи управління приводом переміщення електродів ДСП.....	51

2.4.1 Математичне моделювання лінійного двигуна (пропорційного електромагніту) для управління гідророзподільником.....	52
2.4.2 Математичне моделювання гідророзподільника	56
2.4.3 Математичне моделювання гідроциліндра переміщення електрода.....	57
2.5 Дослідження електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП	59
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП-50 ПРИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕННЯХ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ.....	67
3.1 Структура базової системи управління приводом переміщення електродів ДСП-50.....	67
3.2 Методика експериментальних досліджень електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ».....	71
3.3 Результати експериментальних досліджень	72
3.4 Підтвердження адекватності розробленої моделі системи управління приводом переміщення електродів ДСП.....	80
3.5 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50.....	82
3.5.1 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50 за каналами напруги.....	82
3.5.2 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50 за каналами струму.....	83
3.5.3 Оцінювання середньоквадратичної похибки інформаційно-вимірювальної системи	84
3.6 Оцінювання методичної похибки визначення довжини дуги	84
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП.....	86
4.1 Розроблення методу компенсації електромеханічних збурень у системі управління приводом переміщення електродів ДСП на основі паралельної фаззі-корекції	86
4.2 Синтез фаззі-регулятора для управління приводом переміщення електродів ДСП.....	90
4.3 Розроблення моделі та дослідження удосконаленої системи управління приводом переміщення електродів ДСП	99
4.4 Практичні рекомендації щодо захисту електродів при упорі в струмонепровідну шихту	104
4.5 Практичні рекомендації щодо підвищення точності позиціонування електродів з імпедансними регуляторами їх переміщення	107

ПІСЛЯМОВА.....	111
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	112
Додаток А. Документ, що підтверджує факт передавання ДДМА прав ліцензійного використання програмного продукту MatLab	130
Додаток Б. Електричні і геометричні параметри дугової сталеплавильної печі ДСП-50.....	131
Додаток В. Програма експериментальних досліджень на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ».....	134
Додаток Г. Документи, що підтверджують впровадження результатів роботи	138
Додаток Д. Економічне оцінювання ефективності впровадження результатів досліджень у виробництво	142

ПЕРЕДМОВА

Ключову роль в металургійній галузі грає сталеплавління. На виробництво сталі в усьому світі витрачається близько 60 % енергії. Стан сталеплавлення в Україні істотно відстає від рівня США, Німеччини, Японії та інших країн за показниками роботи великовантажних печей, що пов'язано з недостатньою якістю автоматичного управління приводами дугових сталеплавильних печей.

Період плавлення шихти в ряді випадків становить понад половини тривалості всієї плавки. У цей період витрачається близько 60...80 % енергії, споживаної на плавку. Дуги горять нестійко, може відбуватися до 200 експлуатаційних коротких замикань протягом однієї плавки, які призводять до порушень роботи регуляторів переміщення електродів і збільшують час плавки.

При експлуатаційних коротких замиканнях між гнучкими кабелями трьох фаз виникають електродинамічні зусилля, що є поштовхом до виникнення коливань гнучких кабелів. При цьому змінюються відстані між ними, що призводить до зміни взаємних індуктивностей фаз. У струмах фаз також модулюються згасаючі коливання, які передаються електродам. Такі режими роботи можуть тривати десятки хвилин, що призводить до збільшення часу розплавлення, зайвої трати енергії, зниження продуктивності печі.

Літературний огляд вітчизняних і зарубіжних джерел і дослідження існуючих методів компенсації електромеханічних коливань гнучких кабелів і математичних моделей електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП показав, що до сих пір не було знайдено вирішення даної задачі. Були проведені дослідження впливу коливань гнучких кабелів на зміни взаємних індуктивностей і струмів фаз, однак існуючі математичні моделі не враховували вплив коливань гнучких кабелів на процес зміни довжин дуг.

Таким чином, розроблення заходів та засобів, що дозволяють підвищити ефективність роботи печі за рахунок удосконалення систем управління приводом переміщення електродів (СУ ППЕ) ДСП, є актуальною науково-технічною задачею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗУВАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДАМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Технологічний процес виробництва сталі в дугових печах змінного струму

Дугова сталеплавильна піч змінного струму являє собою потужний трифазний агрегат, у якому три електричні дуги горять між кінцями графітових електродів і розплавляються металом. У ванні печі розплавляється завантажена шихта, потім метал очищується від шкідливих домішок, легується, нагрівається до потрібної температури і зливається з печі.

Процес оброблення металу в ДСП можна поділити на два періоди: енергетичний (електричний), під час якого відбувається розплавлення твердої шихти, і технологічний, у якому здійснюються окислювальні і відновні реакції. Кожен з цих періодів характеризується особливими умовами теплових і електричних процесів [1].

Після закінчення складання шихти у вану печі електроди опускають вниз і включають струм.

1. Старт – початок періоду розплавлення, коли дуги запалюють над верхнім рівнем шихти, поблизу зводу. На початку енергетичного періоду через холодний стан металу і остиглі печі електричні дуги мають малу довжину. Через недостатню емісійну здатність холодної шихти в міжелектродному проміжку дуги горять нестійко, неспокійно, перекидаються з однієї ділянки металу на іншу, а електрична потужність виділяється в невеликому обсязі під електродами. Тому необхідно використовувати ступені напруги трансформатора з повним включенням струмообмежувального реактора. При цьому, щоб уникнути руйнування футерування склепіння через пряме випромінювання дуг в безпосередній близькості від його поверхні, необхідно працювати на зниженому значенні введеної потужності. Через розплавлення шихти електроди починають рух вниз, проплавляя в шихті колодязі. При проходженні кінцем електрода відстані, більші, ніж 1,0...1,5 діаметра електрода, припиняється пряме випромінювання дуг на футерування зводу. Це надає змоги збільшити міцність.

2. Проплавлення колодязів. У цій стадії горіння дуг і раніше нестійке через відносно погані умови іонізації межелектродного проміжку. Можливі обвали шихти і короткі замикання. Рідкий метал стікає вниз, формуючи металеву ванну, достатню для захисту футерування подини від

теплого впливу електричних дуг. Етап ведуть на максимальній введеній потужності з повним включенням струмообмежувального реактора і закінчують, коли дуги досягають поверхні рідкого металу. При цьому для уповільнення руху електродів вниз, що необхідно для утворення під ними достатнього рівня рідкого металу, в кінці етапу змінюють завдання струму, знижуючи потужність.

3. Формування загальної плавильної зони. Дуги горять під шаром шихти між електродами і рідким металом. Водночас виникають сприятливі теплофізичні умови для дугового розряду, електричний режим стабілізується. Екранування футерування і знаходження електричних дуг у колодязях дозволяє плавити шихту в режимі «закритого» горіння дуг і з високою ефективністю використання максимальної електричної потужності. Через збільшення кількості рідкого металу і заповнення рідким металом пустот між шматками твердої шихти електроди починають поступово піднімати вгору. Унаслідок цього дуги поступово відкриваються і вільно випромінюють енергію у всіх напрямках, тобто на звід, стіну ванни, спостерігається різке зростання температури внутрішньої поверхні футерування і щоб уникнути його перегріву необхідно знижувати потужність дуг.

4. Доплавлення і нагрів металу до заданої температури. Етап відбувається при «відкритому» горінні дуг і триває до нагрівання ванни металу до заданої температури. Піч працює на коротких дугах при менш сприятливих електротехнічних режимах експлуатації. Тривалість періоду розплавлення шихти залежить від введеної в піч потужності. Скорочення простоїв у період расплавлення також сприяє підвищенню продуктивності печі.

Відбором першої проби металу закінчується енергетичний період і починається технологічний. До кінця плавлення температура металу повинна бути в межах 1 480...1 520° С [1].

Під час окисного періоду забезпечується зниження вмісту фосфору в металі; зменшують вміст водню, азоту і неметалевих включень; приводять ванну до стандартного за окисненням стану, що полегшує протікання відновних реакцій.

У відновлювальному періоді проводиться розкислення і десульфатації металу і доведення металу до заданої температури і хімічного складу.

ДСП необхідно оснащувати сучасними швидкодіючими регуляторами переміщення електродів, що забезпечують високі техніко-економічні показники, швидко реакцію на зміни електричних параметрів у силовому ланцюзі ДСП і мають високу надійність.

Система управління електричною потужністю повинна забезпечити зміну і підтримку потужності відповідно до заданого режиму плавки.

1.2 Системи приводів переміщення електродів ДСП

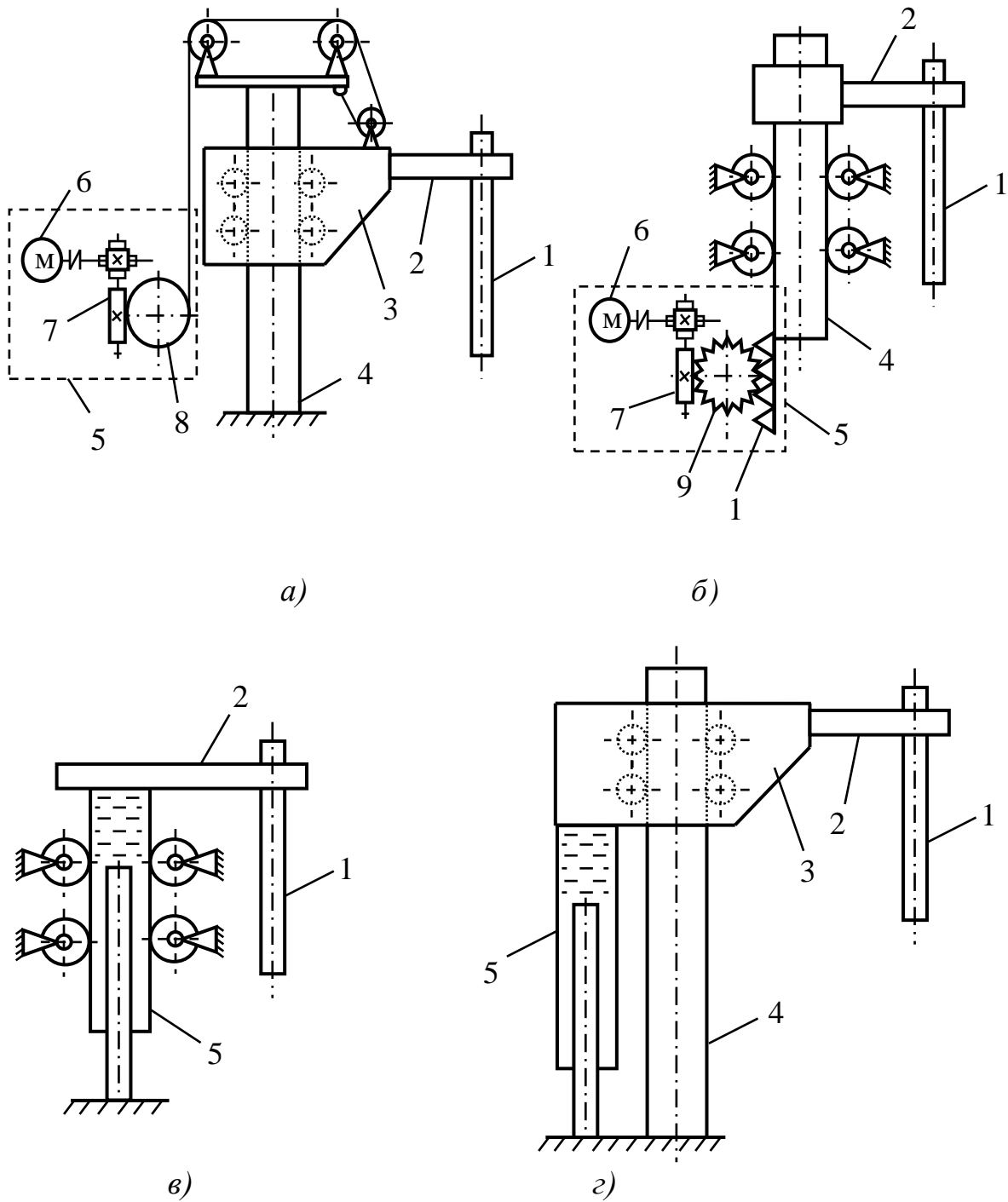
Привід переміщення електродів призначений для переміщення рухомої частини електродотримача разом з електродом під час завалювання шихти і регулювання довжини дуги. Роль ППЕ виключно відповідальна, так як відхилення електричних параметрів від заданих необхідно ліквідувати пересуванням електродів за частки або одиниці секунд. У той же час електрод необхідно встановлювати при заданій довжині дуги з високою точністю [1]. Таким чином, якість роботи ППЕ впливає на продуктивність печі, питома витрата електроенергії, коксування металу.

В історії розвитку дугових сталеплавильних печей при створенні регуляторів переміщення електродів мали місце два типи приводів: електромеханічний та електрогідравлічний [1].

Виконавчий механізм з електромеханічним приводом складається з електродвигуна, редуктора (черв'ячного або циліндричного), механічної передачі (тросової-барabanної, рейкової або гвинтової) і конструкцій, що несуть електрод. Для швидкої ліквідації стрибків струму в період розплавлення шихти необхідний підйом електродів з великою швидкістю. Час підйому залежить від швидкості в сталому режимі і від величини прискорення механізму, яке залежить від інерції рухомих частин механізму і від часу перехідних електромагнітних процесів, яке порівняно мало.

За конструктивним виконанням механізмів переміщення електродів електромеханічні ППЕ ділять на механізми з переміщаються каретками і нерухомими стійками (рис. 1.1, а, г) і механізми з рухомими колонами електрододер і нерухомою кареткою (рис. 1.1, б, в). На рисунку 1.1 прийняті такі позначення: 1 – електрод; 2 – електродотримачі; 3 – каретка; 4 – стійка (колона); 5 – ППЕ; 6 – електродвигун; 7 – редуктор; 8 – барабан; 9 – зубчасте колесо; 10 – рейка.

Інерційність системи управління ППЕ залежить від конструкції виконавчого механізму. Виконавчий механізм з тросово-барabanною передачею має час запізнювання 300...400 мс, у процесі експлуатації внаслідок збільшення зазорів час запізнювання зростає до 800...1 000 мс (див. рис. 1.1, а). Розрахунки [1] показують, що величина запізнювання становить близько 100 мс і знижує допустиму швидкість електродів. Високі значення інерційності обумовлені наявністю інерції двигуна, сухого тертя в механізмах, пружністю ланок виконавчих механізмів, яка при високих швидкостях переміщення електродів призводить до механічних коливань, що передаються регулятору.



*а – з електромеханічним ППЕ і тросово-барабанною передачею;
 б – з електромеханічним ППЕ і рейковою передачею;
 в – з електрогідравлічним ППЕ;
 г – з електрогідравлічним ППЕ при заміні передачі гідроциліндром*
 Рисунок 1.1 – Стояки

Однак у даному механізмі забезпечується найбільша гарантія проти поломок електродів при зіткненні з твердою шихтою.

Також застосовуються механізми з жорстким кінематичним зв'язком, у яких тросову передачу замінюють рейковою (див. рис. 1.1, б). У цьому

випадку запізнення також значне і становить 75...150 мс. При цьому забезпечується більша довговічність і потрібний менший догляд в експлуатації.

Найменше запізнювання (не більше 60 мс) мають електрогідравлічні приводи (див. рис. 1.1, в). Їх виконують з об'ємним і дросельним керуванням. Електрогідравлічний привід з об'ємним управлінням має великий к.к.д. передачі, недоліки – складність і громіздкість. Привід з дросельним керуванням має малі габарити і вагу, низький к.к.д.

Зараз електромеханічний привід в ДСП понад 40 т. практично повністю витіснений електрогідравлічним. Це пов'язано з більш високою швидкістю електрогідроприводу, який практично не має інерційних ланок (система «золотник-гідроциліндр») [1, 3].

Печі з електромеханічним приводом піддавалися модернізації. Модернізація полягала в переході від систем з електромеханічним ППЕ на системи переміщення електродів з електрогідравлічним приводом, що підтверджено світовою практикою. В основному такий перехід полягає в заміні стояків електродів на стояки з гідроциліндрами. Дана модернізація досить дорога, тому замовники вважають більш доцільним придбання нових ДСП [1].

Якщо замінити рейку гідроциліндром, то вийде повноцінний електрогідравлічний механізм ППЕ (рис. 1.1, г). Але електродотримачі при такій модернізації залишаються старими, більш масивними і інерційними.

Заміна електромеханічного ППЕ на електрогідравлічний дозволяє отримати серйозний економічний результат при мінімально можливих витратах. Такий підхід пропонує фірма ТОВ НВФ «Гідромеханіка» (Новосибірськ) у своїй технічній пропозиції щодо модернізації ДСП, яка оснащена електромеханічним регулятором потужності без заміни стояків, – «Електрогідравлічний регулятор потужності ДСП (РТП) типу «сервофаза».

Таким чином, літературний огляд систем приводів переміщення електродів ДСП показав, що найбільш оптимальним за всіма параметрами є електрогідравлічний ППЕ, тому в подальшому будуть розглядатися і досліджуватися системи з електрогідравлічним ППЕ [1].

1.3 Принципи побудови типових систем управління приводом переміщення електродів ДСП

Для регулювання положення електродів дугових сталеплавильних печей застосовують системи управління приводами переміщення електродів ДСП, які можна класифікувати за різними показниками. За способом управління системи управління приводом переміщення електродів можуть бути з диференційними, струмовими та імпедансними РПЕ [1, 4].

Як було сказано раніше, плавлення металу в печі відбувається за рахунок електричної дуги. Температуру шихти визначає потужність дуги. У період розплавлювання шихти особливо важливим є забезпечення введення потужності в піч із заданою точністю за умови, що процес регулювання повинен бути швидким і монотонним. Задана для даного періоду плавки величина потужності дуги визначається за робочими характеристиками, які являють собою залежності електричних параметрів плавки і технологічних характеристик від струмів дуг [1]. Величина підводиться до дуги потужності, визначається виходячи з виразу

$$P_{\delta} = \sum U_{\delta} I_{\delta},$$

де U_{δ} , I_{δ} – напруга і струм дуги.

Звідси випливає, що постійну величину потужності, що підводиться, можна отримати при різних співвідношеннях напруги і сили струму дуги. Однак потужність, що підводиться, залежить також від величини дугового проміжку. Довжина дуги визначає її потужність при певних характеристиках системи живлення. Тому при зміні довжини дуги відбувається управління потужністю. Якщо залишити електроди нерухомими, то режим роботи дуг буде вкрай нестійкий, і вони можуть згаснути. Тому для регулювання величини дугового проміжку використовують механізм переміщення електродів. При цьому довжина дугового проміжку може змінюватися від нуля до деякого значення, яке залежить від фазної напруги. Зміна довжини дуги викликає при незмінному ступені напруги трансформатора значні збурення режиму. Довжину дуги безпосередньо виміряти складно через високу температуру і обгорання електродів у процесі плавлення, тому використовують інші сигнали, які побічно визначають властивості дуги і за допомогою яких здійснюється регулювання режимів роботи ДСП. Вони вибираються з таких умов: наявність досить тісного та монотонного функціонального взаємозв'язку параметра управління з довжиною дуги; можливість автоматичного запалювання дуги при її обриві і при пуску печі; автономне управління кожною фазою печі; простота, точність і надійність датчиків.

У сучасних ДСП в якості таких сигналів використовують струм дуги I_{δ} та напругу дуги U_{δ} . Вони безпосередньо залежать від довжини дуги ℓ_{δ} [1], бо довжина дуги ℓ_{δ} пов'язана з діючим значенням напруги дуги U_{δ} за формулою Фрелиха, яка при робочих струмах понад 10^4 А з достатнім ступенем точності відбиває діюче значення напруги на дузі:

$$U_{\delta} = \alpha + \beta \cdot \ell_{\delta}, \quad (1.1)$$

де α – сума падінь напруг у анода і катода;

ℓ_{δ} – довжина дугового розряду;

β – падіння напруги на 1 мм стовпа дуги (градієнт напруги стовпа дуги), який залежить від періоду плавки (дод. Б).

Напруга дуги забезпечує найбільш точне управління дугою. Використання напруги дуги як параметра регулювання дозволяє для кожної фази пристроїв автоматичного управління зменшити взаємний вплив струмів електродів, знизити асиметрію потужності за фазами.

Під час роботи зв'язок напруги дуги з довжиною дуги не є лінійним, оскільки залежно від періодів плавки значення параметрів α і β змінюються. Але протягом певного проміжку часу (3...5 хв) процес є стаціонарним. Однак напругу на дузі також виміряти безпосередньо неможливо, тому в якості параметра регулювання використовують зазвичай фазну напругу. У зв'язку з цим непрямим методом вимірювання регулювання здійснюється з похибкою.

Струм дуги виміряти можна, тому що всі елементи короткої мережі кожної фази під'єднані послідовно, і струми на кожному з них рівні фазному значенню струму. Система управління приводом переміщення електродів ДСП, заснована на застосуванні струмових регуляторів, як параметри регулювання використовує струми дуг. Однак залежність струму від опору дуги є нелінійною.

Величину, що підводиться до дуги потужності, також можна визначити як

$$P_{\delta} = \sum I_{\delta}^2 \cdot R_{\delta},$$

де R_{δ} – опір дуги, який є головним параметром, що характеризує електричну дугу.

Для збереження в певних межах сили струму і потужності, що підводиться до печі, необхідно регулювати опори електричних дуг, тобто довжини дуг, шляхом переміщення електродів. Опір дуги R_{δ} залежить від довжини ℓ_{δ} дуги $R_{\delta} = U_{\delta} / I_{\delta} = (\alpha + \beta \cdot \ell_{\delta}) / I_{\delta}$. Тому регулювати потужність можна також за опором дуги.

Усі сучасні дугові печі ємністю 1,5 т і вище укомплектовуються автоматичними регуляторами потужності (регуляторами переміщення електродів), які забезпечують підтримання потужності печі на певному рівні, швидку ліквідацію всіх порушень режиму. Під час роботи регулятор повинен впливати на привід переміщення електродів, відновлюючи довжину дугового проміжку, відповідну заданій потужності печі.

1.3.1 Система управління приводом переміщення електродів ДСП зі струмовими регуляторами

Спочатку на практиці широкого поширення набули струмові (рис. 1.2) і імпедансні РПЕ [1, 5]. Параметром регулювання $U_{рег}$ у струмовому регуляторі вибрана сила струму I_{δ} дуги, сигнал якої знімається з датчика ДС струму: $U_{рег} = K_c I_{\delta}$, де K_c – масштабуючий коефіцієнт МС струму, що залежить від коефіцієнта трансформації трансформатора струму. Регулятор під час роботи підтримує незмінною силу струму печі. У струмовому РПЕ дуги на його вхід подається випрямлене і відфільтроване значення напруги $U_{рег}$, пропорційне значенню струму дуги I_{δ} , яке порівнюється із завданням U_3 , і формується сигнал розузгодженості U_p , що впливає на переміщення електродів [1, 5]:

$$U_p = U_3 - U_{рег} = K_c I_{\delta_3} - K_c I_{\delta} = K_c (I_{\delta_3} - I_{\delta}) = K_c \cdot \Delta I_{\delta}, \quad (1.2)$$

де I_{δ_3} – задане значення сили струму дуги.

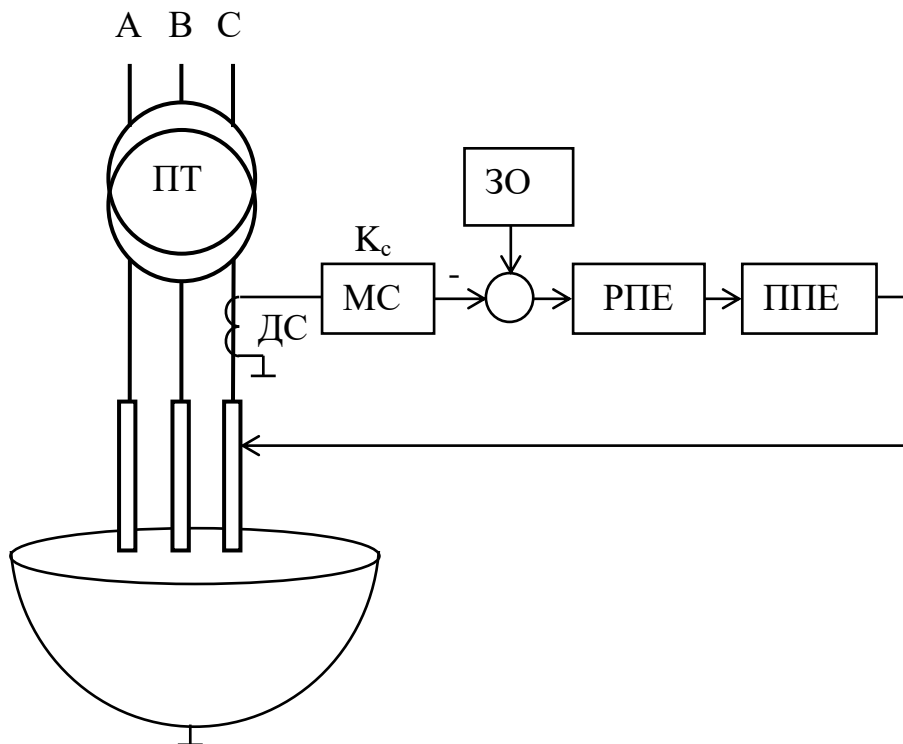


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи управління приводом переміщення електродів ДСП з струмовим регулятором для однієї фази

Завдання ЗС струму вводиться за допомогою напруги постійного підмагнічування дроселя, що включається в струмовий ланцюг регулятора.

У роботі В. М. Глінкова [5] доводиться, що контролю тільки струму недостатньо. Струмові регулятори мають безліч недоліків. Наприклад, при зникненні напруги регулятор спрацьовує на опускання електродів, що обумовлює необхідність спеціального пристрою, що запобігає їх опусканню. При включенні струмового регулятора електроди трьох фаз опускаються. Дуги запалюються тільки в тому випадку, коли два електроди (або три) одночасно торкаються металу. В інших випадках можлива поломка електрода або коксування металеві ванни. На печах, де встановлений струмовий регулятор, запускають печі вручну, а регулятор підключають у той момент, коли горять всі дуги. Також випадкові зміни сили струму однієї фази викликають зміни сили струму у двох інших фазах, внаслідок чого відбуваються непотрібні переміщення електродів, нерівномірний розподіл навантаження між окремими фазами і встановлюються дуги різних довжин. Може статися занурення у ванну того електрода, під яким була найкоротша дуга. Токовий регулятор не забезпечує сталість потужності дуги, тому в сучасному світі вони застосовуються тільки на застарілих установках.

1.3.2 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з диференціальними регуляторами

Диференціальний регулятор формує різницю сигналів, пропорційних струму дуги і напрузі на виході пічного трансформатора (рис. 1.3) [5]:

$$\begin{aligned} U_p &= K_c I_\delta - K_n U_{\text{ПТ}} = K_c I_\delta (K_c / K_n - U_{\text{ПТ}} / I_\delta) = \\ &= K_n I_\delta (z_{\delta z} - z_\delta) = K_n I_\delta \Delta z_\delta, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де K_c і K_n – змінний і постійний коефіцієнти, що залежать від коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів струму і напруги;

$U_{\text{ПТ}}$ – напруга на виході пічного трансформатора;

$z_{\delta z}$, z_δ – задане і поточне значення повного опору дуги, до якого входять опори елементів вторинного струмопроводу.

Наприклад, цей принцип управління використовується в технологічному комплексі «піч-ківш», а також на ДСП-12НЗ ПрАТ «НКМЗ» [6, 7].

На рисунку 1.3 наведена структурна схема СУ ППЕ ДСП з диференціальним регулятором для однієї фази. Для двох інших фаз схема аналогічна. Значення напруг на виході пічного трансформатора і сили струму у фазах короткої мережі контролюються за допомогою датчиків напруги ДН і струму ДС. Після масштабування в підсилювачах (масштабуючі коефіцієнти струму МС і напруги МН) з коефіцієнтами передачі K_m та K_n сигнали, відповідні струму і напрузі, віднімаються, і їх різниця подається на регулятор переміщення електродів. Задане значення повного опору дуги розраховується як $z_{\text{дз}} = K_c / K_n$, тому воно регулюється шляхом зміни коефіцієнта K_c . Коефіцієнт передачі K_n при цьому не змінюють. Регулятор виробляє сигнали управління ППЕ. Електрод переміщається, зменшуючи сигнал неузгодженості [5].

При одночасному зміні напруги і сили струму положення електрода не змінюється. СУ ППЕ з диференціальним регулятором у порівнянні з СУ ППЕ з струмовим регулятором більш точно управляє ППЕ, оскільки крім струму дуги використовує також і повну напругу дуги. Однак при цьому недоліком диференціального регулятора є велика залежність потужності печі від коливань напруги мережі. Тому СУ ППЕ з диференціальним регулятором також не забезпечує стабільний процес горіння дуг.

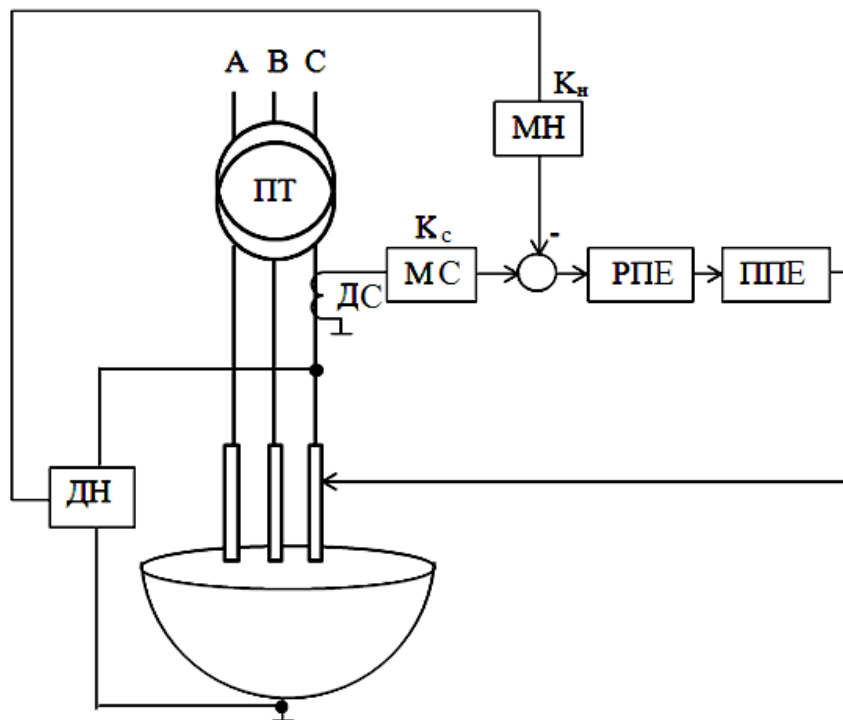


Рисунок 1.3 – Структурна схема системи управління приводом переміщення електродів ДСП з диференціальним регулятором для однієї фази

1.3.3 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з імпедансними регуляторами

В основі імпедансних регуляторів переміщення електродів (див. рис. 1.4) лежать три незалежних регулятори повного опору для трьох фаз:

$$U_p = \frac{aU_{ПТ}}{bI_{ДС}} = \frac{a}{b}z_{\partial}, \quad (1.4)$$

де a і b – постійні коефіцієнти, що залежать від коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів напруги та струму;

z_{∂} – повний опір дуги.

На рисунку 1.4 наведена структурна схема СУ ППЕ ДСП з імпедансним регулятором для однієї фази. Для двох інших фаз схема аналогічна. У роботі регулятора застосовуються значення з датчика напруги ДН на виході пічного трансформатора і датчика струму ДС дуги. Інформація з виходів цих блоків передається на вхід блоку поділу, де отримана напруга ділиться на струм дуги, внаслідок чого на виході з'являється сигнал з інформацією про імпедансі, тобто повному опорі дуги. Цей сигнал порівнюється із заданим значенням опору дуги за допомогою задатчика опору ЗО, формуючи сигнал неузгодженості, що надходить на РПЕ, з виходу якого сигнал управління надходить на ППЕ, змінюючи величину дугового зазору, тобто довжину дуги [5].

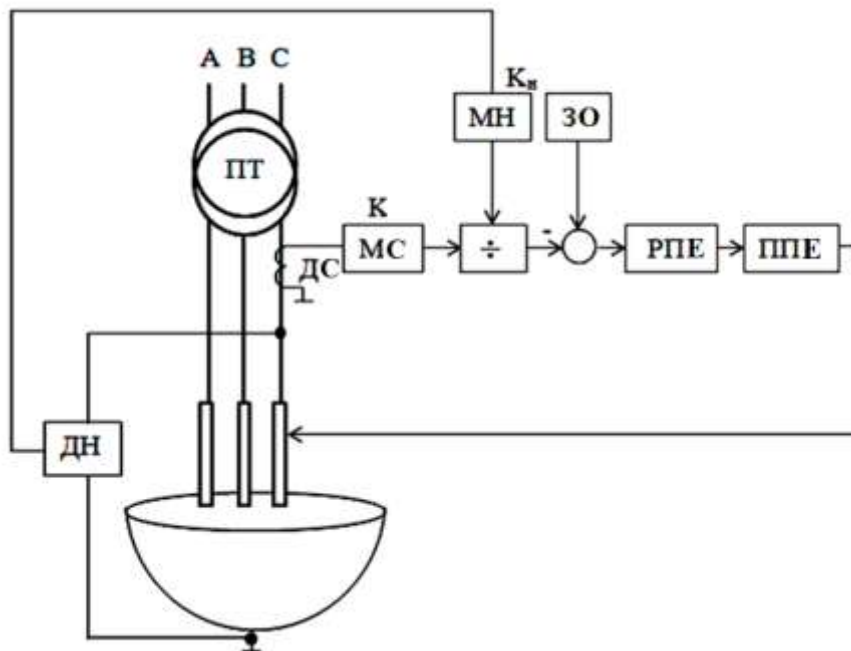


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління приводом переміщення електродів ДСП з імпедансним регулятором

Перевага застосування імпедансного РПЕ полягає в тому, що при зникненні напруги на печі (відключення головного вимикача) сигнал розбалансу в плечах струму і напруги регулятора відсутній і електроди нерухомі. Також імпедансний регулятор дозволяє здійснити автоматичний пуск печі, оскільки в момент зіткнення першого електрода з шихтою напруга стає малою, і регулятор зупиняє електрод. При підході другого електрода запалюються дуги у двох фазах печі.

При імпедансному регулюванні зі збільшенням сили струму в одній з фаз переміщення електродів інших фаз значно менше (або зовсім відсутні), тому що збільшення сили струму двох інших фаз супроводжується одночасним підвищенням напружень в них (унаслідок «перекосу» зірки напруг). Чутливість імпедансного регулятора вище, ніж у токового регулятора при інших рівних умовах, тому що одночасно зі збільшенням сили струму знижується напруга відповідної фази, і навпаки [1].

З розглянутих СУ ППЕ з різними РПЕ системи управління з імпедансними регуляторами краще за інших дозволяють регулювати довжини дуг. Тому в подальшому в роботі дослідження будуть проводитися для СУ ППЕ з імпедансними регуляторами.

Але недоліком імпедансного регулятора, так само як і диференціального, є велика залежність потужності печі від коливань напруги мережі.

1.3.4 Система управління приводом переміщення електродів ДСП з комбінованим законом регулювання

Крім використання СУ ППЕ з типовими регуляторами можна застосовувати комбіновані закони управління. Вченими Лизанець В.В., Паранчук Я.С., Паранчук Р.Я., Мусихина Н.П. і Смітюхом С.В. було запропоновано замінити діючий в існуючих регуляторах переміщення електродів диференціальний закон управління $U_p = K_c I_d - K_n U_{ПТ}$ на регулювання положення електродів у режимах горіння дуги за законом відхилення напруги дуги U_d від заданої її уставки $U_{дз}$: $U_p = k_n (U_{дз} - U_d)$, т. ч. виключити вплив флуктуацій струмів дуг. А в режимах обривів дуг або експлуатаційних к. з. для надійного запалювання дуг авторами пропонується сигнал управління на переміщення електродів формувати за диференціальним законом.

Для отримання порівняльної оцінки ефективності використання діючого і запропонованого законів регулювання довжин дуг на цифровій моделі системи регулювання електричного режиму дугової печі ДСП-3 з регулятором АРДМ-Т Бориславського експериментального ливарно-механічного заводу [8] виконані дослідження процесів стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги. Отримані результати показали,

що покращився низка техніко-економічних показників печі і показників якості електроенергії на шинах приєднання ДСП до електромережі.

Однак, як було з'ясовано, диференційний закон управління і закон управління з відхилення одного параметра не забезпечують точного управління.

1.4 Збурення в системах управління приводом переміщення електродів

До періоду розплавлення можна віднести понад 80...90 % додаткових втрат. Тому дуже важливо стабілізувати роботу печі в цей проміжок часу і мінімізувати додаткові електричні та теплові втрати.

Складність поведінки дуги особливо проявляється в енергетичному періоді на початкових етапах плавки, наприклад в момент заглиблення електродів, і під час проплавлення колодязів. Дуга в цей момент горить вкрай нестійко, форма миттєвих значень струму і напруги різко викривлена. Виникають безперервні штовхоподібні наростання навантаження і потужності, що перевищують за амплітудою задані значення. Даний період характеризується бурхливим процесом, коли кожне нове збурення в пічному просторі, внаслідок руху шихти, відбувається раніше, ніж закінчується оброблення реакції на попереднє обурення. Тоді довжина дуги дуже мала 8...20 мм, і її нижній кінець весь час рухається. Дуга перекидається з одного шматка металу на інший, часто виникають технологічні к. з. і обриви дуг. Унаслідок цього потужність коливається від нуля до декількох тисяч кіловат. Частота цих коливань за експериментальними даними в ДСП ємністю 50...200 т становить 0,2...3,8 Гц. Кожне технологічне к. з. має бути швидко усунуто, оскільки воно призводить до зупинки корисного виділення потужності при максимальних втрат і зниження коефіцієнта потужності об'єкта. При тривалості к. з. 2...3 с і частоті 5 к. з. за хвилину, ДСП працює з відхиленням від заданого режиму протягом 20...25 % усього часу. Це призводить до збільшення періоду розплавлення, зниження потужності і продуктивності печі, збільшення споживання електроенергії і електродів.

До початку 70-х років штовхоподібні горизонтальні рухи провідників вторинного струмопідводу ДСП і пов'язаних з ними механічних частин при флуктуаціях струму в період розплавлення не привертала увагу, тому що суттєво не позначалися на стійкості горіння дуг. Положення змінилося з появою ДСП з високими питомими потужностями, у зв'язку з чим суттєво підвищилися робочі струми, вторинна напруга і, відповідно, електродинамічні взаємодії в струмопідводі. Конструкції механічних частин електродотримач і короткої мережі практично залишилися без зміни. Оскільки провідники механічно

жорстко пов'язані з конструкціями електротримачів, ці взаємодії почали помітно впливати на роботу ДСП в цілому. На етапі плавлення шихти і в період розплавлення колодязів стали значущими коливання механічної системи під дією електромеханічних сил і електричного режиму у зв'язку зі зміною довжини дуги. У свою чергу, зазначені явища призвели до низки негативних наслідків: недовикористання потужності пічного трансформатора, негативний вплив на мережу живлення, поломки електродів, передчасний знос елементів конструкції. Таким чином, велику увагу стали привертати причини і наслідки вібрацій і коливань механічних елементів печі: електродів, електродотримачів, гнучких кабелів, взаємопов'язаних з електричними параметрами короткої мережі. Виникла необхідність поглибленого дослідження цих явищ [9].

Одне з перших повідомлень про вібрації електродотримачів резонансного характеру зроблено Равенскрафтом на основі досвіду роботи 50-тонних печей. Швабе в доповіді на VII Міжнародному конгресі з електротермії повідомив про проблеми, пов'язані з аварійними коливаннями електродів, що виникли під час пуску найбільшої у світі ДСП ємністю 400 тонн. Причини аварійних ситуацій зводилися до виникаючого механічного резонансу, пов'язаного з довжиною електродів. Усунення небажаних автоколивань, які викликали б поломки електродів, зажадало змінити не тільки довжину, але і діаметр графітованих електродів з 610 до 710 мм.

У 70-х роках з'явилися повідомлення в СРСР. За даними при експлуатації 100-тонної дугового печі Донецького металургійного заводу після реконструкції, що включає підвищення потужності і зміну струмопідводу для зниження індуктивності на 14,5 %, було виявлено підвищення простоїв на 8 % за рахунок поломок електродів (1,39 %) і ремонту електродотримача (1,52 %).

Проблеми інтенсивних горизонтальних коливань, обумовлених взаємодією електромагнітних полів сусідніх фаз, виникли під час пуску в експлуатацію нової електропечі ДСП-50Н2 на Запорізькому металургійному заводі з питомою потужністю 0,5 МВт / т, а також після установки на печі ДСП-50 цього самого заводу трансформатора потужністю 25 МВА [10]. Незважаючи на те, що електричні параметри коротких мереж у принципі забезпечували можливість введення до робочого простору активної потужності на першому місці напруги (417 В) в межах 19...20,5 МВт, через інтенсивні коливання електродів на цьому ступені процес розплавлення шихти проводили на зниженій напрузі (378 В) при середній активній потужності 14...15 МВт.

При експериментальних дослідженнях цих електропечей спостерігалися механічні пружні коливання системи електродотримачів з періодом 0,31 с і амплітудою 6,7 мм, які призводили до коливань сили струму дуги від 60 до 10 кА з частотою, близькою до частоти власних пружних коливань системи електродотримачів. Це призводило до

нерівномірного введення активної потужності в піч з відхиленнями, що сягали 30...40 % у відношенні до заданого значення в період проплавлення колодязів. Проведені дослідження вітчизняних електропечей ємністю 50 тонн з питомою потужністю 0,5 МВт / т дозволили виявити достовірно тільки одну особливість системи: для підвищення коефіцієнта потужності печі ДСП-50 була конструктивно знижена реактивність струмопідводу. Це забезпечило таке поєднання робочих параметрів, яке призвело до руйнування конструкцій через електродинамічні коливання. Електропіч була запущена в експлуатацію тільки після виготовлення нових конструкцій короткої мережі з різким збільшенням реактивного опору струмопідводу печі.

Інша проблема, що виникла при переведенні ДСП у режим надвисокої потужності – це зворотний вплив ДСП на мережу живлення. Викликані в електричних мережах роботою таких печей несиметрії і коливання напруги, поява низьких гармонік і перенапруг знижували якість електроенергії. Наприклад, дослідження коливань при живленні дугових печей з трансформаторами 25 і 16 МВА показали, що при потужності ДСП 25 МВА домінували коливання з частотою 4...6 Гц, а в другому випадку (16 МВА) мали місце коливання як з частотою 3...4 Гц, так і з частотою до 1 Гц, причому останні переважали.

Було проведено експериментальні дослідження коливань напруги дуг і їх впливу на живильну мережу в разі експлуатації 80-тонної дугової електропечі з джерелом живлення 30 МВА. Було виявлено, що періодичні флуктуації напруги в період плавлення пов'язані зі змінами довжини дуг унаслідок електромеханічних коливань усієї механічної системи.

Також зазначено, що в ряді випадків причиною низькочастотних (до 0,5 Гц) коливань у мережі може бути робота САР ДСП. При цьому робота САР змінюється внаслідок горизонтальних коливань електрода та довжин дуг, що сприяє ще більшому розгойдуванню механічної системи у вертикальній площині.

Відсутність глибокого розуміння природи електромеханічних коливань в ДСП призвело до того, що з'явилося багато робіт із вдосконалення систем управління приводом переміщення електродів ДСП. Більшість з них було присвячено дослідженню методів поліпшення динамічних властивостей САР ДСП, створення ефективних «швидких» регуляторів, які дозволяли б знижувати пружні коливання електродів. Однак як виявилось на практиці, робота регуляторів не забезпечувала зниження електромеханічних коливань, а високу швидкодію САР на вітчизняних печах реалізувати було практично неможливо. При інтенсивних вібраціях системи електродотримачів процес регулювання електричного режиму печі порушувався. Якщо регулятор відпрацьовував будь-які зміни електричного режиму, то механічна система розгойдувалася ще сильніше – САР ДСП ставала підсилювачем вертикальних електромеханічних коливань. Тому на діючих печах стійкість САР

досягається вибором і налаштуванням параметрів системи (розширенням зони нечутливості). Нерозуміння важливості комплексного дослідження механічних властивостей елементів конструкції електромеханічної системи введення, перетворення і регулювання електроенергії стримувало розвиток САР приводів ДСП.

Експериментальні дослідження роботи ДСП показали, що при певних умовах в її електромеханічній системі виникають автоколивання. Автоколивання електромеханічної системи ДСП викликають зниження втомної міцності її елементів, а при самозбуджувальних коливаннях на резонансних частотах призводять до руйнування графітованих електродів.

При експлуатаційних к. з. збільшення струму у фазах призводить до електродинамічної взаємодії електродів. При збуренні в електричній системі, хоча б в одній з фаз, виникає електродинамічний удар, що впливає на електроди і трубошини всіх трьох фаз. Електродинамічні сили, що діють на електроди двох інших фаз, спрямовані до стінки, згинають пружні конструкції механізмів переміщення цих двох електродів, унаслідок чого змінюються довжини їх дуг і в результаті зменшуються їх опори. Далі під дією пружних сил система повертається до початкового стану, а опір дуг зменшується, отже, струми збільшуються, що призводить до виникнення нової хвилі електродинамічних сил, які відхиляють електроди до стінок. При певних параметрах системи поперечні коливання набувають незатухаючого характеру. Поперечні автоколивання електродів викликають модуляцію струмів і напруг дуг, а це за допомогою регуляторів впливає на ППЕ, які починають коливатися за поздовжньою віссю.

У ДСП крім електромеханічних зусиль між електродами мають місце електродинамічні зусилля між електродом і неоднорідною кускатою шихтою, що також може призвести до поломки електродів. Величина цих зусиль залежить від глибини занурення електрода в шихту і відстані між поверхнею електрода і поверхнею шихти.

Ще одна проблема – вплив коливань гнучких кабелів на стабільність процесу плавки. Експериментально встановлено, що при експлуатаційних коротких замикань (при падіннях шматків шихти і т. п.) виникають електродинамічні зусилля між гнучкими кабелями трьох фаз. Після зникнення експлуатаційних коротких замикань ГК коливаються з частотами вільних згасаючих коливань. При цьому змінюються відстані між фазами, що призводить до відповідної зміни взаємних індуктивностей фаз. Тому в струмах фаз виникають відповідні модульовані затухаючі коливання, які порушують нормальну роботу регуляторів переміщення електродів дугової сталеплавильної печі [13, 17]. Таким чином, електроди також починають здійснювати поздовжні коливання. Такі коливальні процеси в ДСП можуть викликати резонанс системи і виникнення незатухаючих коливань. Такі аварійні режими можуть тривати десятки хвилин, оскільки за одну плавку може відбуватися до 200 коротких

замикань. Електроμηχανічні коливання ГК, а, отже, і поздовжні коливання графітованих електродів, які створюються за рахунок зворотних зв'язків за струмом і напругою РПЕ, викликають зниження втомної міцності елементів системи, а також можуть призвести до руйнування графітованих електродів, що призводить до витрати енергії, збільшення часу розплавлення металу і зниження продуктивності печі. Завдання компенсації коливань гнучких кабелів і буде вирішуватися в даній роботі.

