Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

«*Система автоматичного керування процесом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі*»

Виконав студент гр. АКІТ-20 _____ Пузирей К. С.

Керівник _____ Маринич І. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2024

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: *інформаційних технологій*

Кафедра: *автоматизації, комп'ютерних наук і технологій*

Ступінь вищої освіти: *Бакалавр*

Спеціальність: *151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: *к.т.н. Рубан С.А.*

_____

« *25* » *березня* 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-20 *Пузирею Кирилу Сергійовичу*

1. Тема кваліфікаційної роботи: *«Система автоматичного керування процесом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі»*

затверджено наказом по університету № *231с* від *25.03.2024 р.*

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: *03.06.2024 р.*

3. Склад кваліфікаційної роботи: *Пояснювальна записка обсягом 75с., презентація у Microsoft PowerPoint (11 слайдів) в електронному та друкованому вигляді*

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2 доц. Маринич І. А.

_____

Нормоконтроль доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	*Вступ*	*01.03.24*
2	*Розділ 1*	*05.04.24*
3	*Розділ 2*	*01.05.24*
4	*Висновки*	*25.05.24*
5	*Оформлення кваліфікаційної роботи*	*28.05.24*
6	*Підготовка презентації та графічного матеріалу*	*20.05.24*
7	*Підготовка доповіді до захисту*	*03.06.24*

6. Дата видачі завдання: *29.01.2024р.*

Керівник _____ / Маринич І. А./

7. Запевнення: *Я, Пузирей Кирило Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.*

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Пузирей К. С./

АНОТАЦІЯ

Пузирей К. С. «Система автоматичного керування процесом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти – бакалавр, за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку літератури з 31 позиції та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 73 сторінки, з яких основний зміст роботи викладено на 60 сторінках, робота включає 2 таблиці і 38 рисунки.

Об'єктом керування є система переміщення електродів дугової сталеплавильної печі.

Метою роботи є підвищення якості виплавки сталі у дуговій сталеплавильній печі за рахунок вдосконалення автоматичного керування процесом переміщення електродів.

У першому розділі наведено загальну характеристику процесу виплавки сталі у дугових печах, описано характеристики існуючих систем автоматизації, висунуті вимоги до системи автоматичного керування.

У другому розділі проведена перевірка функціональності системи автоматичного керування та інтерфейсу підтвердила, що програмне забезпечення для об'єкта керування, регулятора та інтерфейсу працює коректно і відповідає вимогам системи автоматичного керування швидкістю переміщення електродів дугової сталеплавильної печі.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧЬ, ЛЮДИНО-МАШИНИЙ ІНТЕРФЕЙС, МОДЕЛЮВАННЯ, ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ, СИНТЕЗ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП……6
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕССА ТА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ….8
1.1 Загальна характеристика виробництва……...8
1.2 Аналіз технологічного процесу……...9
1.3 Аналіз об'єкта керування…….14
1.3.1 Загальна характеристика дугової печі……..14
1.3.2 Структура дугової печі……..…….15
1.3.3 Принцип функціонування дугової печі…….18
1.4 Постановка завдання……20
Висновки до розділу……..21

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ…….23
2.1 Загальна структура системи автоматичного керування……23
2.2 Розробка та ідентифікація моделі об'єкту керування……24
2.3 Критерії якості функціонування розробленої системи…….33
2.4 Синтез системи автоматичного керування…….……37
2.5 Оцінка якості функціонування системи керування……43
2.6 Цифрова модель об'єкта керування…….……45
2.7 Реалізація програмного забезпечення для системи керування…….…50
2.8 Реалізація програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу……..52
Висновки до розділу……..58

ВИСНОВКИ……...60
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ……...62
ДОДАТОК А. Програмні модулі системи управління……...65
ДОДАТОК Б. Програмне забезпечення системи керування…….68
ДОДАТОК В. Програмне забезпечення людино-машинного інтерфейсу…...70

ВСТУП

Металургія є однією з провідних галузей економіки України, і її розвиток значною мірою залежить від впровадження інноваційних технологій. Останнім часом одним із перспективних методів виробництва сталі стало використання електричних печей. Завдяки їм можна створювати і точно контролювати необхідні температурні умови, що дає змогу виробляти сталь із заданими характеристиками, з мінімальним вмістом шкідливих домішок і неметалевих включень.

На сьогоднішній день електродугові печі стали одними з найпоширеніших пристроїв в електрометалургії. В основі роботи електродугових печей лежить використання електричного дугового розряду, який є електротермічним явищем. Електрична дуга, або дуговий розряд, відноситься до складних електричних процесів у газах, викликаних термоелектронним випромінюванням, і характеризується високою щільністю струму при низькому падінні потенціалу, високою температурою горіння та характерним світінням, колір якого залежить від типу газу, в якому він відбувається.

До основних переваг електродугових печей можна віднести високу продуктивність, гнучкість у використанні різних видів сировини, а також наявність як малопотужних, так і великопотужних пристроїв.

Обсяги виробництва сталі в електричних печах продовжують зростати, і на сьогодні частка сталі, отриманої цим методом, у світовому масштабі становить близько 30%. Згідно з прогнозами, ця частка буде збільшуватися, зокрема й в Україні, за рахунок зменшення частки мартенівського сталеварства. Разом із зростанням виробництва легованих сталей, в останні роки також спостерігається зростання виробництва в електродугових печах вуглецевих сталей звичайних марок.

Таким чином, впровадження інноваційних методів синтезу систем керування з метою покращення якості керування технологічними процесами у дугових сталеплавильних печах є актуальним завданням

Метою роботи є підвищення якості виплавки сталі у дуговій сталеплавильній печі за рахунок вдосконалення автоматичного керування процесом переміщення електродів.