Якщо говорити про дугові сталеплавильні печі постійного струму, то вони відрізняються більшою стабільністю плавки, до того ж практично всі працюючі дугові печі постійного струму є одноелектродними, у зв'язку з чим дана проблема ДСП постійного струму стосуватися не буде.

Техніко-економічні показники дугових сталеплавильних печей залежать також від витрат графітованих електродів, який у свою чергу багато в чому визначається ефективністю управління електричним режимом ДСП, а також мають місце їх поломки під час роботи печей. Необхідно враховувати ще те, що при поломці електродів під час роботи печі виникає не тільки економічний збиток, пов'язаний з підвищенням їх витрати, а й шкоду, обумовлену зниженням продуктивності печі, бо її відключають на час заміни електродів.

Статистичні дослідження роботи ДСП протягом тривалого часу дозволили встановити, що основними причинами поломок електродів є: падіння великих шматків шихти на електроди, а також їх упор у струмонепровідну шихту, оскільки в даному випадку є складним автоматично відстежити цей момент і вчасно його ліквідувати. Це питання також буде розглядатися в даній роботі [4].

1.5 Аналізування методів компенсації зовнішніх електроμηχανічних збурень у системах управління приводом переміщення електродів ДСП

Згладжування поштовхів струму і зниження рівня вібрації електродотримачів на надпотужних печах досягають забезпеченням підвищеного імпедансу короткої мережі шляхом реконструкції печей. Однак це призводить до зниження коефіцієнта потужності ДСП. У 1993 р фірмою «Ротерхем Інжиніринг стилз» (Великобританія) була введена в експлуатацію 165-тонна трифазна дугова піч з трансформатором потужністю 120 МВА при вторинній напрузі 1 200 В. Високий імпеданс у ланцюзі струмів дуг був досягнутий конструктивними заходами без вбудованого реактора. При експлуатації печі (у режимі 1 200 В, 50...52 кА) небезпечних коливань електродотримачів, завдяки високому імпедансу, не виникало, не було виявлено нестійкості електричних дуг. Збільшення імпедансу з 3,9 до 5,5 мОм призвело до того, що вібрація, яка призводила до поломок електродів, зникла. Експлуатація електропечі з подібними

дугами вимагає використання режимів із застосуванням пінистого шлаку з метою уникнення швидкого зносу вогнетривкого матеріалу стін.

Зниження індуктивного опору короткої мережі призводить до поліпшення електричних характеристик печі (збільшується коефіцієнт потужності), але разом з цим спостерігається різке зростання електромеханічних коливань, що підтверджується практикою [18]. Тому при зниженні реактивного опору вторинного струмопроводу шляхом зменшення довжини ГК за рахунок застосування еркерного зливу металу на ДСП-100I8, який передбачає менший кут нахилу ванни (280 замість 400 для ДСП-100I7), існує небезпека зниження електродинамічної стійкості печі.

Як було встановлено, першопричиною виникнення коливань у системі ДСП є електродинамічні зусилля, викликані експлуатаційними к. з. у фазах, які виключити неможливо. Їх мінімізація за рахунок включення в ланцюг струмопроводу реакторів знижує корисну потужність печі. Установка розпірок і щільних стяжок, демпферів і пристроїв, що поглинають коливальну енергію системи [19-21], засобів придушення «танців» проводів [22], які фіксують гнучкі кабелі з метою механічного запобігання їх коливанню, також не дає позитивних результатів, оскільки при фіксації ГК електродинаміка зростає і відбувається стирання і пошкодження рукавів водоохолодження і самих гнучких проводів внаслідок тісного механічного контакту з розпорками, а також пробої ізоляції, що сприяє виходу кабелів з ладу. При цьому розпорки не тільки не усувають електромеханічні коливання через дії електродинамічних зусиль між фазами, а й змінюють механічні властивості системи, збільшуючи при цьому сумарну жорсткість, отже, і її власну частоту, що може негативно впливати на електромеханічні властивості кабельних гірлянд.

Тому основну увагу слід приділити тому, щоб згасаючі коливання не перейшли в самозбудні, а процес загасання проходив інтенсивніше.

На даний момент існує велика кількість вітчизняних і зарубіжних робіт, присвячених даній проблемі. Займатися їй почали приблизно з 70-х років ХХ століття з моменту початку освоєння надпотужних ДСП, і велика частина досліджень присвячена саме таким печам. Так Сапко А.І. у співпраці з Хасін К.М. і Ковалем Н.В. проводили серію досліджень на печах ємністю понад 50 тонн, результатом яких стало отримання перехідних процесів коливань, динамічних характеристик регуляторів потужності (переміщення електродів) і кореляційних залежностей між величинами, основною причиною коливань яких було електродинамічна взаємодія сусідніх фаз дугової печі змінного струму [23–24]. Подібні дослідження були проведені і за кордоном Ремусом Б. і Тіммом К. [9, 10].

У кінці ХХ століття – на початку ХХІ століття дослідження були продовжені під керівництвом Чередниченко В.С. з Новосибірська. У цих роботах проаналізовано вплив електродинамічної взаємодії фаз ДСП змінного струму, а також вплив взаємодії струмоведучих кабелів на роботу печі. На перше місце були поставлені питання електромагнітної взаємодії струмів сусідніх фаз печі [25].

Дослідження електродинамічних явищ у ДСП проводилися низкою авторів [18]. Була встановлена фізична природа електродинамічних взаємодій точних струмопроводів ДСП, запропоновані математичні моделі, що дозволяють розкрити загальні закономірності, які відображають залежність параметрів коливань електричних режимів від співвідношення електричних параметрів печі і властивостей механічної системи ДСП, яка бере участь у процесі коливань. Однак використовуваний у роботах математичний апарат обмежував можливості моделей, а прийняті допущення віддалили їх від реального об'єкта. Тому розроблені в результаті зазначених досліджень рекомендації для проектувальників ДСП, наприклад триангуляція вторинного струмопроводу, підвищення жорсткості стояка електротримача, не дозволили істотно знизити негативні наслідки електромеханічних коливань. Вузли конструкції електродотримача, як і раніше, не витримували змінних електродинамічних навантажень, коливання електричних параметрів короткої мережі знижували введення потужності до плавильного простору, не відбувалося зниження низькочастотних складових струму в печі.

Аналізування роботи ДСП показало, що процеси регулювання параметрів ЕР проходять в умовах значних і безперервних параметричних збурень, зокрема зміни параметрів силового ланцюга ДСП, дії міжфазних перехресних зв'язків та нестаціонарних випадкових збурень. Отримати точні математичні моделі опису режимів локальних підсистем і точні аналітичні моделі синтезу оптимального управління при таких особливостях структури САР і характеристиках режимів неможливо. Тому найбільш ефективним підходом для реалізації оптимальних процесів управління і регулювання координат ЕР протягом усієї плавки на всьому діапазоні їх зміни останнім часом є використання новітніх інтелектуальних методів управління, зокрема принципів нечіткого управління, генетичного алгоритму та стохастичної адаптації до змін інтегральних характеристик збурень протягом плавки. Використання пропозованих підходів надає змоги отримати оптимальні та інваріантні до параметричних збурень і до змін інтегральних характеристик збурень процеси регулювання координат локальних підсистем на повному діапазоні їх зміни. Головна особливість нових інтелектуальних систем полягає в тому, що вона не прагнуть приводити електричний і технологічний режими печі до яких-небудь стандартних параметрів, заздалегідь закладених у систему, а з огляду на особливості виплавленої сталі, шихти і ходу плавки, висувають нові

оптимальними, до яких, використовуючи всі технологічні системи, належать електричний і технологічний режими дугової печі.

У роботі [26] пропонується для зменшення дисперсії струму використовувати fuzzy logic регулятор. Даний спосіб управління ППЕ ДСП полягає у визначенні напружень дуг фаз, визначенні швидкостей переміщення електродів фаз і fuzzy-регулюванні переміщення електродів фаз за відхиленнями напруги дуг фаз від заданих і швидкостей переміщення електродів від заданих. База правил fuzzy logic регулятора [26] містить 63 правила, а вихідними сигналами служать: швидкість обертання двигуна і напруга дуги. Використання в САР переміщення електродів ДСП fuzzy logic регулятора вирішує такі завдання: автоматичне запалювання дуги при її зникненні внаслідок обвалу шихти на електрод, або обриву дуги внаслідок провалу шихти під електродом; відпрацювання збурень в дуговому просторі з необхідними динамічними показниками і підтримування в процесі плавки заданого електричного режиму. Швидкодія такої системи вище, ніж швидкодія традиційних систем з пропорційним регулятором.

Недоліком цього способу є недостатня точність регулювання переміщення електродів, пов'язана з відсутністю прямої залежності довжин дуг від їх напружень, залежно напруг дуг від змін струмів в інших фазах, а також від зміни опорів електродів при їх обгоранні і зміні взаємних індуктивностей гнучких кабелів. До того ж сформована база з 63 правил ускладнює реалізацію регулятора і його використання. Тому для спрощення структури регулятора і усунення можливих помилок при формуванні бази правил і проведення структурно-параметричного синтезу пропонується використовувати neuro fuzzy регулятор [27]. Запропонована СУ ППЕ [27] має більш високу швидкодію, причому відсутні коливання проміжних координат і їх перерегулювання знижено на 15 % у порівнянні з традиційними системами. Підвищення швидкодії системи дозволило знизити помилку стабілізації струмів дуг ДСП з 7...9 до 2 %, що зменшило дисперсію струмів дуг у порівнянні з традиційною системою регулювання. Однак створений neuro fuzzy регулятор, також як і fuzzy регулятор, не враховує електро механічні взаємозв'язки коливань ГК і електричних параметрів силового ланцюга ДСП.

У роботі [28] з метою підвищення точності стабілізації струмів дуг використовуються нечіткі паралельні коректори. Для підвищення точності контролю напруг дуг і для поліпшення показників динаміки регулювання координат електричного режиму розроблена нейро-мережева система ідентифікації параметрів короткої мережі ДСП. Також у роботі [29] для підвищення динамічної точності регулювання потужності дуг розроблена двоконтурна система оптимальної стабілізації координат ЕР на основі нейронної мережі. Однак у цих роботах також було проігноровано завдання стабілізації довжин дуг при коливаннях гнучких струмопроводів.

Проблема зниження вібрацій електромеханічних систем залишається актуальною. Наведені вище положення, які спираються на застосування різних методів зниження дисперсій регульованих координат і оптимізації режимів плавки, не надають змоги точно описати розкид розглянутих зовнішніх збурень і розробити заходи їх ліквідації. Таким чином, очевидна необхідність додаткових досліджень електромеханічних властивостей ДСП для виявлення всіх внутрішніх взаємозв'язків у електромеханічній системі ДСП.

Аналізування методів компенсації електромеханічних коливань СУ ППЕ показує, що найбільш перспективним підходом для реалізації оптимальних процесів управління параметрами ДСП у даний час є метод нечіткої логіки, проте його використання також потребує удосконалення.

Що стосується питання захисту електродів при упорі в струмонепровідну шихту, то вона може здійснюватися двома шляхами. Перший варіант – це часткове розвантаження електрода, що має на увазі в механізмі переміщення електрода крім робочого гідроциліндра ще й наявність спеціального плунжерного циліндра, який підпирає електродотримачі, робоча порожнину якого з'єднана з газогідравлічним акумулятором, розвантажує електрод. Іншими словами при упорі в струмонепровідну шихту електрод не ламається, тому що ваги конструкції не вистачає через її часткового розвантаження. Другий варіант – це установка спеціальних пристроїв, які встигають відреагувати на початок падіння тиску в робочому гідроциліндрі і замкнути його, запобігши тим самим поломку електрода.

Перший із шляхів вимагає втручання в конструкцію електродотримача, а тому неприйнятний. Розробкою пристроїв другого типу займалися багато вчених. Наприклад, у роботі [28] пропонується в частотному діапазоні 2,0...10,0 Гц вимірювати електромеханічні коливання системи «електрод-електродотримачі» в горизонтальній площині для кожного електрода в останній проміжок часу $\Delta t = 40...60$ с і безперервно аналізувати динаміку поведінки амплітуди коливань. Оцінюють перевищення кута падіння прямої апроксимуючої залежності амплітуди в часі на ділянці Δt щодо величини 250. Якщо це кут понад 250 хоча б для одного електрода, плавлення переривають і струмонепровідну шихту усувають.

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Гідромеханіка» (Новосибірськ) розробила для всіх ДСП лінію спеціальних швидкодіючих гідравлічних клапанів, що захищають електроди від поломки при упорі в струмонепровідну шихту і при обриві рукава високого тиску. Захист реалізується шляхом автоматичного замикання клапана у функції зміни різниці тисків на його крайках.

Недоліком цих пристроїв є інерційність, пов'язана з інерційністю датчика тиску, мала надійність захисту електродів і можливість помилкової роботи при перешкодах.

1.6 Аналізування математичних моделей електромеханічних систем управління приводом переміщення електродів ДСП

Основоположні результати дослідження ДСП як системи зі взаємопов'язаними електричними і механічними параметрами належать Хасіну К.М. Запропонована ним модель заснована на поданні системи «електрод-електродотримач» у вигляді двох замкнутих коливальних електродинамічних контурів: один, який включає в себе дугу, електродотримачі з електродом і визначає коливання горизонтальних переміщень електрода, і другий, який визначає коливання вертикальних переміщень електрода та включає дугу, електродотримачі з електродом і систему автоматичного регулювання ДСП. Його робота присвячена дослідженню електродинамічних коливань електродів, а не гнучких кабелів, тому не вирішує проблему коливань ГК.

Великий внесок у дослідження електромеханічних коливань ЕР і систем електродів-електродотримачів внесла робота [18]. На базі нового уявлення про діючі в ДСП взаємозв'язки, що включають як елементи струмопроводу, так і елементи механічної конструкції, автором [18] були виявлені два замкнуті коливальні контури з прямими і зворотними за довжиною дуги зв'язками, досліджено механізм виникнення і розвитку коливань у контурі «дуга-електродотримач з електродом-дугою», досліджена електромеханічна стійкість установки. Однак досліджуючи взаємозв'язок між електричними і механічними характеристиками ДСП, автор Єлманова Л.П. [18], не розглядає процеси, що передують порушенню коливань ЕМС під дією змінних електродинамічних зусиль. До цих процесів належать явища, які спочатку викликають амплітудну модуляцію струмів.

У роботах [13, 17, 30, 31] запропоновано математичні моделі ЕМС ДСП, засновані на новому рівні деталізації ДСП. Розроблено концепції аналізу ДСП як ЕМС з внутрішніми взаємозв'язками; досліджені причина пробудження й розвитку коливань в ДСП і вплив електромеханічних коливань кабельних гірлянд на ЕР печі. За допомогою математичних моделей отримано залежності зміни взаємних індуктивностей і фазних струмів при коливаннях гнучких струмопроводів. Однак дані моделі не дозволяють врахувати вплив коливань ГК на стабільність дуг. До того ж робота [13] присвячена технічним вимогам до конструкцій печей, а не вдосконалення ЕМСУ ППЕ, тому проблему компенсації електромеханічних коливань ГК так і не вирішено.

Відомі математичні моделі не дають повного уявлення про вплив електромеханічних коливань ГК на роботу РПЕ і не вирішують задачу компенсації коливань ГК. Отже, необхідні додаткові дослідження і удосконалення математичних моделей ЕМСУ ППЕ ДСП.

1.7 Методи досліджень електричного ланцюга ДСП

Завдання вибору методів досліджень впливає на точність моделювання процесів, тому є важливим і відповідальним етапом.

Як відомо, вивченням електрофізичних і механічних процесів у ДСП займаються як на Україні, так і за її межами. Великий внесок у розробку теорії електросталеплавління внесли вчені: Тельний С.І., Свенчанський А.Д., Окороков М.В., Хасін К.М., Єгоров А.В., Швабе В.А., Шидловський А.К., Борисов Б.П., Гориславец Ю.М., Лозинський О.Ю., Паранчук Я. С., Подільці А.Д., Кучаєв А.А., Жердев І.Т., Соколов А.Н., Полякова Н. А., Ефроймовіч Ю.Є., Смілянський М.Я., Караєв Р.І., Марков Н.А., Мінеєв Р.В., Міхеєв А.П. та інші.

Вальний С.І. розробив теорію електромагнітних явищ електричних контурів ДСП, а також запропонував методи аналізування трифазних ланцюгів з потужними електричними дугами. Для аналізування електромагнітних процесів складних СУ з потужними дугами Ефроймовічем Ю.Є., Поляковою Н.А. і Жердевим І.Т. були запропоновані аналітичні методи з використанням складного математичного уявлення нелінійних характеристик дуг за умови наявності магнітних зв'язків між струмопроводами короткої мережі [1]. Свенчанський А.Д. розглянув робочі характеристики ДСП.

Існують різні методи розрахунку як однофазних, так і трифазних ланцюгів ДСП. Самим нескладним способом є заміна дуги регульованим активним опором [1], коли нелінійність дуги не враховується.

Інший метод, пропонується Тельновим С.І., полягає в тому, що миттєві значення напруги дуги за час її горіння в кожному напівперіоді беруться такими, які дорівнюють постійному значенню. При цьому форма кривої напруги дуги має прямокутний або трапецеїдальний вид. Такий облік нелінійності дуги змінного струму ускладнює розрахунки, але водночас дозволяє отримувати більш близькі до дійсності результати. Така розрахункова форма кривих приймається і іншими дослідниками. За даними Сісоєва Г.А. [32] в руднотермічних печах закритого типу форма кривої напруги на дузі різноманітна і змінюється від прямокутної до синусоїдальної.

Метод гармонійного аналізування полягає в розкладанні напруги- і струму дуги в тригонометричний ряд. При цьому з'ясовується роль вищих гармонік струму і напруги в ланцюзі, їх вплив на параметри установки, роботу вимірювальних апаратів і т. п. [32].

Ряд дослідників, наприклад Montanari GC, Loggini M., Cavallini A., Varadan S., Makrwn EB, Girgis AA, Collantes R., Gomez T. та ін., застосовують стохастичні моделі для опису роботи дугових електропечей, спираючись, на перший погляд, на випадковий характер навантаження [33–37].

Альтернативним підходом опису нестационарного характеру навантаження є застосування детермінованого хаосу, виходячи з присутності хаосу в струмі дуги, який досліджували O'Neill-Carrillo E., Heydt G., Kostelich EJ, Jang G., Wang W., Heydt GT [38].

Опір дуги є нелінійною величиною, змінюється в часі і залежить від струму. Взаємозв'язок між струмом і напругою в ланцюгах змінного струму можна виразити різними методами. Перший метод полягає в тому, що струм і напруга зображують у функції часу. Цей метод, як відомо, широко використовують в електротехніці при дослідженні ланцюгів змінного струму. Але між силою струму і напругою можна встановити і безпосередню функціональну залежність, якщо з рівнянь залежностей струмів і напруг від часу виключити час. Тоді ми отримаємо вольт-амперні динамічні характеристики. Про статичній характеристиці дуги говорити немає сенсу, тому що струм дуги і тепловий стан газового проміжку безперервно змінюються. Тому при змінному струмі може йтися лише про динамічні ВАХ [2].

Для обліку нестационарної поведінки дуги більшість моделей використовують опис випадкового характеру зміни її довжини, що дозволяє досить точно моделювати тільки короткі етапи роботи печі. У результаті розгляду математичних моделей ДСП показано, що для того, щоб адекватно аналізувати поведінку дуги протягом усього часу її існування слід застосовувати найбільш поширений метод математичного моделювання, заснований на застосуванні нелінійних рівнянь ланцюга з використанням динамічної ВАХ дуги.

1.8 Методи оптимізації електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Оцінити роботу СУ ППЕ ДСП в умовах дії випадкових збурюючих впливів можна за інтегральними показниками. Для розглядання випадкових процесів управління ДСП таким показником є дисперсія координат регулювання, що характеризує міру відхилення фактичного режиму від заданого. Струм дуги є однією з фізичних характеристик, яка визначає якість ЕР і суттєво впливає на електричні та економічні показники ДСП. У роботах [1, 39, 40] оптимізація ЕР ДСП здійснюється за струмами дуг. Але казати тільки про дисперсії струму дуги, як показника якості ЕР, не зовсім коректно. Це можна робити тільки, якщо напруга дуги змінюється в дуже малих межах або взагалі не змінюється. Струм і напруга дуги залежать від довжини дуги. Тому дисперсія зміни довжини дуги визначає дисперсію напруги і струму дуги, а значить і дисперсію потужності дуги. Т. ч. критерієм якості регулювання ЕР ДСП, за яким можна точніше оцінити роботу СУ ППЕ, є дисперсія потужності дуги, як

це зроблено в роботах [40]. Унаслідок дії збурень на дугу змінюється її довжина і потужність. Впливаючи на довжину дуги, можна зменшити дисперсію потужності дуги. Отже, критерієм якості ЕР виступає дисперсія довжини дуги.

Існуючі СУ ППЕ ДСП в умовах безперервної дії збурень у силовому ланцюзі, допускають в процесі сталеплавлення, особливо на першому енергетичному періоді розплавлення шихти, значну дисперсію параметрів ЕР. Для забезпечення стабільності та стійкості роботи РПЕ, необхідно стабілізувати довжину дуги, щоб при виникненні зовнішніх електромеханічних збурень РПЕ не реагували б на дані обурення, що призведе до підвищення ефективності роботи печі. Тому для контролю стабільності горіння довжин дуг у роботі в якості контрольованого параметра доцільно вибрати довжину електричної дуги, а оцінку модуляцій довжин дуг здійснювати за допомогою дисперсії довжини дуги, яка визначається за формулою

$$\sigma_{\ell}^2 = m[(\ell_{\partial} - m_{\ell})^2] \quad (1.5)$$

де ℓ_{∂} – поточне значення довжини дуги;

m_{ℓ} і σ_{ℓ}^2 – математичне очікування і дисперсія довжини дуги;

σ_{ℓ} – середньоквадратичне відхилення довжини дуги.

На підставі виконаного аналізу існуючих методів компенсації збурень у СУ ППЕ ДСП, математичних моделей ЕМСУ ППЕ ДСП, методів досліджень позначені такі завдання:

- розроблення математичної моделі ЕМСУ ППЕ ДСП, що враховує електромеханічні коливання гнучких кабелів;
- аналізування впливу показників електромеханічних коливань ГК при експлуатаційних к. з. на стабільність процесу плавки за допомогою розробленої моделі;
- підтвердження адекватності розробленої моделі шляхом виконання експериментальних досліджень СУ ППЕ ДСП в виробничих умовах;
- розроблення СУ ППЕ ДСП, що компенсує електромеханічні коливання ГК, на основі паралельної фаззі-корекції;
- розроблення пристрою захисту електродів при упорі в струмонепровідну шихту з метою підвищення надійності роботи електродів.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП

У роботі проводиться моделювання електромеханічної системи управління електрогідравлічним приводом переміщення електродів ДСП з імпедансними регуляторами переміщення електродів.

На рисунку 2.1 подана структурна схема ЕМСУ ППЕ ДСП з імпедансними регуляторами переміщення електродів для однієї фази. Для двох інших фаз схеми мають такий самий вигляд. Параметром регулювання в даному регуляторі є повний опір дуги – опір короткої мережі, електрода і дуги (1.3).

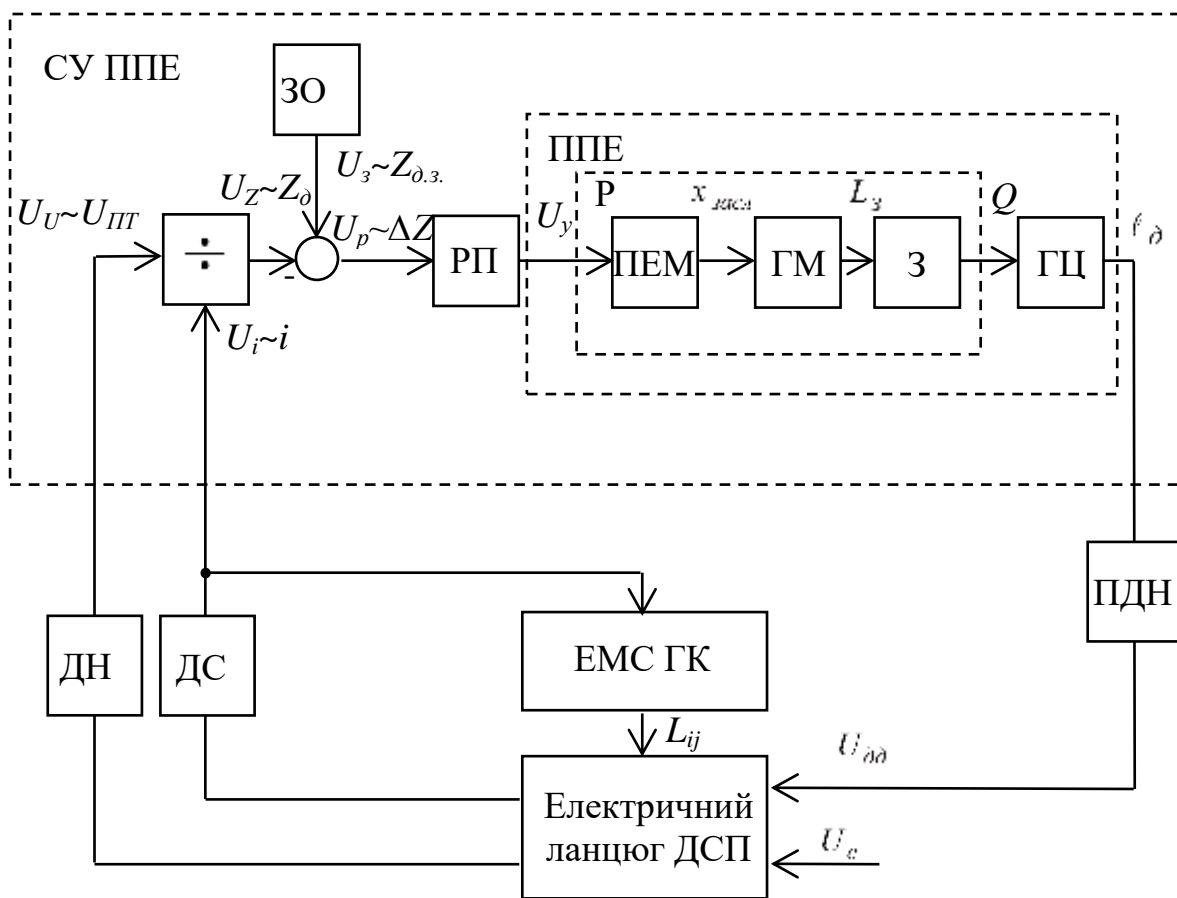


Рисунок 2.1 – Структурна схема ЕМСУ ППЕ ДСП з імпедансним РПЕ для однієї фази

Електромеханічна система управління приводом переміщення електродів ДСП складається з електричного кола, електромеханічної системи коливань гнучких кабелів (ЕМС ГК), що враховує взаємозв'язок коливань ГК, електричних параметрів і системи управління приводом переміщення електродів ДСП.

Розроблена система управління відрізняється від відомих тим, що враховує взаємозв'язок не тільки електричного кола з електромеханічними коливаннями гнучких кабелів, а й з системою управління приводом переміщення електродів ДСП з метою оцінювання впливу коливань гнучких кабелів на зміну не тільки взаємних індуктивностей і фазних струмів, як було досліджено в [13-17, 30, 31], а й на зміни електричних дуг, оскільки ДСП – складний електромеханічний об'єкт з взаємопов'язаним замкнутим контуром управління.

Сигнал з виходу РПЕ надходить на ППЕ, який складається з пропорційного електромагніту, гідророзподільника (гідралічного моста і золотника) і гідроциліндра переміщення електрода. Сигнал довжини дуги перетворюється на чинну напругу дуги згідно з формулою (1.1) (ПДН) (див. рис. 2.1).

При розробленні моделей були прийняті такі допущення:

- гнучкі кабелі при коливаннях зіштовхуються і представляються у вигляді математичних маятників;
- активні і реактивні фазні опори всіх елементів короткої мережі, крім електричних дуг, що не залежать від струму, мають постійні значення і симетричні;
- провідності електричних дуг залежать від струмів і змінюються в часі відповідно до рівняннями Кассі;
- мережа вважається ідеальним джерелом синусоїдальної напруги.

2.1 Розроблення математичної моделі електричного ланцюга ДСП

Електроенергетичний тракт ДСП, що включає в себе вторинний ланцюг пічного трансформатора, тобто «коротку мережу», електродотримачі, електроди, електричну дугу, твердофазну шихту, на початку розплавлення складною електромеханічною системою [6, 13-17, 32].

Об'єкт дослідження можна подати функціональною схемою, показаною на рисунку 2.2, де прийняті такі позначення: ПТ – пічний трансформатор; ДН – датчики напруги; КЗ – контактні з'єднання; ГК – гнучкі кабелі; ЖШ – жорсткі трубчасті водоохолоджувані шини; РШ – рухливі шини; ДС – датчики струму; ЕТ – електродотримачі; Е – електроди; Д – електрична дуга; ВП – ванна печі; СУ ППЕ – система управління приводом переміщення електродів.

Коротка мережу (вторинний струмопровід) ДСП складається з пакета плоских мідних жорстких шин ЖШ, що з'єднують виводи трансформатора з гнучкими кабелями ГК, безпосередньо гнучких струмопроводів і пакета рухомих шин ПШ, що сполучають гнучкі кабелі з розташованими в електродотримачі електродами.

У цій роботі для розрахунку ланцюгів з дугами використовується методика, заснована на застосуванні нелінійних диференціальних рівнянь, які дозволяють точно і адекватно описувати поведінку електричних ланцюгів з дугами [8]. Активні і реактивні опори фаз короткої мережі приймаються незалежними від струму, а опори дуг, як нелінійних елементів, приймаються змінними, залежними від струму.

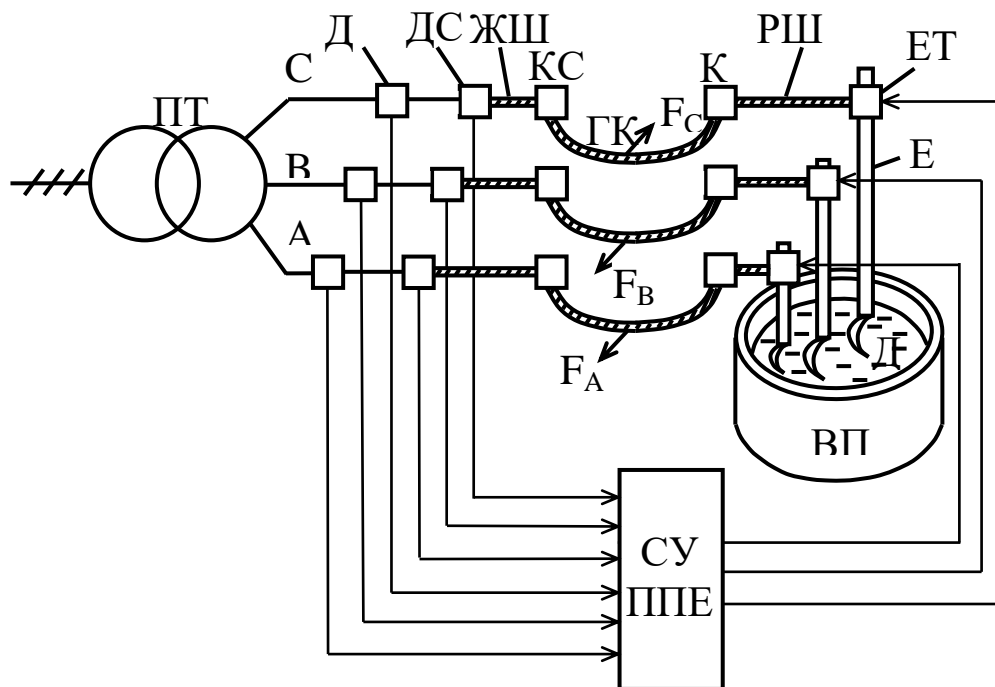


Рисунок 2.2 – Функціональна схема об'єкта дослідження

При моделюванні пічного трансформатора розглядається як реальне джерело фазних ЕРС. При цьому фазні напруги з низького боку трансформатора обчислюються таким чином:

$$\begin{cases} U_A(t) = U_{Am} \sin(\omega t); \\ U_B(t) = U_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right); \\ U_C(t) = U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right), \end{cases} \quad (2.1)$$

де U_{Am}, U_{Bm}, U_{Cm} – амплітудні значення фазної напруги з низького боку трансформатора,

$$U_{Am} = U_{Bm} = U_{Cm} = \frac{U_{2H}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2},$$

де U_{2n} – лінійне номінальну напругу вторинної обмотки трансформатора;

ω – кутова частота;

$i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – фазні струми.

Активні опори $r_{Amp}, r_{Bmp}, r_{Cmp}$ та індуктивності $L_{Amp}, L_{Bmp}, L_{Cmp}$ трансформатора, активні опори $r_{Ajш}, r_{Bжш}, r_{Cжш}, r_{Aрш}, r_{Bрр}, r_{Cрр}$ та індуктивності $L_{Ajш}, L_{Bжш}, L_{Cжш}, L_{Aрш}, L_{Bрш}, L_{Cрш}$ жорстких і рухливих шин вторинного струмопроводу, активні опори $r_{Azк}, r_{Bзк}, r_{Cзк}$ та індуктивності $L_{Azк}, L_{Bзк}, L_{Cзк}$ гнучких кабелів, активні опори $r_{Aел}, r_{Bел}, r_{Cел}$ та індуктивності $L_{Aел}, L_{Bел}, L_{Cел}$ електродів об'єднані в загальні фазні активні опори r_A, r_B, r_C та індуктивності L_A, L_B, L_C . Для фази А загальні фазні активні опори й індуктивності розраховуються таким чином (для двох інших фаз розрахунок аналогічний):

$$r_A = r_{Amp} + r_{Ajш} + r_{Azк} + r_{Aрш} + r_{Aел}; \quad (2.2)$$

$$L_A = L_{Amp} + L_{Ajш} + L_{Azк} + L_{Aрш} + L_{Aел}, \quad (2.3)$$

де $r_{Ajш} + r_{Azк} + r_{Aрш} = r_{Aвт}$, $L_{Ajш} + L_{Azк} + L_{Aрш} = L_{Aвт}$ – активні опори й індуктивності вторинного струмопроводу фази А;

$r_{Aел} = \rho_{ел} \cdot \ell_{ел} / S_{ел}$ – активний опір електрода фази А,

де $\rho_{ел}$ – щільність матеріалу електрода;

$\ell_{ел}$ – довжина електрода;

$S_{ел}$ – площа поперечного перерізу електрода, $S_{ел} = \pi R_{ел}^2$,

де $R_{ел}$ – радіус перерізу електрода;

$$L_{Aел} = 2\ell_{ел} (\ln(2\ell_{ел}/0,782R_{ел}) - 1) \cdot 10^{-7} [14-17].$$

У кожному кабелі трифазної лінії передачі індуктується не тільки е. д. з. самоіндукції, обумовлена змінним струмом у цьому дроті, але також і е. д. з. взаємної індукції, обумовлена струмами в інших проводах лінії [14]. Під час коливань ГК змінюються між ними відстані, призводять до коливань взаємних індуктивностей фаз. Таким чином, сполучною ланкою між електричною частиною і механічними коливаннями ГК є взаємні індуктивності, взаємопов'язані з електричними процесами в електричному ланцюзі, а також залежать від зміни відстаней між гнучкими кабелями.

При дії електродинамічних зусиль відстані між ГК змінюються, а, отже, і взаємні індуктивності між кабелями фаз А і В, які набудуть вигляду [13-17, 43]:

$$L_{AB}(b_{AB}) = L_{BA}(b_{AB}) = \frac{\mu_0 \ell_{зк}}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell_{зк}}{b_{AB}} - 1 \right), \quad (2.4)$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря;

$l_{зк}$ – довжина гнучкого кабелю.

Взаємні індуктивності $L_{BC}(b_{BC})$, $L_{AC}(b_{AC})$ обчислюються аналогічно.

Взаємними індуктивностями між жорсткими шинами і електродами можна знехтувати, оскільки їх довжини малі в порівнянні з довжинами гнучких кабелів.

З урахуванням зроблених припущень електричну частину дугової печі можна уявити еквівалентною електричною схемою, показаній на рисунку 2.3.

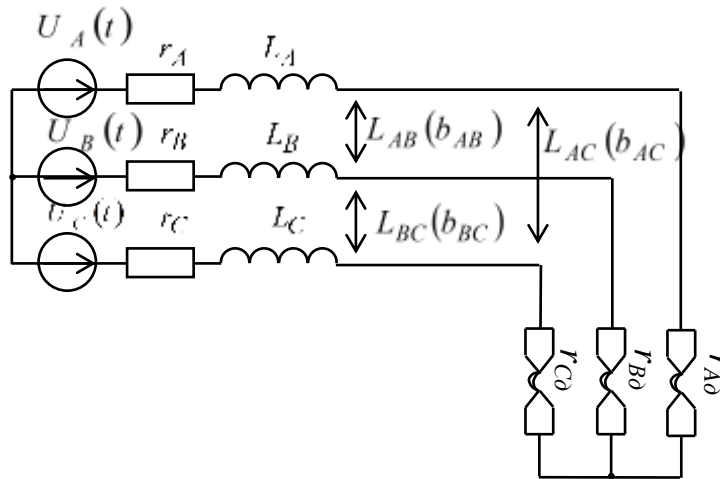


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема заміщення трифазного ланцюга з дугами

Дотримуючись запропонованої методики для трифазного ланцюга, з'єднаного в «зірку», кожна фаза якого містить електричну дугу, можна записати систему рівнянь [32, 44, 45]:

$$\begin{cases} U_A(t) = r_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB}(b_{AB}) \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC}(b_{AC}) \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_A(t)}{g_A(t)}; \\ U_B(t) = r_B \cdot i_B(t) + L_B \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AB}(b_{AB}) \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC}(b_{BC}) \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_B(t)}{g_B(t)}; \\ U_C(t) = r_C \cdot i_C(t) + L_C \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + L_{AC}(b_{AC}) \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC}(b_{BC}) \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + \frac{i_C(t)}{g_C(t)}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – миттєві значення струмів дуг;

$g_A(t)$, $g_B(t)$, $g_C(t)$ – провідності дуг.

Найбільш важливим елементом в електричному контурі ДСП є електрична дуга, яка визначає роботу печі і характер процесів в електропічному контурі. Оскільки ВАХ дуг залежать від параметрів електричного контуру, режимів роботи ДСП і умов теплообміну в робочому просторі печі, є доцільним описувати дуги диференціальними рівняннями. При цьому можна врахувати залежності ВАХ дуг від процесів

в електропідному контурі. Особливістю потужних ДСП є те, що діюче значення напруги дуги практично постійне при незмінній довжині дуги, тобто не залежить від діючого значення сили струму. У зв'язку з цим для опису дуг у ДСП можуть бути використані диференціальні рівняння Кассі, що враховують струми і провідності дуг [7, 12-17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta \frac{dg_A(t)}{dt} = \frac{\frac{i_A^2(t)}{U_{\partial A}^2(t)} - g_A^2(t)}{g_A(t)}; \\ \theta \frac{dg_B(t)}{dt} = \frac{\frac{i_B^2(t)}{U_{\partial B}^2(t)} - g_B^2(t)}{g_B(t)}; \\ \theta \frac{dg_C(t)}{dt} = \frac{\frac{i_C^2(t)}{U_{\partial C}^2(t)} - g_C^2(t)}{g_C(t)}, \end{array} \right. \quad (2.6)$$

де θ – постійна часу дуги, що характеризує теплову інерцію дуги, значення якої змінюється залежно від періоду плавки (дод. Б);

$U_{\partial A}(t)$, $U_{\partial B}(t)$, $U_{\partial C}(t)$ – діючі значення напруг на дугах.

Це дозволяє підійти до розгляду режимів роботи ДСП з більш загальних позицій, врахувати вплив параметрів електричного контуру печі, умов горіння дуг на форму ВАХ і повністю автоматизувати розрахунок і оптимізацію електричних режимів ДСП.

2.2 Реалізація математичної моделі трифазного електричного ланцюга ДСП у програмному середовищі MatLab

Для вирішення системи (2.5) нелінійних диференціальних рівнянь у програмному середовищі MatLab Simulink скористаємося матричним методом. Для цього наведемо систему рівнянь (2.5) до вигляду системи лінійних алгебраїчних рівнянь щодо похідних фазних струмів:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2; \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m, \end{array} \right. \quad (2.7)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – невідомі, які необхідно знайти;

$a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}$ – коефіцієнти системи;

b_1, b_2, \dots, b_m – вільні члени,

n, m – цілі натуральні числа, $n = 1, 2, 3, \dots$; $m = 1, 2, 3, \dots$.

Дану систему рівнянь можна переписати в матричній формі

$$AX = B, \quad (2.8)$$

де A – основна матриця системи,

B – стовпець вільних членів системи,

X – стовпець рішень системи,

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix}.$$

З рівняння (2.7) отримаємо $X = A^{-1}B$.

Отже, наведемо систему рівнянь (2.5) до вигляду системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} L_A \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB}(b_{AB}) \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC}(b_{AC}) \frac{di_C(t)}{dt} = U_A(t) - r_A i_A(t) - \frac{i_A(t)}{g_A(t)}; \\ L_{AB}(b_{AB}) \frac{di_A(t)}{dt} + L_B \frac{di_B(t)}{dt} + L_{BC}(b_{BC}) \frac{di_C(t)}{dt} = U_B(t) - r_B i_B(t) - \frac{i_B(t)}{g_B(t)}; \\ L_{AC}(b_{AC}) \frac{di_A(t)}{dt} + L_{CB}(b_{BC}) \frac{di_B(t)}{dt} + L_C(t) \frac{di_C(t)}{dt} = U_C(t) - r_C i_C(t) - \frac{i_C(t)}{g_C(t)}, \end{cases} \quad (2.9)$$

де $\frac{di_A(t)}{dt}, \frac{di_B(t)}{dt}, \frac{di_C(t)}{dt}$ – невідомі, які необхідно знайти.

Складемо матрицю коефіцієнтів, вектор вільних членів і стовпець розв'язків системи (2.8):

$$A = \begin{vmatrix} L_A & L_{AB}(b_{AB}) & L_{AC}(b_{AC}) \\ L_{AB}(b_{AB}) & L_B & L_{BC}(b_{BC}) \\ L_{AC}(b_{AC}) & L_{CB}(b_{BC}) & L_C \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} U_A(t) - r_A i_A(t) - \frac{i_A(t)}{g_A(t)} \\ U_B(t) - r_B i_B(t) - \frac{i_B(t)}{g_B(t)} \\ U_C(t) - r_C i_C(t) - \frac{i_C(t)}{g_C(t)} \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} \frac{di_A(t)}{dt} \\ \frac{di_B(t)}{dt} \\ \frac{di_C(t)}{dt} \end{vmatrix}.$$

Для вирішення системи рівнянь в математичному програмному пакеті MatLab Simulink організовуються матриця A коефіцієнтів і вектор B вільних членів рівнянь системи (2.8). При цьому використовувався ліцензійний програмний продукт MatLab, встановлений на машинах в Донбаській державній машинобудівній академії. Документ, що підтверджує факт передачі прав ліцензійного використання даної програми вузу, наведено в додатку А. З використанням блоку LU Solver стандартної бібліотеки Library Browser математичного програмного пакету MatLab Simulink отримуємо рішення системи – вектор X , тобто похідні фазних струмів. Після інтегрування похідних струмів отримуємо необхідні струми вільних членів рівнянь системи (2.8).

Електричні дуги формуються за рівняннями Кассі (2.6). При цьому використовуються сигнали миттєвих значень фазних струмів і діючих значень напруг дуг і визначаються провідністю дуг і сигнали миттєвих значень напруг дуг.

2.3 Розроблення математичної моделі електромеханічних коливань гнучких кабелів

2.3.1 Гнучкі кабелі як об'єкт коливань

Гнучкі кабелі є надзвичайно важливим елементом у дуговій печі. Їх виконують з гнучких мідних трубошин. Довжина гнучкого струмопроводу сягає 10 м, перевершуючи інші елементи короткої мережі. Отже, і реактивний опір кабельних гірлянд становить від 35 до 75 % реактивного опору всієї короткої мережі.

Гнучкі струмопроводи найбільш схильні до дії електродинамічних зусиль, оскільки їх жорстке закріплення практично неможливе. Експериментально встановлено, що при експлуатаційних коротких замиканнях (при падіннях шматків шихти і т. п.), що особливо актуально в початковий період плавлення, коли дуги горять нестійко, відбуваються різкі зміни електродинамічних зусиль F_A , F_B і F_C (див. рис. 2.2) між гнучкими кабелями трьох фаз. Після зникнення експлуатаційних коротких замикань гнучкі кабелі коливаються з частотами вільних згасаючих коливань. Також має місце взаємне притягання кабелів однієї фази. Це є однією з причин виходу кабелів з ладу, оскільки при експлуатації вони труться об конструкції печі. Також у кабелях виникають навантаження, що крутять і розтягують шини [11].

Оскільки гнучкі кабелі переміщуються, і змінюються відстані між ними, реактивний опір гнучких струмопроводів, а, отже, і реактивний опір короткої мережі має змінну складову, що змінюється пропорційно струму короткого замикання, оскільки починають змінюватися взаємні індуктивності між фазами струмопроводів [12].

Тому в струмах фаз виникають відповідні модульовані згасаючі коливання, які порушують нормальну роботу регуляторів потужностей дугової сталеплавильної печі. Таким чином, електроди також починають здійснювати поздовжні коливання, що призводить до коливань довжин дуг.

Оскільки механічна система гнучких кабелів має низьку частоту коливань, то тривалість загасання таких коливань може тривати десятки секунд. Однак ситуація може ускладнитися, якщо короткі замикання відбуваються один за одним, коли кабелі ще не встигли завершити коливання після попереднього стрибка струму фази. Такі аварійні режими можуть тривати десятки хвилин, оскільки за одну плавку може відбуватися до 200 коротких замикань, що призводить до додаткових втрат (витрат) енергії, збільшення часу розплавлення металу і зниження продуктивності печі.

Система «електрод-електродотримачі» також є джерелом коливальних процесів електричних параметрів, однак власні частоти даної системи (1,5...6 Гц) і кабелів (0,15...0,3 Гц) значно відрізняються один від одного, отже, резонансні коливання неможливі [13].

Вплив кабельної гірлянди на динаміку електродотримача також не може бути значним, тому що маса кабельних провідників, що припадають на електродотримачі однієї фази, становить 15...16 % від їх загальної маси [13]. Це визначає можливість розгляду гнучкого струмопроводу без зв'язку з іншими ділянками ДСП.

Для усунення цих зовнішніх збурень необхідно оцінити їх параметри.