Для вирішення завдання необхідно:

– ознайомитися з технологічним процесом плавки у дугових сталеплавильних печах;

– проаналізувати існуючі системи керування;

– реалізувати вдосконалену систему керування;

– виконати тестування вдосконаленої системи керування.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика виробництва

Металургія включає в себе широкий спектр процесів, таких як попередня обробка руд, добутих із землі, отримання та рафінування металів і сплавів, а також надання їм певної форми та властивостей.

Традиційно металургія поділяється на чорну і кольорову. Чорна металургія займається виробництвом сплавів на основі заліза, таких як чавун, сталь і феросплави, які складають близько 95% всієї металопродукції у світі. Кольорова металургія охоплює виробництво більшості інших металів, включаючи дорогоцінні, рідкісні й радіоактивні. У зв'язку з використанням атомної енергії все більше уваги приділяється виробництву радіоактивних металів.

Металургійні процеси також застосовуються для виробництва напівпровідників і неметалів, таких як кремній, германій, селен, телур, миш'як, фосфор і сірка. Деякі з цих матеріалів отримують як побічні продукти при видобутку металів. Загалом сучасна металургія охоплює процеси отримання майже всіх елементів періодичної системи, окрім галогенів і газів.

Постійний розвиток технологій і поява нових промислових галузей створюють попит на високоякісні сталі та сплави [2]. Особливі вимоги до якості цих матеріалів пред'являються в ракетній техніці, точному приладобудуванні, машинобудуванні, а також у радіотехнічній, авіаційній, хімічній та інших промислових галузях. Високоякісні сталі характеризуються низьким вмістом шкідливих домішок, таких як сірка (<0,05%), фосфор

(<0,04%) і кисень. До їх складу часто входять різні легуючі елементи, такі як хром, нікель, вольфрам, молібден, титан, ванадій та інші, які надають сталі унікальних фізичних і механічних властивостей. Основним методом виробництва цих високоякісних сталей є дугові електропечі.

Електричні печі дозволяють точно контролювати та регулювати температурні умови процесу, а також забезпечувати плавку в різних атмосферних умовах: окислювальній, відновній, нейтральній чи навіть у вакуумі [3]. Завдяки цим можливостям можна отримувати сталь із заданим складом і мінімальним вмістом шкідливих домішок та неметалічних включень.

Виробництво сталі в електропечах постійно зростає, і на сьогодні приблизно 30% світової сталі виплавляється в електричних печах [3]. За прогнозами, ця частка продовжить збільшуватися, зокрема в Україні, завдяки зменшенню частки сталі, що виплавляється в мартенівських печах. Зі зростанням виробництва легованих сталей останніми роками також збільшується виплавка звичайних вуглецевих сталей в електродугових печах. Нині в багатьох країнах, включно з Україною, використовуються електродугові печі місткістю 80-100 тн. і 200 тн.

Отже, впровадження інноваційних методів синтезу систем управління з метою підвищення якості автоматичного контролю технологічних процесів в електричних сталеплавильних печах є важливим і актуальним завданням.

1.2 Аналіз технологічного процесу

Суттєвою відмінністю виробництва сталі в дугових печах є можливість створення відновної або нейтральної атмосфери та зміни тиску в плавильному просторі [4]. За рахунок відновної атмосфери у ДСП є можливість отримати шлак з вмістом FeO наприкінці плавки, що не перевищує 1%, що приблизно в 10 разів менше, ніж у стандартному шлаку мартенівських печей.

Іншою відмінністю є те, що в атмосфері печі відсутній природний

кисень. Тому для проведення окислювальних процесів потрібне постачання зовнішнього кисню, у якості джерел якого є газоподібний кисень, який уводиться до ванни печі або залізна руда.

З цієї ж причини втрати металу через випаровування (чад) є меншими. Можливість вести плавку на шлаку з вищою температурою плавлення і перегрівом у умовах основного процесу полегшує десульфурацію (процес, що видаляє сірку з розплавленого металу, як-от чавун або сталь). Сірка міцно зв'язується в сульфіди: сульфід кальцію, і потім переходить у шлак. Під час основного процесу плавки створюються всі умови, необхідні для отримання сталі з мінімальним вмістом сірки.

Проте процес дефосфорації (процес, що видаляє фосфор з розплавленого чавуну, шлаку або сталі) у ДСП менш ефективний.

Водночас електродугові печі забезпечують сприятливі умови для переплавлення високолегованих відходів, оскільки мають мінімальні втрати дефіцитних легуючих елементів.

Особливістю виплавки сталі у ДСП є те, що процес може відбуватися з одним шлаком, без необхідності проведення спеціального відновного періоду. Це значно скорочує тривалість плавки, зменшує споживання електроенергії і покращує всі техніко-економічні показники процесу.

Під час електроплавлення кінцевий результат переважно визначається взаємодією двох фаз: металевої і шлакової. В інших процесах, таких як мартенівська плавка, залучені три фази: металева, газова і шлакова.

З точки зору можливості використання фізико-хімічних чинників для досягнення оптимальних результатів, електроплавлення вважається більш досконалим. Багато дефектів у відливах з легованих сталей виникають через низьку якість металу або посилюються через присутність чотирьох шкідливих домішок: кисню, сірки, водню і фосфору. Електроплавлення є найбільш гнучким процесом, який дозволяє ефективно боротися з трьома з цих домішок: киснем, сіркою і воднем.

На рисунку 1.1 наведено послідовність роботи дугової печі за

технологічними стадіями [5, 6].

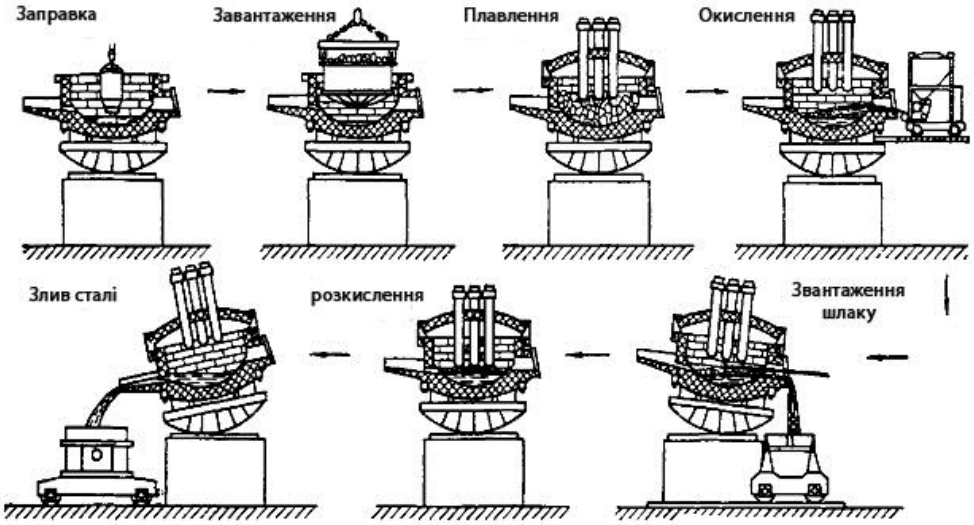


Рисунок 1.1 – Технологічна схема роботи сталеплавильної печі

Плавка в дуговій печі починається із заправки печі (рис. 1.1). Оскільки гарячі шлаки, які є рідкими і рухливими, сильно роз'їдають футерування, це футерування може бути пошкоджене під час завантаження. Якщо подину печі вчасно не покрити шаром рідкого металу та шлаку, то електричні дуги можуть її пошкодити. Тому перед початком плавки необхідно провести ремонт (заправка подини).

Перед цим з поверхні подини видаляють усі залишки металу та шлаку, а на пошкоджені ділянки подини й укосів (зони, де подина переходить у стіни печі) кидають сухий магнезитовий порошок. Якщо пошкодження значні, використовують порошок з додаванням пеку або смоли.

Заправку виконують за допомогою спеціальної заправної машини, яка викидає заправні матеріали через насадку під тиском стислого повітря, або розкидає матеріали по колу за допомогою диска, який швидко обертається і опускається у відкриту піч зверху.

Для оптимального використання робочого простору ДСП до її центральної частини, як умога ближче до електродів, завантажують досить великі шматки металу (40% від загального обсягу). Ближче до укосів

розміщують середній лом (45%), а на дно та зверху - дрібний лом (15%). Дрібні шматки металу мають заповнювати проміжки між великими шматками. Плавка сталі відбувається в робочому просторі, який обмежений зверху куполоподібним зведенням, знизу сферичною подиною, а з боків стінками.

Вогнетривка кладка подини і стін печі розміщена в металевий кожух, який забезпечує структуру і стабільність печі. Знімне зведення, яке створене з вогнетривкої цегли, спирається на опірне кільце для стабільності та підтримки. В робочий простір печі через три симетрично розташовані отвори введені струмопровідні електроди, які можуть переміщатися вгору і вниз за допомогою спеціальних механізмів, щоб контролювати процес плавки. Піч живиться трифазним електричним струмом, що забезпечує ефективну та стабільну роботу електродів і процесу плавки.

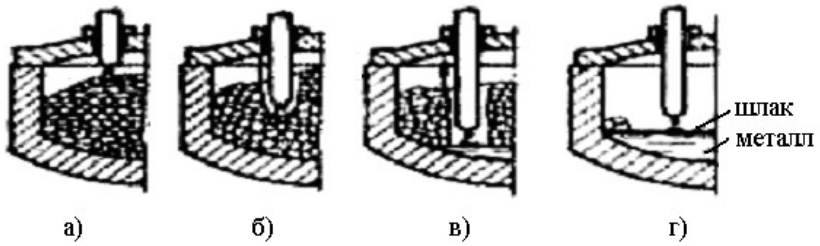
Шихтові матеріали завантажують на подину печі, і після їх розплавлення утворюється шар металу та шлаку. Плавлення та нагрів здійснюються теплом електричних дуг виникаючих між електродами та рідким металом (металевою шихтою). Вихід готового шлаку та сталі проводиться через сталевипускний отвір і жолоб шляхом нахилу робочого простору печі. Робоче вікно, яке закривається заслінкою, призначене для контролю за процесом плавки, ремонту подини та завантаження матеріалів.

Виплавка сталі включає такі етапи (рис. 1.1): розплавлення металу, видалення шкідливих домішок та газів, розкислення металу, а потім випуск його з печі в ківш для подальшого розливання у форми. Важливість кожного з цих етапів та вимоги, які вони висувають до дугової печі, можуть значно варіюватися.

Розплавлення скрапу слід проводити якнайшвидше і з мінімальними енерговитратами. Часто тривалість цього етапу становить понад половину всього часу плавки і при цьому споживається від 60 до 80% усієї електроенергії. Характерна особливість цього періоду полягає в нестабільному електричному режимі печі. Дуга, що виникає між кінцем

електроду і холодним металом, є нестійкою, її довжина невелика, і навіть незначні зміни в положенні електроду або скрапу (обвал або зміщення підплавленого шматка) можуть призвести до обриву дуги або, навпаки, короткого замикання. Схема процесу плавлення шихти в дуговій печі представлена на рис. 1.2.