Як було сказано в попередньому підрозділі, сполучною ланкою між електричною частиною і механічними коливаннями гнучких кабелів є залежності взаємних індуктивностей, оскільки вони взаємопов'язані з електричними процесами в трифазній електричного кола, а також залежать від зміни відстаней між гнучкими кабелями.

Для визначення законів зміни відстаней між гнучкими кабелями при їх коливаннях необхідно визначити закони коливань гнучких кабелів. Для цього спочатку необхідно знайти рівняння кривої, за якою висить гнучкий кабель, тобто рівняння ланцюгової лінії.

2.3.2 Визначення рівняння провисання гнучкого кабелю ДСП

На рисунку 2.4 наведена схема уявлення одного гнучкого кабелю у вигляді вагової нитки (ланцюгової лінії), на яку без урахування зовнішніх зусиль діє зусилля H в нижній її точці (яке в разі розрізання кабелю в нижній його точці необхідно докласти з метою утримання кабелю в тому ж зігнутому стані), зусилля T натягу нитки і сила тяжіння qS – вага

вагомої нитки довжиною S ($S = M_O M$ – мала ділянка нитки між точками M_O та M), де q – погонна вага нитки, тобто вага 1 м, який розраховується таким чином [14-16]:

$$q = m_{гк} g / \ell_{гк},$$

де $m_{гк}$ – маса гнучкого кабелю,

$2a$ – відстань між точками підвісу гнучкого кабелю;

h – висота провисання гнучкого кабелю [46].

Для виведення рівняння ланцюгової лінії необхідно скласти рівняння рівноваги сил щодо осей Ox і Oy .

Сума проекцій усіх сил на вісь Ox :

$$\Sigma F_x = 0; \quad -H + T \cos \gamma = 0;$$

$$T = \frac{H}{\cos \gamma}. \quad (2.10)$$

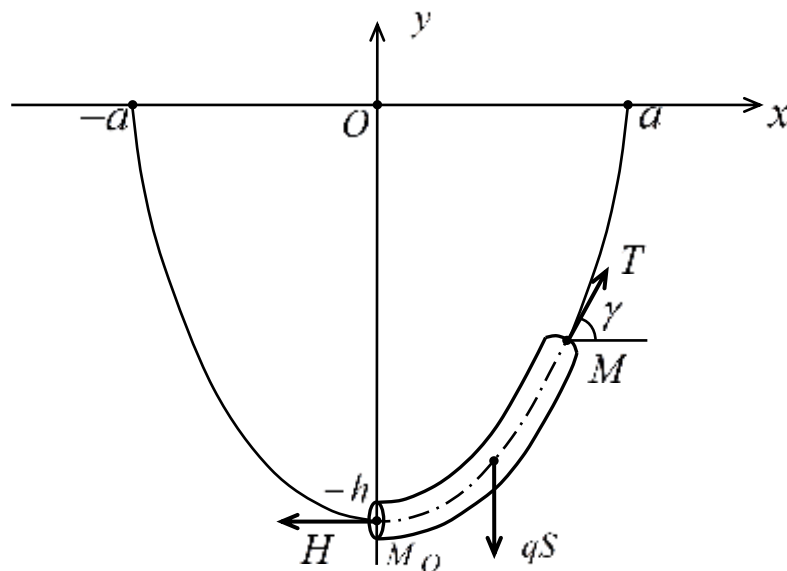


Рисунок 2.4 – Схема зображення гнучкого кабелю у вигляді ланцюгової лінії

Сума проекцій усіх сил на вісь Oy :

$$\Sigma F_y = 0; \quad -qS + T \sin \gamma = 0;$$

$$T = \frac{qS}{\sin \gamma}. \quad (2.11)$$

З рівнянь (2.10) і (2.11) можна визначити:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{qS}{H}. \quad (2.12)$$

Нехай рівняння ланцюгової лінії $y = y(x)$. Тоді

$$y' = \operatorname{tg} \gamma; \quad y' = \frac{qS}{H}. \quad (2.13)$$

Продиференціюємо рівняння (2.13):

$$y'' = \frac{q}{H} S'. \quad (2.14)$$

Відомо, що

$$dS = \sqrt{1 + (y')^2} dx; \quad S' = \sqrt{1 + (y')^2}. \quad (2.15)$$

Підставимо вираз (2.15) у рівність (2.14) і знайдемо диференціальне рівняння шуканої лінії:

$$y'' = \frac{q}{H} \sqrt{1 + (y')^2}. \quad (2.16)$$

Знайдемо загальний розв'язок. Нехай $y' = p(x)$, тоді

$$y'' = \frac{dp}{dx}. \quad (2.17)$$

Підставимо (2.17) в (2.16) і отримаємо:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{q}{H} \sqrt{1 + p^2}. \quad (2.18)$$

Знайдемо розв'язок $dp / \sqrt{1 + p^2} = q dx / H$.

Інтегруючи його, одержимо:

$$\int \frac{dp}{\sqrt{1 + p^2}} = \int \frac{q}{H} dx; \quad \ln \left(p + \sqrt{1 + p^2} \right) = \frac{q}{H} x + C_1.$$

Використовуючи умови, що при $x = 0$ $y'|_{x=0} = p|_{x=0} = 0$, визначаємо, що $C_1 = 0$. Тоді: $\ln \left(p + \sqrt{1 + p^2} \right) = \frac{q}{H} x$. Звідси

$$p + \sqrt{1 + p^2} = e^{\frac{q}{H} x}. \quad (2.19)$$

З рівняння (2.19) знайдемо p :

$$\begin{aligned} \left(\sqrt{1+p^2}\right)^2 &= \left(e^{\frac{q}{H}x} - p\right)^2; \quad 1+p^2 = e^{\frac{2q}{H}x} - 2e^{\frac{q}{H}x}p + p^2; \\ 2e^{\frac{q}{H}x}p &= e^{\frac{2q}{H}x} - 1; \\ p &= \frac{e^{\frac{q}{H}x} - e^{-\frac{q}{H}x}}{2}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Використовуючи умови, що $y' = p(x)$ і $\frac{e^{\frac{q}{H}x} - e^{-\frac{q}{H}x}}{2} = sh\left(\frac{q}{H}x\right)$, вираз (2.20) можна записати як

$$y' = sh\left(\frac{q}{H}x\right). \quad (2.21)$$

Інтегруючи (2.21), одержимо:

$$y = \frac{H}{q} ch\left(\frac{q}{H}x\right) + C_2.$$

Знайдемо C_2 із умови, що $y(0) = -h$

$$\frac{H}{q} ch\left(\frac{q}{H} \cdot 0\right) + C_2 = -h; \quad C_2 = -h - \frac{H}{q}.$$

Тоді остаточно рівняння ланцюгової лінії набуде вигляду

$$y = -h + \frac{H}{q} \left(ch\left(\frac{q}{H}x\right) - 1 \right). \quad (2.22)$$

Враховуючи, що $y(a) = 0$ отримаємо:

$$\begin{aligned} -h + \frac{H}{q} \left(ch\left(\frac{q}{H}a\right) - 1 \right) &= 0; \quad \frac{H}{q} \left(ch\left(\frac{q}{H}a\right) - 1 \right) = h; \\ ch\left(\frac{q}{H}a\right) &= \frac{q}{H}h + 1. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Введемо заміну. Нехай $z = \frac{q}{H}a$. Тоді рівняння (2.23) можна переписати

$$ch(z) = \frac{h}{a}z + 1. \quad (2.24)$$

Тоді рівняння ланцюгової лінії, на якій висить гнучкий кабель, має вигляд

$$y = -h + \frac{a}{z} \left(ch\left(\frac{z}{a}x\right) - 1 \right). \quad (2.25)$$

Розв'язання рівняння (2.25) щодо z можна провести графічним способом у програмному пакеті MathCad.

2.3.3 Визначення законів коливань гнучких кабелів

На рисунку 2.5 наведена схема відхилення ГК від вертикалі на кут φ .

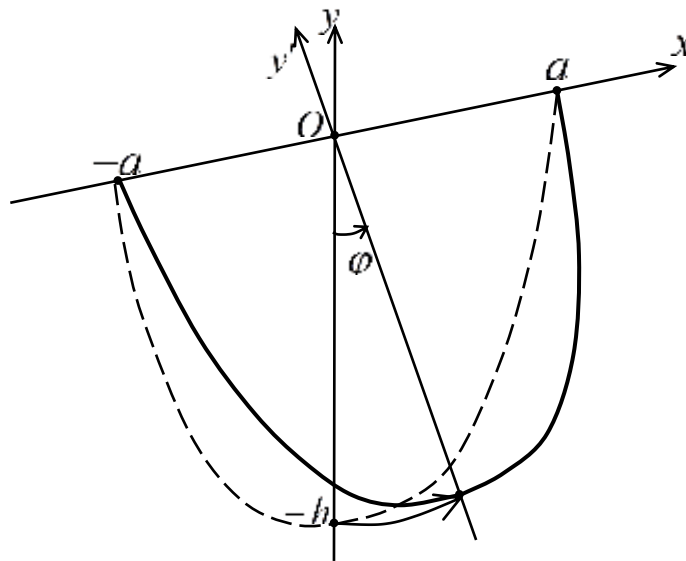


Рисунок 2.5 – Схема відхилення ГК від вертикалі на кут φ

Для того щоб уявити гнучкі кабелі в грубому наближенні у вигляді математичних маятників, визначимо їх наведену довжину ℓ^* та масу m^* [14, 42].

Знайдемо кінетичну і потенційну енергії ваговою нитки при повороті площини підвісу на кут φ відносно нерухомої точки O без урахування дії зовнішніх зусиль [14, 46].

Кінетична і потенційна енергії елемента нитки:

$$dT = \frac{q}{2g} \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot y^2 \cdot \dot{\varphi}^2; \quad (2.26)$$

$$d\Pi = q\sqrt{1+(y')^2} dx \cdot y \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (2.27)$$

Інтегруючи обидві частини рівнянь (2.26), (2.27) отримаємо:

$$T = \frac{1}{2} \frac{q}{g} \int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot \varphi^2; \quad (2.28)$$

$$\Pi = q \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (2.29)$$

Відповідно до рівняння Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.30)$$

Підставимо в рівняння (2.30) вирази (2.28) і (2.29):

$$\frac{q}{g} \int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot \ddot{\varphi} + q \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot \sin \varphi = 0; \quad (2.31)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{g \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx}{\int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx} \sin \varphi = 0. \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32) зводиться до рівняння

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \sin \varphi = 0. \quad (2.33)$$

Тоді, виходячи з рівнянь (2.32) і (2.33), частота коливань маятника близько точки О набуде вигляду

$$\omega = \frac{\int_{-a}^a g y \sqrt{1+(y')^2} dx}{\int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx}. \quad (2.34)$$

Відомо, що частота коливань математичного маятника дорівнює:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell^*}}, \quad (2.35)$$

де ℓ^* – приведена довжина маятника, м.

Прирівнюючи праві частини рівнянь (2.34) і (2.35), визначимо наведену довжину математичного маятника ℓ^* :

$$\ell^* = \frac{\int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx}{\int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx}. \quad (2.36)$$

Знаючи рівняння ланцюгової лінії (2.25), на якій висить гнучкий кабель, визначимо y' :

$$y' = sh\left(z \frac{x}{a}\right). \quad (2.37)$$

Тоді з урахуванням виразів (2.25) і (2.37) запишемо приведену довжину маятника:

$$\ell^* = \frac{\int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx}{\int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx} = \frac{\int_{-a}^a \left[\left(-h - \frac{a}{z} + \frac{a}{z} ch\left(z \frac{x}{a}\right) \right)^2 ch\left(z \frac{x}{a}\right) \right] dx}{\int_{-a}^a \left[\left(-h - \frac{a}{z} + \frac{a}{z} ch\left(z \frac{x}{a}\right) \right) ch\left(z \frac{x}{a}\right) \right] dx}. \quad (2.38)$$

Чисельне значення приведеної довжини маятника для ДСП-50 наводиться в додатку Б.

Власну частоту коливань гнучких кабелів можна визначити з урахуванням (2.35):

$$f_{зк} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell^*}}. \quad (2.39)$$

Для ДСП-50 власна частота коливань гнучких кабелів становить 0,18 Гц.

У грубому наближенні зобразимо гнучкі кабелі у вигляді математичних маятників (див. рис. 2.7) [7, 41-43, 46].

На рисунку 2.6 прийняті такі позначення: $A'B' = a_{AB}$, $B'C' = a_{BC}$, $A'C' = a_{AC}$ – відстані між гнучкими кабелями фаз А і В, В і С, А і С

відповідно; $AB = b_{AB}$, $BC = b_{BC}$, $AC = b_{AC}$ – відстані між гнучкими кабелями фаз А і В, В і С, А і С відповідно під впливом електродинамічних сил; $A'A = B'B = C'C = \ell^*$ – довжина математичного маятника; F_A, F_B, F_C – електродинамічні зусилля, що діють на кабелі фаз А, В і С; для фази А електродинамічне зусилля має вигляд

$$F_A = F_{BA} + F_{CA}; \quad (2.40)$$

для двох інших фаз розрахунки аналогічні. Сили тяжіння, що діють на кожен маятник, вони однакові, тому що маси m^* маятників дорівнюють один одному:

$$G = m^* g; \quad (2.41)$$

де G'_A, G'_B, G'_C – проекції зусиль тяжіння, що створюють моменти $M_{G'_A}, M_{G'_B}, M_{G'_C}$ щодо нерухомих точок A', B', C' , для фази А мають вигляд $G'_A = G \sin \varphi_A$; $M_{G'_A} = G'_A \ell^*$; для двох других фаз розрахунки аналогічні;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – кути, на які відхиляються кабелі фаз А, В і С відповідно під впливом електродинамічних сил;

$M_{F'_A}, M_{F'_B}, M_{F'_C}$ – моменти проекцій електродинамічних зусиль щодо нерухомих точок A', B', C' ;

$M_{в.тр.А}, M_{в.тр.В}, M_{в.тр.С}$ – моменти в'язкого тертя, яке виникає в місцях кріплення гнучких кабелів до нерухомих стояків.

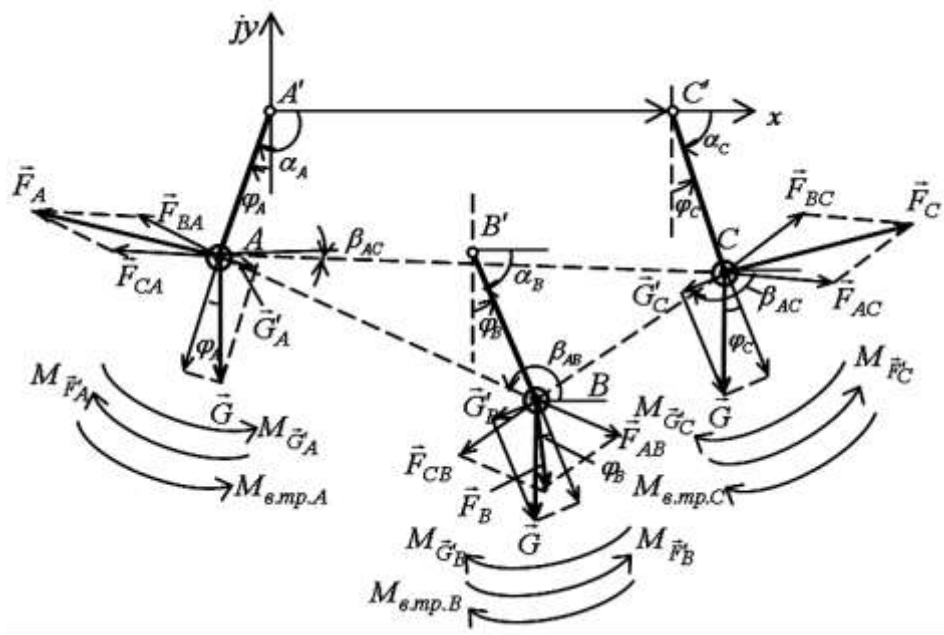


Рисунок 2.6 – Схема подання гнучких кабелів у вигляді математичних маятників

Для визначення закону коливань маятників скористаємося теоремою моментів для фази А відносно нерухомої точки A' і врахуємо, що при коливаннях гнучких кабелів їх параметри змінюються в часі (див. рис. 2.7) [7, 41-43, 46]:

$$J_{A'}\varphi_A''(t) = -M_{G'A}(t) - M_{e.mp.A}(t) + M_{F'A}(t);$$

$$J_{A'}\varphi_A''(t) = -m^* g \ell^* \sin \varphi_A(t) - \mu \varphi_A'(t) + M_{F'A}(t); \quad (2.42)$$

де $J_{A'}$ – момент інерції маятника (гнучкого шинопровода) відносно нерухомої точки A' ,

$J_{A'} = J_{B'} = J_{C'} = J_O$; m^* – приведена маса маятника;

ℓ^* – приведена довжина маятника;

μ – коефіцієнт в'язкого тертя.

Для двох інших фаз теорема моментів має подібний вигляд.

Порівнюючи рівняння (2.31) і (2.42), можна висновити, що момент інерції гнучкого кабелю при повороті площини підвісу на кут φ щодо точки О для кожної з фаз дорівнює:

$$J_O = \frac{q}{g} \int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx, \quad (2.43)$$

а момент сили тяжіння гнучкого кабелю

$$M_G = m^* g \ell^* \sin \varphi = q \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx \cdot \sin \varphi. \quad (2.44)$$

Тоді момент інерції гнучкого кабелю з урахуванням (2.25) і (2.43) набуде вигляду

$$J_O = \frac{q}{g} \int_{-a}^a y^2 \sqrt{1+(y')^2} dx = \frac{q}{g} \int_{-a}^a \left[\left(-h - \frac{a}{z} + \frac{a}{z} \operatorname{ch} \left(z \frac{x}{a} \right) \right)^2 \operatorname{ch} \left(z \frac{x}{a} \right) \right] dx. \quad (2.45)$$

Чисельне значення моменту інерції гнучкого кабелю ДСП-50 приводиться в додатку Б.

Тепер з рівняння (2.44) визначимо наведену масу маятника m^* :

$$m^* = \frac{q \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx}{g \ell^*}. \quad (2.46)$$

Перетворимо вираз наведеної маси математичного маятника з урахуванням (2.25):

$$m^* = \frac{q \int_{-a}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx}{g \ell^*} = \frac{q \int_{-a}^a \left[\left(-h - \frac{a}{z} + \frac{a}{z} \operatorname{ch} \left(z \frac{x}{a} \right) \right) \operatorname{ch} \left(z \frac{x}{a} \right) \right] dx}{g \ell^*}. \quad (2.47)$$

Чисельне значення наведеної маси гнучкого кабелю ДСП-50 наводиться в додатку Б.

У рівнянні (2.42) відомі всі параметри, крім залежності кута відхилення маятника (гнучкого кабелю) і залежно від моменту електродинамічного зусилля фази. Моменти електродинамічних зусиль можна визначити, використовуючи рисунок 2.7 [7, 14, 41-43, 46]:

$$M_{\bar{F}'_A}(t) = \sin(\beta_{AB}(t) - \pi - \alpha_A(t)) \cdot F_{AB}(t) \cdot \ell^* + \sin(\beta_{AC}(t) - \alpha_A(t)) \cdot F_{AC}(t) \cdot \ell^*; \quad (2.48)$$

$$M_{\bar{F}'_B}(t) = \sin(\beta_{AB}(t) - \alpha_B(t)) \cdot F_{AB}(t) \cdot \ell^* + \sin(\beta_{BC}(t) - \pi - \alpha_B(t)) \cdot F_{BC}(t) \cdot \ell^*; \quad (2.49)$$

$$M_{\bar{F}'_C}(t) = \sin(\beta_{AC}(t) - \pi - \alpha_C(t)) \cdot F_{AC}(t) \cdot \ell^* + \sin(\beta_{BC}(t) - \alpha_C(t)) \cdot F_{BC}(t) \cdot \ell^*. \quad (2.50)$$

У рівнянні (2.42) після підстановок відомі всі параметри, крім залежності електродинамічного зусилля $F_{AB}(t)$ та кутів $\alpha(t)$ і $\beta(t)$.

Визначимо електродинамічні сили, що діють між гнучкими кабелями пар фаз [44]. Електродинамічне зусилля $F_{AB}(t)$ дорівнює

$$F_{AB}(t) = F_{BA}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\ell}{b_{AB}(t)} \cdot i_A(t) \cdot i_B(t), \quad (2.51)$$

де $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – миттєві значення струмів, поточних в кабелях А, В і С.

Електродинамічні зусилля $F_{BC}(t)$, $F_{AC}(t)$ обчислюються аналогічно.

Для ДСП, що живиться трифазним струмом, характерна зміна знака електродинамічного зусилля. Для різних моментів часу твір струмів двох сусідніх фаз надає позитивної або негативної величини у зв'язку зі зрушенням кожної фази на 120° , тобто на кабелі діють знакозмінні зусилля.

Якщо к. з. відбувається в одній з фаз, то струм у цій фазі може досягати триразової величини в порівнянні з номінальним значенням струму фази. Але дно печі є непровідним, опір між нульовими точками печі і трансформатора – нескінченність, то виконується умова

$i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0$ (І закон Кірхгофа). Таким чином, при к. з. в одній з фаз збільшуються струми в усіх трьох фазах.

При к. з. фази велике значення має момент часу, в який воно відбулося. При цьому самі критичні ситуації короткого замикання фаз припадають на моменти амплітудних значень струмів.

До формули для обчислення електродинамічних зусиль між двома струмопроводами входить змінювана в часі відстань між ними. Для того щоб отримати залежності електродинамічних зусиль між гнучкими кабелями, необхідно визначити закони зміни відстаней між ними при їх механічних низькочастотних коливаннях.

Зміни відстаней між гнучкими кабелями (маятника), а також кути $\alpha(t)$ і $\beta(t)$ визначимо за рисунком 2.7.

Запишемо координати точок A', B', C' ; A, B, C з урахуванням того, що маятники коливаються в часі:

$$\begin{aligned} & A'(x_{A'}, y_{A'}); \quad B'(x_{B'}, y_{B'}); \quad C'(x_{C'}, y_{C'}); \\ & A(x_A(t), y_A(t)); \quad B(x_B(t), y_B(t)); \quad C(x_C(t), y_C(t)), \end{aligned}$$

де $x_{A'}, x_{B'}, x_{C'}, y_{A'}, y_{B'}, y_{C'}$ – відомі координати, пов'язані з конструктивним взаємним розташуванням гнучких кабелів, а координати $x_A(t), x_B(t), x_C(t), y_A(t), y_B(t), y_C(t)$ можна визначити. Для точки А на рисунку 2.7 координати набудуть вигляду (для двох інших точок координати визначаються аналогічно) $A(x_{A'} + \ell^* \sin \varphi_A(t), y_{A'} + \ell^* \cos \varphi_A(t))$.

Тоді відстані між фазами А і В маятника визначаються таким чином (відстані між іншими парами фаз визначаються аналогічно):

$$\begin{aligned} & b_{AB}(t) = AB = \\ & = \sqrt{(x_{B'} + \ell^* \sin \varphi_B(t) - x_{A'} - \ell^* \sin \varphi_A(t))^2 + (y_{B'} + \ell^* \cos \varphi_B(t) - y_{A'} - \ell^* \cos \varphi_A(t))^2}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Тепер, підставляючи вираз зміни відстані між фазами маятника $b_{AB}(t)$ (2.52) до формули (2.51), можна визначити зміну електродинамічного зусилля між маятниками (гнучкими кабелями).

Кут $\alpha_A(t)$ з урахуванням того, що маятник коливається в часі, визначається таким чином:

$$\alpha_A(t) = \varphi_A(t) - \frac{\pi}{2}. \quad (2.53)$$

Кути $\alpha_B(t)$ та $\alpha_C(t)$ визначаються аналогічно.

Кут $\beta_{AB}(t)$ з урахуванням того, що маятники коливаються в часі і з урахуванням (2.38), визначаються в такий спосіб:

$$\beta_{AB}(t) = \arctg \left(\frac{y_{B'} - y_{A'} + \ell^* (\cos \varphi_B(t) - \cos \varphi_A(t))}{x_{B'} - x_{A'} + \ell^* (\sin \varphi_B(t) - \sin \varphi_A(t))} \right). \quad (2.54)$$

Кути $\beta_{BC}(t)$ та $\beta_{AC}(t)$ визначаються аналогічно.

Тепер, підставляючи вирази змін кутів $\alpha(t)$ та $\beta(t)$, приведену довжину ℓ^* математичного маятника, а також зміни електродинамічних зусиль маятника, можна визначити зміни моментів електродинамічних зусиль між гнучкими кабелями.

Підставляючи момент інерції J_O маятника відносно нерухомої точки O , наведену масу маятника і моменти електродинамічних зусиль між гнучкими кабелями в рівняння теорем моментів, отримуємо систему трьох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, вирішуючи яку щодо кутів відхилення $\varphi(t)$ гнучких кабелів від вертикалі, можна визначити зміни відстаней між математичними маятниками (гнучкими кабелями), що відхиляються, за виразом (2.53).

Оскільки запізнювання в гідравлічній системі приводу переміщення електродів (0,06 с) [1] на порядок нижче ніж 5,5 с, що відповідає частоті коливань 0,18 Гц гнучких кабелів, то запізненням гідроприводу можна знехтувати.

Оскільки система нелінійна і дуже складно навіть записати її рівняння після всіх підстановок відомих і виражених величин, то, природно, розв'язати її аналітично неможливо. У математичному програмному пакеті Matlab Simulink була зібрана модель електромеханічної системи ДСП, що враховує всі взаємозв'язки параметрів коливань гнучких кабелів з електричними параметрами, а саме зі змінами взаємних індуктивностей (див. рис. 2.4). У якості вхідних параметрів служать сигнали зміни струмів фаз, взяті з моделі електричного кола, а в підсумку формуються сигнали зміни відстаней між гнучкими кабелями і сигнали зміни взаємних індуктивностей, які, у свою чергу, входять до моделі трифазного електричного кола ДСП.

Таким чином, була отримана електромеханічний взаємозв'язок між механічними коливаннями гнучких кабелів і електричними параметрами печі [7, 43].

2.4 Розроблення моделі системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Відповідно до структурної схеми ЕМСУ ППЕ ДСП з імпедансними регуляторами переміщення електродів (рис. 2.1) розробимо модель системи управління електрогідравлічним приводом переміщення

електродів ДСП і визначимо передавальні функції ППЕ ДСП [47-49, 50, 51]: пропорційного електромагніта, гідророзподільника і гідроциліндра.

2.4.1 Математичне моделювання лінійного двигуна (пропорційного електромагніту) для управління гідророзподільником

Лінійним двигуном для управління зміною робочих позицій гідророзподільника ДСП-50 є пропорційний електромагніт (ПЕМ). Пропорційний електромагніт служить для управління позиціями гідророзподільника (з електромагнітним керуванням) шляхом перетворення електричного сигналу управління на механічне переміщення вхідної ланки розподільного пристрою. Його моделювання є важливим, оскільки впливає на роботу гідророзподільника і, відповідно, на переміщення електродів ДСП.

Опис роботи такого електромеханічного перетворювача не раз наводилося в науковій літературі.

Електромагніт поступальної дії, що використовується в ДСП-50, (рис. 2.7) складається з двох соленоїдних котушок 2, у яких переміщення якорів 1 врівноважується пластинчастою пружиною 3 [11, 47-49].

Такий електромагніт надійно працює тільки за наявності руху золотника, при якому відбувається вібраційна лінеаризація сухого тертя і контактних сил, обумовлених облітерацією золотника. З цією метою в обмотки управління 2 разом з керуючим електричним сигналом подається осцилювальний сигнал у вигляді гармонійних коливань струму з малою амплітудою, але великою частотою 200...400 Гц.

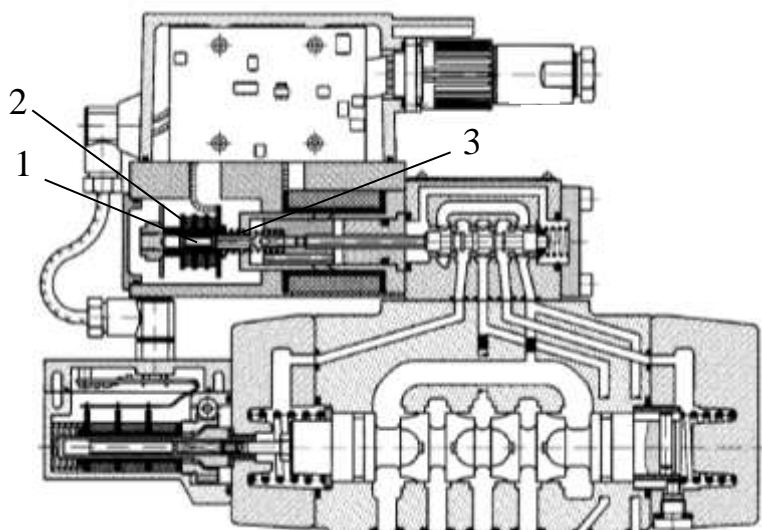


Рисунок 2.7 – Пропорційний гідророзподільник з пропорційним електромагнітом

У роботі [50] пропонується моделювати електромагніт одним блоком – інерційною ланкою, передавальна функція якого визначається таким чином:

$$W_{ПЕМ}(p) = W_E(p) = \frac{x_{засл}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_e}{T_e p + 1}, \quad (2.55)$$

де $x_{засл}$ – переміщення якоря;

U_y – сигнал з виходу РПЕ (сигнал управління);

K_e – коефіцієнт передачі електричної частини лінійного двигуна,

$$K_e = I/U_y,$$

де I , U_y – струм якоря і напруга управління електромагнітом;

T_e – електрична постійна якоря лінійного двигуна.

Однак такий опис є дуже спрощеним і не дозволяє врахувати механічну частину даного електромагнітного перетворювача.

Магніторушійні сили підмагнічування і управління, підсумовуючись у робочих зазорах, створюють рушійне зусилля на якорі електромагніта. При переміщенні якоря і тягове зусилля врівноважується пружними силами пружин. При цьому якір і заслінка відхиляються на величину, прямо пропорційну струму управління, про що говорить регульовальна характеристика:

$$x_{засл} = k_x \cdot I,$$

де $x_{засл}$ – переміщення заслінки якоря;

I – струм управління;

k_x – коефіцієнт пропорційності, що залежить від параметрів магнітної системи, кількості витків обмотки управління і жорсткості пружного елемента якоря, $k_x = \partial x_{засл} / \partial I$.

Регульовальна характеристика управління показує, що якщо знехтувати малим за величиною магнітним гістерезисом, можна вважати, що в розрахунковому діапазоні переміщень якоря пропорційний електромагніт забезпечує процес безперервного управління.

Поряд з характеристикою управління важливою статичною характеристикою є тягова характеристика, яка визначає залежність сили тяги електромагніта від струму управління при нерухомо закріпленому якорі в нейтральному положенні [52]:

$$F_m = k_F \cdot I,$$

де F_m – сила тяги;

k_F – коефіцієнт посилення тягової характеристики, що залежить від величини поляризованої магніторушійної сили, кількості витків обмотки управління і конструктивних параметрів магнітного кола.

Статичні властивості електромагніта визначаються його узагальненою статичною характеристикою, яка виражається формулою [50-52]

$$F = k_F \cdot I - C_{np} \cdot x_{засл},$$

де C_{np} – коефіцієнт жорсткості статичної характеристики (коефіцієнт жорсткості пружини),

$$C_{np} = |\partial F / \partial x_{засл}| = k_F / k_x.$$

У динамічних процесах рух електромагніта визначається рівнянням сил, що діють на його якір.

Вважаючи, що сухе тертя, гістерезисна петля і електрорушійна сила, наведена рухом якоря, малі і ними можна знехтувати, запишемо рівняння руху якоря в такому вигляді [50-52]:

$$F = F_m - F_{np} - F_{в.д.};$$

$$m \frac{d^2 x_{засл}}{dt^2} = k_F \cdot I - C_{np} x_{засл} - f \frac{dx_{засл}}{dt}, \quad (2.56)$$

де m – маса якоря і рухомих частин електромагніта (заслінки);

k_F – коефіцієнт зусилля тягової характеристики;

C_{np} – коефіцієнт жорсткості пружини;

f – коефіцієнт в'язкого демпфірування.

Це механічна частина електромагніта. Виконуємо необхідні перетворення в рівнянні (2.56), тоді передавальна функція електромагніта може бути подана у вигляді коливального ланки [50-52]:

$$W_m(p) = \frac{x_{засл}(p)}{I(p)} = \frac{k_m}{T_m^2 p^2 + 2\xi_m T_m p + 1}, \quad (2.57)$$

де T_m – постійна часу,

$T_m = \sqrt{m/C_{np}}$; ξ_m – коефіцієнт відносного демпфірування,

$\xi_m = f/2\sqrt{C_{np}m}$; k_m – коефіцієнт передачі, $k_m = k_x$.

Електрична частина електромагніта має таку ПФ:

$$W_e(p) = \frac{I(p)}{U_y(p)} = \frac{k_e}{T_e p + 1}, \quad (2.58)$$

де k_e – коефіцієнт передачі електричної частини лінійного двигуна,

$$k_e = 1/R,$$

де R – опір контуру, по якому протікає струм;

T_e – електрична постійна якоря,

$$T_e = L/R,$$

де L – індуктивність обмотки управління.

Зворотній зв'язок – проти-е. д. з. руху за рахунок магніторушійної сили управління. Однак якщо протидія е. д. з. незначна за величиною, то нею можна знехтувати, вважаючи, що $k_{ne} = const$, де k_{ne} – коефіцієнт протидії е. д. з., що залежить від параметрів електромагнітного ланцюга [15, 16, 47-49]. В окремому випадку, якщо R велике, а T_L мале, та ними можна знехтувати, то передавальна функція електромагніта на підставі перетворень набуває вигляду

$$W_{ПЕМ}(p) = \frac{x_{засл}(p)}{U_y(p)} = \frac{k_m / R}{T_m^2 p^2 + 2\xi_{ел} T_m p + 1}, \quad (2.59)$$

$$\text{де } \xi_{ел} = \xi_m + \frac{k_m k_{ne}}{2T_m R}.$$

Однак при такому моделюванні в структурній схемі не враховуються детально електромагнітні процеси.

Тому в роботі при моделюванні пропорційного електромагніта пропонується враховувати як електричну, так і механічну частини ПЕМ і більш детально описати всі електромеханічні зв'язки з метою простежити за значеннями всіх зусиль, що діють на електромагніт, згідно з формулою (2.56).

Структурна схема ПЕМ з урахуванням (2.55), (2.56) подана на рисунку 2.4 в структурі системи управління ППЕ ДСП з імпедансним РПЕ, виконана в програмному середовищі MatLab Simulink [15, 16, 47-49].

Сигнал з виходу регулятора, пропорційний сигналу неузгодженості, тобто різниці сигналів завдання опору фази і діючого значення опору фази, надходить на пропорційний електромагніт гідро, де він послідовно проходить процедури перетворення на струм управління якорем, далі на зусилля якоря, на швидкість переміщення заслінки електромагніта і, нарешті, після інтегрування, на переміщення заслінки. Сигнал, пропорційний переміщенню заслінки електромагніта, є вхідним сигналом передавальної функції (ПФ) гідравлічного моста, на виході якого утворюється сигнал переміщення золотника, що надходить на передавальну функцію золотника, на виході якого утворюється сигнал, пропорційний витраті гідроциліндра переміщення електрода фази. Даний

сигнал в блоці передавальної функції гідроциліндра перетворюється на швидкість переміщення електрода і після інтегрування – на переміщення електрода, тобто на довжину дуги.

2.4.2 Математичне моделювання гідророзподільника

Гідравлічний розподільник складається з гідравлічного моста і циліндричного золотника [50].

Передавальна функція гідравлічного моста визначається таким чином [50]:

$$W_{ГМ}(p) = \frac{L_3(p)}{x_{засл}(p)} = \frac{k_n}{T_{2М}^2 p^2 + 2\xi T_{2М} p + 1}, \quad (2.60)$$

де L_3 – переміщення золотника;

k_n – коефіцієнт передачі гідравлічного моста,

$$k_n = \frac{k_g S_3}{k_g k_{oc} S_3 + k_d C_{2d}},$$

де k_g – коефіцієнт посилення за витратою,

$$k_g = Q_c / X_o = \mu \pi d_c \sqrt{2 / \rho P_k},$$

де μ – коефіцієнт в'язкості рідини;

d_c – діаметр сопла;

ρ – щільність робочої рідини;

P_k – тиск управління в камері потенціометрів;

S_3 – площа торця золотника;

$$S_3 = \pi d_3^2 / 4,$$

де d_3 – діаметр золотника;

C_{2d} – жорсткість струменя потоку в щілині золотника;

k_{33} – коефіцієнт зворотного зв'язку,

$$k_{33} = X_0^{\max} / L^{\max},$$

де X_0^{\max} – максимальне зміщення золотника;

L^{\max} – максимальний хід заслінки;

k_{∂} – коефіцієнт посилення за тиском,

$$k_{\partial} = Q_c / P_k = (k_{\epsilon} \cdot x_0) / P_k,$$

де x_0 – максимальний хід заслінки;

T_{2M} – постійна часу моста,

$$T_{ГМ} = \sqrt{K_{\partial} \cdot m_3 / (K_{\epsilon} \cdot K_{33} \cdot S_3 + K_{\partial} \cdot C_{2\partial})},$$

де m_3 – маса золотника;

ξ – коефіцієнт демпфірування коливань.

Відносний коефіцієнт демпфірування коливань:

$$\xi = \frac{S_3^2 + K_{\partial} \cdot f}{2\sqrt{K_{\partial} m_3 (K_p \cdot K_{33} \cdot S_3 + K_{\partial} \cdot C_{2\partial})}},$$

де f – коефіцієнт в'язкого тертя.

Передавальна функція циліндричного золотника визначається таким чином [50]:

$$W_3(p) = \frac{Q(p)}{L_3(p)} = k_3, \quad (2.61)$$

де k_3 – коефіцієнт передачі золотника,

$$k_3 = Q / L_3,$$

де Q – підводиться до гідроциліндра витрата;

L_3 – переміщення золотника.

2.4.3 Математичне моделювання гідроциліндра переміщення електрода

Виконавчим органом є гідроциліндр, який має таку передавальну функцію [50]:

$$W_{ГЦ}(p) = \frac{v_{2ц}(p)}{Q(p)} = \frac{k_{2ц}}{p(T_{2ц}p^2 + 2\xi T_{2ц}p + 1)}, \quad (2.62)$$

де $v_{2ц}$ – швидкість переміщення корпусу гідроциліндра щодо його плунжера;

$k_{2ц}$ – швидкість переміщення корпусу гідроциліндра відносно його

плунжера;

$$k_{2ц} = 1/S_B, \quad T_{2ц} = \sqrt{m/C_{2ц}},$$

де S_B – ефективна площа поршня циліндра з боку нагнітальної порожнини;

$E_{пр}$ – наведений модуль пружності стінок корпуса гідроциліндра і робочої рідини;

$L_{2ц}$ – довжина робочого ходу циліндра;

ξ – відносний коефіцієнт демпфірування коливань,

$$\xi = f/2 \cdot \sqrt{C_{ГЦ} \cdot m},$$

де f – наведений коефіцієнт в'язкого тертя.

На виході ПФ гідроциліндра формується сигнал зміни довжини дуги. Перетворення сигналу довжини дуги на напругу дуги здійснюється за формулою Фрелиха (1.1).

Структурна схема СУ ППЕ у програмному середовищі MatLab Simulink наведена на рисунку 2.4. У якості вхідних сигналів виступають діючі значення фазних напруг і струмів.

Для перетворення миттєвих значень фазних струмів і напруг на діючі значення в моделі використовується блок-підсистема «RMS», структурна схема якої у програмному середовищі Matlab Simulink наведена на рисунку 2.8.

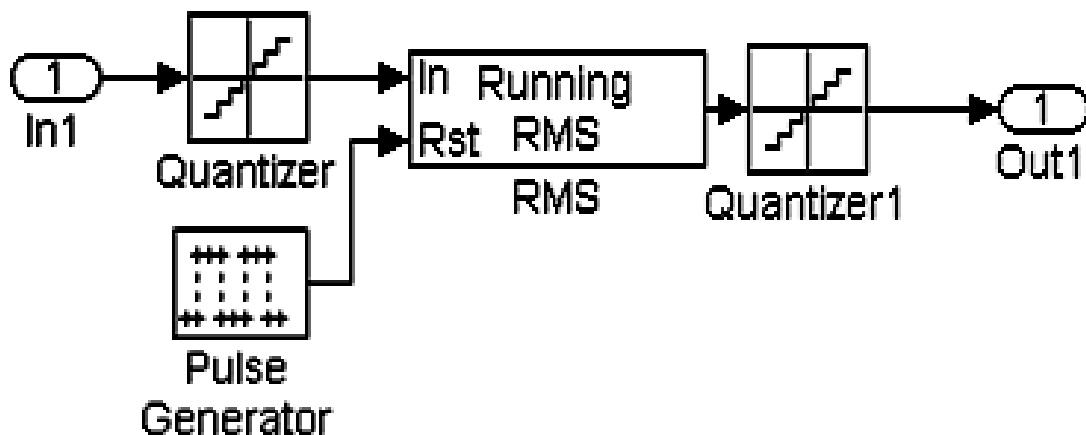


Рисунок 2.8 – Структурна схема блоку «RMS» перетворення миттєвого значення параметра на чинний у програмному середовищі Matlab Simulink

2.5 Дослідження електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Оскільки моделі створювалися універсальними для різних ДСП з імпедансними РПЕ, то для дослідження конкретної ЕМСУ ППЕ ДСП-50 був створений М-файл, у якому змінним були присвоєні конкретні чисельні значення ДСП-50, наведені в додатку Б.

При нормальному режимі роботи для СУ ППЕ були отримані графіки зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями трьох фаз, графіки миттєвих та діючих значень фазних струмів і напруг дуг, графіки зміни довжин дуг і ін. Наводити їх немає сенсу, оскільки далі будуть наведені ті самі графіки при дії збурень, за якими буде видно поведінку системи при нормальному режимі (до 15-ї с) і при дії збурень (з 15-ї с).

На рисунку 2.9 наведено масштабований графік зміни миттєвого значення напруги дуги фази А, а на рисунку 2.10 наведено графік ВАХ дуги фази А. Для двох інших фаз графіки мають подібний вигляд [44]. З рисунка 2.10 виходить, що форма миттєвого значення напруги дуги має форму, близьку до прямокутної, є піки запалювання і потухання дуг, що відповідає результатам досліджень Ного С.І., Сісоєва Г.А. і ін. вчених і є результатом використання диференційного рівняння Кассі, що описує нелінійність дуги. Це також відбивається на формі ВАХ дуги (див. рис. 2.10).

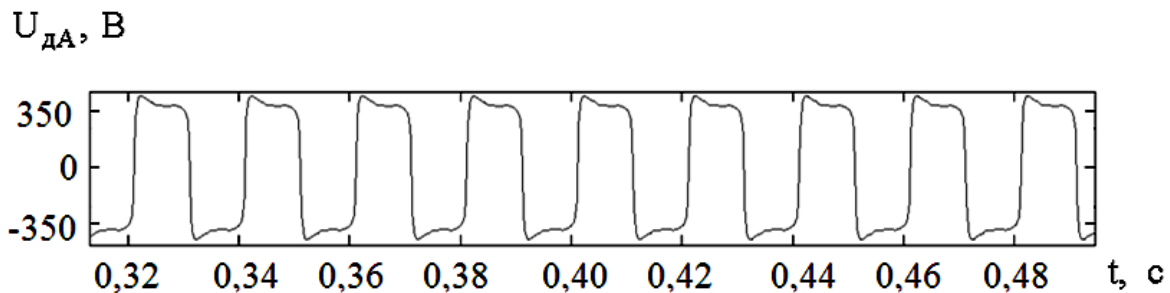


Рисунок 2.9 – Графік миттєвого значення напруги дуги фази А

При роботі ДСП, особливо в період розплавлення, дуже часто відбуваються експлуатаційні короткі замикання. Досліджуємо за допомогою моделі ЕМСУ ППЕ ДСП наслідки коротких замикань: модуляцію коливань електромеханічних параметрів, пов'язаних з коливаннями гнучких кабелів і реакцію РПЕ на дані обурення [44, 45].

При дослідженнях моделі ЕМСУ ППЕ ДСП-50 в якості показників збурюючих впливів виступають: глибина модуляції струмів, дисперсія довжин дуг, тривалість і частота коливань.

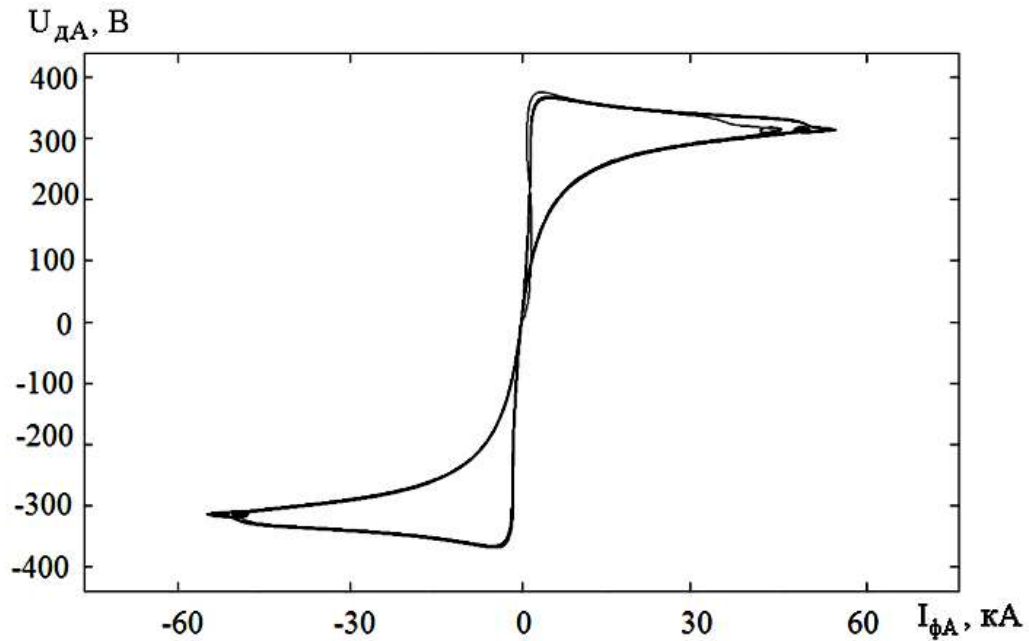


Рисунок 2.10 – Графік вольт-амперної характеристики дуги фази А

Дисперсія довжини дуги визначається за формулою (1.5).