Спочатку дуга виникає між кінцем електроду і поверхнею шихти (рисунок 1.2,а). Для підвищення стійкості дуги з початку під електроди підкладають електродний бой або шматки коксу. Після того як вони згорять, починається плавлення металу, який стікає краплями на подину печі. В шихті утворюються "колодязі", в які занурюються електроди (рис. 1.2,б), і вони опускаються доти, доки не досягнуть подини. До цього моменту на подині має утворитися калюжа розплавленого металу, щоб запобігти перегріву (рис. 1.2,в).



а - початок плавки; б - опускання електродів; в - підйом електродів; г - закінчення плавки

Рисунок 1.2 – Етапи плавлення шихти

Це найбільш нестабільний і неспокійний період горіння дуги. Підплавлені шматки шихти можуть падати на електрод і викликати коротке замикання дуги. Якщо шматок шихти опуститься під торцем електрода, це може, навпаки, призвести до обриву струму. Дуга, що горить між електродом і розплавленим металом, може перегрівати метал, що призводить до розмиву та розплавлення шихти, яка оточує "колодязі", які розширюючись підвищують рівень рідкого металу у ванні, що призводить до поступового піднімання електродів (рис. 1.2,в)

Наприкінці цього періоду майже весь метал вже розплавлений,

залишається лише кілька окремих шматків шихти на схилах печі ("настили", рис. 1.2,г), які розплавляються останніми. Щоб прискорити цей процес, ці "настили" зазвичай зіштовхують ломом у глибину ванни. Період розплавлення вважається завершеним, коли весь метал у печі перейшов у рідкий стан. Перед цим моментом режим горіння дуги є стабільнішим, оскільки температура в печі вища, а поверхня металу покрита шаром шлаку, що утворився з шматків вапна, кинутих у піч під час розплавлення, та оксидів, які сплили.

Довжина дуги збільшується порівняно з початком періоду розплавлення, дуга стає стабільнішою, а кількість коротких замикань та обривів струму зменшується.

1.3 Аналіз об’єкта керування

Технологічним об’єктом керування виступає механізм переміщення електродів дугової печі.

1.3.1 Загальна характеристика дугової печі

Дугова піч складається з робочого простору (самої печі) з електродами і струмопідводами, а також механізмів, які забезпечують нахил печі, завантаження шихти, переміщення та утримання електродів [5, 6].

Установка дугової печі є великим споживачем електроенергії, з потужністю, яка може складати десятки тисяч кіловат. Витрати електроенергії на розплавлення однієї тони твердої шихти можуть досягати 400-600 кВт-год. Живлення печі забезпечується через понижуючий пічний трансформатор 510 В, при напрузі мережі 35 кВ.

Установка дугової печі включає спеціальну пічну підстанцію, яка розташована безпосередньо біля печі, щоб забезпечити ефективне живлення та управління. Щити і пульти управління розміщені в окремому приміщенні, звідки зручно спостерігати за процесом плавки через робочі вікна печей.

Електрична дугова піч споживає великі струми, які вимірюються десятками тисяч ампер. Ланцюги, що з'єднують пічний трансформатор з електродами печі, мають невелику довжину і складну конструкцію, відому як коротка мережа.

В електроприводах механізмів печі зазвичай використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які працюють при напрузі 380 В і мають потужність до 20 кВт. Двигуни, які приводять у дію механізми дугових печей, працюють у складних умовах, таких як запилене середовище та близьке розташування до сильно нагрітих конструкцій печі. Через це вони мають закрите виконання і використовують теплостійку ізоляцію, щоб забезпечити надійність та безпеку роботи..

Таблиця 1.1 − Технічні характеристики ДСП-100НЗА

Параметр	Значення
Номінальна місткість, т	200
Номінальна потужність трансформатора, В-А	250 000
Первинна напруга, В	510
Межі вторинної напруги, В	417–131
Максимальний струм печі, кА	34,6
Максимальна швидкість переміщення електроду, м/с	0,085

1.3.2 Структура дугової печі

Дугова сталеплавильна піч ДСП-200 (рис. 1.3) з місткістю 200 тонн складається з таких основних компонентів:

1. Графітований електрод діаметром 710 мм – основний елемент, що генерує електричну дугу.

2. Електродоутримувач – забезпечує надійне кріплення електроду.

3. Зведення – верхня частина печі, яка може зніматися для доступу до внутрішнього простору.

4. Водоохолоджуюче склепінне кільце – забезпечує стабільність конструкції та охолодження.

5. Циліндричний кожух – зовнішня оболонка печі, яка захищає від високих температур.

6. Водоохолоджуючі допоміжні дверці – використовуються для додаткового доступу і огляду.

7. Електромеханічний механізм повороту печі навколо вертикальної осі – дозволяє обертати піч для рівномірного розподілу шихти.

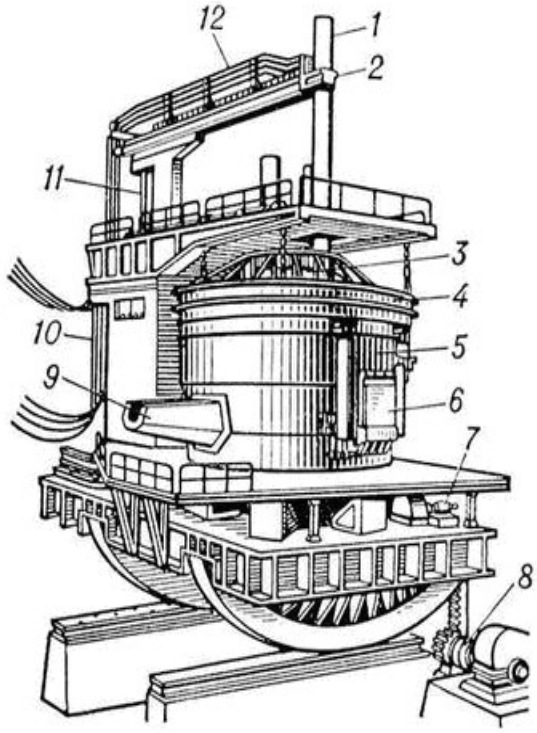


Рисунок 1.3 – Дугова сталеплавильна піч ДСП–200

8. Електромеханічний механізм нахилу печі – використовується для випуску розплавленого металу та шлаку.

9. Зливний носик – призначений для контролю виливання сталі.

10. Рухливий струмопровід з водоохолоджуваними гнучкими кабелями – забезпечує гнучке підведення електроенергії.

11. Шток вертикального переміщення системи: «стійка – рукав – електродоутримувач – електрод» – для переміщення електрода у вертикальному напрямку.

12. Струмопровід з охолоджуючими мідними трубами – забезпечує стабільне електропостачання та охолодження.

Шток (поз. 11 на рис. 1.3) є фактично вихідним елементом об'єкта керування, яким є пристрій переміщення електродів ДСП. Вхідним параметром цього об'єкта управління є сигнали управління для електропривода, який відповідає за переміщення електродів і бере участь у формуванні потужності, що вводиться в піч. Вихідним параметром об'єкта управління є швидкість руху електродів.

У дугових печах для переміщення електродів зазвичай використовують електрогідравлічні або електричні приводи, які оснащені двигунами постійного струму з незалежним збудженням. Потужність двигунів, які застосовуються для руху електродів у дугових печах, варіюється в межах від 1 до 20 кВт.

Структура електрогідравлічного приводу майже не зазнала значних змін протягом тривалого часу, тоді як види електричних приводів суттєво розширилися за останнє десятиліття завдяки розвитку силової напівпровідникової техніки. Промисловість активно виробляє транзисторні перетворювачі частоти, на основі яких створено частотно-регульовані приводи з асинхронними короткозамкненими двигунами, які конкурентоспроможні за своїми регулювальними характеристиками, розмірами та вартістю порівняно з приводами постійного струму. Тиристорні регулятори напруги, що використовуються для плавного пуску асинхронних двигунів, також набувають все більшого поширення. Управління приводами все частіше покладається на сучасні мікропроцесорні технології, що додає свої особливості в цей процес.

Відповідно до зазначених тенденцій, варто розглянути впровадження нової структури об'єкта керування, яка більш відповідає сучасним вимогам електричних приводів. Заміна двигунів постійного струму, що використовують контактний колекторно-щітковий вузол і погіршують експлуатаційні характеристики в умовах запиленого середовища і високих температур на привод АД-ПЧ (з коротко-замкненим ротором) виглядає актуальним рішенням.

1.3.3 Принцип функціонування дугової печі

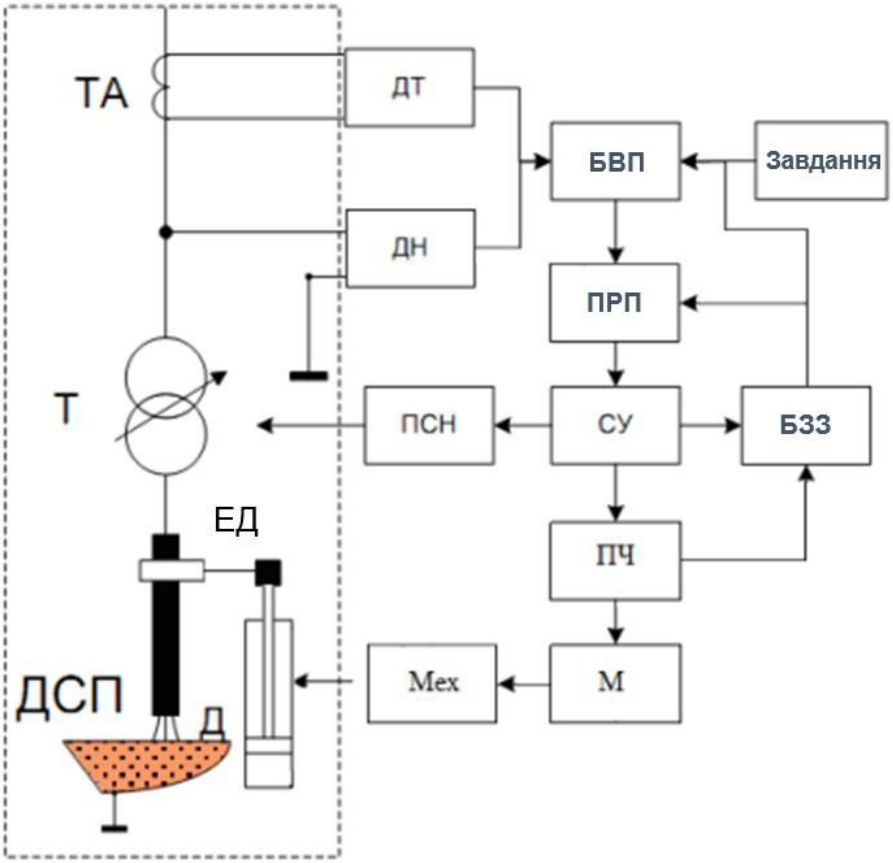
Технологічний процес плавки в дугових печах вимагає автоматичного запалення дуги на різних стадіях процесу, зокрема під час первинного включення печі, при обриві дуги, або при усуненні технологічних коротких замикань, які можуть виникнути через обвал шихти [5, 6]. Точність і швидкість системи керування дуговою плавильною піччю мають вирішальне значення для її продуктивності та енергоефективності. Для підтримки дуги сила струму може досягати 10–15 кА , а напруга подається в межах 120–600В.