Максимальна глибина модуляції струмів визначається за формулою

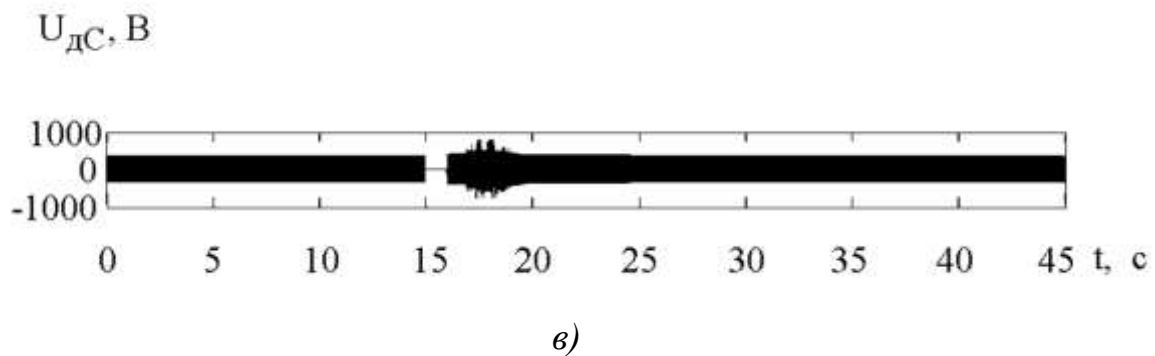
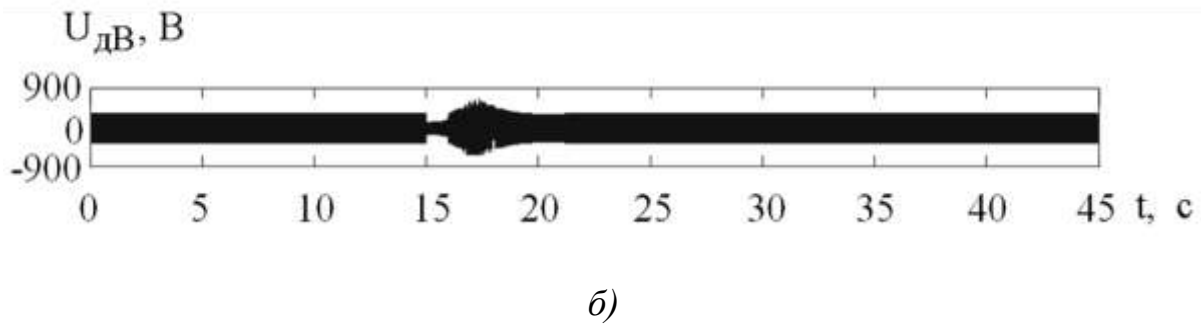
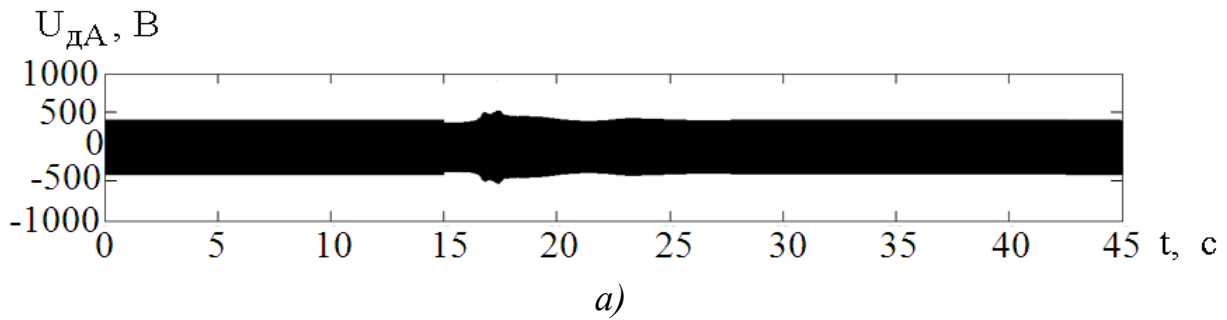
$$\varepsilon_i = \frac{\Delta I_{\max i}}{I_n} \cdot 100\%, \quad (2.63)$$

де $\Delta I_{\max i}$ – перерегулювання струму в i -й фазі;

I_n – номінальне значення струму.

Для оцінювання впливу збурень на електромеханічні параметри ДСП проводився ряд досліджень при імітації короткого замикання в різних фазах різної тривалості [44, 45]. Коротке замикання в програмному пакеті MatLab Simulink здійснювалося шляхом обнулення напруги дуги на час короткого замикання. Як показники збурюючих впливів будемо використовувати такі параметри, як: частота і тривалість коливань, глибина модуляції струмів фаз і дисперсія довжин дуг.

На рисунку 2.11 наведені графіки миттєвих значень напруг дуг ДСП-50, за якими виходить, що в момент часу 15 с напруга фази С дорівнює нулю протягом 1 с, що відповідає імітації короткого замикання. Також після закінчення короткого замикання видно обурення.



а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Рисунок 2.11 – Графіки миттєвих значень напруг дуг ДСП-50 при короткому замиканні в фазі С

На рисунках 2.12 і 2.13 наведені графіки кутів відхилення гнучких кабелів ДСП-50 від вертикалі і графіки зміни відстаней між гнучкими кабелями фаз при короткому замиканні у фазі С. З графіків виходить, що коротке замикання у фазі С призвело до коливань гнучких кабелів фаз В і С, при цьому гнучкі кабелі коливаються з частотою 0,18 Гц, а тривалість коливань – близько 20 с.

На графіках видно, мають місце високі гармоніки, які є результатом того, що при коливаннях гнучкі кабелі наближаються один до одного, у зв'язку з чим відстані між ними зменшуються, а потім у певний момент координати їх рухомих точок за віссю x стають однаковими, тому після цього відстані між ними на деякий час починають збільшуватися.

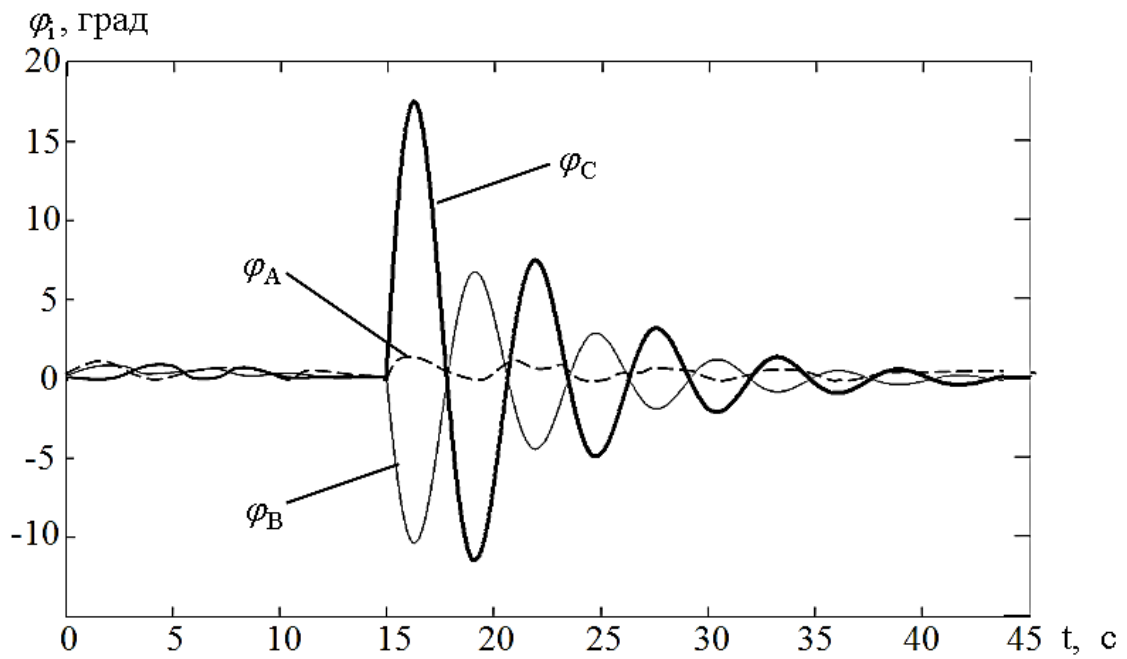


Рисунок 2.12 – Графіки кутів відхилення гнучких кабелів ДСП-50 від вертикалі при короткому замиканні у фазі С

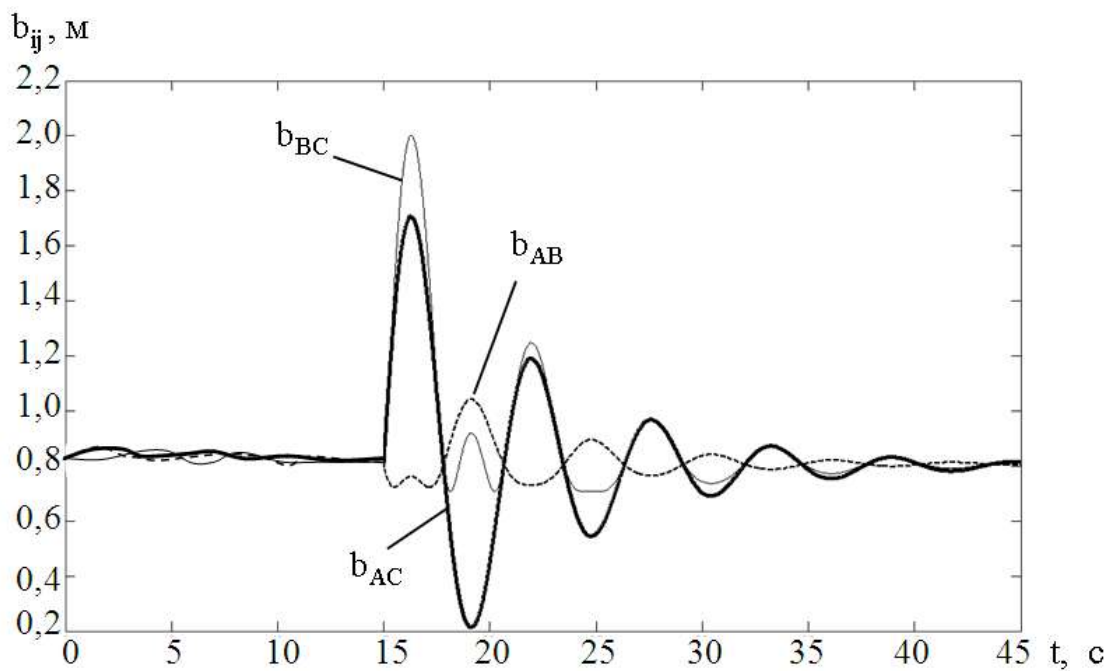


Рисунок 2.13 – Графіки зміни відстаней між гнучкими кабелями ДСП-50 при короткому замиканні у фазі С

На рисунку 2.14 наведені графіки зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями трьох фаз ДСП-50 під впливом імітації короткого замикання у фазі С.

L_{ij} , мкГн

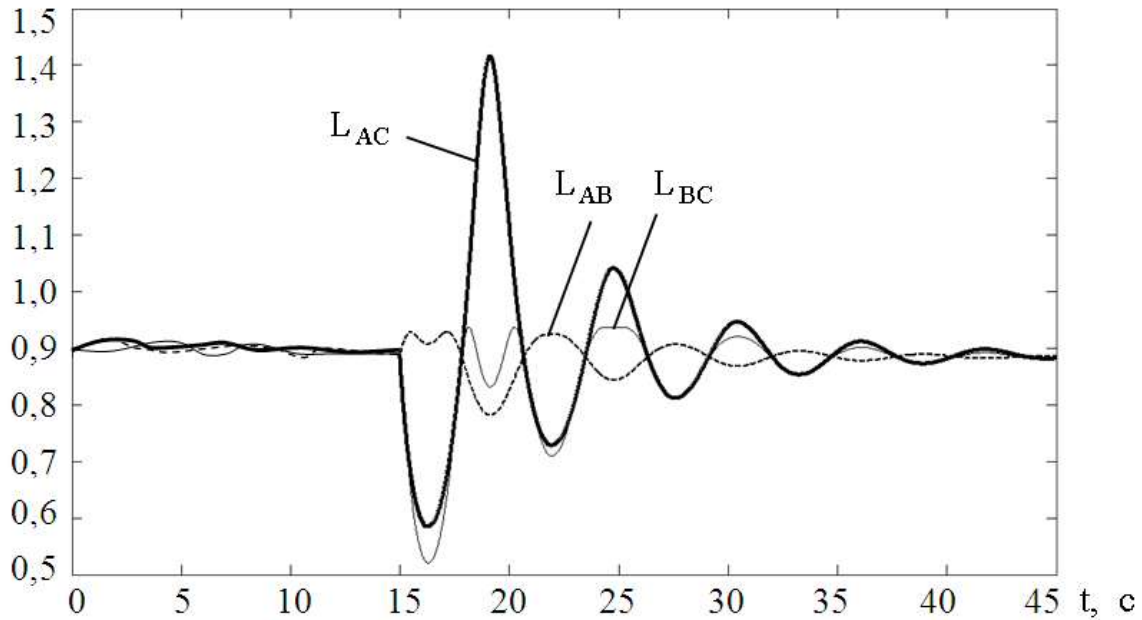
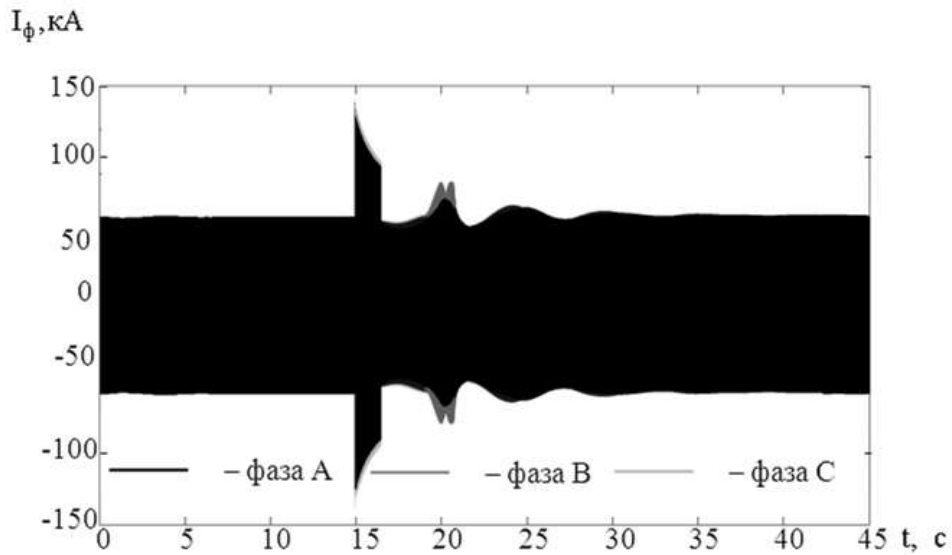


Рисунок 2.14 – Графіки зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями ДСП-50 при короткому замиканні у фазі С

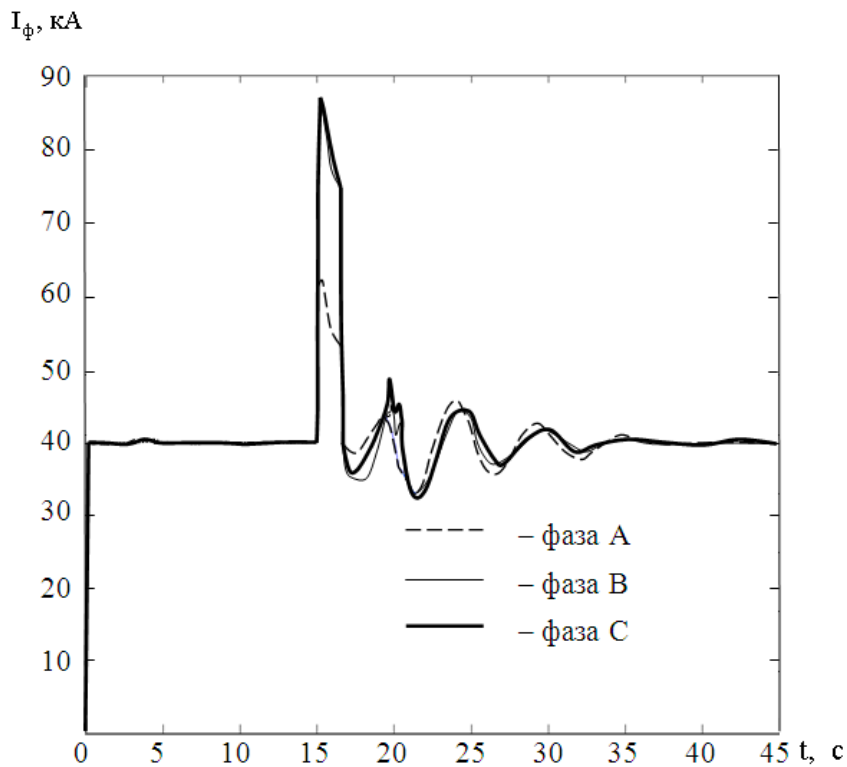
На рисунку 2.15 наведені графіки миттєвих та діючих значень фазних струмів ДСП-50 при імітації короткого замикання у фазі С [44, 45].

З графіків виходить, що в момент часу 15 с має місце різке зростання фазних струмів тривалістю 1 с, пов'язане з імітацією к. з., після чого починаються низькочастотні згасаючі коливання, які збігаються за тривалістю і частотою з коливаннями взаємних індуктивностей фаз гнучких кабелів.

При цьому глибина модуляції струмів, що визначається за формулою (2.63), сягає 20 %. Це свідчить про наслідки коливань гнучких кабелів, які відображаються у змінах струмів фаз.



а)



б)

а – миттєві значення; б – діючі значення
Рисунок 2.15 – Графіки фазних струмів ДСП-50 при к. з. у фазі С

З рівняння взаємозв'язку між довжиною дуги і діючим значенням напруги дуги (1.1) випливає те, що зміна напруги дуги будь-якої фази відбувається пропорційно зміні довжини дуги цієї фази (рис. 2.16).

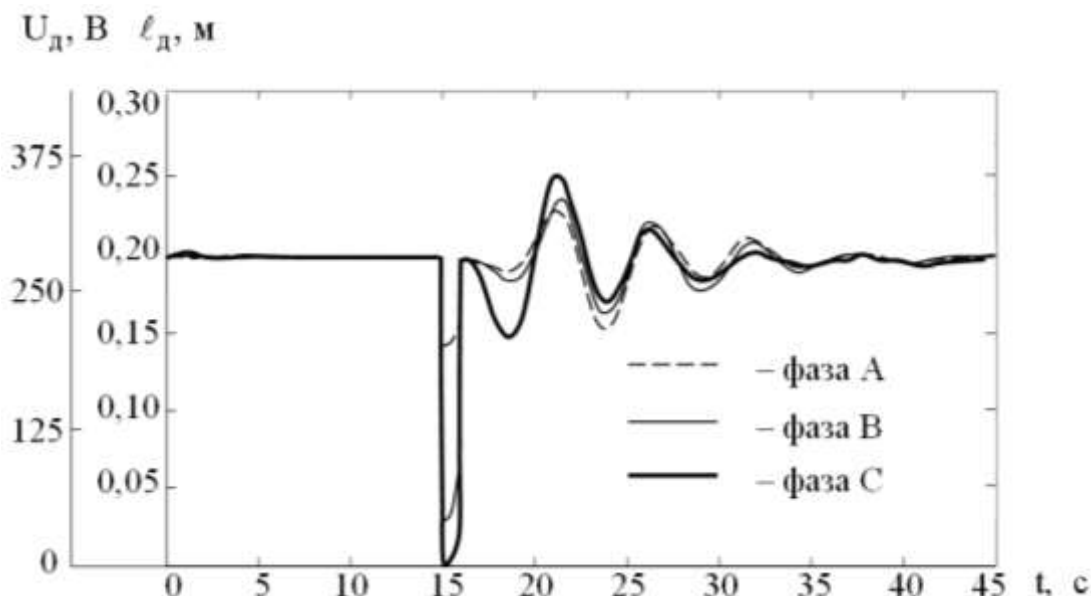


Рисунок 2.16 – Графіки діючих значень напруг дуг і зміни довжин дуг ДСП-50 при к.з. у фазі С

На графіках діючих значень напруг дуг і зміни довжин дуг видно, що у фазі С у момент часу 15 з тривалістю 1 с напруга і довжина дуги дорівнюють 0, що відповідає закорочуванню електрода даної фази. І після нього також видно наслідки збурень. Коливання довжин дуг після короткого замикання є результатом відпрацювання регуляторами переміщення електродів модуляцій фазних струмів і напруг дуг.

У таблиці 2.1 наведені оцінки показників збурень – наслідків к. з.

Таблиця 2.1 – Оцінки показників збурень при к. з. у фазі С

Контрольований параметр	Фаза	ДСП-50
Глибина модуляції струмів ε_i , %	А	12,5
	В	13,6
	С	20,8
Дисперсія довжини дуги σ_ℓ^2 , мм ²	А	53,7
	В	92,5
	С	116,9
Тривалість коливань електричних параметрів t , с	А	20
	В	20
	С	21
Частота коливань електричних параметрів f , Гц	А	0,18
	В	
	С	

Аналізування таблиці 2.1 показує, що при імітації короткого замикання у фазі відбуваються коливання всіх електричних параметрів, при цьому глибина модуляції струмів сягає 20 % у тій фазі, де проводилося

к. з., що робота регуляторів переміщення електродів призводить до дисперсії довжин дуг до 117 мм^2 . Що цікаво, тривалість і частота коливань всіх електричних параметрів збігається і відповідає частоті коливань гнучких кабелів, що свідчить про те, що, як і передбачалося, автоматичні регулятори переміщення електродів реагують на будь-які зміни електричних параметрів, у тому числі пов'язані з електромеханічними коливаннями гнучких кабелів.

Такі показники збурень призводять до збільшення тривалості розплавлення, оскільки, як виходить з таблиці 2.1, реакція регуляторів на одне коротке замикання призводить до коливань електричних параметрів протягом 20 с. Це у свою чергу призводить до зайвих витрат енергії, знижує ефективність роботи печі.

Також були проведені дослідження електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП-12 з диференціальними регуляторами переміщення електродів. Наводити результати моделювання немає сенсу, оскільки вони практично збігаються з результатами досліджень електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП-50. Розбіжності спостерігаються тільки в тривалості і частоті коливань електромеханічних параметрів. Частоти коливань гнучких кабелів і, відповідно, електричних параметрів, для ДСП-12 становлять 0,2 Гц, оскільки довжини гнучких кабелів ДСП-12, від яких залежить частота їх коливань, менше, ніж довжини гнучких кабелів ДСП-50.

Оскільки тривалість коливань електричних параметрів при реакції на одне коротке замикання у зв'язку з коливаннями гнучких кабелів може тривати до 20 с, а за одну плавку, як було відмічено раніше, може відбуватися до 200 коротких замикань, то нестабільна робота печі становитиме:

$$T = N \cdot t_n = 200 \cdot 20 \text{сек} = 4000 \text{сек} = 1,1 \text{ часа}, \quad (2.64)$$

де N – кількість експлуатаційних к. з. за одну плавку, $N=200$;

t_n – тривалість коливань електричних параметрів при відпрацюванні одного к. з., $t_n=20 \text{ с}$.

Таким чином, оскільки повна тривалість однієї плавки – 2 години, то виходить, що 55 % від усього часу плавлення піч працює нестабільно з зайвою витратою енергії і, оскільки електроди при цьому роблять поздовжні коливання у зв'язку з відпрацюванням регуляторами переміщення електродів збурень у силовому ланцюзі, то також частішають поломки електродів.

Тому необхідно вдосконалити електромеханічну систему управління приводом переміщення електродів ДСП для того, щоб регулятори переміщення електродів не реагували на розглянуті зовнішні збурення шляхом стабілізації довжин дуг з метою підвищення ефективності роботи печі, а саме: скорочення тривалості плавки, зниження енергоспоживання і підвищення стабільності і надійності роботи печі.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП-50 ПРИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕННЯХ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

У розділі розробляється методика проведення експериментальних досліджень вихідної системи автоматичного керування приводом переміщення електродів ДСП при коливаннях гнучких кабелів. Наводяться результати експериментальних досліджень відповідно до розробленої методики. Перевіряється адекватність математичних моделей, розроблених в розділі 2.

3.1 Структура базової системи управління приводом переміщення електродів ДСП-50

АСУ технологічним процесом ДСП призначена для автоматизованого управління, контролю, документування, сигналізації і візуалізації технологічного процесу оброблення сталі на установці, і являє собою єдину систему логічно, фізично і функціонально пов'язану [15, 16].

Система управління забезпечує виконання супутніх операцій в автоматизованому і ручному режимах:

- управління скраповозом для навантаження брукхту;
- управління сталевозом, передавальним візком і шлаковозом;
- вимірювання температури металу;
- переміщення електродів;
- автоматичного запалювання і горіння дуг;
- дугового підігріву;
- наведення рафінуючого шлаку;
- подачі шлакоутворюючих і легуючих матеріалів;
- коригування хімічного складу і розкислення металу;
- відбору проб металу і виміру його температури і окислення;
- доведення металу за результатами проб, модифікація неметалічних включень;
- продування металу аргоном;
- випуску сталі в сталерозливних ковшах, скачування шлаку;
- подачі ковша з рідкою сталлю на сталевоз для подальшого оброблення на установці ківш-піч.

АСУ ППЕ установки виконана як дворівнева розподілена система:

- верхній рівень – обмін технологічною і оперативною інформацією з оператором, візуалізація, протоколювання і архівування;

- нижній рівень – управління роботою електроустаткування окремих вузлів і механізмів ДСП.

У даній роботі досліджується електричний режим роботи ДСП, тому не будемо розглядати весь технологічний процес, обмежимося управлінням тільки енергетичним режимом.

Структура АСУ ППЕ ДСП-50 подана на рисунку 3.1.

Верхній рівень АСУ ППЕ реалізований на базі промислових серверів HP ML350 і комп'ютерів HP DC7700, програмованих контролерів серії Premium фірми Schneider: центрального контролера PLC400, контролера регулятора горіння дуги PLC400, контролера гідравліки PLC400. Обмін даними на верхньому рівні здійснюється через промислову мережу Ethernet за допомогою концентраторів. Устаткування верхнього рівня розташоване в електроприміщеннях. Робочі місця (монітор, клавіатура, миша) серверів і комп'ютерів знаходяться в приміщенні центрального поста управління (ЦПУ) і підключені до комп'ютерів за допомогою KVM подовжувачів.

Центральне місце в СУ займають програмовані контролери Premium на базі центрального процесора TSXP575634M з двома встановленими комунікаційними процесорами TSXPBY100 (PROFIBUS-DP) на кожному для організації мережі нижнього рівня і інтегрованим комунікаційним процесором Ethernet для організації зв'язку з верхнім рівнем АСУ в ручному (налагоджувальному) і автоматичному режимах. Центральний контролер працює під управлінням відповідного програмного забезпечення і дозволяє вести управління електричним режимом ДСП в ручному і автоматичному режимах. Центральний контролер передає дані про стан механізмів ДСП на сервер і приймає керуючі команди і параметри процесу, задані з операторських станцій.

У сервері СУ базами даних зберігається база даних датчиків і переданих сигналів. На сервері додатків зберігається все необхідне програмне забезпечення.

Сервер ДСП пов'язаний з обладнанням мереж Ethernet через мережеві концентратори. З керуючим обладнанням – центральним контролером, контролером РПЕ, контролером гідравліки. Обладнання другого рівня, робочі станції управління і візуалізації так само підключені через окремі мережеві концентратори до мережі Ethernet. З цієї ж мережі Ethernet передбачено підключення до заводської мережі.

Сервер ДСП виконує функції протоколювання і архівування технологічних даних процесу ДСП, дій оператора, технологічних та аварійних повідомлень. Сервер працює під управлінням відповідного програмного забезпечення візуалізації техпроцесу і передає на клієнтські станції дані про стан механізмів, а також фіксує введені оператором команди управління і змінювані величини.

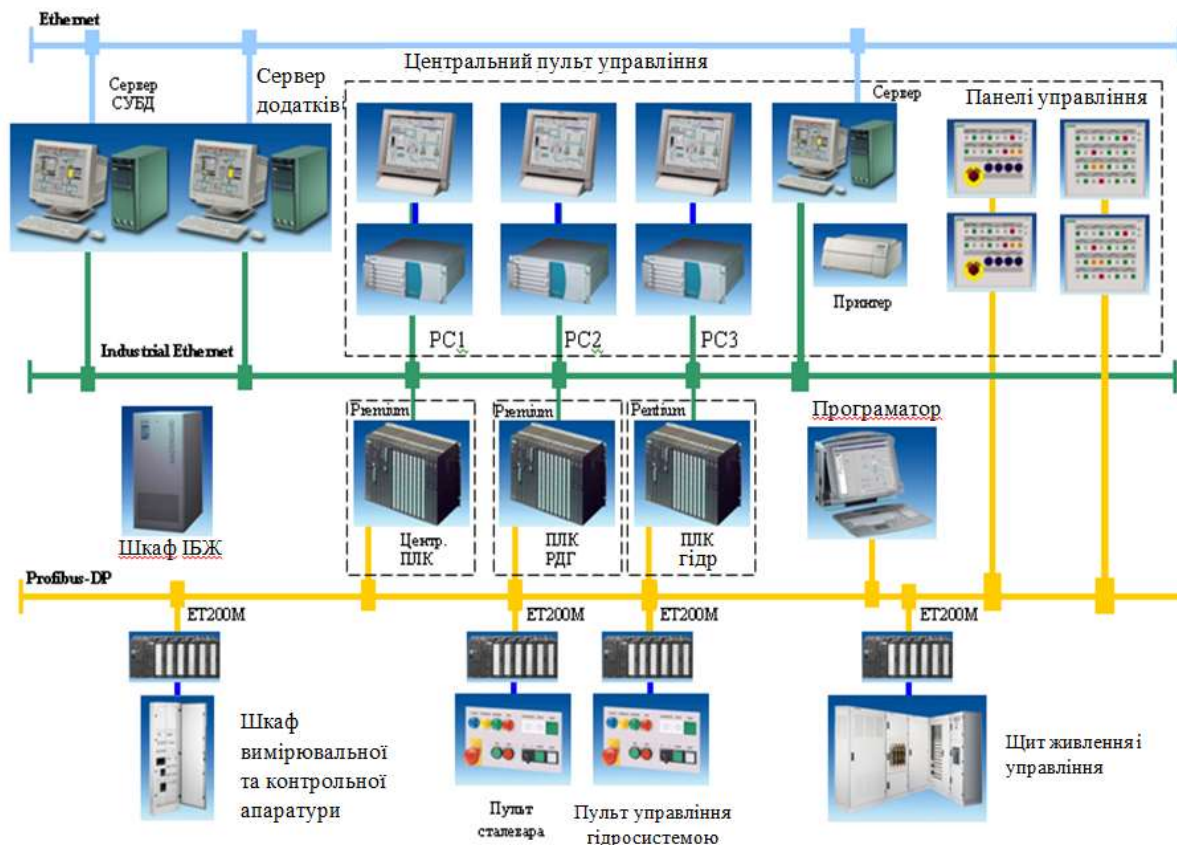


Рисунок 3.1 – Структурна схема АСУ ППЕ ДСП-50

Робочі місця надають у зручних графічній і цифровій формах операторові всю необхідну для роботи інформацію і забезпечують передачу команд оператора через сервер до керуючого контролера для виконання.

РПЕ реалізований на базі програмованого контролера Premium (SIMELT) і виконує такі функції:

- автоматичне запалювання дуг;
- незалежне регулювання імпедансу (для кожного електрода);
- регулятор перевантаження зі струму;
- виявлення короткого замикання і прискорений підйом електродів;
- захист пічного вимикача і перемикача ступенів.

Нижній рівень АСУ ППЕ є розподіленою відкритою системою управління, побудовану на базі програмованого логічного контролера серії Premium, станцій розподіленого вводу-виводу Advantis, панелей оператора OP77, кнопкових панелей PP17, частотних перетворювачів Altivar і Sikostart. Устаткування АСУ ППЕ нижнього рівня установки об'єднано локальними мережами PROFIBUS-DP.

Мережа PROFIBUS-DP складається з сегментів (кручена екранована пара, що має на кінцях згасаючі резистори). До цієї крученої пари електрично паралельно підключаються абоненти мережі. Кожен абонент має унікальну для мережі адресу (число від 0 до 126).

Сегменти мережі PROFIBUS-DP підключені через повторювачі, встановлені в шафі контролера. Панель оператора OP77 підключена до контролера за локальною мережею Uni-Telway.

Розподілена периферія ET200M має інформаційні модулі вводу / виводу і служить для збору та обміну інформацією між центральним контролером, датчиками і приводами виконавчих механізмів печі. Усі модулі постійно опитуються за мережею PROFIBUS-DP (RS485).

На ділянці насосно-акумуляторної станції організована локальна мережа PROFIBUS-DP, майстром якої є контролер Pentium насосно-акумуляторної станції. Мережа об'єднує кнопкові панелі PP17-II, станції розподіленого вводу-виводу Advantis. Панель оператора OP77 підключена до контролера насосної станції за локальною мережею Uni-Telway.

У системі регулятора переміщення електродів є своя локальна мережа PROFIBUS-DP, яка об'єднує контролер Premium з вимірювальною системою параметрів високовольтного трансформатора SIMEAS Q.

Управління приводами і механізмами проводиться як з центрального пульта управління, так і з місцевих пультів управління, залежно від виконуваних функцій.

За допомогою програматора відбувається програмування оператором логічних контролерів з метою завдання їм алгоритмів роботи.

Незалежно від місця знаходження керівного органу логіку роботи реалізує програмований логічний контролер.

Організація зв'язку ПЛК логічної системи управління приводом переміщення електродів з відомими DP-пристроями (датчиками і виконавчими пристроями) здійснюється через ПЛК РПЕ з промислової шини Profibus. Схематичне зображення зв'язку ПЛК АСУ ППЕ з відомими DP-пристроями подано на рисунку 3.2, на якому прийняті такі позначення: ПЛК – програмований логічний контролер регулятора горіння дуги; Е – графітові електроди; ТП – трансформатор пічний; ВМ – виконавчий механізм (механізм переміщення електродів); Д1 – датчики напруги на короткій мережі; Д2 – датчики струму на короткій мережі; АЦП1 – аналогово-цифрові перетворювачі каналу напруг; АЦП2 – аналогово-цифрові перетворювачі каналу струмів; М1 – модем передачі напружень; М2 – модем передачі струмів; К1 – комунікатор каналу напруг; К2 – комунікатор каналу струмів.

Управління приводом переміщення електродів проводиться з візуалізацією таких параметрів моделювання: фазних струмів і напруг, потужності на електричній дузі, зміни довжин електричних дуг. Вихідними даними функціонування АСУ ППЕ є параметри, що описують директивний графік процесу плавки, що вводяться сталеваром з поста управління значення напруги і сили струму на короткій мережі.

При роботі ДСП найбільш енергозатратним є період розплаву шихти.

Як було сказано раніше, цей період характеризується нестабільністю горіння дуг, пов'язаною з прогоранням каналів горіння і падінням шматків шихти, електромеханічною взаємодією рухомих струмоведучих елементів печі і дуг при коротких замиканнях. Дослідженнями [7,43–45] встановлено, що експлуатаційні к. з. викликають коливання гнучких кабелів і інших

рухомих елементів короткої мережі, а це призводить до виникнення зовнішніх збурень у каналах управління регуляторів переміщення електродів.

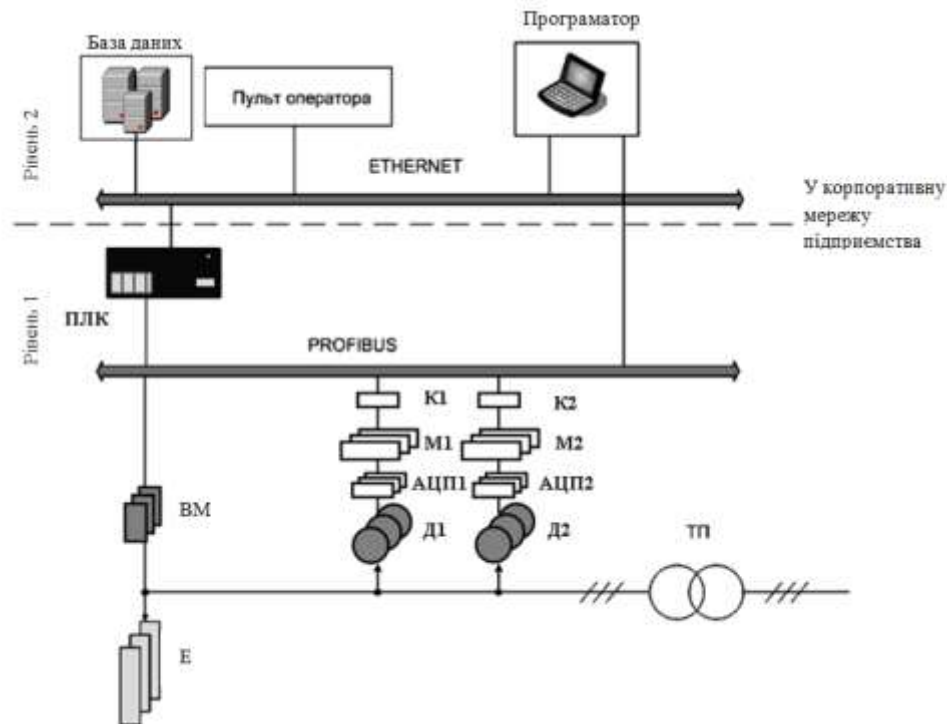


Рисунок 3.2 – Структурна схема зв'язку ПЛК АСУ ППЕ з відомими DP-пристроями

3.2 Методика експериментальних досліджень електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ»

Для того щоб перевірити адекватність розробленої в розділі 2 моделі ЕМСУ ППЕ ДСП і довести вплив коливань гнучких кабелів на модуляцію електричних параметрів і стабільність горіння дуг, необхідно провести експериментальні дослідження в промислових умовах на ДСП з імпедансними РПЕ. Однак при цьому ми не повинні втручатися в техпроцес плавлення сталі, примусово створюючи додаткові короткі замикання з метою порівняння результатів експериментальних досліджень і за допомогою розробленої моделі. Тому можна провести еквівалентні дослідження без примусового короткого замикання, які також будуть підтверджувати взаємозв'язок механічних коливань гнучких кабелів і зміну електричних параметрів короткої мережі, у тому числі і коливання довжин дуг.

Тому для оцінювання впливу збурень на електромеханічні параметри реальної печі ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» у виробничих умовах проводився ряд досліджень при зовнішньому збурюючих впливів у різних фазах шляхом імітації відхилення кабелю під час спокійного горіння дуг (період доведення), коли процес плавлення найбільш стабільний (щоб на експеримент не впливали зовнішні експлуатаційні збурення).

Паралельно проводилися аналогічні дослідження в моделі електромеханічної системи ДСП у середовищі MatLab [44, 45].

Потім, з використанням відомих методик теорії оброблення експерименту, теоретичні та експериментальні дослідження були зіставлені.

Для проведення експериментальних досліджень системи управління приводом переміщення електродів ДСП при коливаннях гнучких кабелів у даній роботі використовуються:

- СУ ППЕ ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ»;
- математична модель ЕМСУ ППЕ ДСП, розроблена в розділі 2;
- ізолюваний капронову канат довжиною 15 метрів;
- значення напруг і сил струмів у кожній фазі короткої мережі, знімаються з датчиків напруги і струмів фаз короткої мережі за допомогою діючої інформаційно-вимірювальної системи, описаної в підрозділі 3.1;
- відеокамера для визначення кількісних показників коливань гнучких кабелів (30 кадрів за секунду).

Програма експериментальних досліджень СУ ППЕ ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» при коливаннях гнучких кабелів наведена в додатку В і [53, 54].

3.3 Результати експериментальних досліджень

Спостереження за поведінкою гнучких кабелів у виробничих умовах при коротких замиканнях і проведення серії дослідів за допомогою розробленої моделі показали, що при коротких замиканнях найбільш часто має місце відхилення гнучкого кабелю на кут порядку 150. Тому наводиться один з експериментів при відхиленні гнучкого кабелю на кут 150 і порівняльний аналіз графіків, отриманих експериментально і з використанням розробленої в розділі 2 моделі. При цьому було встановлено, що максимальні кути відхилення гнучких кабелів крайніх фаз від вертикалі, отримані за допомогою моделі, можуть сягати 30 градусів, а фази В – 100, що збігається з результатами досліджень Бікеева Р.А. [30].

Використовуючи засоби обчислювальної техніки і покадрову розгортку, проводилося оброблення відеоматеріалів, знятих для визначення кількісних показників коливань гнучких кабелів під час експерименту [54]. На рисунку 3.3 наведено графік зміни кута відхилення гнучкого кабелю фази С від вертикалі при штучному зовнішньому

збуренні в момент часу 15 с шляхом його відхилення на кут 150. Кабелі двох інших фаз при цьому були нерухомі [54].

На графіку видно, що в момент часу 15 с кабель фази С був відхилений від вертикалі на кут 150, після чого починає здійснювати вільні затухаючі коливання тривалістю 18 с. Частота коливань становить 0,18 Гц.

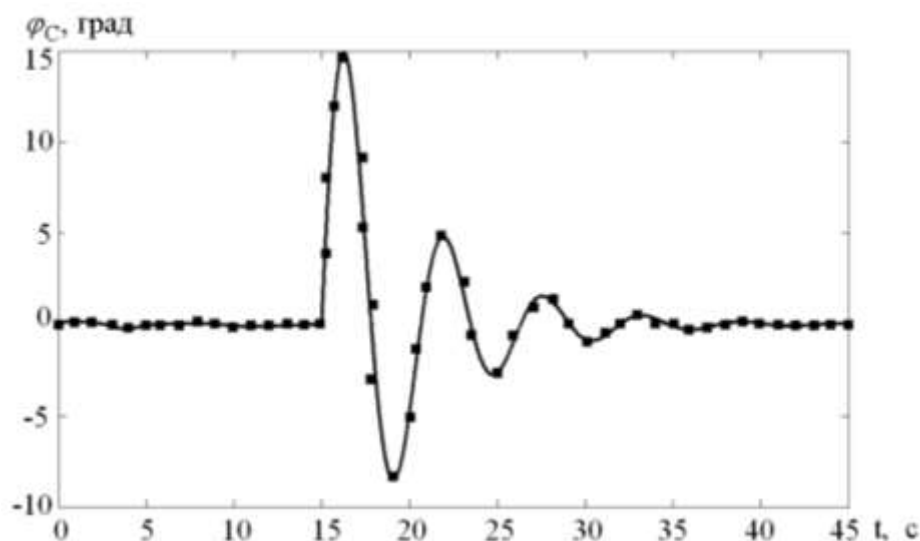


Рисунок 3.3 – Графік зміни кута відхилення гнучкого кабелю фази С від вертикалі при його коливанні

На рисунку 3.4 наведені графіки зміни відстаней між гнучкими кабелями, отримані за допомогою моделі і збігаються з реальними коливаннями гнучких кабелів під час проведення експерименту, що підтвердила покадрова розгортка відеокамери.

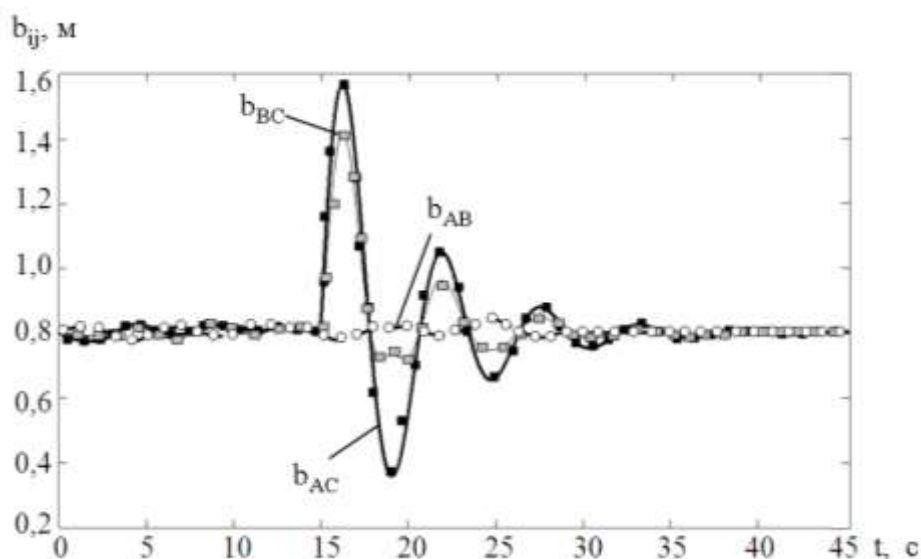


Рисунок 3.4 – Графіки зміни відстаней між гнучкими кабелями трьох фаз ДСП-50 при коливанні кабелю фази С

На рисунках 3.5...3.7 наведені графіки зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями трьох фаз, графіки миттєвих значень фазних струмів і напруг дуг при імітації зовнішнього збурення у фазі С, отримані за допомогою розробленої моделі.

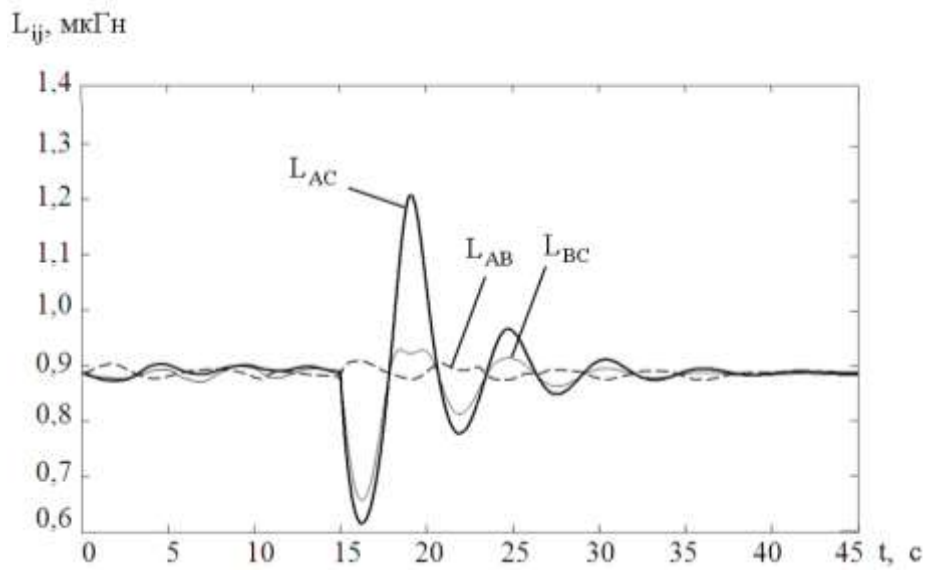


Рисунок 3.5 – Графіки взаємних індуктивностей гнучких кабелів трьох фаз ДСП-50 при коливанні кабелю фази С

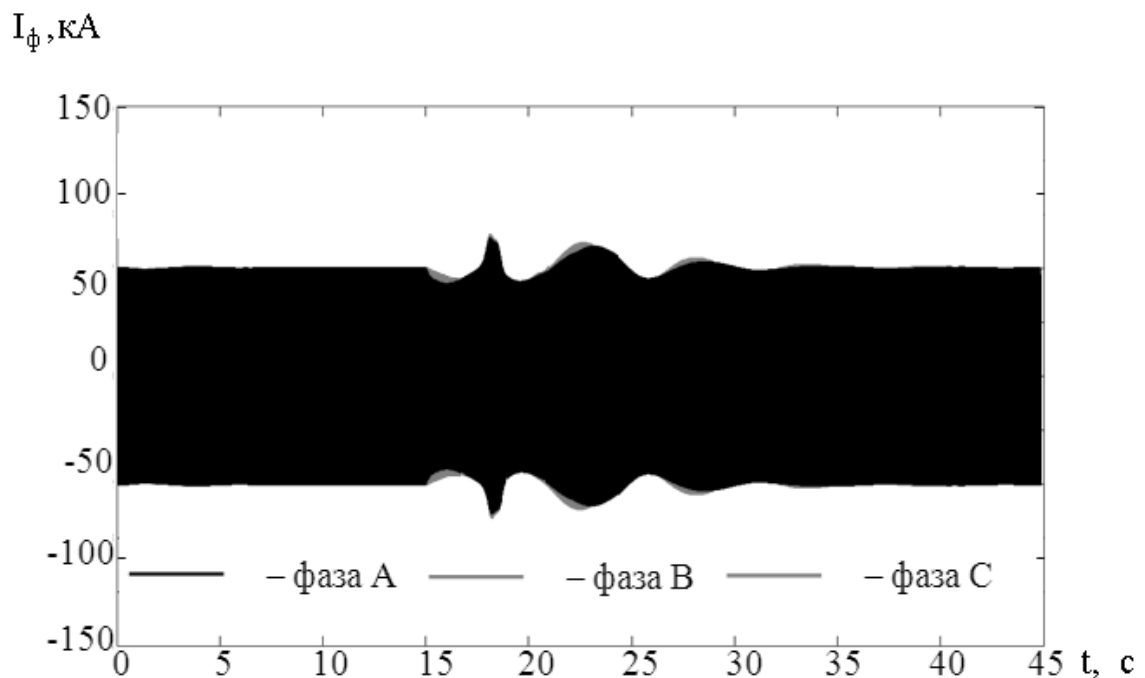
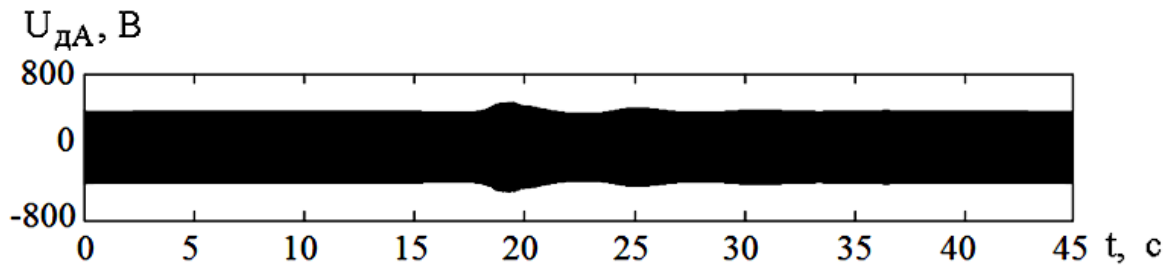
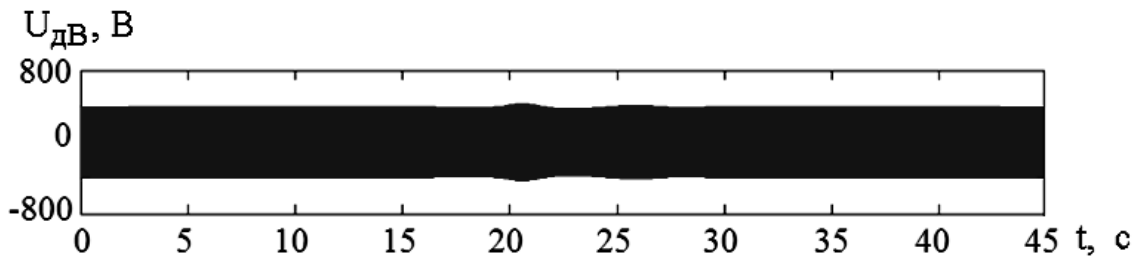


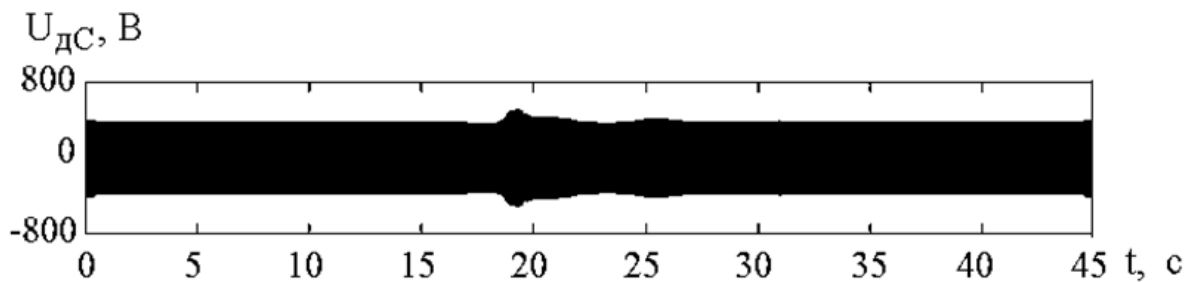
Рисунок 3.6 – Графіки миттєвих значень фазних струмів ДСП-50 при коливанні кабелю фази С



a)



б)



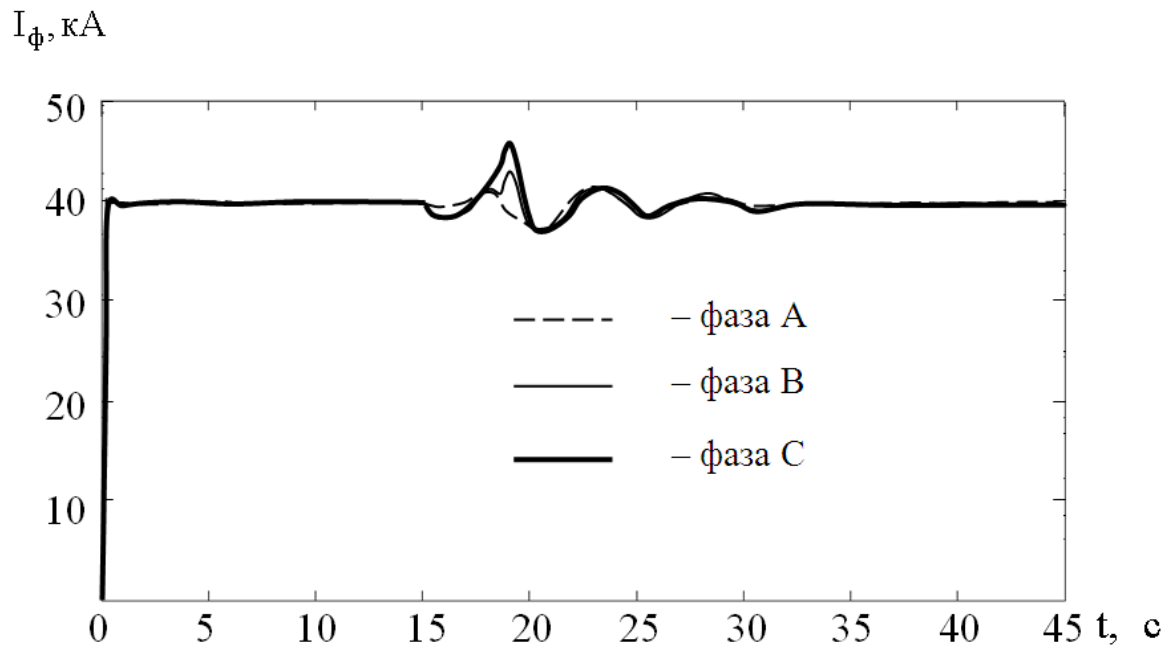
в)

a – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

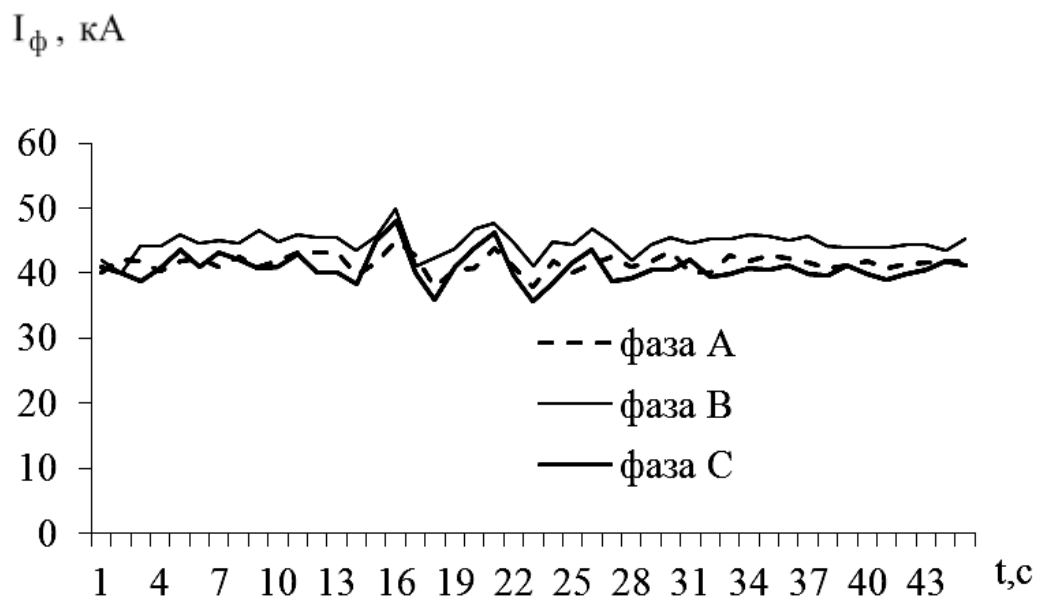
Рисунок 3.7 – Графіки миттєвих значень напруг дуг ДСП-50 при збуренні у фазі С

На графіках рисунків 3.4...3.7 видно, що з 15-ї секунди мають місце низькочастотні згасаючі коливання, частота яких становить 0,18 Гц, а тривалість приблизно 17...19 с, що свідчить про вплив механічних коливань гнучких кабелів на модуляції електричних параметрів короткої мережі.

Дані зміни довжин дуг, фазних струмів і напруг, отримані у виробничих умовах, були експортовані в програму Microsoft Excel. Далі проводиться порівняльний аналіз графіків зміни фазних струмів, фазних напруг і довжин дуг, отриманих експериментально і за допомогою моделі (рис. 3.8...3.10).

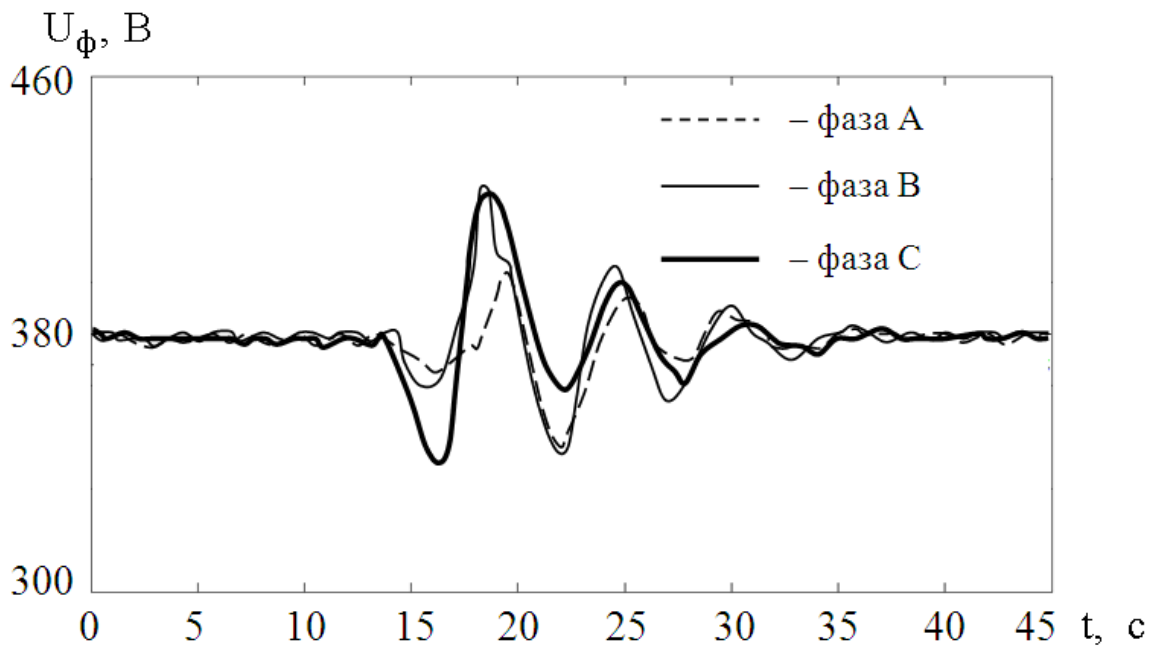


a)

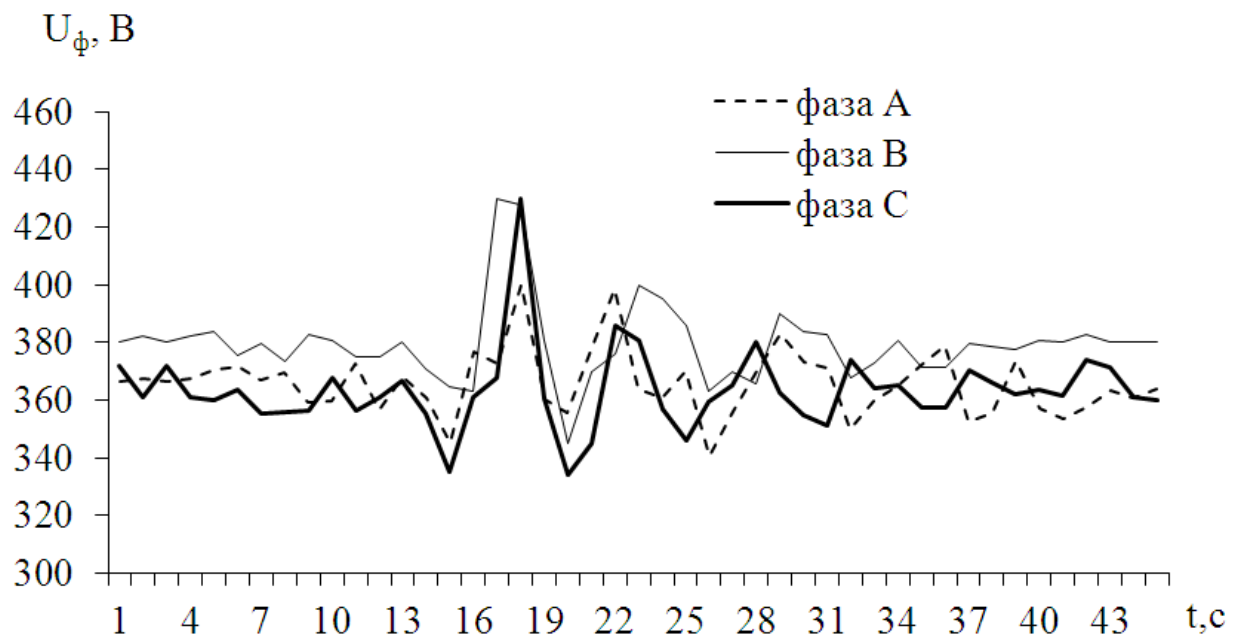


б)

a – отримані в моделі; б – отримані експериментально
 Рисунок 3.8 – Графіки зміни фазних струмів при штучному зовнішньому збуренні у фазі С

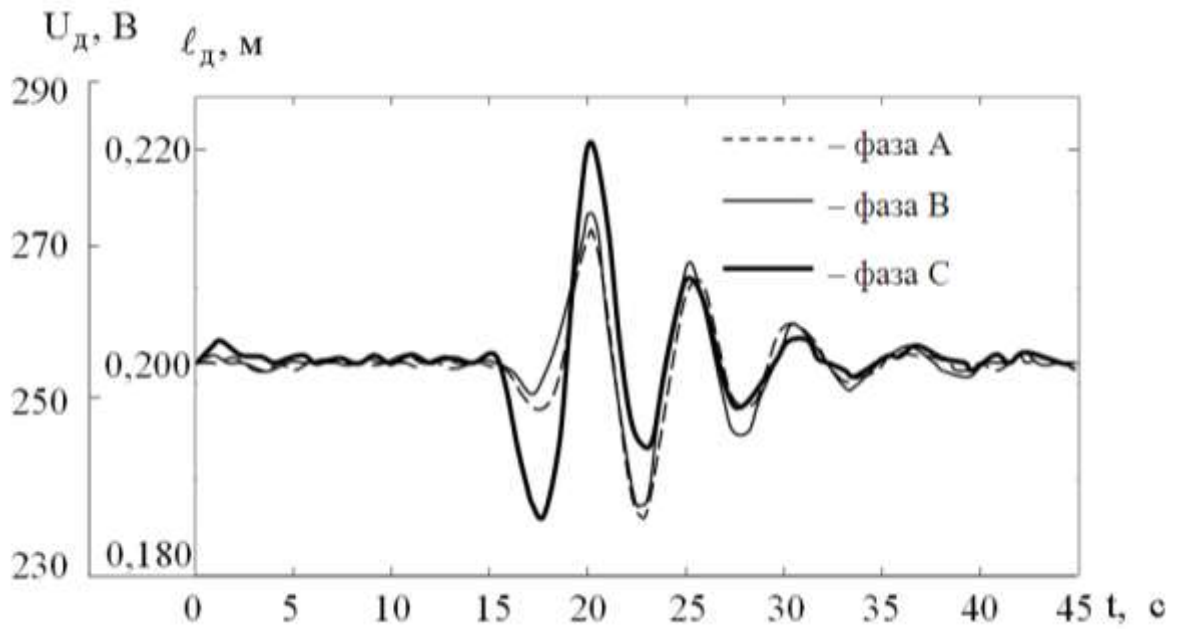


a)

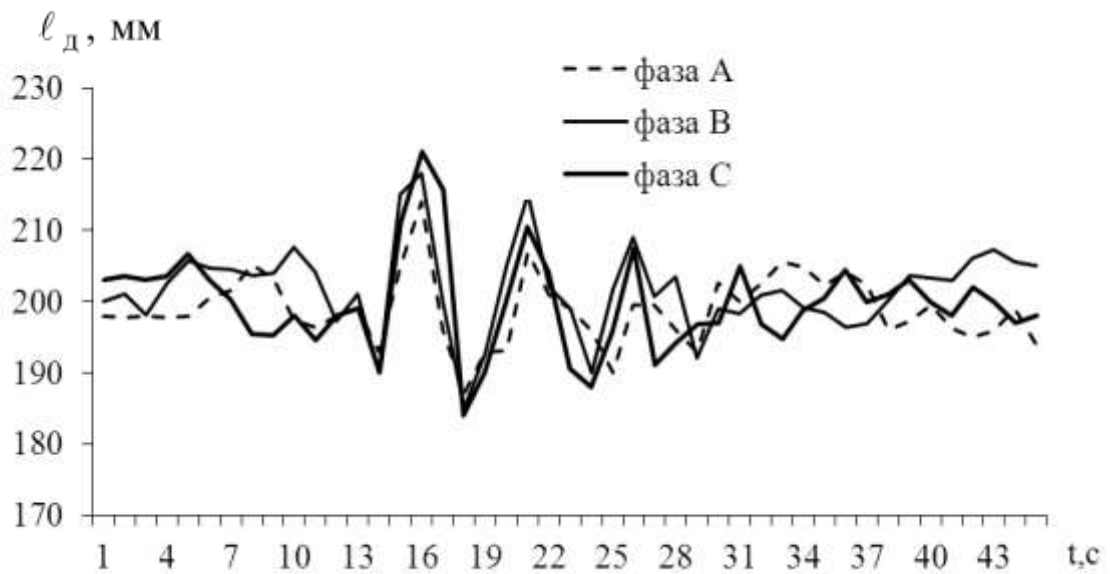


б)

a – отримані в моделі; б – отримані експериментально
 Рисунок 3.9 – Графіки зміни фазних напруг при штучному зовнішньому збуренні у фазі С



a)



б)

а – отримані в моделі; б – отримані експериментально
 Рисунок 3.10 – Графіки зміни довжин дуг при штучному зовнішньому збуренні у фазі С

На графіках зміни довжин дуг, фазних струмів і напруг видно вплив зовнішнього механічного збурення, тобто примусового коливання кабелю фази С. Коливання всіх цих параметрів також тривають 16,5...18,4 с.

Графіки зміни довжин дуг є результатом роботи регуляторів переміщення електродів, оскільки між сигналом управління з виходу регулятора і довжиною дуги існує зв'язок. Тому на графіках зміни довжин дуг (див. рис. 3.10) видно, що регулятори працюють нестабільно, відпрацьовуючи збурення електричних параметрів, викликані примусовим коливанням кабелю фази С.

При цьому частоти коливань електричних параметрів короткої мережі ДСП збігаються з власними інфранизькими частотами коливань рухомих гнучких кабелів ДСП [7], що визначаються за формулою

$$f_{ci} = \frac{\omega_{ci}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_i}{m_i}}, \quad (3.1)$$

де c_i – жорсткості сердечників кабелів;

m_i – маси кабельних провідників з ізоляцією і шлангами з водою.

За рисунком 3.3 під час проведення експерименту на ДСП-50 також було встановлено, що частота коливань гнучкого кабелю становить 0,18 Гц. У цих же інтервалах перебувають і частоти випадкових періодичних коливань струмів, напруг і довжин дуг:

$$f_{ci} = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{T_U} = \frac{1}{T_\ell} \approx 0,16...0,5 \text{ Гц}, \quad (3.2)$$

де T_I, T_U, T_ℓ – періоди коливань струмів, напруг, довжин дуг (див. рис. 3.8...3.10). Причому найбільш чітко виражена частота 0,18 Гц, яка проглядається саме при коливанні гнучкого кабелю.

Максимальна глибина модуляції струмів, а також дисперсії довжин дуг ДСП-50 під час проведення експерименту визначалися за формулами (2.63), (1.5) і занесені до таблиці 3.1, де наведено порівняльну оцінку показників збурень, отриманих за допомогою розробленої моделі і під час експерименту.

Аналізування таблиці 3.1 показує, що при імітації коливання гнучкого кабелю у фазі відбуваються коливання всіх електричних параметрів, при цьому глибина модуляції струмів доходить до 15 % у тій фазі, де проводилося відхилення кабелю, що після роботи регуляторів переміщення електродів призводить до дисперсії довжин дуг до 45 мм². Тривалість і частота коливань усіх електричних параметрів збігається і відповідає частоті коливань гнучких кабелів, що знову-таки доводить реакцію регуляторів переміщення електродів на будь-які зміни електричних параметрів, у тому числі пов'язаних з електромеханічними коливаннями.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика параметрів перехідних процесів ЕМСУ ППЕ ДСП-50 при дослідженнях у розробленій моделі і під час експерименту

Контрольований параметр	Фаза	Модель	Експеримент	Розкид параметрів, %
Глибина модуляції струмів ε_i , %	А	10,27	10,77	4,6
	В	10,41	10,32	1,1
	С	15,72	10,06	2,1
Дисперсія довжини дуги σ_ℓ^2 , мм ²	А	23,63	23,28	1,5
	В	34,36	33,36	3,0
	С	45,54	44,39	2,6
Тривалість коливань електричних параметрів t , с	А	17,1	16,5	3,6
	В	17,0	17,2	1,2
	С	18,0	18,4	2,2
Частота коливань електричних параметрів f , Гц	А	0,18	0,18	0
	В			
	С			

Виходячи з даних таблиці 3.1, можна висновити, що розкид електромеханічних параметрів у розробленій у розділі 2 моделі і за експериментальними даними не виходить за межі 5 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі ЕМСУ ППЕ ДСП фізичному об'єкту.

3.4 Підтвердження адекватності розробленої моделі системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Підтвердження адекватності розробленої моделі ЕМСУ ППЕ ДСП у даній роботі будемо проводити, використовуючи дисперсії довжин дуг, як основний параметр, що характеризує вплив збурення на ППЕ. Тому доцільно скористатися методом статистичного аналізу даних. Для цього сформулюємо гіпотезу: дисперсії довжин дуг ДСП для експериментально отриманої вибірки даних і для вибірки даних, отриманих шляхом моделювання за допомогою розробленої моделі при імітації зовнішнього збурення у фазі С, є однаковими.

Перевірку гіпотези проведемо за допомогою М-критерію Барлетта. Значення критерію визначають за формулою [55, 56]

$$t = \frac{\ln 10}{c} \left[(N - k) \cdot \lg s^2 - \sum (n_i - 1) \cdot \lg s_i^2 \right]; \quad (3.3)$$

$$c = 1 + \frac{1}{3 \cdot (k-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right); \quad (3.4)$$

$$s^2 = \frac{1}{N - k} \cdot \sum (n_i - 1) \cdot s_i^2, \quad (3.5)$$

де $N = \sum_{i=1}^k n_i$ – загальна кількість даних;

$n, i = 1, 2, \dots;$

k – кількість вибірок;

s_i^2 – дисперсія i -ої вибірки,

$$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2.$$

При великих $n_i, i = 1, 2, \dots, k$, розподіл статистики цього критерію має асимптотичний c^2 -розподіл з кількістю степенів вільності, яке дорівнює $(k-1)$, а довірчий рівень визначається з функції χ^2 -розподілення [56, 57]. У нашому випадку аналізу піддавалася ділянка вибірки кількістю спостережень, яке дорівнює 51.

Для перевірки адекватності розробленої моделі використовуємо 12 вибірок даних. Це залежності зміни довжин дуг, отримані під час експерименту і за допомогою моделювання при імітації зовнішнього збурення у вигляді коливання гнучкого кабелю. У таблиці 3.2 наведені результати статистичного аналізу даних.

Як виходить з таблиці 3.2, отримані значення критеріїв для всіх дослідів менші, ніж значення критерію для 5 %-го рівня значущості. Це говорить про те, що висунута гіпотеза вірна. Отже, розроблена модель системи управління приводом переміщення електродів ДСП адекватно відображає процеси, що протікають у реальному об'єкті.

Таблиця 3.2 – Статистичний аналіз даних

Номер дослідів	Проведення експерименту	Кількість спостережень	Дисперсія вибірки	Значення М-критерію Барлетта
1	2	3	4	5
1	Модель	2250	34,3	3,334
	Експеримент	51	24,2	
2	Модель	2250	23,6	1,172
	Експеримент	51	19,1	

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
3	Модель	2250	45,5	2,692
	Експеримент	51	33,2	
4	Експеримент	2250	47,5	2,470
	Експеримент	51	35,1	
5	Модель	2250	18,8	2,850
	Експеримент	51	13,6	
6	Модель	2250	24,7	3,366
	Експеримент	51	17,4	
7	Модель	2250	55,5	3,523
	Експеримент	51	38,8	
8	Модель	2250	35,3	1,326
	Експеримент	51	28,2	
9	Модель	2250	42,7	3,027
	Експеримент	51	30,6	
10	Модель	2250	37,5	1,908
	Експеримент	51	28,7	
11	Модель	2250	29,1	2,473
	Експеримент	51	21,5	
12	Модель	2250	18,3	0,656
	Експеримент	51	15,6	
Допустиме значення критерію				3,840

3.5 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50

Експериментальні дослідження залежностей $\ell(t), I(t), U(t)$ проводяться на базі існуючої ІВС, структура якої наведена на рисунку 3.2.

3.5.1 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50 за каналами напруги

ІВС за каналами напруги у фазах А, В і С складається з перетворювальних елементів - первинних датчиків напруги Д1, аналогово-цифрових перетворювачів АЦП1, модемів М1, комунікатора К1, шини PROFIBUS, ПЛК регулятора горіння дуги, шини ETHERNET.

Клас точності первинного датчика напруги не перевищує 0,1, отже, його гранична похибка, розрядність АЦП залежать від рівня квантування і становить половину молодшого розряду, тому гранична похибка АЦП

$$\delta_{U_2} = \frac{1}{256} \cdot 0,5 \cdot 100\% \approx 0,2\%. \quad (3.6)$$

У модемі і комунікаторі використовується цифровий сигнал, тому похибка $\delta_{U_3} = \delta_{U_4} = 0\%$.

Шини PROFIBUS і ETHERNET – це цифрові системи, тому, якщо при передачі сигналу і є якась перешкода, то вона виправляється, тому похибки шин PROFIBUS і ETHERNET $\delta_{U_5} = \delta_{U_6} = 0\%$.

Похибка обчислень ПЛК регулятора горіння дуги $\delta_{U_7} = 0\%$.

Гранична похибка ІВС за каналом напруги для 1-ї фази дорівнює сумі граничних відносних помилок:

$$\delta_{U_8} = \sum_{i=1}^7 \delta_{U_i} = 0,1 + 0,2 = 0,3\%. \quad (3.7)$$

Структура передачі інформації від двох інших фаз аналогічна.

Гранична похибка ІВС вимірювального каналу напруги не перевищує 5 %.

3.5.2 Оцінювання похибки інформаційно-вимірювальної системи ДСП-50 за каналами струму

ІВС за каналами струму у фазах А, В і С складається з перетворювальних елементів - первинних датчиків струму Д2, аналогово-цифрових перетворювачів АЦП2, модемів М2, комунікатора К2, шини PROFIBUS, ПЛК регулятора горіння дуги, шини ETHERNET.

Клас точності первинного датчика струму не перевищує 0,1, отже, його гранична похибка $\delta_{I_1} = 0,1\%$.

Розрядність АЦП залежить від рівня квантування і становить половину молодшого розряду, тому гранична похибка АЦП

$$\delta_{I_2} = \frac{1}{256} \cdot 0,5 \cdot 100\% \approx 0,2\%. \quad (3.8)$$

У модемі і комунікаторі використовується цифровий сигнал, тому похибка $\delta_{I_3} = \delta_{I_4} = 0\%$.

Шини PROFIBUS і ETHERNET – це цифрові системи, тому, якщо при передачі сигналу і є якась перешкода, то вона виправляється, тому похибки шин PROFIBUS і ETHERNET $\delta_{I_5} = \delta_{I_6} = 0\%$.

Похибка обчислень ПЛК регулятора горіння дуги $\delta_{I_7} = 0\%$.

Гранична похибка ІВС за каналом струму для 1-ї фази дорівнює сумі граничних відносних помилок:

$$\delta_{I8} = \sum_{i=1}^7 \delta_{Ii} = 0,1 + 0,2 = 0,3\%. \quad (3.9)$$

Структура передачі інформації від двох інших фаз аналогічна.
 Гранична похибка ІВС вимірювального каналу струму не перевищує 5 %.
 Повна середня помилка ІВС дорівнює сумі граничних похибок ІВС за каналами струму і напруги:

$$\delta_{\dot{E}\dot{E}\dot{N}} = \delta_U + \delta_I = 0,3 + 0,3 = 0,6 \%. \quad (3.10)$$

Повна середня помилка ІВС не перевищує 5 %.

3.5.3 Оцінювання середньоквадратичної похибки інформаційно-вимірювальної системи

Виникнення граничної сумарної помилки малоімовірно. Через те, що робота ІВС здійснюється безперервно і тривалий час, можна вважати, що розподіл ймовірностей похибок підпорядкований нормальному закону розподілу випадкових величин, а похибка ІВС за каналом напруги і за каналом струму може бути оцінена з урахуванням правила «Трьох сигм» середньоквадратичної похибкою:

$$\begin{aligned} \delta_{cpU} &= \sqrt{\left(\frac{1}{3}\delta_{U1}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U2}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U4}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U5}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U6}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{U7}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{3}\cdot 0,1\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\cdot 0,2\right)^2} = \sqrt{0,001 + 0,004} = 0,074\%; \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \delta_{cpI} &= \sqrt{\left(\frac{1}{3}\delta_{I1}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I2}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I4}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I5}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I6}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\delta_{I7}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{3}\cdot 0,1\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\cdot 0,2\right)^2} = \sqrt{0,001 + 0,004} = 0,074\%. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Середньоквадратична похибка ІВС не перевищує 5 %.

3.6 Оцінювання методичної похибки визначення довжини дуги

У ІВС ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» розрахунок довжина дугового проміжку розраховується за формулою [5]

$$\ell_{\dot{a}} = \left(\sqrt{U_{\dot{o}}^2 - (I_{\dot{o}} \cdot \tilde{\delta}_{\dot{o}})^2} - I_{\dot{o}} \cdot r_{\dot{o}} - \alpha \right) / \beta, \quad (3.13)$$

де $\ell_{\dot{a}}$ – довжина дуги;

$U_{\dot{o}}$ – напруга фази;

$I_{\dot{o}}$ – струм фази;

$r_{\dot{o}}, \tilde{\delta}_{\dot{o}}$ – фазні активний і реактивний опори;

α – сума анодного і катодного падіння напруги;

β – градієнт напруги в стовпі.

Щоб знайти методичну похибку визначення довжини дуги ІВС, необхідно в формулу (3.21) підставити знайдені раніше граничні похибки ІВС за каналами напруги, струму, а також граничні похибки обчислення фазних опорів.

Граничні похибки обчислення фазних активного і реактивного опорів $\delta_x = \delta_r = 0,2\%$, де δ_x, δ_r – граничні похибки обчислення фазних активного і реактивного опорів.

Оскільки значення суми анодного і катодного падіння напруги та градієнта напруги в стовпі дуги задаються в ІВС як вихідні дані, то їх похибки дорівнюють нулю.

Тоді методична похибка визначення довжини дуги однієї фази дорівнюватиме:

$$\delta_{\ell} = \sqrt{\delta_U^2 - (\delta_I \cdot \delta_x)^2} - \delta_I \cdot \delta_r = \sqrt{0,3^2 - (0,3 \cdot 0,2)^2} - 0,3 \cdot 0,2 = 0,23\%, \quad (3.14)$$

де $\delta_{\ell}, \delta_U, \delta_I, \delta_x, \delta_r$ – відповідно, похибки довжини дуги, напруги фази, фазного струму, реактивного і активного опорів фази.

Методична похибка визначення довжини дуги не перевищує 5 %.

Експериментальні дослідження СУ ППЕ ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» і аналізування процесів зміни струмів, напруг і довжин дуг, отриманих експериментальним шляхом при штучному зовнішньому механічному збуренні ДСП-50 виявили, що інтервали частот і тривалість коливальних процесів електричних параметрів короткої мережі ДСП збігаються з інтервалами власних частот і тривалістю коливань гнучких кабелів.

Порівняльною оцінкою параметрів перехідних процесів реальної електромеханічної системи приводом переміщення електродів ДСП-50 і моделі при коливаннях гнучких кабелів встановлена адекватність розробленої моделі ЕМСУ ППЕ ДСП. Були підтверджені результати досліджень, наведених у розділі 2, тобто вплив коливань гнучких кабелів на електричні параметри короткої мережі ДСП і регулятори переміщення електродів, що надає змоги розробити спосіб компенсації електромеханічних коливань гнучких кабелів ЕМСУ ППЕ ДСП. Статистичний аналіз даних за допомогою М-критерію Барлетта також підтвердив адекватність розробленої моделі системи управління приводом переміщення електродів ДСП фізичному реальному об'єкту. Гранична похибка ІВС ДСП-50 не перевищує 5 %.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДСП

У якості методу оптимізації електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП доцільно використовувати метод мінімізації дисперсії довжини дуги з метою її стабілізації, як було обгрунтовано в розділі 1.

Цей метод найбільш точно враховує зміну основного контрольованого параметра і надає змоги оцінити збурюючий вплив – дисперсію довжини дуги. Дисперсія такої режимної координати значною мірою впливає на втрати в короткій мережі, а це, у свою чергу, призводить до впливу дисперсії на техніко-економічні показники роботи ДСП, такі як: питомі витрати електроенергії, тривалість плавки, продуктивність печі, собівартість однієї тонни сталі.

Таким чином, для забезпечення стабілізації довжини дуги необхідно мінімізувати її дисперсію. Між зміною довжини дуги і електромеханічними коливаннями гнучких кабелів існує взаємозв'язок, який виявлено в розділах 2 і 3.

Вихідною контрольованою координатою є довжина дуги. Впливи, пов'язані з коливаннями гнучких струмопроводів, призводять до модуляцій електричних параметрів короткої мережі, які відпрацьовуються регуляторами переміщення електродів. Таким чином, сигнали з виходів регуляторів також коливаються і передаються на привід переміщення електродів, у зв'язку з чим довжини дуг починають також коливатися, оскільки довжини дуг змінюються пропорційно зміні сигналів управління з виходів регуляторів.

На рисунку 2.1 видно, що зміна довжини дуги відбувається при перетворенні сигналу неузгодженості, отже і зміна дисперсії сигналу неузгодженості призводить до зміни дисперсії довжини дуги.

Таким чином, оптимізація ЕМ СУ ППЕ ДСП з мінімізації дисперсії довжини дуги зводиться до мінімізації дисперсії сигналу неузгодженості з виходу блоку поділу фазної напруги на струм дуги, що в цій роботі пропонується здійснити фаззі-корекцію сигналу неузгодженості.

4.1 Розроблення методу компенсації електромеханічних збурень у системі управління приводом переміщення електродів ДСП на основі паралельної фаззі-корекції

Згідно з результатами теоретичних і експериментальних досліджень складено алгоритм роботи удосконаленої системи управління приводом переміщення електрода ДСП для однієї фази, який подано на рисунку 4.1 [58].

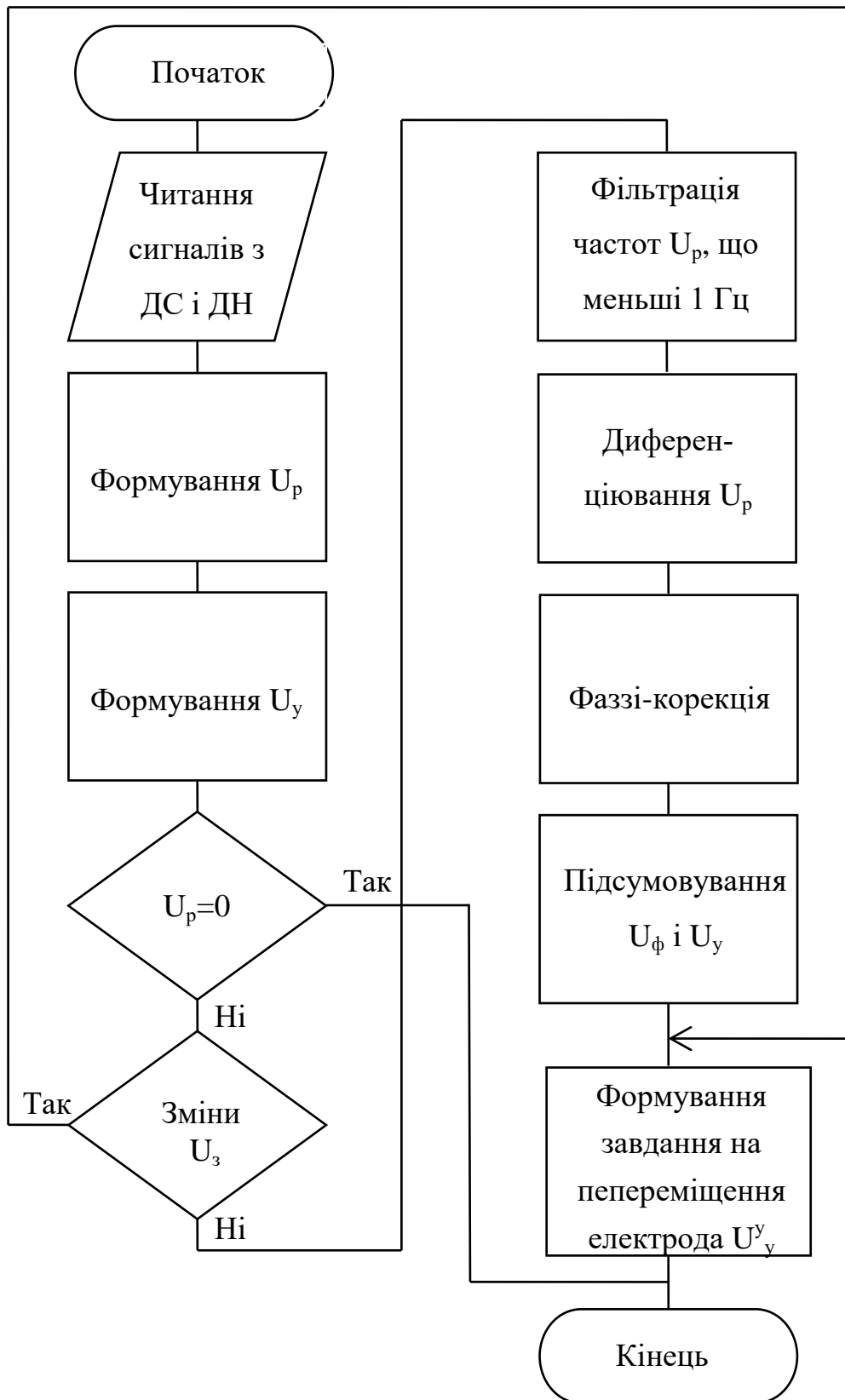


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи удосконаленої системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Спочатку відбувається зчитування сигналів з датчика струму (ДС) і датчика напруги (ДН). Далі відбувається формування сигналу неузгодженості (помилки) U_p відповідно до того, який використовується регулятор переміщення електрода (у ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» встановлений імпедансний регулятор, який контролює сигнал, пропорційний опорі фази при розподілі напруги фази на ток дуги). Далі відбувається формування сигналу управління U_u відповідно до того, який використовується регулятор (П, ПІ, ПІД), і перевірка наявності коливань сигналу неузгодженості з двох умов. По-перше, з умови, що сигнал неузгодженості (помилки) дорівнює нулю. Якщо сигнал помилки не дорівнює нулю, значить, коливання є, і, по-друге, з умови наявності зміни завдання опорі фази. Якщо зміни завдання не було, значить, коливання сигналу неузгодженості мають іншу природу. Далі за допомогою фільтра фільтруються низькі частоти нижче 1 Гц.

Таким чином, за наявності коливань сигналу неузгодженості, відбувається диференціювання даного сигналу з метою прогнозування і фаззі-корекція, тобто формування сигналу U_f у протифазі сигналу неузгодженості U_p . Далі відбувається підсумовування сигналу U_f з сигналом управління U_u з метою компенсації помилки, після чого відбувається видача завдання на переміщення електрода фази U_{uu} [58-60].

Таким чином, на привід переміщення електрода надходить сигнал без помилки і без коливань, що призводить до стабілізації дуг при дії зовнішніх збурень. Для двох інших фаз алгоритм аналогічний.

Під час вивчення робіт, присвячених проблемам, суміжним з проблемою, що досліджується в даній роботі, було з'ясовано, що до сих пір не був розроблений спосіб компенсації електромеханічних коливань гнучких кабелів.

Отримані в розділі 2 графіки зміни електричних параметрів силового ланцюга при коливаннях гнучких кабелів під час моделювання і експерименту показали, що регулятори переміщення електродів реагують на дані збурення, що в підсумку призводить до поздовжніх коливань електродів, коливань довжин дуг, збільшення часу плавки, енергоспоживання і, як наслідок, до зниження продуктивності печі.

У даній роботі для виключення наслідків досліджуваних збурюючих впливів пропонується використовувати метод, заснований на застосуванні нечіткого управління – фаззі-корекції [61-63].

Його використання дозволить зберегти всі колишні функції існуючого регулятора і забезпечити миттєву реакцію на зовнішні впливи, пов'язані з коливаннями гнучких струмопроводів, оскільки він має функцію прогнозування.

Завданням нечіткого регулятора є поліпшення показників роботи ДСП шляхом зниження дисперсії довжин дуг.

Відповідно до алгоритму (рис. 4.1) розроблений спосіб компенсації електромеханічних коливань гнучких кабелів (рис. 4.2) [58-60].

На рисунку 4.2 були прийняті такі позначення: ПТ – пічний трансформатор; ЖШ – жорстка шина; ГК – гнучкий кабель; РШ – рухома шина; ЕД – електродотримачі; Е – електрод; Д – дуга; Ш – шихта; ДТ – датчик струму дуги; ДН – датчик напруги фази; РПЕ – регулятор переміщення електрода (П, Ш або ПД); ФР – фаззі-регулятор; ЗО – задатчик опору; ППЕ – привід переміщення електродів; А, В, С – фази А, В, С; U_U – сигнал з датчика напруги фази; U_I – сигнал з датчика струму дуги; U_Z – сигнал, пропорційний повного опору дуги; U_p – сигнал неузгодженості; U'_p – похідна сигналу неузгодженості; U_ϕ – сигнал на виході фаззі-регулятора; U_y – сигнал управління; U_y^y – сигнал управління в удосконаленій системі.

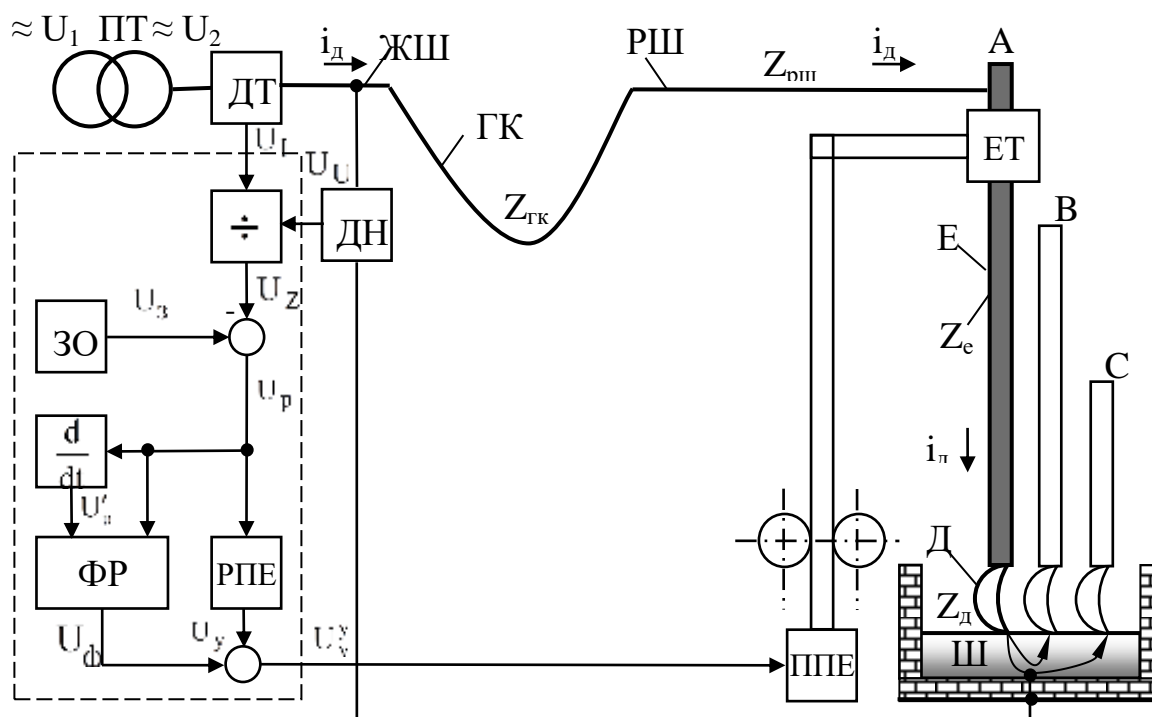


Рисунок 4.2 – Структурна схема удосконаленої СУ ППЕ ДСП для однієї фази

Спосіб реалізується наступним чином [59, 60]. Живлення дугової сталеплавильної печі здійснюється від пічного трансформатора ПТ (показаний силовий ланцюг фази А). Під час роботи печі під дією вторинної напруги U_2 трансформатора ПТ по жорсткій шині ЖШ, гнучкому кабелю ГК, рухомій шині РШ, електродотримачу ЕТ, електроду Е, дузі Д, шихті Ш до дуг електродів фаз В і С тече струм I_d дуги фази А. На перший вхід блоку визначення повного опору дуги надходить сигнал від цифрового датчика ДС струму дуги, на другий вхід блоку поділу надходить сигнал від цифрового датчика ДН напруги дуги. У блоці поділу виконується операція визначення повного опору дуги.