Хоча регулятори потужності зазвичай мають відносно просту кінематику, але їхня нелінійність і різноманітні типи зв'язків ускладнюють визначення параметрів регуляторів. Доцільним вважається застосування електричного приводу для переміщення електродів.

Принцип роботи регулятора потужності можна зобразити наступною функціональною схемою (на рис. 1.4).

Датчики струму (ДТ) і напруги (ДН) вимірюють відповідні параметри та передають сигнали зворотного зв'язку на блок вимірювання і порівняння (БВП). Після порівняння цих сигналів з заданими значеннями різниця між ними надходить до підсилювально-регулюючого пристрою (ПРП).

Цей пристрій, залежно від обраного параметра регулювання (струм, напруга, диференціальний струм тощо), генерує керуючий сигнал. Далі цей сигнал через систему управління (СУ) перемикає сходинки напруги силового трансформатора (Т) за допомогою перемикача східців напруги (ПСН) або управляє механізмом переміщення електродів, який складається асинхронного двигуна (М), механізму переміщення електродів (Мех) та перетворювача частоти (ПЧ).



ДН − датчик напруги; ДТ − датчик струму; ПРП − підсилюючий регулюючий пристрій; БВП − блок виміру і порівняння; Т − трансформатор; ПЧ − перетворювач частоти; СУ − система управління; М − асинхронний двигун; Мех − механізм переміщення електроду ПСН – перемикач східців напруги.

Рисунок 1.4 – Функціональна схема регулятора потужності дугової печі

З технологічних причин електричний режим у дугових печах (ДП) залишається нестабільним протягом усієї плавки і супроводжується постійними коливаннями потужності, яка вводиться в піч. Відхилення від номінального електричного режиму знижує продуктивність і погіршує техніко-економічні показники. Зміна потужності в дугових печах відбувається шляхом переміщення електродів. Для кожної з трьох фаз живильної мережі використовують окремі регулятори потужності, що дозволяє їм працювати незалежно один від одного.

Традиційно для переміщення електродів у дугових печах використовують електрогідравлічні або електричні приводи з двигунами постійного струму незалежного збудження. Потужність двигунів, які

застосовуються для переміщення електродів у дугових печах, становить від 1 до 20 кВт.

Отже, вхідним параметром об'єкта управління є сигнал керування для електропривода переміщення електродів, який впливає на формування потужності, що подається в піч. Вихідним параметром об'єкта управління є швидкість переміщення електродів.

1.4 Постановка завдання

Завдання для досягнення кращого керування процесом переміщення електродів у дуговій сталеплавильній печі:

1. Аналіз існуючої системи керування:

- Вивчення та опис поточної системи керування переміщенням електродів, включаючи її архітектуру, алгоритми та програмне забезпечення.
- Ідентифікація обмежень та недоліків існуючої системи, які негативно впливають на якість виплавки сталі.
- Визначення ключових параметрів, які потребують вдосконалення, таких як точність позиціонування електродів, швидкість переміщення та стійкість до збурень.

2. Розробка вдосконаленої системи керування:

- Визначення нових вимог та специфікацій для вдосконаленої системи керування, ґрунтуючись на результатах аналізу.
- Розробка нових алгоритмів та методів керування, які забезпечують більш точне, швидке та стійке керування переміщенням електродів.
- Використання сучасних методів моделювання та оптимізації для розробки оптимальних параметрів системи керування.

3. Впровадження та тестування вдосконаленої системи керування:

- Інтеграція нової системи керування з існуючою системою автоматизації дугової сталеплавильної печі.

– Проведення комплексного тестування та налагодження нової системи керування для забезпечення її стійкої та надійної роботи.

– Оцінка впливу вдосконаленої системи керування на якість виплавки сталі за допомогою експериментів та промислових випробувань.

4. Очікувані результати:

– Покращення точності позиціонування електродів, що призведе до більш однорідного розподілу тепла та зниження втрат металу.

– Збільшення швидкості переміщення електродів, що скоротить час плавки та підвищить продуктивність.

– Покращення стійкості системи керування до збурень, що призведе до більш стабільного процесу виплавки та зниження кількості браку.

– Зниження загальних експлуатаційних витрат за рахунок економії енергії та зменшення втрат металу.

– Покращення якості виплавленої сталі за рахунок більш точного контролю складу та властивостей.

Висновки за розділом:

Для зменшення похибки позиціонування електрода, з урахуванням обмежень на швидкість його переміщення та прискорення, пропонується застосувати систему підпорядкованого автоматичного керування. У внутрішньому контурі регулювання здійснюється за швидкістю з використанням методу параметричної оптимізації для налаштування регулятора, що дозволяє усунути похибку швидкості та, як результат, зменшити похибку позиціонування електрода. У зовнішньому контурі керування базується на відстані, яку електрод пройшов.

Об'єкт керування в даному випадку є безперервним і одномірним, з одним керуючим входом (сигнал управління на перетворювач частоти приводу механізму переміщення електродів) і одним контрольованим виходом (швидкість переміщення електродів). Проте цей об'єкт складний для управління, оскільки, з одного боку, є досить жорсткі вимоги до швидкодії

системи, а з іншого боку, існують обмеження на керуючий вплив і його диференціал у часі. Для досягнення цієї мети важливо експериментально вивчити залежність між параметрами регулятора швидкості переміщення електроду та максимальним значенням керуючого сигналу, враховуючи обмеження об'єкта управління. Після цього можна налаштувати регулятор швидкості таким чином, щоб забезпечити оптимальний розгін та гальмування електроду без порушення допустимих меж керуючого сигналу та його диференціалу у часі.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

2.1 Загальна структура системи автоматичного керування

Дугова сталеплавильна піч, з точки зору системи керування, є об'єктом неперервного регулювання. Сигналом керування для даної системи виступає сигнал, що подається на електропривод переміщення електродів. Цей сигнал визначає швидкість руху електродів.