На підсумовуючому вході регулятора переміщення електрода повний опір дуги, певне в блоці поділу, порівнюється із заданим за технологією задатчиком опору $Z_{д.з.}$ сигнал неузгодженості $\pm \Delta Z_{\partial} = Z_{\partial.з.} - Z_{\partial}$, пропорційний довжині дуги впливає на привід переміщення ППЕ так, що б електрод Е переміщався вертикально вгору або вниз. При $Z_{\partial} > Z_{\partial.з.}$ привід ППЕ переміщує електрод вниз, а при $Z_{\partial} < Z_{\partial.з.}$ – догори. При виконанні умови $\Delta Z_{д} = 0$, що відповідає оптимальному горінню дуги, переміщення електродів немає.

Паралельно регулятору переміщення електрода повного опору дуги підключений фаззі-регулятор ФР, на перший вхід якого подається сигнал неузгодженості $\pm \Delta Z_{д}$, а на другий його вхід – через диференціатор похідна цього сигналу. Унаслідок збурення в сигналі управління похибка компенсується.

Використання фаззі-регулятора дозволяє зберегти всі колишні функції існуючого регулятора і здійснювати миттєву реакцію на зовнішні впливи, пов'язані з коливаннями гнучких струмопроводів, оскільки він має функцію прогнозування.

4.2 Синтез фаззі-регулятора для управління приводом переміщення електродів ДСП

Фаззі-логіка – це логіка нечітких множин [61-63]. Нечітка логіка є багатозначною логікою, що дозволяє визначити проміжні значення для таких загальноприйнятих оцінок, як так / ні, істинно / хибно і т. п [62]. Як правило, для ідентифікації фаззі-множин, наприклад А, використовують так звану функцію приналежності $\mu_A(n_i)$ [61-63]. Функції приналежності можуть набувати різноманітних форм: лінійної, трикутної, трапецієподібної, прямокутної, – функцію Гаусса, Синглетон-функцію [61-63].

Якщо позначити нечітку множину «задовольняють систему параметрів» А, то характеристична функція даної множини буде позначатися μ_A . Тоді математично нечітка множина А запишеться:

$$A = \{[\mu_A(n_1)] \dots [\mu_A(n_n)]\}, \quad (4.1)$$

де n – величина, що належить до нечіткої множини А.

Це означає, що величини n_i належать до нечіткої множини А зі ступенем приналежності $\mu_A(n_i)$.

Таким чином, нечітка множина – це множина, елементи якої належать до неї з різним ступенем – від 0 до 1 [15, 16, 61-63].

Завдання управління електрогідроприводом переміщення електродів складається з підтримки необхідної довжини дуги.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження надали змоги отримати вихідну інформацію, необхідну для синтезу ФР.

Для того щоб стабілізувати довжину дуги, необхідно стабілізувати сигнал неузгодженості, що надходить на наявний регулятор переміщення електрода і на привід переміщення електрода. Отже, в якості вхідних сигналів для фаззі-регулятора доцільно використовувати сигнал неузгодженості і швидкість зміни цього сигналу з метою прогнозування. Фаззі-корекція сигналів за похідною помилки регулювання надає змоги автоматично коригувати зони нечутливості в аварійних режимах (обривах дуг і к. з.), Отже, підвищити швидкодію системи управління [60]. Для того щоб не заважати основному процесу роботи наявних регуляторів переміщення електродів, що розробляються, фаззі-регулятори будемо підключати паралельно наявним регуляторам. Оскільки настроювання фаззі-регуляторів трьох фаз здійснюється однаково, то далі настроювання фаззі-регулятора наводиться для однієї фази. При цьому ФР необхідно налаштувати таким чином, щоб за наявності в силовому ланцюзі збурення, тобто при коливаннях сигналу помилки регулювання, на виході ФР формувався сигнал в протифазі даним сигналу. Далі сигнали з виходів наявного регулятора і ФР будуть підсумовуватися, що призведе до компенсації помилки збурення і на привід переміщення електрода помилка надходити не буде, отже, і задана довжина дуги буде стабілізована.

Структура системи управління приводом переміщення електрода з фаззі-контролером методом паралельної корекції наведена на рисунку 4.3.

Таким чином, вдосконалена система управління повинна контролювати сигнали помилок регулювання (сигнали неузгодженості) і похідні даних сигналів, що використовуються для прогнозування, і за їх співвідношенням видавати сигнал управління на установку відповідного знака та значення.

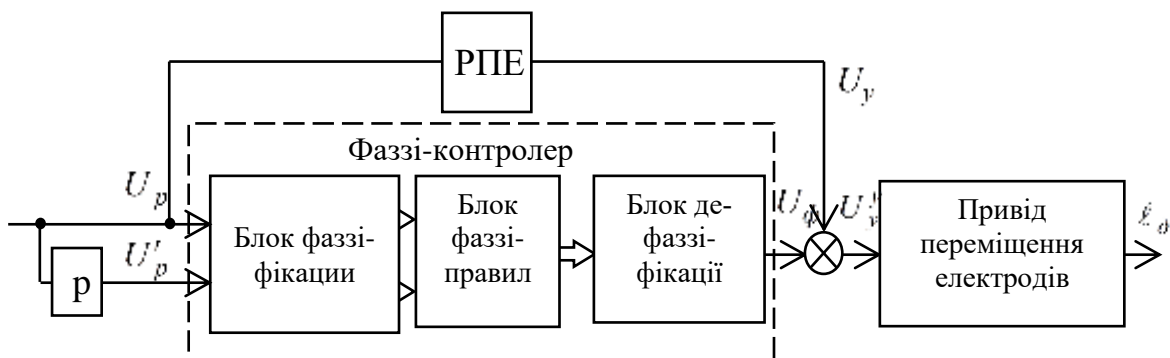


Рисунок 4.3 – Структура системи управління приводом переміщення електрода з паралельною фаззі-корекцією

Контролери нечіткої логіки – найбільш важливий практичний додаток теорії нечітких множин. Їх функціонування відрізняється від роботи звичайних контролерів [61].

Для створення алгоритму управління ФР замість вирішення диференціальних рівнянь використовуються знання експертів і логічні правила оброблення вхідних сигналів, поданих нечіткими множинами [61-63].

Знання експертів можуть бути виражені природним чином обґрунтування і вибору лінгвістичних змінних, інтервалів варіювання, розроблення фаззі-правил. Це важливий етап при синтезі фаззі-регулятора [61-63].

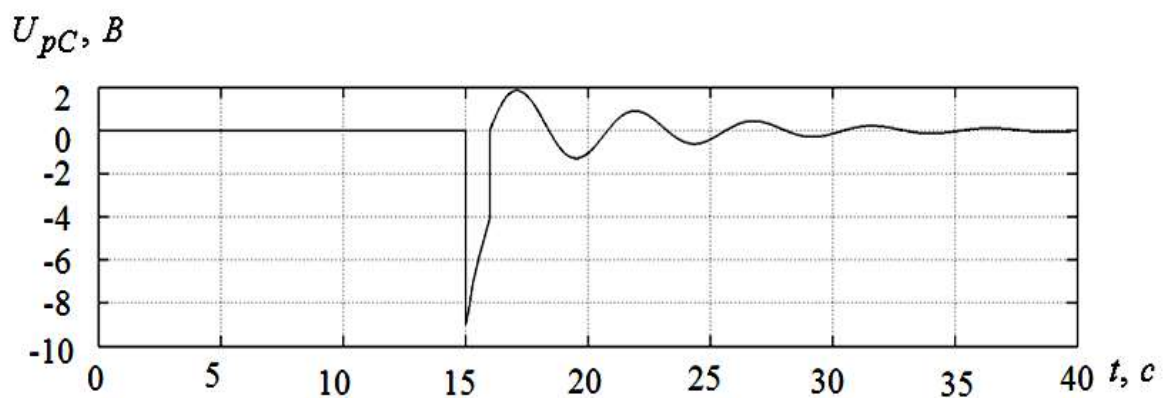
Процес фаззіфікації заснований на створенні і ідентифікації нечітких множин в інтервалах варіювання вхідних і вихідних змінних ФР. Для цього діапазони зміни вхідних і вихідних змінних поділяються на кілька піддіапазонів, які є нечіткими множинами [61-63] в області:

- 1) нуля;
- 2) малих позитивних і негативних змін;
- 3) великих позитивних і негативних змін і т. д.

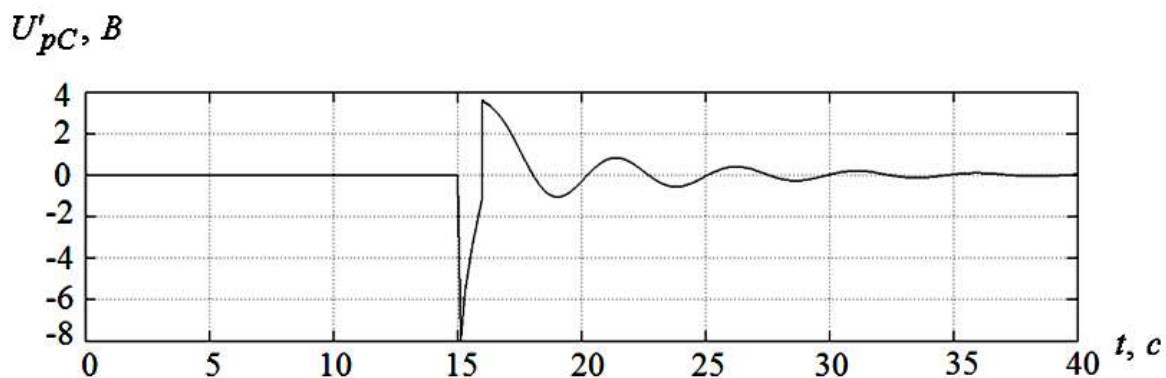
Сусідні множини повинні перетинатися.

Під час роботи системи управління приводом переміщення електродів при короткому замиканні на виході регуляторів формуються сигнали, які подаються на пропорційні електромагніти гідророзподільників. Однак при дії розглянутих збурень, пов'язаних з коливаннями гнучких кабелів, при глибині модуляції 15...20 %, що визначено в розділі 2, на виході регуляторів утворюються сигнали, тому інтервали варіювання вхідного сигналу неузгодженості будуть перебувати в межах [-10; 10] В, а інтервали вихідної змінної фаззі-регулятора будуть перебувати в межах [-2; 2] В, оскільки фаззі-регулятор буде включатися тільки на час наслідків коротких замикань, а не на самі короткі замикання, тобто на зміни сигналів неузгодженості в інтервалах [-2; 2] В. Використання паралельної фаззі-корекції дозволяє відокремити роботу імпедансного регулятора під час аварійних режимів (коротких замикань, обривів дуг), тобто при сигналі неузгодженості понад 2 В і менше -2 В, щоб вчасно забезпечити підйом електрода з шихти, від роботи ФР в разі, якщо коливання струмів викликані саме низькочастотними коливаннями ГК. Тому фаззі-регулятор, встановлений паралельно з наявним регулятором переміщення електрода, не заважає роботі основного регулятора і вносить в систему управління нову функцію компенсації електромеханічних зовнішніх збурень. «Ігнорування» фаззі-регулятором короткого замикання буде здійснено шляхом програмування фаззі-правил, що буде описано далі.

Було проведено ряд експериментів на розробленій в розділі 2 моделі при імітації коротких замикань і коливань гнучких кабелів. На рисунках 4.4, 4.5 наведені графіки сигналів неузгодженості і їх похідних при імітації короткого замикання у фазі С тривалістю 1 с і при імітації коливання гнучкого кабелю фази С для фази С. Для двох інших фаз графіки мають подібний вигляд. Вони являють собою графічні залежності між змінами взаємних індуктивностей фаз гнучких кабелів і сигналами з виходів імпедансних регуляторів при електромеханічних коливаннях гнучких кабелів. За даними рисунків 4.4, 4.5 визначаються інтервали варіювання похідних сигналів неузгодженості $[-8; 8]$ В, з яких інтервал $[-4; 4]$ В відповідає коливанням гнучкого струмопроводу.



a)

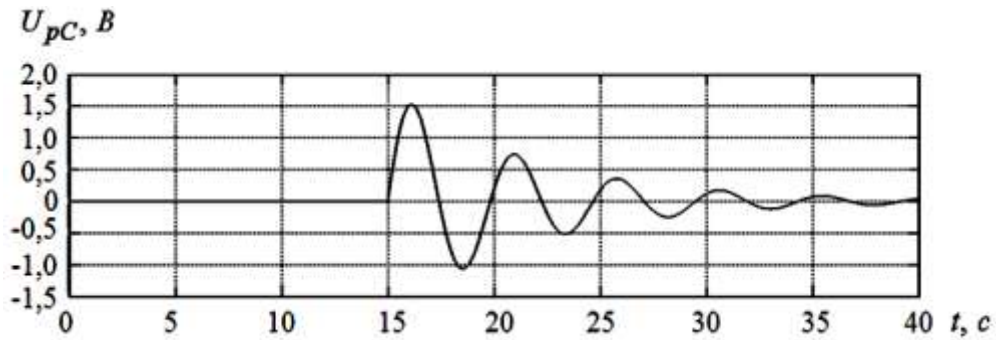


б)

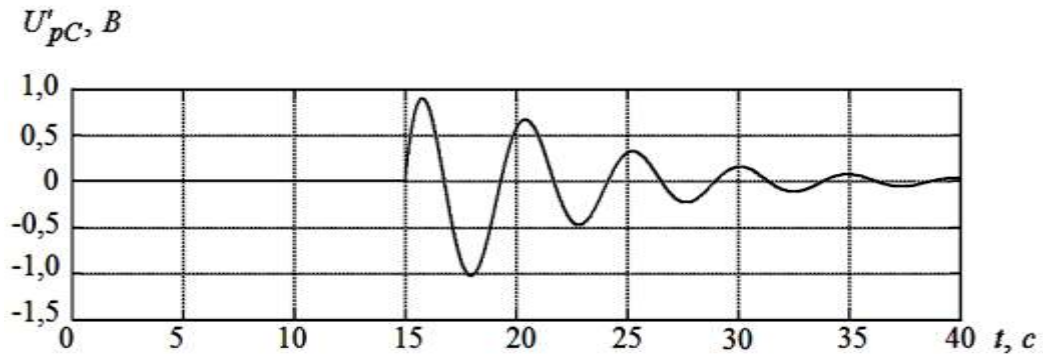
a – сигналів неузгодженості фази С;

б – похідних сигналів неузгодженості фази С

Рисунок 4.4 – Графіки при імітації короткого замикання у фазі С



a)



б)

a – сигналів неузгодженості фази C;

б – похідних сигналів неузгодженості фази C

Рисунок 4.5 – Графіки при імітації колювання гнучкого кабелю фази C

З отриманого розподілу рівнів сигналів неузгодженості можна висновити, що сигнали неузгодженості і, відповідно, і вихідні сигнали фаззі-регулятора, що наближаються до значень $[-2; 2]$ В, можна вважати областями великих відхилень, їм будуть відповідати лінгвістичні змінні U_{pb}, U_{fb} і $-U_{pb}, -U_{fb}$. Значення сигналу неузгодженості і вихідного сигналу ФР, яке дорівнює 0, характеризує нормальний режим роботи без збурень, тому цій галузі відповідає лінгвістична змінна «нормальна» U_{p0}, U_{f0} . Сформовано також області малих відхилень, які є проміжними. Їм відповідають лінгвістичні змінні, відповідно, U_{pt}, U_{ft} і $-U_{pt}, -U_{ft}$. Під час короткого замикання відбувається стрибок сигналу неузгодженості в інтервалах $[-10; -2] \vee [2; 10]$, яким будуть відповідати лінгвістичні змінні U_{pk} і $-U_{pk}$.

Похідна сигналу неузгодженості подається на другий вхід фаззі-регулятора. Аналогічно описаному вище алгоритму для похідної сигналу неузгодженості формуються лінгвістичні змінні: в області коротких

замикань U'_{pk} , $-U'_{pk}$; в області великих відхилень U'_{pb} , і $-U'_{pb}$; в області малих відхилень U'_{pm} , $-U'_{pm}$ і в області 0 U'_{p0} .

Таким чином, вхідні сигнали були поділені на 7 лінгвістичних змінних, а вихідні – на 5.

Для моделювання фаззи-блоків у даній роботі застосовувалася система інференції Мамдані (Mamdani's fuzzy inference method) – фаззи-блоки [61-63]. При програмуванні фаззи-регуляторів використовувалися: редактор фаззи-блоків FIS Editor, редактор правил Rule Editor і редактор функцій належності Membership Function Editor. Ці засоби служать для встановлення вхідних і вихідних змінних фаззи-блоку, їх функцій приналежності і фаззи-правил.

При виборі функцій приналежності необхідно спиратися на форми сигналів вибраних вхідних змінних [62]. З графіків сигналів неузгодженості і їх похідних при коливаннях видно, що вони мають форму, близьку до синусоїдальної. Тому найбільш підходящими функціями належності є функція Гаусса, сигма-функція і сплайнова крива.

На рисунках 4.6...4.8 наведені лінгвістичні змінні і сформовані функції належності вхідних і вихідних сигналів фаззи-регулятора.

Логічно оброблювалася інформація у ФР за спеціальними лінгвістичними правилами, що встановлюються програмістом ФР на основі логічних міркувань [61-63].

Наприклад, збурень у системі немає, отже, і сигнал з виходу наявного регулятора дорівнює нулю. Очевидно, що це бажаний стан, тобто нічого робити не треба (сигнал з виходу фаззи-регулятора дорівнює 0).

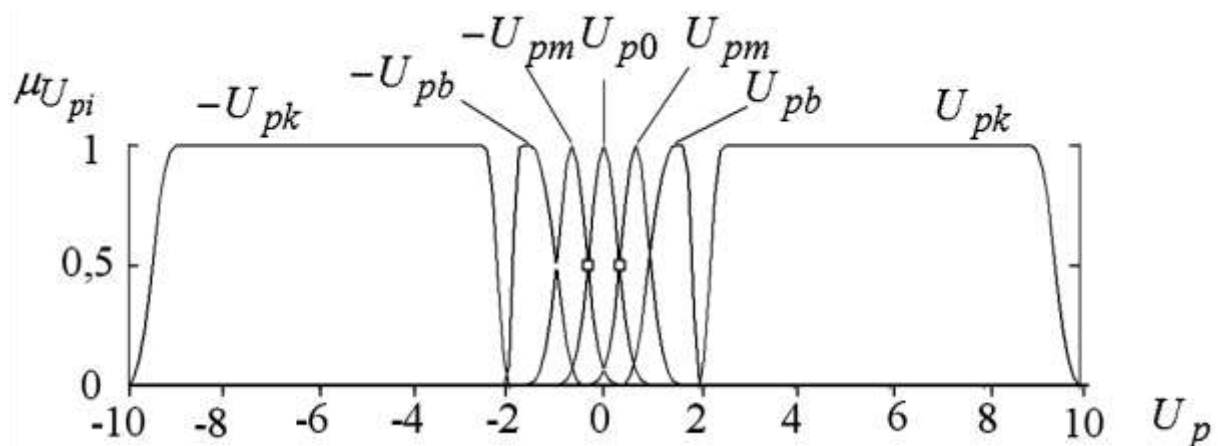


Рисунок 4.6 – Лінгвістичні змінні і функції приналежності вхідного сигналу фаззи-регулятора за неузгодженістю для однієї фази

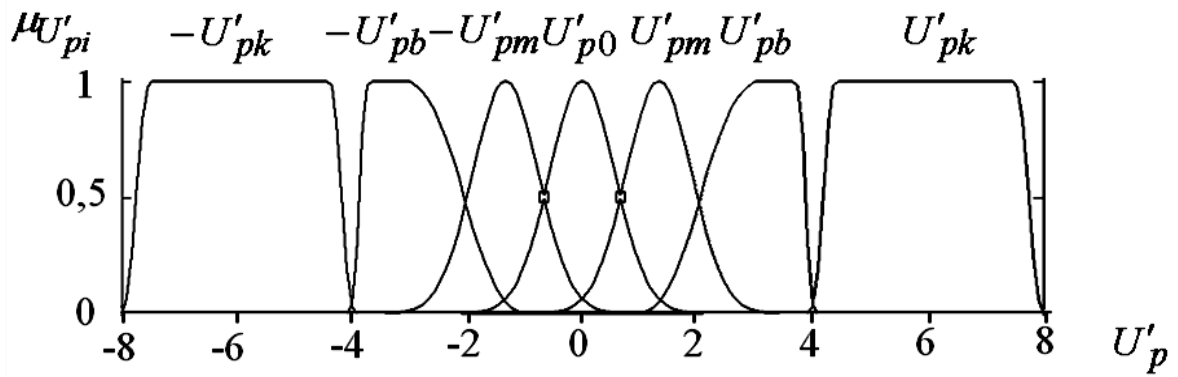


Рисунок 4.7 – Лінгвістичні змінні і функції приналежності вхідного сигналу фаззі-регулятора за похідною неузгодженості для однієї фази

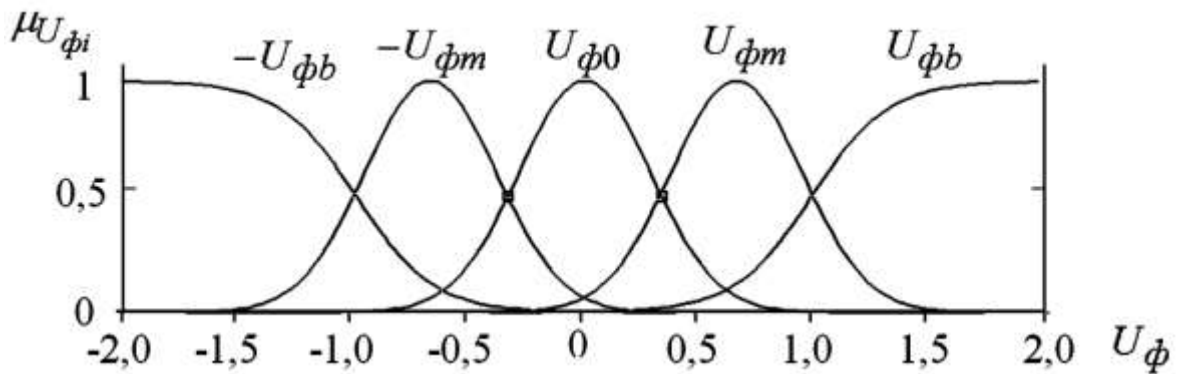


Рисунок 4.8 – Лінгвістичні змінні і функції приналежності вихідного сигналу фаззі-регулятора

Розглянемо другий випадок: через експлуатаційне коротке замикання в системі з'явилися коливання, пов'язані з коливаннями гнучких кабелів, і сигнал неузгодженості і похідна цього сигналу, наприклад, позитивні. Значить, необхідно, щоб на виході фаззі-регулятора організувався негативний сигнал, який дорівнює за амплітудою і частотою сигналу неузгодженості для того, щоб сигнал помилки компенсувався, і на привід переміщення електродів помилка не надходила.

Розглянемо третій випадок: у системі з'явилися коливання, пов'язані з коливаннями гнучких кабелів, і сигнал неузгодженості і похідна цього сигналу набули негативних значень. Значить, необхідно, щоб на виході фаззі-регулятора організувався позитивний сигнал, який дорівнює за амплітудою і частотою сигналу неузгодженості для того, щоб сигнал помилки компенсувався, і на привід переміщення електродів помилка не надходила.

Також необхідно передбачити «ігнорування» фаззі-регулятором короткого замикання, тобто щоб під час дії короткого замикання фаззі-регулятор не включався, а працював основний регулятор на переміщення електрода. Для цього інтервали варіювання вхідних змінних були поділені на піддіапазони в області коротких замикань U_{pk} , $-U_{pk}$, U'_{pk} і $-U'_{pk}$. При цьому, якщо хоча б одна вхідна змінна входить до цієї області, то на виході фаззі-регулятора необхідно організувати сигнал 0, щоб працював тільки основний регулятор переміщення електрода.

Отримуємо п'ять правил:

1. Якщо сигнал неузгодженості дорівнює нулю і похідна сигналу неузгодженості дорівнюють нулю, то значення на виході фаззі-регулятора має дорівнювати нулю.

2. Якщо зміна сигналу неузгодженості позитивна і похідна сигналу неузгодженості позитивна, то значення на виході фаззі-регулятора має бути малим негативним.

3. Якщо зміна сигналу неузгодженості негативна і похідна сигналу неузгодженості негативна, то значення на виході фаззі-регулятора має бути позитивним.

4. Якщо зміна сигналу неузгодженості входить до області коротких замикань і похідна сигналу неузгодженості – величина з будь-якого піддіапазону, то значення на виході фаззі-регулятора має дорівнювати нулю.

5. Якщо зміна похідною сигналу неузгодженості входить до області коротких замикань і сигнал неузгодженості – величина з будь-якого піддіапазону, то значення на виході фаззі-регулятора має дорівнювати нулю.

Аналогічно встановлюються інші правила, відповідні всіляким збігам вхідних фаззі-можин (табл. 4.1). Кількість фаззі-правил визначається кількістю розбиття діапазонів варіювання. Кількість цих правил – 49.

Таблиця 4.1 – Фаззі-правила регулятора

$U'_p \backslash U_p$	$-U_{pk}$	$-U_{pb}$	$-U_{pt}$	U_{p0}	$+U_{pt}$	$+U_{pb}$	$+U_{pk}$
$+U'_{pk}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$
$+U'_{pb}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$-U_{\phi b}$	$-U_{\phi b}$	$-U_{\phi b}$	$U_{\phi 0}$
$+U'_{pt}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$-U_{\phi t}$	$-U_{\phi t}$	$-U_{\phi b}$	$U_{\phi 0}$
U'_{p0}	$U_{\phi 0}$	$+U_{\phi b}$	$+U_{\phi t}$	$U_{\phi 0}$	$-U_{\phi t}$	$-U_{\phi b}$	$U_{\phi 0}$
$-U'_{pt}$	$U_{\phi 0}$	$+U_{\phi b}$	$+U_{\phi t}$	$+U_{\phi t}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$
$-U'_{pb}$	$U_{\phi 0}$	$+U_{\phi b}$	$+U_{\phi b}$	$+U_{\phi b}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$
$-U'_{pk}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$

Завданням створення алгоритму роботи ФР за фаззі-правилами є перетворення якісного експертного знання на закон регулювання, який може бути реалізований технічно [61-63].

Вхідними даними для цього процесу є фаззі-правила і ступені приналежності, за якими встановлюється певне логічне висловлювання. На основі результатів фаззіфікації і фаззі-правил у блоці фаззі-правил відбувається формування вихідної фаззі-безлічі [61-63].

Процес оброблення нечіткої інформації в блоці фаззі-правил можна умовно поділити на три етапи [61]:

- 1) агрегацію;
- 2) імплікації;
- 3) акумуляцію.

У процесі агрегації вибираються різні елементарні висловлювання, які належать до одного фаззі-правила, і визначається ступінь приналежності до нього.

Кожна умовна частина правила складається з декількох елементарних висловлювань, які за допомогою логічних зв'язків зводяться до єдиного комплексного виразу.

Операторами агрегації можуть бути будь-які оператори, але в техніці регулювання використовується, як правило, лише І-оператор. Він у загальному вигляді може бути реалізований за критерієм мінімуму:

$$E_i(x) = \min\{E_{1,i}(x_1), \dots, E_{m,i}(x_m)\} = \min E_{k,i}(x_k), \quad (4.2)$$

де $E_{k,i}$ – елементарні вирази (фаззі-безлічі), $k \in 1..m$.

У процесі імплікації для кожного активного фаззі-правила залежно від значення ступеня приналежності визначаються фаззі-безлічі $U_{\phi k}$.

Для здійснення імплікації використовуються оператори композиції. Часто в якості оператора імплікації в техніці регулювання використовується І-оператор Мамдані [62].

Останнім етапом процесу оброблення нечіткої інформації в блоці фаззі-правил є акумуляція.

Завданням акумуляції є об'єднання результатів імплікації.

Результатом акумуляції є фаззі-безліч $U_{\phi \Sigma}$, яка формується шляхом об'єднання окремих фаззі-множин: $U_{\phi 0}, -U_{\phi m}, +U_{\phi m}$.

Функція приналежності результуючої фаззі-безлічі виходить за допомогою оператора акумуляції Akk :

$$\mu_{U_{\phi}}(U_{\phi}) = Akk\{U_{\phi 0}(U_{\phi}), -U_{\phi m}(U_{\phi}), +U_{\phi m}(U_{\phi})\}, \quad (4.3)$$

де $Akk \in 1..n$.

Акумулярована фаззі-множина $U_{\phi\Sigma}$ являє собою остаточний результат процесу оброблення інформації в блоці фаззі-правил. Таким чином, результатом оброблення нечітких множин сигналів неузгодженості і їх похідних за правилами експерта є нечітка множина на виході фаззі-регулятора $U_{\phi\Sigma}$. Акумулярована фаззі-множина $U_{\phi\Sigma}$ не може бути використана для управління, тому необхідно перетворити її на однозначний сигнал керування. Це перетворення виконується в блоці дефаззіфікації. Існує велика кількість методів дефаззіфікації, метою яких є визначення такої однозначної величини, яка б якомога точніше представила закумуляовану фаззі-безліч. Найбільш поширений гравітаційний метод, який заснований на визначенні центра ваги площі функції приналежності.

Центруюче значення сигналу з виходу фаззі-регулятора для реальних значень U_{p1} та U'_{p1} визначиться в блоці дефаззіфікації за алгоритмом:

$$U_{\phi 1} = \frac{\int U_{\phi} \cdot \mu(U_{\phi}) dU_{\phi}}{\mu(U_{\phi}) dU_{\phi}}. \quad (4.4)$$

У таблиці 4.2 зведемо основні параметри розробленого фаззі-регулятора.

Таблиця 4.2 – Параметри фаззі-регулятора

Тип фаззі-блоків	Інтервали варіювання			Кількість лінгвістичних змінних			Тип функції приналежності			Кількість фаззі-правил
	U_p	U'_p	U_{ϕ}	U_p	U'_p	U_{ϕ}	U_p	U'_p	U_{ϕ}	
Мамдані	[-10;10]	[-8;8]	[-2;2]	7	7	5	Функції Гауса, сигма-функції, сплайнова крива			49

4.3 Розроблення моделі та дослідження удосконаленої системи управління приводом переміщення електродів ДСП

Розроблення моделей фаззі-регуляторів здійснюється за допомогою програмного пакету MatLab Simulink. Далі проводиться їх інтегрування в розроблену в розділі 2 модель ЕМСУ ППЕ ДСП.

Діагностика розробленого фаззі-блока здійснювалася за допомогою переглядача тривимірної функції (Surface Viewer) [15, 16, 61-63], який надає змоги уявити залежність вихідної змінної від вхідних у вигляді тривимірного графіка. Він поданий на рисунку 4.9.

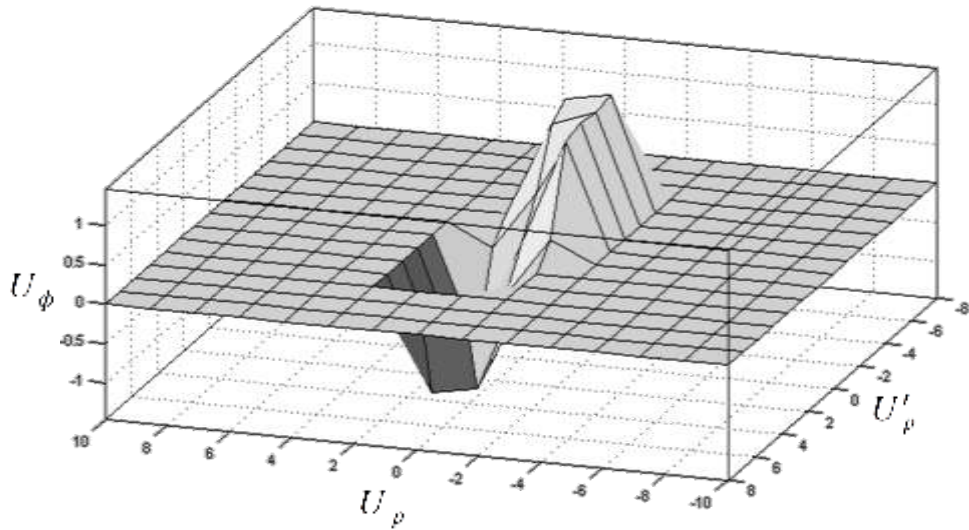


Рисунок 4.9 – Тривимірний графік, що передає функції фаззі-блоку

Структурна схема удосконаленої СУ ППЕ ДСП для однієї фази в MATLAB Simulink подана на рисунку 4.10. До моделі електромеханічної СУ ППЕ ДСП було підключено 3 фаззі-регулятори паралельно основним регуляторам.

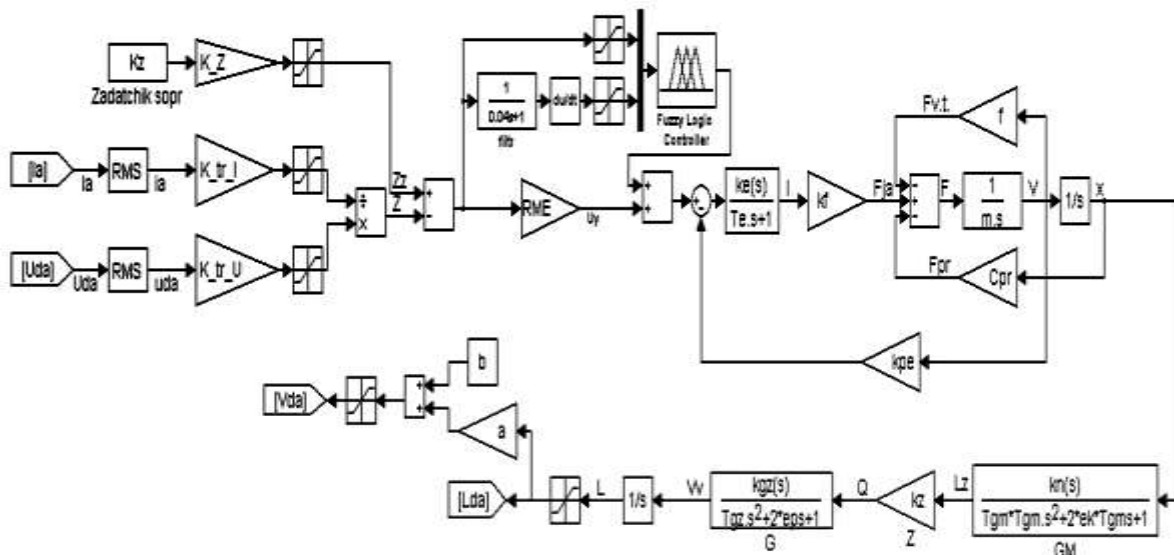


Рисунок 4.10 – Структурна схема удосконаленої СУ ППЕ ДСП для однієї фази в прикладному пакеті MATLAB Simulink

На рисунках 4.11, 4.12 наведені графіки компенсації коливань сигналу управління при к. з. у фазі С і при коливаннях гнучкого кабелю фази С ДСП-50. Графіки наведені для фази С, для двох інших фаз графіки мають подібний вигляд.

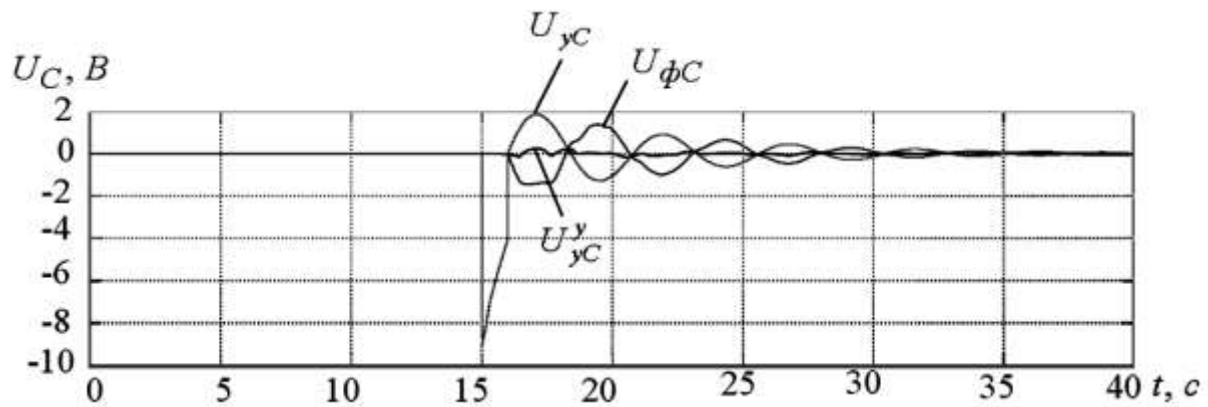


Рисунок 4.11 – Графіки компенсації коливань сигналу управління фази С при к. з. у фазі С ДСП-50

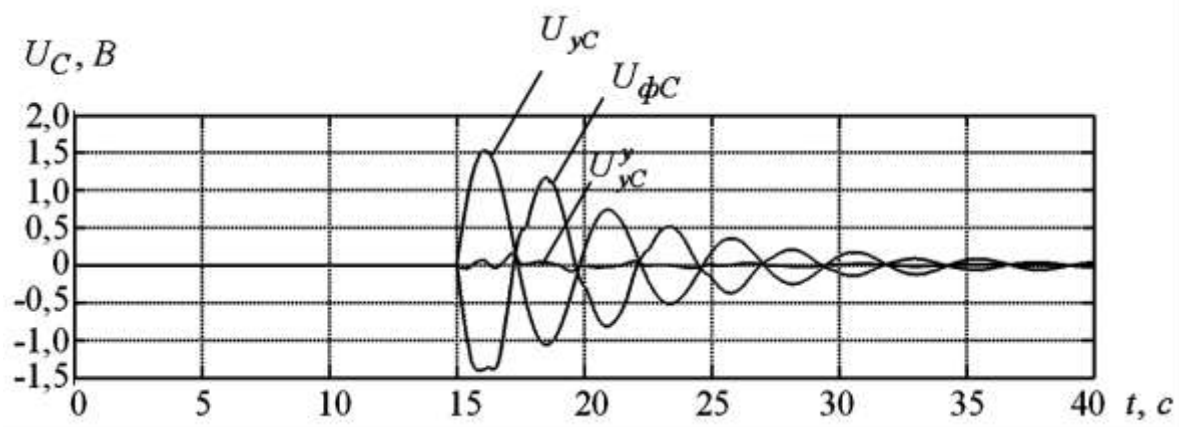


Рисунок 4.12 – Графіки компенсації коливань сигналу управління фази С при імітації коливання гнучкого кабелю у фазі С ДСП-50

На рисунку 4.13 поданий графік зміни довжини дуги фази С при к. з. у фазі С ДСП-50 у початковій і вдосконаленій системах управління приводом переміщення електродів. Для інших фаз графіки мають подібний вигляд.

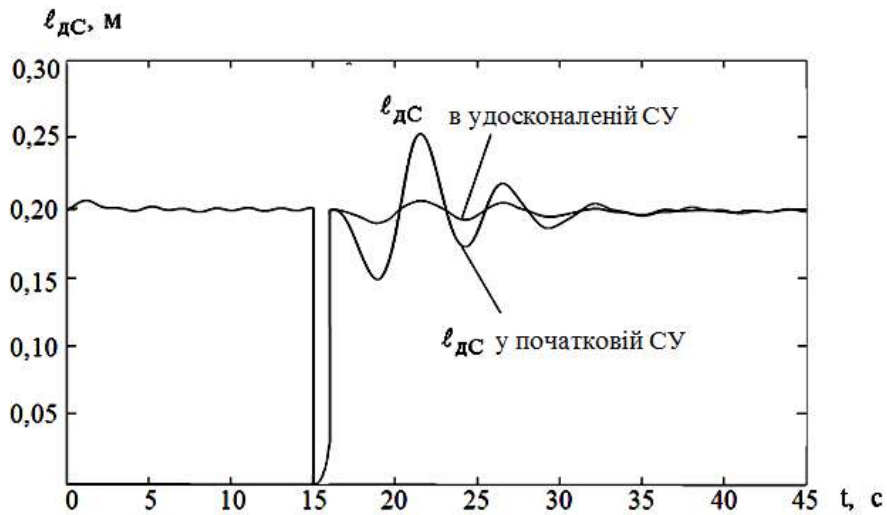


Рисунок 4.13 – Графіки зміни довжини дуги фази С при к. з. у фазі С ДСП-50 у початковій і вдосконаленій системах управління

На рисунку 4.14 наведено графік зміни довжини дуги фази С при імітації зовнішнього збурення у фазі С ДСП-50 – коливанні гнучкого кабелю фази С у початковій і вдосконаленій системах управління приводом переміщення електродів. Для інших фаз графіки мають подібний вигляд.

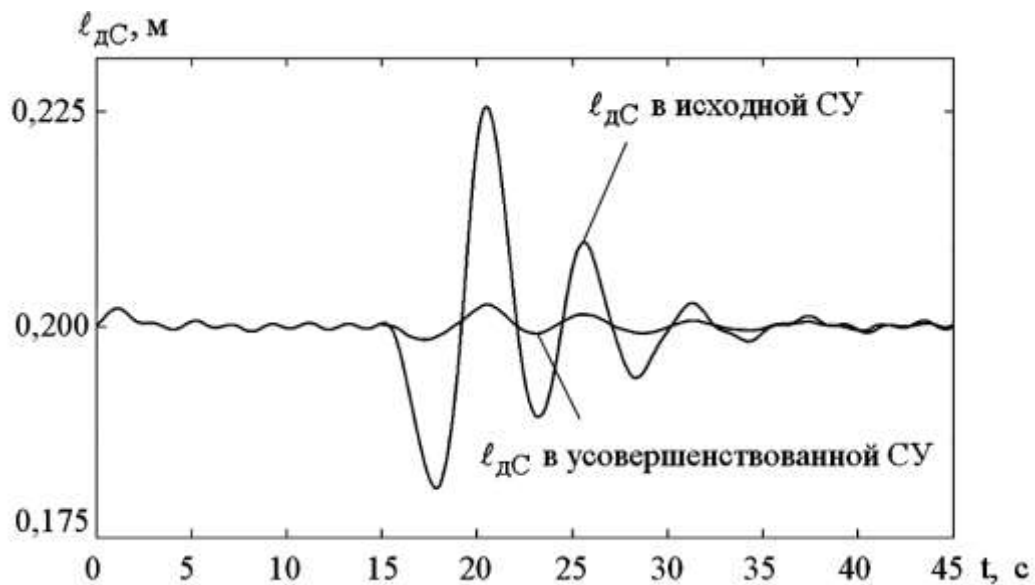


Рисунок 4.14 – Графіки зміни довжини дуги фази С ДСП-50 при імітації зовнішнього збурення у фазі С у початковій і вдосконаленій СУ ППЕ

На рисунках 4.11...4.14 видно, що фаззі-регулятори практично повністю усувають наслідки збурювальних впливів у сигналі управління, що надходить на привід переміщення електродів, як при імітації короткого замикання у фазі, так і при імітації зовнішнього збурення, і вони більше

не впливають на вихідну контрольовану величину – довжину дуги (рис. 4.16...4.17).

У таблиці 4.3 наведені значення дисперсій довжин дуг для вихідної базової системи управління приводом переміщення електродів і для вдосконаленої.

Таблиця 4.3 – Порівняльний аналіз роботи вихідної і вдосконаленої СУ ППЕ

Контрольований параметр	Фаза	Вихідна СУ ППЕ	Удосконалена СУ ППЕ	Зменшення дисперсії довжин дуг, %
Дисперсія довжини дуги при імітації к. з. $\sigma_{\ell}^2 = m \left[(\ell_{\partial} - m_{\ell})^2 \right]$	А	92	5,5	94
	В	53	3,4	93,6
	С	116	5	95,7
Дисперсія довжини дуги при імітації коливання ГК $\sigma_{\ell}^2 = m \left[(\ell_{\partial} - m_{\ell})^2 \right]$	А	34	1	97,9
	В	23	0,7	97
	С	45	1,3	97,2

Як виходить з таблиці 4.3, під час дії збурюючих впливів при короткому замиканні дисперсія довжин дуг зменшилася на 93,6...95,7 %. А при імітації коливання гнучкого кабелю – на 97...97,9 %. Це буде сприяти більш стійкому горінню дуг при коротких замиканнях під час електромеханічних збурень, що істотно скоротить час розплаву і підвищить ефективність енергоспоживання.

Реалізація вдосконаленої СУ ППЕ ДСП шляхом вбудовування в існуючі СУ ППЕ розроблених ФР методом паралельної корекції не вимагає конструктивних і апаратних змін, оскільки в програмному забезпеченні сучасних СУ ППЕ, у тому числі і на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ», є пакет фаззі-інструментів, що дозволяє зменшити фінансові витрати і скоротити до мінімуму простої технологічного устаткування при впровадженні.

Впровадження розробок у виробництво (див. дод. Д) призводить до поліпшення основних показників економічної ефективності виробництва (див. дод. Е):

- підвищення стабільності процесу плавки внаслідок компенсації електромеханічних збурень за рахунок скорочення дисперсії довжин дуг на 94...98 %;
- зниження тривалості плавки на 3,2 % за рахунок стабілізації довжин дуг, підвищення точності регулювання переміщення електродів;
- економія енерговитрат на 5,3 %, пов'язана зі скороченням тривалості розплавлення шихти;

- зниження аварійності на виробництві: зменшення поломок і зношуваності електродів у зв'язку зі стабілізацією горіння дуг.

Річна економічна ефективність від застосування розробленої удосконаленої СУ при реально існуючому завантаженні обладнання на ПрАТ «НКМЗ» становить понад 1,5 млн грн.

Результати розроблення способу компенсації електромеханічних коливань ДСП можуть бути використані для будь-яких ДСП змінного струму. При використанні ФР у СУ ППЕ різних ДСП досить провести настроювання і корекцію інтервалів варіювання вхідних і вихідних змінних ФР з використанням експертних оцінок, логічних міркувань і аналізування графіків електричних параметрів короткої мережі конкретної ДСП, щоб відокремити аварійні режими від збурень, викликаних зміною індуктивностей гнучких кабелів. Інші параметри фазі-регуляторів є універсальними для різних ДСП.

4.4 Практичні рекомендації щодо захисту електродів при упорі в струмонепровідну шихту

При роботі дугових сталеплавильних печей бувають ситуації, коли їх електрогідравлічні регулятори переміщення електродів у режимі пошуку контрольного параметра (імпедансу) роблять команду на опускання електрода, і електрод, в пошуку короткого замикання, опускаючись, вплирається в шихту, яка не має струмопровідних властивостей, сприймає вагу всієї стійки електродотримача і ламається.

Проблема поломок електродів досить серйозна і якщо вона статистично стає закономірною, то впливає на економічні показники всього підприємства. Вирішити цю проблему також не просто через швидкоплинність процесу поломки. Тому з метою зниження витрати електродів унаслідок їх поломок необхідно своєчасно розпізнавати і запобігати упору електродів у струмонепровідну шихту.

У даній роботі пропонується пристрій захисту електродів дугових сталеплавильних печей, підтвержене патентом [65], структурна схема якого для однієї фази наведена на рисунку 4.15, на якому прийняті такі позначення: ДН – датчик напруги фази; КУ1, КУ2 – перший і другий ключі управління; РПЕ – регулятор переміщення електрода; ДС – датчик струму дуги; ГП – гідропривід; МПЕ – механізм переміщення електрода; ДІФ – диференціатор; ВД – вібродатчик; ІЛД1, ІЛД2 – імпульсно-логічні детектори; ЕЗ – елемент затримки; БП – блок пам'яті; ІН – індикатор; МЗЕ – механізм затиску електрода; Д1-Д4 – детектори; К1-К5 – компаратори. Для двох інших фаз схема має подібний вигляд.

Перевагою запропонованого пристрою для управління електричним режимом дугової електропечі в порівнянні з іншими відомими пристроями,

розглянутими в розділі 1, є підвищення швидкодії і чутливості, а, отже, надійності захисту електродів за рахунок застосування замість інерційного (2...10 с) датчика тиску, на виході якого сигнал пропорційний рівню тиску, швидкодіючих (2...5 мс) диференціатора тиску, підтверженого патентом [64], на виході якого сигнал пропорційний швидкості зміни тиску, і вібродатчика, на виході якого сигнал пропорційний прискоренню електрода, що відрізняється від датчика тиску функціональним призначенням і конструкцією.

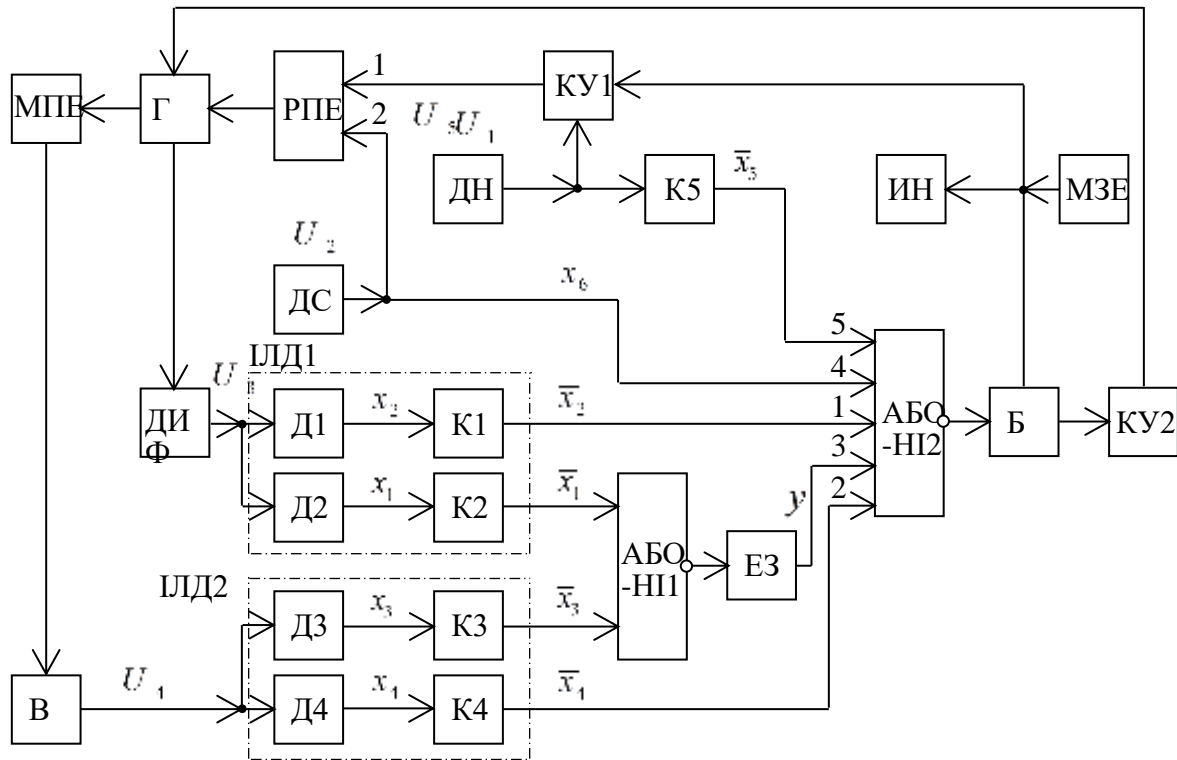


Рисунок 4.15 – Структурна схема пристрою захисту електродів при упорі в струмонепровідну шихту для однієї фази

Пристрій працює таким чином. При опусканні електрода з верхнього положення вниз до електричного контакту з металевою шихтою запалювання дуги забезпечується регулятором РПЕ переміщення електрода за рахунок порівняння в ньому сигналу, пропорційного напрузі між електродом і подини печі, і сигналу, пропорційного струму, що протікає через електрод (дугу). При упорі електрода в струмопровідну шихту в регуляторі РПЕ формується керуючий сигнал на підйом електрода до тих пір, поки довжина виникла дуги не стане такою, при якій рівні обох вхідних сигналів регулятора РПЕ не врівноважує.

При упорі електрода в струмонепровідну шихту регулятор РПЕ продовжує деякий час (2...5 мс) формувати керуючий сигнал на опускання електрода, але в початковий момент механічного контакту (навіть ковзного типу) на виходах диференціатора ДІФ і вібродатчика ВД з'являються синфазні коливальні електричні сигнали (згасаючі).

Експериментально встановлено, що при упорі електрода в шихту спочатку виникають напівхвилі негативної полярності, а потім – позитивної. У всіх інших випадках (у початковий момент опускання, при експлуатаційній зупинці, підйомі електрода, вібро- і гідроударі) спочатку виникають напівхвилі позитивної полярності, потім – негативної. Це властивість диференціатора ДФ і вібродатчика ВД використовується для швидкого розпізнавання упору електрода в струмонепровідну шихту.

Якщо при опусканні електрода без дуги, але за наявності напруги на ньому відбудеться упор у струмонепровідну шихту, то детектори Д1 і Д4 виявлять перші негативні напівхвилі сигналів з виходів диференціатора ДФ і вібродатчика ВД відповідно, у компараторах К1 і К4 сформується логічні «0» і подадуться до перших і других входів першого елемента АБО-НІ1. Якщо в цей момент часу на інших входах цього елемента будуть сформовані логічні «0» (немає струму: $x_6 = 0$, ϵ напруга на електроді: $x_5 = 1$), то на його виході з'явиться логічна «1», яка після запам'ятовування у БП забезпечить відключення ключем КУ2 сигналу, пропорційного напрузі між електродом і подиною печі, а отже, миттєву зупинку електрода, запобігання його поломки. Одночасно відключається електропривід МЗЕ, електротримачі (послаблюючі механічне напруження в електроді, що виникає від дії сил інерції), і спрацьовує індикатор ІН (сирена). Пультівник печі за цим сигналом піднімає електрод вручну, впливаючи на ключ КУ2 управління. Зміною його положення в «Ручне управління» БП (блок пам'яті) повертається до початкового положення (обнуляється), що призводить до зникнення сигналу індикатора ІН, включенню механізму МЗЕ затиску.

Якщо з виходів диференціатора ДФ і вібродатчика ВД першими з'являться напівхвилі позитивної полярності, наприклад у початковий момент опускання (без струму дуги), то вони, виявлені детекторами Д2 і Д3 і, перетворені на компаратори К2 і К3 відповідно в логічні «0», потрапляють на вхід другого елемента АБО-НІ2, на виході якого з'являється логічна «1». На третьому вході першого елемента АБО-НІ2 цей блокуючий сигнал з'являється не відразу, а в момент часу, коли на виходах диференціатора ДФ і вібродатчика ВД виникають напівхвилі негативної полярності. Затримка блокуючого сигналу «1» на час, що дорівнює половині періоду коливання вихідних сигналів (2...5 мс) вібродатчика ВД і диференціатора ДФ тиску, забезпечується елементом Е3 з невеликою затримкою.

При роботі печі на виходах диференціатора ДФ тиску і вібродатчика ВД унаслідок впливу електродинамічних сил з'являються складні незгасаючі коливальні сигнали. Робота пристрою захисту від упору в шихту в цьому режимі автоматично забезпечується регулятором РПЕ. Хибна робота його блокується логічним сигналом $x_6 = 1$ (див. рис. 4.15), який формується на виході датчика ДС струму дуги і подається на другий

вхід елемента АБО-НІ2. При обриві дуги і одночасному упорі в струмонепровідну шихту це блокування миттєво знімається ($x_b = 0$).

Форсований підйом електрода може здійснюватися вручну або автоматично за допомогою впливу на ключ КУ1 управління. Після розвороту ванни печі або відновлення провідності шихти за допомогою ключа КУ2 управління проводиться скидання пам'яті в блоці БП і переведення регулятора в автоматичний режим роботи.

При розробленні даного пристрою за основу був узятий диференційний закон управління переміщенням електродів, проте розробка поширюється і на системи управління ППЕ з імпедансними регуляторами переміщення електродів. Розроблений спосіб може використовуватися на всіх металургійних промислових підприємствах України, де використовуються дугові електропечі.

4.5 Практичні рекомендації щодо підвищення точності позиціонування електродів з імпедансними регуляторами їх переміщення

Зараз більшість дугових сталеплавильних печей ємністю понад 50 тонн укомплектовуються імпедансними РПЕ. Робота імпедансного регулятора ґрунтується на порівнянні вимірних імпедансов дуг із заданими. З цього випливає, що найбільша увага розробників імпеданс-регуляторів переміщення електродів повинна приділятися точності визначення поточного опору дуги.

Однак чинний нині метод визначення імпедансу має низку істотних недоліків. Один з них – недостатньо коректне розташування датчика напруги в силовому ланцюзі печі. У реальних печах прийнято розташовувати датчик напруги в безпосередній близькості до трансформатора. Це обумовлено легкою технічною реалізацією такої системи, тому що датчик легко монтується в даній позиції і не піддається впливу високих температур, які супроводжують процес плавки безпосередньо в печі. Саме з таким недостатньо коректним підключенням датчика пов'язана помилка вимірювання імпедансу, тому що отримане значення включає в себе не тільки опір самої дуги, а й ряд опорів, що входять до вимірюваного ланцюга.

Увесь ланцюг від трансформатора до дуги для кожної з фаз містить в собі низку опорів, які мають в собі як активну, так і індуктивну складову. Схема ланцюга заміщення для фази А подана на рисунку 4.16, на якому прийняті такі позначення: ДС – датчик струму; ДН – датчик напруги; $r_{жшА}$, $r_{ГКА}$, $r_{ршА}$, $r_{eА}$, $r_{дА}$ – активні опори жорсткій шині, гнучкого кабелю, рухомої шини, електрода і дуги відповідно; $X_{жшА}$, $X_{ГКА}$, X_{AB} , X_{AC} , $X_{ршА}$, $X_{eА}$ – індуктивний опір жорсткої шини, індуктивний опір гнучкого кабелю, взаємна індуктивність між гнучкими кабелями фаз А і В, взаємна

індуктивність між гнучкими кабелями фаз А і С, індуктивні опору рухомої шини і електрода, відповідно. Для двох інших фаз схема заміщення і розрахунки мають подібний вигляд.

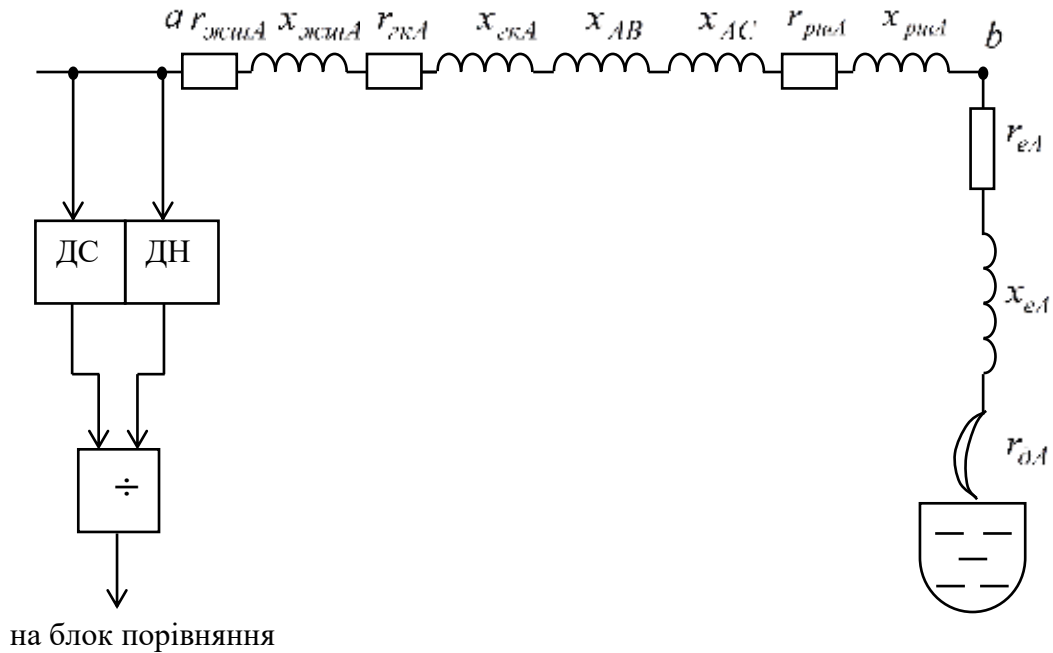


Рисунок 4.16 – Схема заміщення ланцюга для фази А

Значення імпедансу отримують діленням значення, отриманого з датчика напруги, на величину, отриману від датчика струму. Виходячи з рисунка 4.16, до існуючого ланцюга датчик напруги підключається в точці *a*, проте є можливість його перенесення в точку *b*. Для доказу необхідності перепідключення датчика, необхідно порівняти похибки визначення імпедансу в обох варіантах позиціонування датчика напруги з істинним опором дуги.

Перший варіант (при підключенні датчика в точці *a*) відповідає реальності. Якщо знехтувати перехідними опорами контактів, значення яких вкрай малі, то величина імпедансу дуги визначиться таким чином:

$$Z_{дА} = \frac{U_{дА}}{I_{дА}} = \frac{\Delta U_{жшА} + \Delta U_{гкА} + \Delta U_{рушА} + \Delta U_{еА} + \Delta U_{дА}}{I_{дА}}, \quad (4.4)$$

де $Z_{дА}$ – імпеданс фази А, тобто виміряний повний опір дуги фази А при підключенні ДН у точці *a*;

$U_{дА}$ – загальна напруга дуги за датчиком напруги;

$I_{дА}$ – струм дуги (фази А);

$\Delta U_{жшА}$, $\Delta U_{гкА}$, $\Delta U_{рушА}$, $\Delta U_{еА}$, $\Delta U_{дА}$ – падіння напруги на жорсткій шині, гнучкому кабелі, рухомій шині, електроді і дузі фази А.

Значення падіння напруги на жорсткій шині фази А визначається $\Delta U_{жшА} = z_{жшА} \cdot I_{дА}$, где $z_{жшА}$ – повний опір жорсткої шини фази А.

Значення падіння напруги на гнучкому кабелі фази А визначається $\Delta U_{гкА} = z_{гкА} \cdot I_{дА}$, де $z_{гкА}$ – повний опір гнучкого кабелю фази А з урахуванням взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями фаз А і В, і А і С.

Значення падіння напруги на рухомій шині фази А визначається $\Delta U_{ршА} = z_{ршА} \cdot I_{дА}$, де $z_{ршА}$ – повний опір рухомої шини фази А.

Значення падіння напруги на електроді фази А визначається $\Delta U_{еА} = z_{еА} \cdot I_{дА}$, де $z_{еА}$ – повний опір електрода фази А.

Значення падіння напруги на дузі фази А визначається $\Delta U_{дА} = r_{дА} \cdot I_{дА}$, де $r_{дА}$ – повний опір електрода фази А.

Виходячи з попередніх виразів, величину імпедансу дуги можна визначити таким чином:

$$\begin{aligned} Z_{да} &= \frac{U_{да}}{I_{да}} = \frac{z_{жшА} \cdot I_{да} + z_{гкА} \cdot I_{да} + z_{ршА} \cdot I_{да} + z_{еА} \cdot I_{да} + r_{да} \cdot I_{да}}{I_{да}} = \\ &= z_{жшА} + z_{гкА} + z_{ршА} + z_{еА} + r_{да}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Якщо розглядати ідеальний випадок виміру напруги дуги, то до значення імпедансу не входили б опори струмопроводу, а значення імпедансу дуги в ідеальному випадку склало б:

$$Z_{д.ідеал.} = \frac{\Delta U_{да}}{I_{да}} = \frac{r_{да} \cdot I_{да}}{I_{да}} = r_{да}, \quad (4.6)$$

де $Z_{д.ідеал.}$ – справжнє значення імпедансу дуги.

Вираз (4.6) говорить про те, що при ідеальному випадку позиціонування датчика напруги імпеданс і був би опором дуги.

Але реалізувати таку систему технічно неможливо, тому що жоден існуючий датчик не здатний витримати високі температури в печі в процесі плавки і коректно працювати при цьому. Тому найбільш наближеним до ідеального, але водночас технічно реалізованим є підключення датчика напруги в точці *b* (див. рис. 4.15), тобто в зоні електрододер. При цьому імпеданс складе:

$$Z_{дб} = \frac{\Delta U_{еА} + \Delta U_{дА}}{I_{да}} = \frac{z_{еА} \cdot I_{да} + r_{да} \cdot I_{да}}{I_{да}} = z_{еА} + r_{да}, \quad (4.7)$$

де $Z_{дб}$ – реально досяжне значення імпедансу.

В існуючих СУ ППЕ ДСП при позиціонуванні датчика напруги у трансформатора абсолютна похибка визначення імпедансу складе:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{да}} &= Z_{\text{да}} - Z_{\text{д.ідеал.}} = z_{\text{жшА}} + z_{\text{ГКА}} + z_{\text{ршА}} + z_{\text{еА}} + \\ &+ r_{\text{дА}} - r_{\text{дА}} = z_{\text{жшА}} + z_{\text{ГКА}} + z_{\text{ршА}} + z_{\text{еА}} = z_{\text{вТА}} + z_{\text{еА}}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

де $z_{\text{вТА}}$ – повний опір вторинного струмопровода.

Тоді відносну похибку значення імпедансу при позиціонуванні датчика напруги у трансформатора можна визначити як відношення величини абсолютної помилки до істинного значення опору дуги:

$$\delta Z_{\text{да}} = \frac{\Delta Z_{\text{да}}}{r_{\text{да}}} \cdot 100\% = \frac{z_{\text{вТА}} + z_{\text{е}}}{r_{\text{д}}} \cdot 100\%. \quad (4.9)$$

Але в разі підключення датчика в точці b величина абсолютної похибки визначення імпедансу складе:

$$\Delta Z_{\text{дб}} = Z_{\text{дб}} - Z_{\text{д.ідеал.}} = z_{\text{еА}} + r_{\text{дА}} - r_{\text{дА}} = z_{\text{еА}}. \quad (4.10)$$

А відносна похибка визначення імпедансу складе:

$$\delta Z_{\text{дб}} = \frac{\Delta Z_{\text{дб}}}{r_{\text{дА}}} \cdot 100\% = \frac{z_{\text{еА}}}{r_{\text{дА}}} \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

Для чисельної оцінки похибок необхідно прийняти чисельні значення для всіх необхідних для розрахунків параметрів. З паспортних даних ДСП-50, наведених у додатку Б, беруться всі необхідні значення.

Відносна похибка визначення імпедансу в реальному СУ ППЕ ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» становить $\delta Z_{\text{да}} = 98,8\%$, а відносна похибка визначення імпедансу при підключенні датчика напруги в зоні електрододер для СУ ППЕ ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» становить $\delta Z_{\text{дб}} = 7,7\%$.

До того ж у зв'язку з тим, що взаємні індуктивності між гнучкими кабелями фаз змінюються при виникненні коротких замикань, то сигнал з датчика напруги, підключеного в точці a , коливається і також змінюється, що передається регуляторам переміщення електродів і погіршує стабільність горіння дуг.

Різниця відносних похибок визначення імпедансу в випадках підключення датчика напруги в точках a і b є обґрунтуванням необхідності переміщення датчика до зони ланцюга, найменш віддалену від дуги. Перенесення датчика напруги з точки a в точку b , тобто до зони розміщення електрододер, технічно здійснимо. Реалізація таких змін дозволить зменшити відносну похибку позиціонування електрода при роботі регулятора за розрахунками для ДСП-50 на 91,1 %.

Розрахунки, проведені при перенесенні датчика напруги, були наведені для імпедансного регулятора переміщення електродів. Однак дана пропозиція щодо перенесення датчика призведе до зменшення похибок позиціонування і для інших типів регуляторів переміщення електродів.

ПІСЛЯМОВА

У монографії вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення ефективності роботи дугових сталеплавильних печей за рахунок удосконалення систем управління приводом переміщення електродів.

Наукові і практичні результати роботи полягають у такому.

1. Отримала подальший розвиток математична модель електромеханічної системи управління приводом переміщення електродів ДСП, яка дозволяє врахувати вплив електромеханічних коливань гнучких кабелів на стійкість роботи регуляторів переміщення електродів ДСП і зміни довжин електричних дуг.

2. Розроблено методику оцінювання впливу коливань гнучких кабелів при експлуатаційних коротких замиканнях на процес переміщення електродів ДСП.

3. Результати оцінювання коливань гнучких кабелів, отримані за допомогою розробленої математичної моделі, підтверджені експериментально на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ». Розкид параметрів не перевищує 5 %, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

4. Вперше синтезовано фаззи-коректори, які здійснюють компенсацію електромеханічних коливань гнучких кабелів і дозволяють зменшити чутливість системи управління приводом переміщення електродів до зовнішніх електромеханічних збурень, які пов'язані з процесом коливання гнучких кабелів, і тим самим підвищити стабільність процесу плавлення за рахунок скорочення дисперсії довжин дуг на 94...98 % і зменшити витрату технологічної енергії на 5,3 % за рахунок скорочення тривалості плавлення на 3,2 %. Річна економічна ефективність від застосування розробленої удосконаленої системи управління на ПрАТ «НКМЗ» становить понад 1,5 млн грн.

5. Спосіб компенсації електромеханічних збурень підтверджується патентом України № 76205. Пристрій для управління електричним режимом ДСП при упорі в струмонепровідну шихту підтверджується патентом України № 34774. Датчик швидкості зміни тиску, який використовується при розробленні пристрою захисту електродів ДСП, підтверджується патентом України № 34775. Методика оптимізації системи управління приводом переміщення електродів ДСП затверджена КПЦ «Автоматика» ПрАТ «НКМЗ» і прийнята для промислового використання, що підтверджується відповідним актом. Розроблені моделі, алгоритми і методики, необхідні для побудови удосконаленої системи управління процесом плавлення, використані в навчальному процесі, що підтверджується відповідними актами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин [и др.]; под ред. А. Д. Свенчанского. [2-е изд.– перераб. и доп.]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. **Сисоян, Г. А.** Электрическая дуга в электрической печи / Г. А. Сисоян. – 3-е изд. – М. : Metallurgiya, 1974. – 304 с.
3. **Bowman, Ben.** Arc furnace physics / Ben Bowman, Klaus Krüger. Düsseldorf : Stahleisern Verlag, 2009.
4. **Лапшин, И. В.** Автоматизация дуговых печей / И. В. Лапшин. – М. : б.н., 2004.
5. **Глинков, В. М.** АСУ ТП в черной металлургии. [Текст]: учебник для вузов. / В. М. Глинков, В. А. Маковский. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Metallurgiya, 1999.– 310 с.
6. **Разживин, А. В.** Моделирование мощности и напряжения на электрической дуге / А. В. Разживин, А. А. Сердюк // Наукові праці ДНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 58. – Донецьк, 2003. – с. 102–107.
7. **Панкратов, А. И.** Колебания кабельных гирлянд дуговой сталеплавильной печи при эксплуатационных коротких замыканиях [Электронный ресурс] / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Научный вестник ДГМА. – 2010. – № 1 (6Е). – С. 177–182. – Режим доступа к журн. : http://www.dgma.donetsk.ua/publish/2010/2010_1/article/10APVISS.pdf.
8. **Паранчук, Я. С.** Моделивання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг ДСП / Я. С. Паранчук // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2000. – №403. – С. 126-133.
9. Vibrational analysis and first operational results of current conducting electrode arms / J. Ehte, K. Timm, B. Remus, H. Knapp // Electrowärme international. – 1992. № 04(50). – P. 55-60.
10. **Timm, K.** Untersushung elektromeshanischer Schwingungen der Elektroden-Tragarm Szsteme von Lichtbogenöfen / K. Timm – VDI-Ber. – 1992. – №957. – S. 59-76.
11. Лютая А.В. Исследование влияния изменения задания импеданса на величину длины дуги дуговой сталеплавильной печи [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Научный Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14Е). – С. 56-62. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(14](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(14)

12. Панкратов А.И. Исследование электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 / А.И. Панкратов, А.В. Афанасьева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2009. – Вип. 9 (158), - С.175 – 179.

13. **Тесля, Н. Б.** Исследование электромеханических характеристик гибких токопроводов дуговых сталеплавильных печей и разработка технических требований к их конструкциям: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Н. Б. Тесля. – Новосибирский гос. технич. ун-т. – Новосибирск, 1998. – 198 с.

14. Лютая А. В. Математическая модель электромеханической системы колебаний гибких токопроводов дуговой печи [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, А. Н. Обухов // Научный вестник ДГМА. – 2013. – № 1 (11Е). – С. 153-163. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(11%D0%95\) 2013/article/24.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(11%D0%95) 2013/article/24.pdf)

15. Лютая А. В. Усовершенствование систем управления приводом перемещения электродов дуговых сталеплавильных печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А. В. Лютая. – Донбасская государственная машиностроительная академия – Краматорск, 2013. – 22 с.

16. Лютая А. В. Усовершенствование систем управления приводом перемещения электродов дуговых сталеплавильных печей: дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Лютая. – Краматорск, 2013.

17. **Kadar, I. I.** The influence of cable swings on the electrical parameters of flexible cables / I. I. Kadar, P. P. Biringer // Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.: Pap. Ind. Appl. Conf. 25 th, Seattle, Wash., Oct. 7-12, 1990. Pt 2 – New York, 1990. – P. 2031-2035.

18. **Елманова, Л. П.** Исследование и расчёт электромеханических колебаний в дуговых сталеплавильных электропечах с целью оптимизации режимов работы и совершенствования конструкций: дисс. ... канд. техн. наук / Л. П. Елманова. – Новосибирск, 1996.

19. Устройства и способы демпфирования электродинамических колебаний электродов СВМ ДСП / А. И. Сапко, Н. В. Коваль, В. В. Салмин, В. И. Петров // Освоение новых высокоомощных электропечей. – М., 1982. – С.44-49.

20. **Власов, А. А.** Гашение вибраций систем электрододержателей дуговых сталеплавильных печей / А. А. Власов, Н. В. Коваль // Вибрация машин: измерение, снижение, защита (Материалы Международной научно-технической конференции. Донецк : ДонНТУ). – 2003. – С. 57-61.

21. **Туан.** Исследование областей устойчивости против

автоколебаний следящих гидроприводов механизма перемещения электродов дуговой электропечи / Туан, Май Фьюк // Вибрация машин: измерение, снижение, защита (Материалы Международной научно-технической конференции. Донецк : ДонНТУ). – 2003. – С. 62-70.

22. **Виноградов, А. А.** Виды колебаний одиночных и расщеплённых проводов воздушных ЛЭП. Современные средства гашения пляски проводов / А. А. Виноградов, И. А. Платонова // Труды V Международной научно-технической конференции «Высоковольтное коммутационное оборудование». – ЗАО ЭССП, Москва, 2009.

23. **Сапко, А. И.** Упругие колебания электродов на дуговой электропечи / А. И. Сапко, Н. В. Коваль // Электротехническая промышленность, сер. Электротермия. – 1975. – Вып. 4 (152). – С. 6-7.

24. Корреляционный анализ электродинамических колебаний электродов в дуговых сталеплавильных печах / А. И. Сапко [и др.] // Электротехническая промышленность, сер. Электротермия. – 1978. – Вып. 8 (192). – С. 6-8.

25. **Чередниченко, В. С.** Математическое моделирование электромеханических колебаний кабельных гирлянд в дуговых сталеплавильных печах / В. С. Чередниченко, Р. А. Бикеев, М. Г. Кузьмин // Электрометаллургия. – 2005. – № 4. – С. 10-16.

26. **Лозинський, А. О.** Система керування переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі з fuzzy logic регулятором / А. О. Лозинський // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: ДУ «ЛП». – 1997. – №340. – С. 62-68.

27. **Лозинський, А. О.** Синтез нейрон-фаззи регулятора системи переміщення електродів дугової сталеплавильної печі / А. О. Лозинський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – Частина 6. – С. 61-66.

28. Дослідження режимів електромеханічної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі з нечітким паралельним коректором / О. Ю. Лозинський, Я. С. Паранчук, В. І. Мороз, Р. Я. Паранчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «ПАЕП Теорія й практика». – №3, 2012 (19). – С. 524-525.

29. **Паранчук, Р. Я.** Нейромережева система оптимальної стабілізації координат електричного режиму дугової сталеплавильної печі / Р. Я. Паранчук // Збірник тез МНТК МІССУ'2008. – Москва-Донецьк, 2008. – С. 177-178.

30. **Бикеев, Р. А.** Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность : автореф. дис. на стиск. уч. степени канд. техн. наук: 05.09.10 – Электротехнология / Новосибирский государственный

технический университет. – 2004. – 27с.

31. An efficient power control scheme for electric arc furnaces using online estimation of flexible cable inductance / H. Khoshkhoo, S. H. N. Sadeghi, R. Moini, H. A. Talebi // *Computers & Mathematics with Applications*. – Volume 62, Issue 12, December 2011, Pages 4391–4401.

32. **Карпенко, С. В.** Разработка математической модели и компьютерной системы для исследования трёхфазных цепей с электрическими дугами / С. В. Карпенко, В. Д. Сарычев, С. П. Мочалов // *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия № 6*. – М., 2006. – С. 48-51.

33. **Varadan, S.** *IEEE Transactions on Power Delivery* / S. Varadan, E. B. Makrwn, A. A. Girgis. – 1996. – V. 1. – № 3. – P. 1685-1691.

34. **Collantes, R.** *IEEE Transactions on Power Delivery* / R. Collantes, T. Gomez. – 1997. – V. 12. – № 4. – P. 1812-1817.

35. **Kołodziej, Joanna.** *Theory and Practice of Stochastic Modelling* / Joanna Kołodziej, William J. Knottenbelt, Samee U. Khan // *Computers & Mathematics with Applications*. – Volume 64, Issue 12, December 2012, Pages 3657.

36. **Andrea, Marina.** Algorithmic product-form approximations of interacting stochastic models / Marina Andrea, Maria Grazia Vigliottib // *Computers & Mathematics with Applications*. – Volume 64, Issue 12, December 2012, Pages 3852–3868.

37. **Hamedani, M. E.** Updating stochastic model coefficients for prediction of arc furnace reactive power / M. E. Hamedani, Haidar Samet // *Electric Power Systems Research*. – Volume 79, Issue 7, July 2009, Pages 1114–1120.

38. **O’Neill-Carrillo, E.** *IEEE Transactions on Power Delivery* / E. O’Neill-Carrillo, G. Heydt, E. J. Kostelich. – 1999. – V. 14. – № 2. – P. 537-542.

39. **Лозинский, О. Ю.** Система оптимального управления электроприводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.09.03 / О. Ю. Лозинский. – Львовский политехн. ин-т. – 1974. – 27с.

40. Стабілізація потужності дуг в електродугових печах за допомогою гіперболічного закону керування струмом дуги / О. Ю. Лозинський, Я. Ю. Марущак, Я. С. Паранчук, Д. В. Уханська // *Научные труды Кренменчугского государственного политехнического университета. Проблемы создания новых машин и технологий*. – 2001. – Вып. 1(10). – С.193-197.

41. Афанасьева А.В. Моделирование электромеханических

колебаний гибких кабелей ДСП / А.В. Афанасьева, А.И. Панкратов // Электротехника, электроника и микропроцессорная техника. Донецкий национальный технический университет. – 2008. – С. 9-10.

42. Панкратов А.И. Математическая модель электромеханических колебаний в дуговой сталеплавильной печи [Электронный ресурс] / А.И. Панкратов, А.В. Шишкин, А.В. Афанасьева // Научный вестник ДГМА. – 2009. – № 1 (4Е). – С. 140–144. – Режим доступа : http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009_1/article/09PAIEAF.pdf.

43. **Панкратов, А. И.** Оценка изменения взаимных индуктивностей между гибкими кабелями трех фаз дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», 2009, вип.9 (158). - С.179-182.

44. **Панкратов, А. И.** Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Кременчугского Национального технического университета. Вып.3, ч.1, Кременчуг, 2009. – С.183-186.

45. **Панкратов, А. И.** Проблема вариации реактанса в силовых цепях дуговых сталеплавильных печей / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus. Специальный выпуск. Варна, Болгария (VI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» 4-11 июня 2010 г., Варна, Болгария), 2010. – Том I (Ч. 1). – С. 397-399.

46. **Тарг, С. М.** Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Наука, 1970. – 478 с.

47. Лютая А. В. Исполнительные механизмы и регулирующие органы. Гидравлика, гидро- и пневмоприводы : пособие для самостоятельного изучения дисциплины для студентов всех инженерно-технических специальностей заочной формы обучения / А. В. Лютая, А. В. Периг. – Краматорск : ДГМА. – 2014. – 72 с.: ил. – Библиогр.: с. 72 (5 назв). – ISBN 978-966-379-680-2.

48. Лютая А. В. Разработка математической модели системы управления приводом перемещения электродов (СУ ППЭ) дуговой сталеплавильной печи (ДСП) [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Научный Вестник ДГМА. – 2015. – № 2 (17Е). – С. 103-113. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(17%D0%95\)_2015/article/18.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(17%D0%95)_2015/article/18.pdf)

49. Лютая А. В. Исследование влияния коэффициента передачи П-регулятора перемещения электрода на величину колебаний длины дуги

дуговой сталеплавильной печи (ДСП) [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Вестник ДГМА. – 2015. – № 1 (34). – С. 51-56. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1\(34\)_2015/article/11.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1(34)_2015/article/11.pdf).

50. **Чекулаев, Е. Ф.** Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Исполнительные механизмы и регулирующие органы» и дипломным проектам : для студентов специальности 7. 092501 / Сост. Е. Ф. Чекулаев. – Краматорск: ДГМА, 2000. – 92с.

51. **Федорець, В. О.** Гідроприводи і гідро пневмоавтоматика / В. О. Федорець. – К.: Вища школа, 1995. – 464 с.

52. **Попов, Д. Н.** Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем : учебник [для вузов] / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с. ил.

53. [SCOPUS] Лютая А.В. Экспериментальные исследования электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи/ А.В. Лютая // Металлург. и горноруд. пром-сть, Дніпропетровськ. – 2014. – № 2. – С. 93–96. Режим доступа: <http://www.metaljournal.com.ua/metal-gp2-2014/>

54. **Панкратов, А. И.** Экспериментальные исследования влияния колебаний гибких токопроводов на стабильность работы регуляторов перемещения электродов дуговых сталеплавильных печей / А. И. Панкратов, А. В. Лютая, В. П. Верешко // Научный вестник ДГМА. – 2012. – № 1 (9Е). – С. 114-121.

55. Лютая А. В. Оценка адекватности математической модели системы управления приводом перемещения электродов (СУ ППЭ) дуговой сталеплавильной печи (ДСП) [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Научный Вестник ДГМА. – 2015. – № 3 (18Е). – С. 190-197. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(18%D0%95\)_2015/article/27.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(18%D0%95)_2015/article/27.pdf)

56. **Гайдышев, И.** Анализ и обработка данных: специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб : Питер, 2001. – 752 с.

57. **Kreyszing, E.** Advanced engineering mathematics / E. Kreyszing. – John Wiley & Sons, 1983. – 1081 p.

58. Лютая А.В. Способ адаптации регуляторов перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи к внешним возмущениям / А.В. Лютая // Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод : материалы Всеукраинской научно-технической конференции, посвященной 60-летию ДГМА, 17–21 декабря 2012 г. / ред. кол. : А.Ф. Тарасов, Г.П. Клименко, П.И. Сагайда. – Краматорск : ДГМА, 2012. – С. 203–205.

59. **Лютая, А. В.** Адаптивная система управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи / А. В. Лютая, О. И. Толочко // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2013. – №1. С. 98-101.

60. **Патент № 76205. Україна. МПК (2012.01) H05B 7/00.** Спосіб автоматичного управління приводами переміщення електродів n-фазних дугових сталеплавильних печей / А. І. Панкратов, А.В. Люта; заявник і патентовласник Донбаська держ. машинобуд. академія – U201207394; заявл. 18.06.12; опубл. 25.12.2012. – Бюл. № 24/2012.

61. **Панкратов, А. И.** Фаззи-управление электроприводами: учеб. пособие по дисциплине «Новые системы и принципы управления электроприводами» для студентов электромеханических специальностей / А. И. Панкратов. – Краматорск: ДГМА, 2006. – 48 с.

62. **Калашніков, В. І.** Основи теорії фаззи-логіки та фаззи-регулювання: навч. посібник / В. І. Калашніков, Ф. Паліс, О. Ю. Лозинський. – Донецьк; Магдебург; Львів, 2000. – 69 с.

63. **Леонтьев, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леонтьев. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.

64. **Патент № 34775. Україна, МПК (2006) G01L 9/16.** Датчик швидкості зміни тиску / А. І. Панкратов, А. В. Афанасьєва; заявник і патентовласник Донбаська держ. машинобуд. академія – U200802823; заявл. 04.03.08; опубл. 26.08.2008. – Бюл. № 16.

65. **Патент № 34774. Україна. МПК (2006) H05B 7/00.** Пристрій для керування електричним режимом дугової електропечі / А. І. Панкратов, А. В. Афанасьєва; заявник і патентовласник Донбаська держ. машинобуд. академія – U2008028321; заявл. 04.03.08; опубл. 26.08.2008. – Бюл. № 16.

66. **Черных, И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

67. **Панкратов, А. И.** Автокорреляционный анализ флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьєва // *Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus. Специальный выпуск. Варна, Болгария (VII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» 3-10 июня 2011 г., Варна, Болгария), 2011. – Том II. – С. 203-206.*

68. **А. с. № 1129748 СССР.** Устройство для автоматического управления электрическим режимом дуговой электропечи / В. И. Дронин, В. А. Гордиенко и др. (СССР). – Опубл. в Б. И., 1984. – № 46. – С. 17-18.

69. **Крилов, А. В.** Моделирование в Matlab электрической дуги ДСП / А. В. Крилов, А. К. Мурышкин // *Наука и молодёжь : проблемы, поиски, решения. Труды Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, 12-14 мая 2004. – Ч. 3, вып. 8. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ,*

2004. – С. 53-54.

70. **Денис, Б. Д.** Демпфирование упругих колебаний электродов в дуговых сталеплавильных печах / Б. Д. Денис, О.Ю. Лозинский, Я. Ю. Марущак // Изв. вузов. Электромеханика. – 1988. – №6. – С.84-89.

71. **Марущак, Я. Ю.** Электромеханическая система подачи электродов дуговых сталеплавильных печей : авторефер. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Я. Ю. Марущак. – Новосибирский электротехнический ин-т. – Новосибирск, 1988. – 19с.

72. Синтез двомасових і тримасових систем автоматичного регулювання положення електродів при врахуванні випадкового характеру збурень / О. Ю. Лозинський, Я. Ю. Марущак, Я. С. Паранчук, Н. О. Попова // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: ДУ «ЛП». – 1997. – №301. – С. 77-85.

73. **Труфанов, И. Д.** Общесистемные параметры динамики механизма регулирования длины дуги дуговых печей / И. Д. Труфанов, Ю. А. Крисан, Салох Рихан Мохамад // Придніпровський науковий вісник: Технічні науки, №110(177), 1988. – С. 62-69.

74. **Лозинський, О. Ю.** Тривимірна стохастична модель системи регулювання електричного режиму дугової сталеплавильної печі / О. Ю. Лозинський, Я. Ю. Марущак // Український міжвідомчий наук.-техн. зб. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Світ. – 1993. – №31. – С.7-11.

75. **Лозинський, О. Ю.** Регулювання дисперсії вихідної координати шляхом формування випадкового керуючого впливу / О. Ю. Лозинський, Я. С. Паранчук // Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки. – Київ: «Либідь». – 1993. – С.43-45.

76. **Паранчук, Я. С.** Моделювання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі / Я. С. Паранчук // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2000. – №403. – С.126-133.

77. **Адріанова, А. Я.** Про деякі властивості електричних кіл з дугами і керування ними / А. Я. Адріанова, В. М. Эдемський // ЕЛЕКТРОінформ. – Львів. – № 2, 2002. – С. 17-18.

78. **Лозинський, А. О.** Оптимізація режимів компенсації реактивної потужності ДСП з використанням методу генетичного алгоритму / А. О. Лозинський, Я. С. Паранчук // Теоретична електротехніка. – 2002. – Вип. 56. – С. 81-86.

79. **Лозинський, А. О.** Аналіз форми струмів дугової сталеплавильної печі на основі wavelet-перетворення / А. О. Лозинський, Я. С. Паранчук, В. В. Лізанець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007, №2. – Т2. – С. 65-68.

80. **Карпенко, С. В.** Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа (на примере дуговой сталеплавильной печи): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / С. В. Карпенко. – Сибирский гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2006. – 23 с.

81. **Панкратов, А. И.** Оценка адаптивности регуляторов мощности дуговых сталеплавильных печей к внешним возмущениям / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Серия «Электротехника, электроника и электропривод», вып.28. , Харьков. 2010. – С.462–463.

82. Регулятор автоматический управления электродами. Руководство по эксплуатации. Версия S7-02.– Copyring of Siemens AG 2001. – 65 с.

83. **Rama Rao, K.S.** Optimal design of a furnace transformer by intelligent evolutionary methods / K. S. Rama Rao, Mohd Noh Karsiti // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – Volume 43, Issue 1, December 2012, Pages 1056–1062.

84. **Bojan, Stojčića.** Current distribution in the low-voltage winding of the furnace transformer / Stojčića Bojan, Damijan Miljavec // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – Volume 43, Issue 1, December 2012, Pages 1251–1258.

85. Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks / José Manuel Mesa Fernández, Valeriano Álvarez Cabal, Vicente Rodríguez Montequin, Joaquín Villanueva Balsera // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – Volume 21, Issue 7, October 2008, Pages 1001–1012.

86. **Golnaraghi, Farid.** Automatic control systems / Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo. – [9th ed]. – NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 944 p.

87. **Lyshevski, Sergey E.** Electromechanical systems and devises / Sergey E. Lyshevski – CRC Press, 2008. – 565 p.

88. **Sanchez, Edgar N.** Discrete .Time high order neural control: Trained with Kalman filtering / Edgar N. Sanchez, Alma Y. Alanis, Alexander G. Loukianov. – Springer, 2008. – 109 p.

89. **Schröder, Dierk.** Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.

90. **Schröder, Dierk.** Intelligente Verfahren – Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2010. – 840 p.

91. **Zhang, Peng.** Advanced industrial control technology / Peng Zhang – Oxford : Elsevier, 2010. – 842 p.

92. **Das, Anupam.** Process control strategies for a steel making furnace

using ANN with bayesian regularization and ANFIS / Anupam Das, J. Maiti, R. N. Banerjee // *Expert Systems with Applications*. – Volume 37, Issue 2, March 2010. – Pages 1075–1085.

93. **Kirschen, Marcus.** Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry / Marcus Kirschen, Karim Badrb, Herbert Pfeifera // *Energy*. – Volume 36, Issue 10, October 2011. – Pages 6146–6155.

94. Improvement of electrical arc furnace operation with an appropriate model. / Labar Hocine, Djeghader Yacine, Bounaya Kamel, Kelaiaia Mounia Samira // *Energy*. – Volume 34, Issue 9, September 2009, Pages 1207–1214.

95. A novel estimation of electrical and cooling losses in electric arc furnaces. / Eder Trejo, Fernando Martell, Osvaldo Micheloud, Lidong Teng, Armando Llamas, Alejandro Montesinos-Castellanos // *Energy*. 8th World Energy System Conference, WESC 2010. – Volume 42, Issue 1, June 2012. – Pages 446–456.

96. **Lazaroiu, G. C.** A control system for dc arc furnaces for power quality improvements / G. C. Lazaroiu, D. Zaninelli // *Electric Power Systems Research*. – Volume 80, Issue 12, December 2010. – Pages 1498–1505.

97. **Janabi-Sharifi, F.** An adaptive system for modelling and simulation of electrical arc furnaces / F. Janabi-Sharifi, G. Jorjani // *Control Engineering Practice*. – Volume 17, Issue 10, October 2009. – Pages 1202–1219.

98. **Samet, Haidar.** A wide nonlinear analysis of reactive power time series related to electric arc furnaces / Haidar Samet, M. E. Hamedani Golshan // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – Volume 36, Issue 1, March 2012. – Pages 127–134.

99. **Liu, Yu-Jen.** Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace / Yu-Jen Liu, Gary W. Chang, Rong-Chin Hong // *Electric Power Systems Research*. – Volume 80, Issue 5, May 2010. – Pages 572–581.

Додаток А
Документ, що підтверджує факт передавання ДДМА
прав ліцензійного використання програмного продукту MatLab

The screenshot displays the MATLAB license management interface. At the top, there are navigation links for "Activation & Installation Troubleshooting", "Contact Support", and "Help". Below this is a search bar and buttons for "Download Report", "Add License", and "Search".