Швидкість руху електродів регулюється за допомогою частотного перетворювача. Він контролює швидкість обертання двигуна приводу механізму переміщення електродів. Діапазон регулювання становить від 0 до 100%. 0% відповідає нульовій швидкості поступального руху електродів (0 м/с), а 100% - максимальній швидкості, яка становить 0,085 м/с.

Вдосконалення системи керування цим процесом може призвести до покращення якості виплавленої сталі.

Враховуючи це, система керування має включати такі компоненти:

- Датчик швидкості обертального руху, який вимірює швидкість в діапазоні від 0 до 1000 обертів на хвилину.

- Частотний перетворювач, що регулює швидкість двигуна.

- Пристрій керування, що встановлює швидкість обертання валу двигуна механізму переміщення електродів на основі виміряної швидкості їхнього руху.

- Пульт оператора, для завдання режиму роботи системи керування.

Ці компоненти дозволяють створити ефективну систему автоматичного керування, яка забезпечує стабільне і плавне переміщення електродів відповідно до встановлених обмежень по швидкості та прискоренню (рис. 2.1).

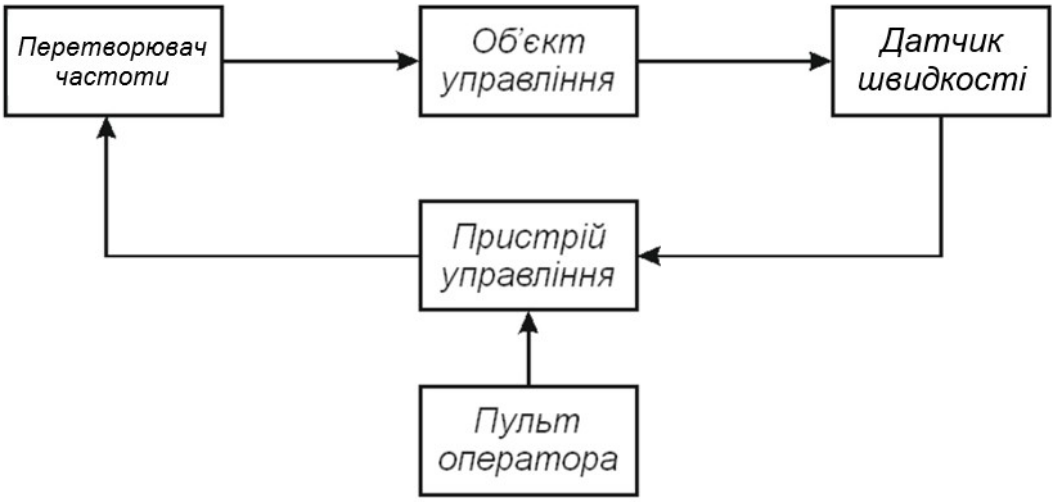


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи автоматичного керування

2.2 Розробка та ідентифікація моделі об’єкту керування

Основою моделі об'єкта управління є диференційне рівняння, представлене у формі передаточної функції (ПФ), яка встановлює аналітичний зв'язок між керуючим впливом (сигналом, що подається на перетворювач частоти асинхронного двигуна приводу електродів) і керованою величиною (швидкість переміщення електродів). Експериментальні дані, отримані при подачі ступінчастого керуючого впливу зі швидкістю 0,7 м/с при максимальному значенні 1,1 м/с (рис. 2.2), використанні щоб обґрунтувати вид ПФ та її параметрів.

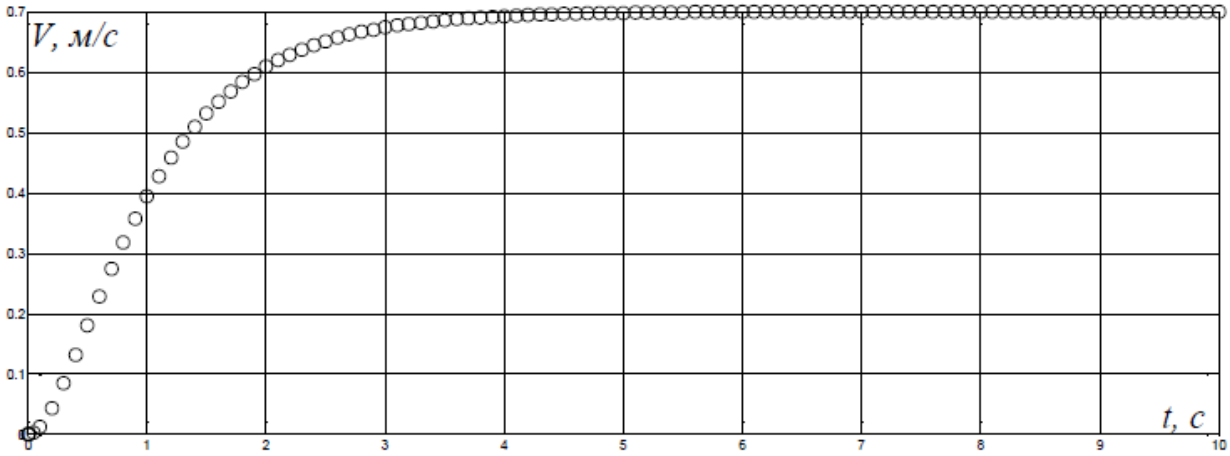


Рисунок 2.2 – Експериментальна крива розгону (ступінчастий вплив)

Ці дані дозволяють визначити точні параметри моделі та забезпечити адекватне управління швидкістю переміщення електродів.