License No.	Label	Option	Use	Activation Type	My Role	Administrator
716381		Concurrent	Classroom	Network Concurrent User	Administrator	Syonic, Mihal

Below the table, there are tabs for "License Details", "Activation and Installation", "End Users and License Contacts", and "Passcodes". The "License Details" tab is active, showing "License Attributes for 716381".

License Label:		Option:	Concurrent	Use:	Classroom
Email Domains:	Allowed dgmz.donetsk.ua	Activation Type:	Network Concurrent User	Term:	Perpetual
				Release:	R2012h

Below the license attributes, there are buttons for "Download Products" and "Request DVD and Printed Guides".

Count	Product	Maintenance End Date
10	MATLAB	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	Simulink	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	Fuzzy Logic Toolbox	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	Neural Network Toolbox	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	SimElectronics	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	SimPowerSystems	01 Oct 2012 Renew Maintenance
10	Simscape	01 Oct 2012 Renew Maintenance

Рисунок А.1

Додаток Б
Електричні і геометричні параметри дугової сталеплавильної печі
ДСП-50

Номінальна потужність пічного трансформатора	40 МВА
Первинна напруга живлення пічного трансформатора, $U_{1н}$	35 кВ
Максимальний струм, I_n	40 кА
Вторинна лінійна напруга, $U_{2н}$	658 В
Вторинна фазна напруга, U_{ϕ}	380 В
Промислова частота, $f_{пром}$	50 Гц
Активний опір вторинного струмопровода, $r_{в.с.}$	0,45 мОм
Індуктивність вторинного струмопровода, $L_{в.с.}$	6,4 мкГн
Активний опір трансформатора, $r_{тр}$	0,51 мОм
Індуктивність трансформатора, $L_{тр}$	8 мкГн
Параметри електродів:	
– активний опір електрода, $r_{ел}$	0,12 мОм
– довжина електрода, $\ell_{ел}$	2,4 м
– радіус електрода, $R_{ел}$	0,254 м
– індуктивність електрода, $L_{ел}$	1,05 мкГн
– власна частота коливань системи електрод-електродотримач, $f_{ел.с}$	1,5...6 Гц
Активний опір фази, $r_A = r_B = r_C$	1,08 мОм
Індуктивність фази, $L_A = L_B = L_C$	15,45 мкГн
Коефіцієнт в'язкого тертя, μ	$0,125 \times 10^{-6}$
Параметри гнучких кабелів:	
– довжина гнучкого кабелю, $\ell_{зк}$	10 м
– діаметр гнучкого кабелю разом із рукавами водоохолодження, $d_{зк}$	0,15 м
– відстань між гнучкими кабелями в статистиці, $a_{AB} = a_{BC} = a_{AC}$	0,8 м
– маса гнучкого кабелю, $m_{зк}$	638 кг
– погонна вага гнучкого кабелю (вага 1 м), q	638 Н/м
– відстань між точками підвісу гнучкого кабелю, $2a$	2 м
– висота провису гнучкого кабелю, h	4,4 м

– приведена довжина маятника, ℓ^*	3 м
– власна частота коливань гнучких кабелів, $f_{зк.с}$	0,18 Гц
– момент інерції маятника відносно нерухомої точки, J_O	2 850 кг·м ²
– приведена маса маятника, m^*	460 кг
Пропорційний електромагніт:	
– маса якоря та рухомих частин, m	0,005 кг
– коефіцієнт жорсткості пружини, $C_{пр}$	100 Н/м
– коефіцієнт в'язкого демпфірування, f	2,8...5,2
– струм якоря, I	0,02 А
– напруга управління магнітом, U_y	10 В
– коефіцієнт посилення тягової характеристики, k_F	60 Н/А
Гідророзподільник:	
– тиск управління в камері потенціометрів, P_k	1,2×10 ⁶ Па
– діаметр сопла, d_c	0,4×10 ⁻³ м
– максимальний хід заслінки, L^{\max}	0,4×10 ⁻³ м
– діаметр золотника, d_z	9×10 ⁻³ м
– максимальне зміщення золотника, X_0^{\max}	1×10 ⁻³ м
– коефіцієнт зворотного зв'язку підсилювача, K_{oc}	0,4
– маса золотника, m_z	1 кг
Гідроциліндр переміщення електрода:	
– ефективна площа поршня циліндра зі сторони нагнітальної порожнини, S_B	0,25 м ²
– довжина робочого ходу циліндра, $L_{ГЦ}$	4,5 м
– маса рухомих частин гідроциліндра та робочого органу, m	4,8 кг
– діаметр плунжера, $d_{пл}$	0,18 м
– швидкість переміщення в процесі плавки, $v_{зц}$	80...120 мм/с
– приведений модуль пружності стінок корпусу, $E_{пр}$	46 800 Н/м ²
– приведений коефіцієнт в'язкого тертя, f	1,5×10 ⁴
Анодно-катодне падіння потенціалу, α	40 В

Таблиця Б.1 – Параметри дуги в різні технологічні періоди

Параметр дуги	Період розплаву		Металургічні періоди плавлення
	Початок	Кінець	
Гرادієнт потенціалу в дуговому проміжку β , кВ/м	1,1	0,1	0,7
Постійна часу дуги, що характеризує теплову інерцію дуги θ , мс	0,1	0,6	2...5

Запізнення механізмів переміщення електродів:

- запізнювання механізму електромеханічного ППЕ з тросово-барабанною передачею	800...1 000 мс
- запізнювання механізму електромеханічного ППЕ з рейковою передачею	75...150 мс
- запізнювання механізму електрогідравлічного ППЕ	до 60 мс

Додаток В

Програма експериментальних досліджень на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ»



ПРОГРАММА

Исследование системы управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи ДСП-50 при колебаниях гибких кабелей

Целью проведения экспериментальных исследований является оценка влияния колебаний гибких кабелей на стабильность и устойчивость работы ДСП в период расплава металла.

Для того, чтобы на эксперимент не влияли эксплуатационные внешние возмущения, которые возникают в период расплавления шихты, оценка влияния колебаний кабелей производится в период спокойного горения дуг, то есть в период доводки.

1. Подготовительные работы.

1.1. Определение и согласование места проведения эксперимента. Время выполнения: 06.10.2011 г. – 30.11.2011 г.

1.2. При полностью отключенном печном трансформаторе к нижней точке петли гибкого кабеля, крайнего со стороны пультуовой, привязывается изолированный капроновый канат длиной 10 м. (рис. 1). Исполнитель: Панкратов А.И. Время выполнения: при работе печи в период с 06.10.2011 г. – 30.11.2011 г.

2. Порядок проведения исследований.

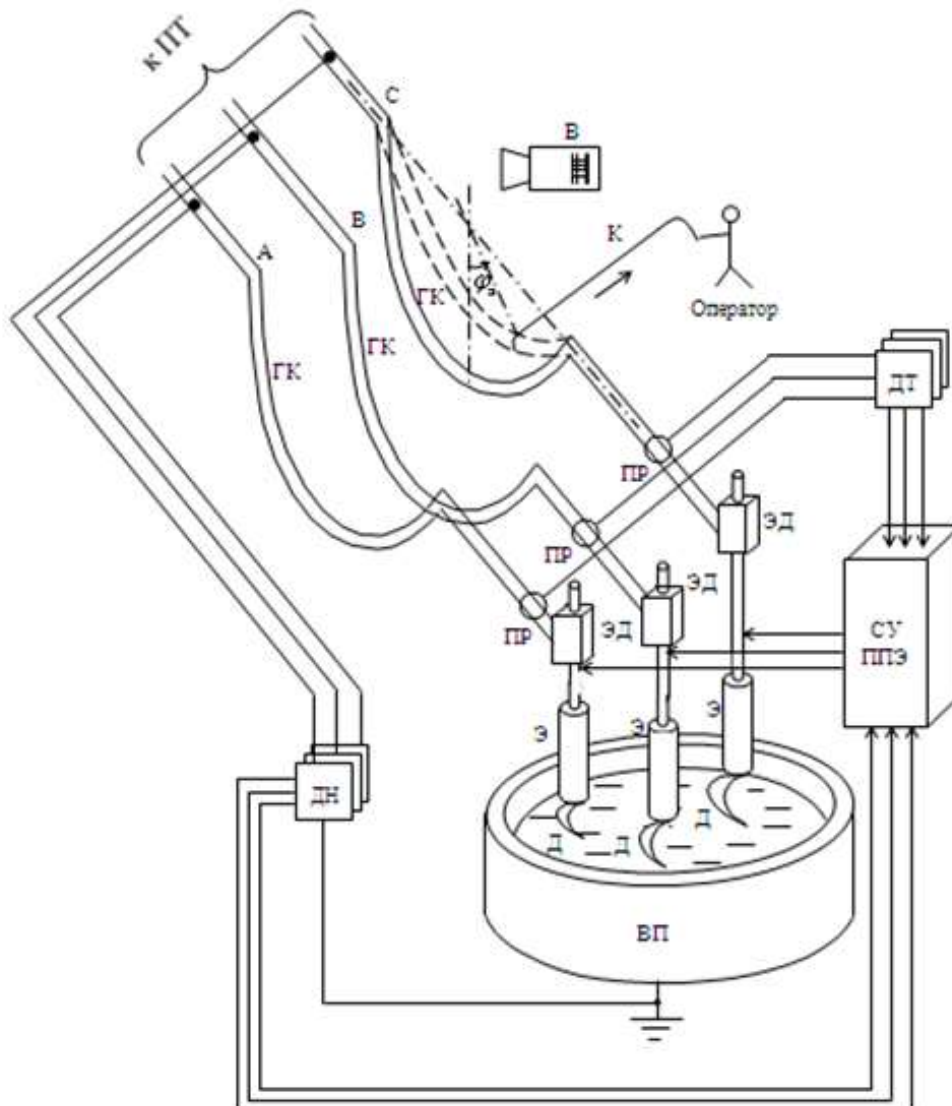
2.1. Ввод параметров директивного графика плавки, включение печного трансформатора, опускание электродов, зажигание электрических дуг и плавление металла. Исполнители: оперативный персонал ДСП-50.

2.2. В период плавки металла, когда дуги горят устойчиво, производится снятие и фиксация данных с датчиков фазных напряжений, фазных токов

a)

Рисунок В.1

(трансформаторов напряжений и токов) на короткой сети и расчет длин электрических дуг. Исполнители: операторы ЭВМ пультовой.



ПТ – печной трансформатор; ГК – гибкий кабель; К – канат; О – оператор; В – видеокамера; ПР – пояса Роговского; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; СУ ППЭ – система управления приводом перемещения электродов; ЭД – электрододержатель; Э – электрод; Д – электрическая дуга; В – ванна металла; φ_y – угол отклонения оператором гибкого кабеля от вертикали; ВП – ванна печи

Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

б)

Рисунок В.1, аркуш 2

2.3. В определённый фиксированный момент времени производится механический ввод в систему низкочастотного внешнего возмущения. Для этого оператор тянет за изолированный капроновый канат и тем самым отклоняет гибкий кабель фазы С от вертикали на угол приблизительно 15° и тут же отпускает канат. Кабели начинают совершать свободные затухающие колебания. Исполнитель: Панкратов А.И.

2.4. Производится одновременное видеонаблюдение за перемещением кабельных гирлянд, снятие и фиксация данных с датчиков фазных напряжений, фазных токов (трансформаторов напряжений и токов) на короткой сети и расчет длин электрических дуг.

Исполнители: видеонаблюдение колебаний кабеля – Лютая А.В., фиксация данных – операторы ЭВМ пультовой.

2.5. Опыты повторяются 12 раз. Данные экспериментов заносятся в память жесткого диска сервера управления базой данных. Обработка массивов данных экспериментов выполняется асп. Лютой А.В.

3. Распределение обязанностей при подготовке и проведении исследований.

3.1. Ввод параметров директивного графика плавки, включение печного трансформатора и опускание электродов осуществляется оперативным персоналом НКМЗ в соответствии с планом.

Ответственные: зам. нач. СП №1 по оборудованию Измайлов А. В., энергетик цеха СП№1 Гуц О.А.

3.2. Ввод в систему низкочастотного внешнего возмущения производят путём последовательного натяжения и отпускания изолированного каната сотрудником ДГМА.

Ответственные: Панкратов А. И

4. Техника безопасности.

4.1. При проведении исследований необходимо соблюдать общие правила техники безопасности, а также правила техники безопасности при проведении работ вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением.

4.2. Закрепление изолированного капронового каната на гибком кабеле производится при полном отключении ДСП-50.

4.3. Механический ввод в систему низкочастотного внешнего возмущения производится оператором вдали (более 10 м) от токоведущих частей, находящихся

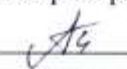

в)


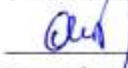

Рисунок В.1, аркуш 3

под напряжением.

4.4. Снятие данных с датчиков фазных напряжений, фазных токов (трансформаторов напряжений и токов) на короткой сети производится системой автоматического контроля ДСП-50 и фиксируется операторами ЭВМ пультовой в базе данных.

СОГЛАСОВАНО:

От ДГМА:
Профессор каф. АПП ДГМА
 Панкратов А.И.
Аспирант ДГМА
 Лютая А. В.

От НКМЗ:
Начальник КЦЦ «НКМЗ – Автоматика»
 Верешко В. П.
Зам. начальника СП №1 по оборудованию
 Измайлов А. В.
Энергетик СП №1
 Гуц О. А.


с 7⁰⁰ до 17⁰⁰

2)

Рисунок В.1, аркуш 4

Додаток Г
Документи, що підтверджують впровадження результатів
роботи

УТВЕРЖДАЮ:
начальник конструкторско-производственного
центра "НКМЗ-Двигатель" (Вербшко В. П.)
(подпись) (ФИО)
14.06. 2012



А К Т

**о передаче методики оптимизации системы управления приводом
перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и
способа адаптации регуляторов перемещения электродов ДСП к
внешним электродинамическим возмущениям, разработанных в
кандидатской диссертационной работе
Лютой Анастасии Владимировны
«УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ
ПЕЧЕЙ»**

Методика оптимизации системы управления приводом перемещения электродов ДСП предназначена для того, чтобы адаптировать регуляторы перемещения электродов к внешним электродинамическим возмущениям, связанным с колебаниями гибких кабелей, и стабилизировать заданные длины дуг.

Методика оптимизации системы управления приводом перемещения электродов ДСП позволяет сохранить все прежние функции существующих регуляторов перемещения электродов ДСП и обеспечить компенсацию внешних возмущающих воздействий, связанных с колебаниями гибких токопроводов.

Реализация способа адаптации автоматических регуляторов перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи (ДСП) к внешним электродинамическим возмущениям обеспечит повышение точности регулирования перемещения электродов, снизит продолжительность плавки на 3,2 %, уменьшит потребление технологической энергии на 5,3 %.

а)

Рисунок Г.1

Методика оптимизации системы управления приводом перемещения электродов ДСП и способ адаптации автоматических регуляторов перемещения электродов ДСП к внешним электродинамическим возмущениям приняты к использованию для разработки адаптивной системы управления приводом перемещения электродов ДСП.

ВВ (подпись) (Филин В.В.)
ФИО
инженер-конструктор 1 к.
КПЦ „НКМЗ-Автоматика“

Авторы с результатами

внедрения ознакомлены : *руковод.* АИ (Панкратов А.И.)

АВ (Лютая А.В.)

б)

Рисунок Г.1, аркуш 2

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи ДДМА

д.т.н., професор Дзів


5.02. 2013



АКТ

використання у навчальному процесі кафедрою «Автоматизація виробничих процесів» Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України результатів дисертаційної роботи асистента кафедри Лютої Анастасії Володимирівни на тему «Удосконалення систем управління приводами переміщення електродів дугових сталеплавильних печей».

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи асистента Лютої А.В. на тему «Удосконалення систем управління приводами переміщення електродів дугових сталеплавильних печей» використовуються у курсовому та дипломному проектуванні, в лекційному курсі з дисциплін «Технічні засоби автоматизації», «Автоматизація технологічних процесів та виробництв», НДРС, магістерських роботах студентів спеціальності 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами».

Зав. кафедрою «Автоматизація
виробничих процесів»



д.т.н., професор Клименко Г.П.

Рисунок Г.2

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи ДДМА
д.т.н., професор Аліва І. С.


5.02. 2013



Довідка

про використання результатів дисертаційної роботи «Удосконалення систем управління приводами переміщення електродів дугових сталеплавильних печей» асистента кафедри «Автоматизація виробничих процесів» Донбаської державної машинобудівної академії Лютої А.В.

Результати дисертаційної роботи Лютої А.В. використані при виконанні держбюджетних науково-дослідницьких роботах: Дк-06-2008 «Удосконалення енергозберігаючих технологій в автоматизованих системах машинобудування та металургії», звіт по НДР ДР № 0108U010081; – Краматорськ, 2008 (автор приймав участь як виконавець, використані результати дисертації); Дк-06-2011 «Підвищення ефективності автоматизації технологічних процесів металургії та машинобудування», звіт по НДР ДР № 0111U007640; – Краматорськ, 2011 (автор приймав участь як виконавець, використані результати дисертації).

У держбюджетній темі Дк-06-2008 використані розроблені математичні моделі електромеханічних систем управління приводом переміщення електродів дугових сталеплавильних печей і методика оцінки впливу коливань гнучких кабелів при експлуатаційних коротких замиканнях на нестабільну роботу різних автоматичних регулювальників переміщення електродів ДСП. У держбюджетній темі Дк-06-2011 застосована методика оптимізації системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі та спосіб адаптації регуляторів переміщення електродів до зовнішніх обурень.

Зав. кафедрою «Автоматизація
виробничих процесів», керівник

НДР ДР № 0108U010081,

ДР № 0111U007640



д.т.н., професор Клименко Г.П.

Рисунок Г.3

Додаток Д
Економічне оцінювання ефективності впровадження результатів досліджень у виробництво

Це економічне оцінювання є додатком до «Акту про передачу методики оптимізації системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі і способу адаптації регуляторів переміщення електродів ДСП до зовнішніх електромеханічним збурень».

Суть роботи полягає в тому, що:

1. Розроблено методику оптимізації системи управління приводом переміщення електродів ДСП з метою компенсувати електромеханічні впливи, пов'язані з коливаннями гнучких кабелів, і стабілізувати задані довжини дуг. (Тут і далі повна назва методики буде згадуватися одним словом «МЕТОДИКА».)

2. МЕТОДИКА дозволяє при управлінні процесом плавки за рахунок реалізації способу компенсації електромеханічних впливів, що обурюють підвищити точність регулювання переміщення електродів, знизити тривалість плавки, зменшити споживання технологічної енергії, підвищити стабільність роботи печі, тобто збільшити ефективність її роботи.

Обчислення виконані в три етапи [103, 147]:

1. Визначення витрат на створення програмного продукту (ПП) для випадку, якби він розроблявся на стороні.

Примітка: згадана вище МЕТОДИКА виконана в рамках домовленості про співпрацю і не вимагає оплати.

2. Визначення економічної ефективності від реалізації застосування методу адаптації регуляторів переміщення електродів ДСП до зовнішніх збурень.

3. Визначення техніко-економічних показників нового оптимізованого процесу управління ППЕ ДСП.

Вихідні дані для розрахунків подані в таблиці Д 1.

Таблиця Д.1 – Вихідні дані для розрахунків

Номер	Найменування	Позначення	Розмірність	Величина
1	2	3	4	5
1. Визначення витрат на створення ПП				
1.1	Коефіцієнт відбору потужності при роботі комп'ютера	K_C	-	0,7
1.2	Встановлена потужність комп'ютера фірми-розробника	$N_{вст}$	кВт	0,4
1.3	Зарплата розробника-програміста за місяць	$Z_{ПМ}$	грн	4 500

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5
1.4	Вартість комп'ютерного забезпечення	$C_{комп}$	грн	5 000
1.5	Коефіцієнт обліку площ фірми-розробника	$K_{обл.пл.}$	-	2,5
1.6	Площа робочого місця розробника-програміста	P_{PM}	м ²	6
1.7	Вартість оренди 1 м ² /міс.	$C_{ор.кв.м}$	$\frac{грн}{м^2 \cdot міс}$	50
1.8	Норма прибутку	$K_{НП}$	%	35
2. Визначення економічної ефективності від впровадження				
2.1	Питома витрата технологічної енергії	$P_{уе}$	$\frac{кВт \cdot ч}{т}$	560
2.2	Маса розплавляється за одну плавку металу	m_m	т	50
2.3	Максимальний фонд часу використання ДСП	$\Phi_{ф.мах}$	ч	6 180
2.4	Реальна кількість плавок за рік на ДСП-50 ПрАТ НКМЗ	$N_{пл.р.}$	шт.	1 500
3. Техніко-економічні показники				
3.1	Балансова вартість печі	C_n	грн	80 000 000
3.2	Балансова вартість СУ ППЕ ДСП	$C_{СУ}$	грн	7 000 000

Д.1 Визначення витрат на створення програмного продукту для випадку, якби він розроблявся на стороні

Програмним продуктом є розробка моделі адаптивної системи управління ППЕ ДСП до зовнішніх електромеханічним збурень у пакеті MatLab.

МЕТОДИКА розробляється самостійної фірмою в рамках господарського договору. Вартість цих робіт визначається в кілька етапів:

- прямі матеріальні витрати;
- прямі витрати на оплату праці;
- інші прямі витрати;
- загальновиробничі витрати;
- загальна сума витрат на створення ПП;
- вартість робіт зі створення ПП.

Д.1.1 Прямі матеріальні витрати

Прямі матеріальні витрати включають витрати на основні матеріали і енергію для технологічних цілей. Перша частина цих витрат в явному вигляді відсутня, оскільки ПП розроблявся в електронному вигляді. Витрати на енергію для технологічних цілей B_{II} , грн, складаються з власне витрат на привід комп'ютера в період розробок і визначаються за формулою

$$B_{II} = K_C \cdot N_{вст} \cdot T_{рк} \cdot 0,28 = 0,7 \cdot 0,4 \cdot 270 \cdot 0,28 = 21,17 \text{ грн}, \quad (\text{Д.1})$$

де K_C – коефіцієнт відбору потужності (коефіцієнт попиту), заданий у вихідних даних (№ 1.1 табл. Д.1),

$K_C = 0,7$; $N_{вст}$ – встановлена потужність комп'ютера фірми-розробника, кВт, задана у вихідних даних (№. 1.2 табл. Д.1), $N_{вст} = 0,4 \text{ кВт}$;

$T_{рк}$ – трудомісткість комп'ютерних робіт розробника-програміста зі створення ПП, годин, з розроблення МЕТОДИКИ, наведена в таблиці Д.2,

$T_{рк} = 270 \text{ час.}$; $0,28$ – вартість $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

Д.1.2 Прямі витрати на оплату праці

Прямі витрати на оплату праці $П_{воп}$, грн, включають основну та додаткову зарплату розробника і визначаються за формулою

$$П_{воп} = \frac{З_{ПМ}}{8 \cdot 22} \cdot T_{р\Sigma} = \frac{4500}{8 \cdot 22} \cdot 310 = 7926,14 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.2})$$

де $З_{ПМ}$ – зарплата розробника за місяць, що включає основну та додаткову зарплату, всі види доплат і премій для розробника-програміста першої категорії, грн, задана у вихідних даних (№ 1.3 табл. Д.1),

$З_{ПМ} = 4500 \text{ грн.}$;

$8, 22$ – тривалість робочої зміни, год., і середня кількість робочих днів за місяць;

$T_{р\Sigma}$ – трудомісткість робіт, задана в таблиці Д.2, $T_{р\Sigma} = 310 \text{ час.}$

Таблиця Д.2 – Трудомісткість робіт

Етапи роботи	Зміст робіт	Трудомісткість, год
1. Технічне завдання	Стисла характеристика програми; основу і призначення розробки; вимоги до програми і програмної документації; стадії і етапи розробки програми; порядок контролю та приймання виконання	30
2. Ескізний проект	Попередня розробка структури вхідних та вихідних даних; уточнення методу розв'язання задачі; Розробка та опис загального алгоритму рішення; розробка техніко-економічного обґрунтування та пояснювальної записки.	80
3. Технічний проект	Уточнення структури вхідних та вихідних даних, визначення форми їх подання; розробка детального алгоритму; розробка структури програми; остаточне визначення конфігурації технічних засобів; розробка заходів по впровадженню програми.	60
4. Робочий проект	Опис програми на обраною мовою; налагодження; розробка методики випробувань; проведення попередніх випробувань (тестування); коригування програми; розробка програмної документації.	100
Разом	Трудомісткість комп'ютерних робіт, T_{pk}	270
5. Впровадження	Підготовка і передача програми для супроводу; навчання персоналу використанню програми; внесення коригувань до програми і документацію.	40
Усього	Трудомісткість виконання робіт, $T_{p\Sigma}$	310

Д.1.3 Інші прямі витрати

Інші прямі витрати B_{in} , грн, які визначаються за формулою

$$B_{in} = B + A_{MB} + C_{op}, \quad (Д.3)$$

де B – відрахування від основної та додаткової зарплати розробника-виконавця, грн; A_{MB} – амортизаційні відрахування за знос комп'ютера, грн;
 C_{op} – вартість оренди приміщень фірми-розробника, грн.

Відрахування від основної та додаткової зарплати розробника-виконавця B :

$$B = 0,375 \cdot P_{BOT} = 0,375 \cdot 7926,14 = 2972,3 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.4})$$

де 0,375 – відрахування із зарплати (з них 0,32 – до пенсійного фонду, 0,04 – до фонду соціального страхування, 0,015 – до фонду соціального захисту від безробіття);

P_{BOT} – прямі витрати на зарплату, розраховані у формулі (Д.2),
 $P_{BOT} = 7926,14 \text{ грн.}$

Амортизаційні відрахування за знос комп'ютера A_{MB} :

$$A_{MB} = 0,25 \cdot C_{комп} = 0,25 \cdot 5000 = 1250 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.5})$$

де 0,25 – норма амортизаційних відрахувань на комп'ютер та оргтехніку;

$C_{комп}$ – вартість комп'ютерного забезпечення для розробки МЕТОДИКИ, грн, включає все комп'ютерне обладнання, яке використовується фірмою-розробником при виконанні робіт, віднесене до одного робочого місця, задана у вихідних даних (№ 1.4 табл. Д.1), $C_{комп} = 5000 \text{ грн.}$

При розробленні ПП використовувалося таке комп'ютерне забезпечення:

1. Ноутбук LGE50 з такими характеристиками:
 - процесор: Intel (R) Pentium® Dual CPU T2390 @ 1 / 86GHz;
 - частота процесора: 1,86 ГГц;
 - обсяг пам'яті: 1,99 ГБ ОЗУ;
 - відеоадаптер: Mobile Intel® 965 Express Chipset Family;
 - обсяг пам'яті: 256 МБ;
 - типу системи: 32х-розрядний.
2. Лазерний принтер CanonLBP292900.
3. Сканер HPScanjet 2400.

Вартість оренди приміщень фірми-розробника C_{ap} :

$$C_{op} = K_{обл.пл.} \cdot P_{PM} \cdot C_{ар.кв.м} \cdot \frac{T_{Pк}}{22 \cdot 8} = 2,5 \cdot 6 \cdot 50 \cdot \frac{270}{22 \cdot 8} = 1150,57 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.6})$$

де $K_{обл.пл.}$ – коефіцієнт обліку площ фірми-розробника, що включає в себе облік усіх офісних і допоміжних площ, що припадають на одне робоче місце програміста, задана у вихідних даних (№ 1.5 табл. Д.1),
 $K_{обл.пл.} = 2,5$;

P_{PM} – площа робочого місяця, m^2 , задана у вихідних даних (№ 1.6 табл. Д.1),

$P_{PM} = 6m^2$; $C_{op.kv.m}$ – вартість оренди $1 m^2$ за місяць, $\frac{грн}{m^2 \cdot мес}$, задана у вихідних даних (№ 1.7 табл. Д.1),

$C_{op.kv.m} = 50 \frac{грн}{m^2 \cdot мес}$; $\frac{T_{pk}}{22 \cdot 8}$ – фактично показує тривалість комп'ютерних робіт з розробки МЕТОДИКИ, міс., використовується у формулі (Д.1), (Д.2), задана в таблиці Д.2.

Тоді загальні за підрозділом Д.1.3 витрати V_{in} , грн, визначаються за формулою

$$V_{in} = B + A_{MB} + C_{op} = 2972,3 + 1250 + 1150,57 = 5372,87 \text{ грн.}$$

Д.1.4 Загальновиробничі витрати

Ці витрати в рамках даного розрахунку точно визначити досить складно, тому що вони повинні врахувати таке:

- основну і додаткову зарплату і відрахування від неї всього персоналу фірми, а саме: усіх керівників, фахівців і молодшого персоналу, що не беруть безпосередню участі в розробці ПП, але працюють на фірмі-розробнику, крім власне виконавця, але що припадає на одного виконавця;

- витрати, пов'язані з опаленням, освітленням, водопостачанням приміщень фірми, віднесені до одного робочого місця виконавця;

- витрати, пов'язані з обслуговуванням і ремонтом усього наявного на фірмі обладнання і оргтехніки, що відносяться до одного робочого місця виконавця.

Тому загальновиробничі витрати V_{zag} , грн, визначаються укрупнено, як накладні, тобто як частина від прямих витрат на оплату праці. Їх розрахунок виконується за формулою

$$V_{zag} = \frac{H_{\%} \cdot P_{BOП}}{100} = \frac{250 \cdot 7926,14}{100} = 19815,35 \text{ грн.}, \quad (Д.7)$$

де $H_{\%}$ – відсоток накладних загальновиробничих витрат, заданий у вихідних даних (№ 1.7 табл. Д.1), $H_{\%} = 250\%$;

$P_{BOП}$ – визначені за формулою (Д.2), $P_{BOП} = 7926,14 \text{ грн.}$

Д.1.5 Загальна сума витрат на створення ПП

Загальна сума витрат на створення ПП Z_{Σ} , грн, визначається з використанням таблиці Д.3.

Таблиця Д.3 – Визначення суми загальних витрат на створення ПП

Номер	Найменування витрат, позначення	Величина, грн	%
1	Прямі матеріальні витрати, V_{Π}	21,17	0,06
2	Прямі витрати на оплату праці, $\Pi_{\text{ВОП}}$	7 926,14	23,92
3	Інші прямі витрати, $V_{\text{ін}}$	5 372,87	16,21
4	Загальновиробничі витрати, $V_{\text{заг}}$	19 815,35	59,81
Підсумкова загальна сума витрат, V_{Σ}		33 135,53	100

Д.1.6 Вартість робіт з розробки ПП

Величина витрат, розрахована в пункті Д.1.5, фактично є собівартістю робіт. Для того щоб фірма-розробник могла розвиватися, розширювати і поглиблювати розробки, враховувати всі види ризиків при роботі з замовниками, вона повинна отримувати прибуток. Собівартість і прибуток складають вартість робіт, яка визначається за формулою

$$C_{\text{роб}} = V_{\Sigma} + K_{\text{НП}} \cdot Z_{\Sigma} = 33135,53 + 0,35 \cdot 33135,53 = 44732,97 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.8})$$

де V_{Σ} – загальна сума витрат, визначена в таблиці Д.3,

$$V_{\Sigma} = 33135,53 \text{ грн.};$$

$K_{\text{НП}}$ – коефіцієнт норми прибутку, заданий у вихідних даних (№ 1.8 табл. Д.1), $K_{\text{НП}} = 35\%$.

Д.2 Визначення ефективності від реалізації впровадження результатів досліджень у виробництво

Пропонована МЕТОДИКА передбачає, що в процесі впровадження її у виробництво в конструкцію основного обладнання ДСП-50 не вноситимуться жодні зміни. Додаткові роботи будуть пов'язані з впровадженням МЕТОДИКИ в виробництво (етап 5 табл. Д.2), а саме:

- підготовка і передача програми;
- навчання персоналу використанню програми;
- внесення коригувань до програми і документацію.

Ці витрати враховані в підрозділі Д.1 справжнього розрахунку і не вимагають додаткового повторного обліку, так як вони вже враховані в п. Д.1.2 як «Прямі витрати на оплату праці».

Обчислення в даному підрозділі будуть виконані в кілька етапів:

- розрахунок вартості одиничних витрат на технологічну енергію (на одну плавку);
- розрахунок вартості річних витрат на технологічну енергію;
- розрахунок економічної ефективності від реалізації впровадження.

Для того щоб перейти до цих розрахунків, необхідно врахувати такий момент.

Використання методу адаптації автоматичних регуляторів переміщення електродів до зовнішніх електромеханічних збурень призводить до таких наслідків (табл. Д.4).

Як було виявлено раніше, розглядаються зовнішні електромеханічні збурення виключити неможливо. Першопричиною даних збурень є експлуатаційні короткі замикання, кількість яких за одну плавку може сягати двохсот. Однак надання автоматичним РПЕ властивості адаптації до даних збурень призводить до стабілізації довжин дуг, а значить, до підвищення точності регулювання переміщення електродів, скорочення тривалості плавки і зниженню витрати технологічної енергії. А за оцінками експертів – працівників, які обслуговують піч ДСП-50 ПрАТ НКМЗ, тривалість однієї плавки знизиться на 3,2 %, що призводить до зменшення витрати енергоспоживання.

Таблиця Д4 – Наслідки впровадження результатів досліджень у виробництво

Номер	Джерела ефективності	Характер динаміки
1	Довжини дуг	Стабілізуються внаслідок компенсації електромеханічних збурень
2	Тривалість плавки	Знижується за рахунок стабілізації довжин дуг, підвищення точності регулювання переміщення електродів
3	Витрати витрачається технологічної енергії	Зменшується у зв'язку зі зниженням часу плавки
4	Стабільність і надійність роботи печі	Підвищується за рахунок зниження впливу збурень на роботу РПЕ

Повний технологічний процес плавлення металу складається з:

- завалювання шихти;
- етапу плавлення;
- етапу окислення;

- етапу відновлення;
- випуску готової продукції.

Оскільки в цій роботі розглядаються збурення, які мають місце в періоді плавлення, то в результаті застосування результатів досліджень у виробництво, відбувається скорочення тривалості саме періоду плавлення металу, що призводить до скорочення загального часу плавлення (табл. Д.5).

Таблиця Д.5 – Повний технологічний процес плавлення

Номер	Етап плавлення	Тривалість, год.		Зміна:	
		Варіант		(+)- збільшення; (-)- зменшення	
		Базовий	Новий	час.	%
1	Завалка	0,16	0,16	0	0
2	Плавлення	1,2	1,136	-0,064	-5,3
3	Окислення	0,2	0,2	0	0
4	Відновлення	0,27	0,27	0	0
5	Випуск	0,17	0,17	0	0
Усього		2	1,936	-0,064	-3,2

Оскільки тривалість періоду розплавлення скорочується на 5,3 %, то і споживання технологічної енергії в порівнянні з базовим варіантом зменшується на 5,3 %:

$$\Delta e = 100\% - \frac{T_{тр.пл.}^H}{T_{тр.пл.}^B} \cdot 100\% = 100\% - \frac{1,136}{1,2} \cdot 100\% = 5,3\%, \quad (Д.9)$$

Для визначення економічної ефективності від реалізації впровадження обчислимо тільки змінну частину витрат, а саме вартість витрачається технологічної енергії, яка змінюється в новому варіанті в період розплавлення, оскільки удосконалення СУ ППЕ проводиться саме на цьому етапі плавлення.

Д.2.1 Розрахунок вартості одиничних витрат на технологічну енергію (на одну плавку)

Величина вартості одиничних витрат на технологічну енергію для кожного з варіантів дорівнює:

$$C_{el}^B = B_{ye} \cdot m_m \cdot 0,75 = 560 \cdot 50 \cdot 0,75 = 21000 \text{ грн.}; \quad (Д.10)$$

$$C_{el}^H = \frac{100\% - \Delta e}{100\%} \cdot B_{ye} \cdot m_m \cdot 0,75 = \frac{100\% - 5,3\%}{100\%} \cdot 560 \cdot 50 \cdot 0,75 = 19887 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.11})$$

де B_{ye} – питома витрата технологічної енергії при виплавці сталі в ДСП-50, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, задана у вихідних даних (№ 2.1 табл. Д.1),

$$B_{ye} = 560 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}};$$

Δe – відсоток зменшення споживання технологічної енергії, задано у формулі (Д.9), $\Delta e = 5,3\%$; m_m – маса металу, який розплавляється за одну плавку, т, задана у вихідних даних (№ 2.2 табл. Д.1),

$m_m = 50 \text{ т}$; $0,75$ – середня вартість електроенергії для промислових підприємств, $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

Д.2.2 Вартість річних витрат на технологічну енергію

Сталеплавильні агрегати на металургійних великих машинобудівних підприємствах можуть працювати за безперервним графіком без вихідних. Зараз у реальних умовах це досягається тільки на великих металургійних комбінатах, таких як: Снакіївський металургійний комбінат, Маріупольський металургійний комбінат та ін.

У сталеплавильному цеху ПрАТ «НКМЗ», незважаючи на безперервний графік роботи, сталеплавильне обладнання задіяно не на повну потужність. Це обумовлено неповним загальним завантаженням усього підприємства в цілому.

Виконаємо розрахунки вартості річних витрат на технологічну енергію, виходячи з максимально можливого завантаження і реально існуючого на даний момент завантаження.

Вартість річних витрат на технологічну енергію, виходячи з максимально можливого завантаження для базового і нового варіантів, визначиться за формулами:

$$C_{eГ.з.}^B = C_{el}^B \cdot N_{пл.м.з.}^B = 21000 \cdot 3090 = 64890000 \text{ грн.}; \quad (\text{Д.12})$$

$$C_{eГ.з.}^H = C_{el}^H \cdot N_{пл.м.з.}^H = 19887 \cdot 3191 = 6346914894 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.13})$$

де C_{el}^B , C_{el}^H – розраховані за формулами (Д.10), (Д.11);

$N_{пл.м.з.}^B$, $N_{пл.м.з.}^H$ – кількість плавок за рік у базовому і новому варіантах при максимально можливому завантаженні,

$$N_{пл.м.з.}^B = \frac{\Phi_{эф.мах}}{T_{пл}^B} = \frac{6180}{2} = 3090 \text{ плавок}; \quad (\text{Д.14})$$

$$N_{пл.м.з.}^H = \frac{\Phi_{эф.мах}}{T_{пл}^H} = \frac{6180}{1,9364} = 3191 \text{ плавка}, \quad (\text{Д.15})$$

де $\Phi_{эф.мах}$ – максимальний фонд часу використання ДСП, ч, заданий у вихідних даних (№ 2.3 табл. Д.1), $\Phi_{эф.мах} = 6180$ ч.;

$T_{пл}^B, T_{пл}^H$ – час повного технологічного процесу плавлення, відповідно, у базовому і новому варіантах, задано в таблиці Д.5, $T_{пл}^B = 2$ ч., $T_{пл}^H = 1,9364$ ч.

Вартість річних витрат на технологічну енергію, виходячи з реально існуючого завантаження для базового і нового варіантів, визначиться за формулами:

$$C_{елр.з.}^B = C_{ел}^B \cdot N_{пл.р.з.} = 21000 \cdot 1500 = 31500000 \text{ грн.}; \quad (\text{Д.16})$$

$$C_{елр.з.}^H = C_{ел}^H \cdot N_{пл.р.з.} = 19887 \cdot 1500 = 29830500 \text{ грн.}, \quad (\text{Д.17})$$

де $C_{ел}^B, C_{ел}^H$ – розраховані за формулами (Д.10), (Д.11);

$N_{пл.р.}$ – реальна кількість плавок за рік на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ», задано у вихідних даних (№ 2.4 табл. Д.1), $N_{пл.р.з.} = 1500$.

Звертає на себе увагу та обставина, що річний обсяг продукції, що випускається (виплавленої сталі) для максимального завантаження в базовому варіанті, новому варіанті і для реального завантаження устаткування, буде різним. Визначимо його окремо для кожного випадку:

$$B_{ГМ.з.}^B = N_{пл.м.з.}^B \cdot m_M = 3090 \cdot 50 = 154500 \frac{m}{год}; \quad (\text{Д.18})$$

$$B_{ГМ.з.}^H = N_{пл.м.з.}^H \cdot m_M = 3191 \cdot 50 = 159550 \frac{m}{год}; \quad (\text{Д.19})$$

$$B_{Гр.з.}^B = B_{Гр.з.}^H = N_{пл.р.з.} \cdot m_M = 1500 \cdot 50 = 75000 \frac{m}{год}, \quad (\text{Д.20})$$

де $N_{пл.м.з.}^B, N_{пл.м.з.}^H$ – кількість плавок за рік в базовому і новому варіантах при максимально можливому завантаженні, пораховані в формулах (Д.14), (Д.15);

$N_{пл.р.з.}$ – реальна кількість плавок за рік на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ»,

задано у вихідних даних (№ 2.4 табл. Д.1),

$N_{пл.р.з.} = 1500$; m_m – маса розплавляється за одну плавку металу, задана у вихідних даних (№ 2.2 табл. Д.1).

Д.2.3 Розрахунок економічної ефективності від реалізації впровадження МЕТОДИКИ

Економічна ефективність першого року впровадження МЕТОДИКИ визначається як різниця вартостей витрачається технологічної енергії з урахуванням можливої вартості ПП.

Обчислимо цю ефективність для двох варіантів: з максимально можливим завантаженням обладнання $E_{м.з.}$, грн, і з реальним завантаженням обладнання $E_{р.з.}$, грн:

$$E_{м.з.} = C_{еГм.з.}^B - C_{еГм.з.}^H - 3_{\Sigma} = 64890000 - 6346914894 - 33135,53 = 1387715,53 \text{ грн.}; \quad (Д.21)$$

$$E_{р.з.} = C_{еГр.з.}^B - C_{еГр.з.}^H - 3_{\Sigma} = 31500000 - 29830500 - 33135,53 = 1636364,47 \text{ грн.}, \quad (Д.22)$$

де $C_{еГм.з.}^B$, $C_{еГм.з.}^H$ – вартості річних витрат на технологічну енергію, виходячи з максимально можливого завантаження для базового і нового варіантів, розраховані у формулах (Д.12) (Д.13);

$C_{еГр.з.}^B$, $C_{еГр.з.}^H$ – вартості річних витрат на технологічну енергію, виходячи з реально використовуваного завантаження на ДСП-50 ПрАТ «НКМЗ» для базового і нового варіантів, розраховані у формулах (д.16) (Д.17); 3_{Σ} – загальна сума витрат на створення ПП, визначена в таблиці Д.3.

Д.3 Техніко-економічні показники вдосконаленого процесу

Ця частина економічного оцінювання є заключною. Розрахуємо тут відсутні показники:

- відносна вартість розробок ПП в обсязі капіталовкладень;
- окупність розробок ПП;
- власне техніко-економічні показники.

Д.3.1 Відносна вартість розробок ПП в обсязі капіталовкладень

Відносна вартість розробок ПП в обсязі вартості технологічного обладнання, на якому ці розробки впроваджувалися, визначається за формулою

$$B_{\text{відн.}} = \frac{B_{\text{роб.}} \cdot 100\%}{B_n + B_{\text{СУ}}} = \frac{44732,97 \cdot 100\%}{80000000 + 7000000} = 0,05\%, \quad (\text{Д.23})$$

де $B_{\text{роб.}}$ – вартість робіт з розробки МЕТОДИКИ, грн, визначена у формулі (Д.8), $B_{\text{роб.}} = 44732,97$ грн.;

B_n , $B_{\text{СУ}}$ – балансові вартості печі і СУ ППЕ, грн, задані у вихідних даних (№ 3.1, 3.2 табл. Д.1), $B_n = 80000000$ грн., $B_{\text{СУ}} = 7000000$ грн.

Д.3.2 Окупність розробок ПП

Термін окупності розробок ПП розраховуємо для двох варіантів: при максимально можливому завантаженні обладнання та при реально існуючому на даний момент:

$$T_{\text{ок.м.з.}} = \frac{B_{\text{роб.}}}{E_{\text{м.з.}}} = \frac{44732,97}{1387715,53} = 0,032 \text{ року}; \quad (\text{Д.24})$$

$$T_{\text{ок.р.з.}} = \frac{B_{\text{роб.}}}{E_{\text{р.з.}}} = \frac{44732,97}{1636364,47} = 0,027 \text{ року}; \quad (\text{Д.25})$$

де $B_{\text{роб.}}$ – вартість робіт з розробки МЕТОДИКИ, грн, визначена у формулі (Д.8), $B_{\text{роб.}} = 44732,97$ грн.;

$E_{\text{м.з.}}$, $E_{\text{р.з.}}$ – економічні ефективності від реалізації впровадження, відповідно, з максимально можливим завантаженням обладнання та з реальним завантаженням обладнання, визначені за формулами (Д.21), (Д.22), $E_{\text{м.з.}} = 1387715,53$ грн., $E_{\text{р.з.}} = 1636364,47$ грн.

Д.3.3 Власні техніко-економічні показники

Підсумкові показники порівнюваних варіантів відповідно до наведених у цьому пункті розрахунків наведені в таблиці Д.6.

Таким чином, впровадження результатів досліджень у виробництво викликає поліпшення основних показників економічної ефективності виробництва. Відбувається зниження тривалості плавлення на 3,2 % за рахунок стабілізації довжин дуг, економія енерговитрат при реальному завантаженні обладнання на 5,3 %, пов'язаного зі скороченням тривалості розплавлення шихти. Вартість обладнання і розробок практично не змінюється, оскільки існуючі сучасні мікропроцесорні системи управління ДСП містять вбудовані блоки нечіткої логіки, тому реалізація даного способу компенсації електромеханічних коливань не тягне за собою капітальні вкладення, оскільки зміни виробляються програмно. Єдиними витратами при цьому є витрати, пов'язані з розробленням програмного продукту, які в порівнянні з вартістю обладнання ДСП складають лише 0,05 %. Річна економічна ефективність від застосування розробленої удосконаленої СУ при реально існуючому завантаженні обладнання на ПрАТ «НКМЗ» становить понад 1,5 млн грн. А термін окупності становить менше місяця.

Таблиця Д.6 – Підсумкові показники порівнюваних варіантів

Но- мер	Найменування показників, розмірність		Варіант		Відхилення: (+) - збільшення; (-) - зменшення		
			Базовий	Новий	Базова єдиниця	%	
1	Час плавлення, ч / плавка		2	1,936	-0,064	-3,2	
2	Технологічна енергія, грн / рік	Завантаження	Реальне	64 890 000	63 469 148	-1 420 851	-2,2
			Макс.	31 500 000	29 830 500	-1 669 500	-5,3
3	Вартість обладнання і розробок, грн.		87 000 000	87 044 732	+44 732	0,05	
4	Річна економічна ефективність, грн.	Завантаження	Реальне	138 7715			
			Макс.	1 636 364,47			
5	Термін окупності, рік.	Завантаження	Реальне	0,032			
			Макс	0,027			

Наукове видання

ЛЮГА Анастасія Володимирівна

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
ПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ
ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Монографія

Редагування і комп'ютерне верстання

І. І. Дьякова

79/2017 Формат 60 x 84/8. Ум. друк. арк. 8,6. .
Обл.-вид. арк. 5,57. Тираж 300 пр. Зам. № 7.

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003