Для ідентифікації об'єкта керування використовується бібліотека System Identification Tool системи Matlab, яка дозволяє автоматизувати процедуру ідентифікації. Щоб забезпечити високу точність ідентифікації, спершу слід провести аналіз експериментальної кривої розгону, наведеної на рис. 2.1. Цей аналіз допоможе виявити характерні параметри об'єкта, такі як сталі часу, коефіцієнти підсилення та інші важливі властивості, які визначають динаміку системи. Після цього можна використовувати "System Identification Tool" для автоматичного визначення передаточної функції об'єкта управління на основі отриманих експериментальних даних.

З рисунка 2.2 видно, що об'єкт має властивість самовирівнювання, тобто він є статичним, оскільки вихідна величина прагне до значення 0,7 м/с. Це дозволяє зробити висновок, що в передаточній функції об'єкта управління немає інтегруючої ланки, а коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці (вихідна величина співпадає з керуючим впливом). Це вказує на те, що об'єкт досить стабільний і відгукується на керуючий вплив без тривалого накопичення помилок або відхилень, що спрощує моделювання та регулювання системи керування.

На графіку кривої розгону (рис. 2.2) видно, що немає чітких коливань, що дозволяє зробити висновок про відсутність комплексних коренів у передаточній функції об'єкта управління.

Також з рисунка 2.2 можна помітити, що у момент подачі сигналу керування спостерігається постійне збільшення цієї величини. Це означає, що у передаточній функції об'єкта управління немає транспортного запізнення, що спрощує аналіз та передбачення реакції системи на керуючий вплив. Таким чином, об'єкт управління відповідає керуючим сигналам досить швидко і без значних затримок.

Отже, виходячи з вищезазначених спостережень, можна припустити, що передаточна функція об'єкта управління складається з одного або кількох

послідовно з'єднаних аперіодичних ланок. Для підтвердження цього припущення та визначення оптимальної структури передаточної функції, скористаємося інструментом "System Identification Tool" в програмі Matlab.

Метою є аналіз результатів ідентифікації з різною кількістю аперіодичних ланок у передаточній функції, щоб визначити найбільш підходящий варіант, який точно відображає поведінку об'єкта управління. Застосувавши цей інструмент, можна в автоматичному режимі отримати різні моделі та порівняти їх з експериментальними даними, щоб вибрати оптимальну структуру передаточної функції.

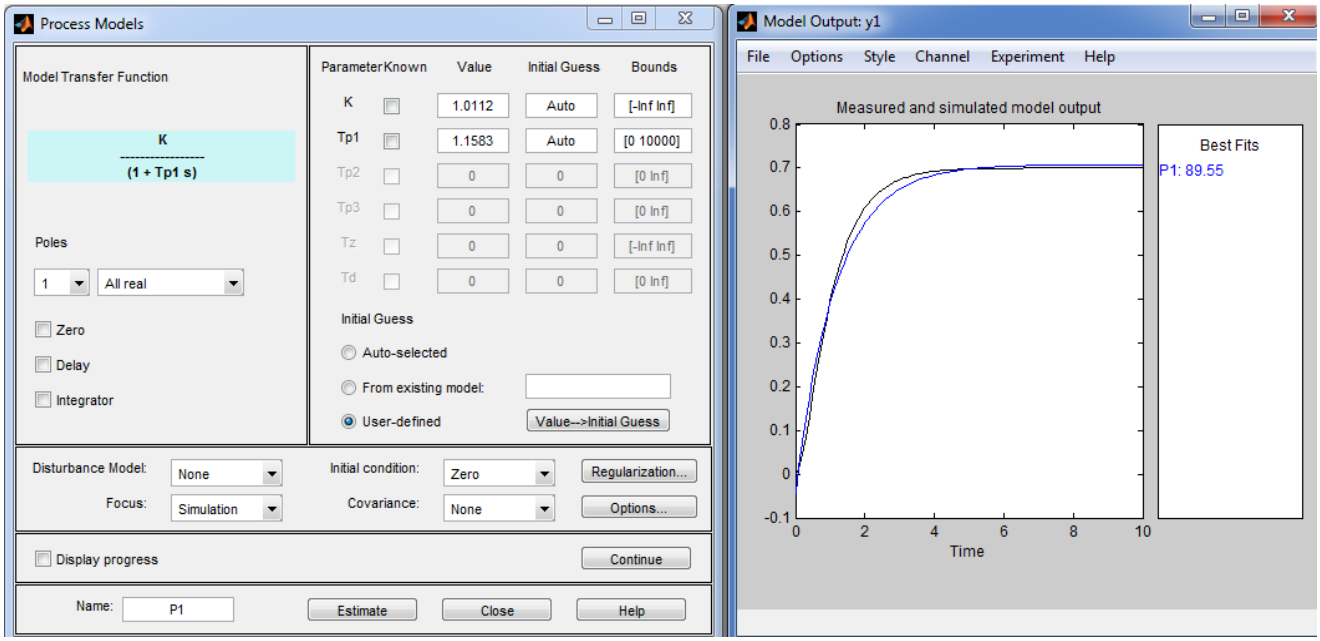


Рисунок 2.3 – Результат ідентифікації об’єкта керування представленого аперіодичною ланкою

За результатами ідентифікації об'єкта управління, з використанням аперіодичної ланки як передаточної функції, на рисунку 2.3 видно, що постійна часу дорівнює 1,158 с (ліве зображення). Відносний показник збігу експериментальної кривої з графіком перехідного процесу на виході моделі об'єкта управління складає 89,55% (праве зображення), де 100% означає повний збіг кривих, а 0% — їхню повну невідповідність. Це свідчить про досить добру відповідність моделі об'єкта управління реальній системі, але є деякий простір для вдосконалення та підвищення точності.

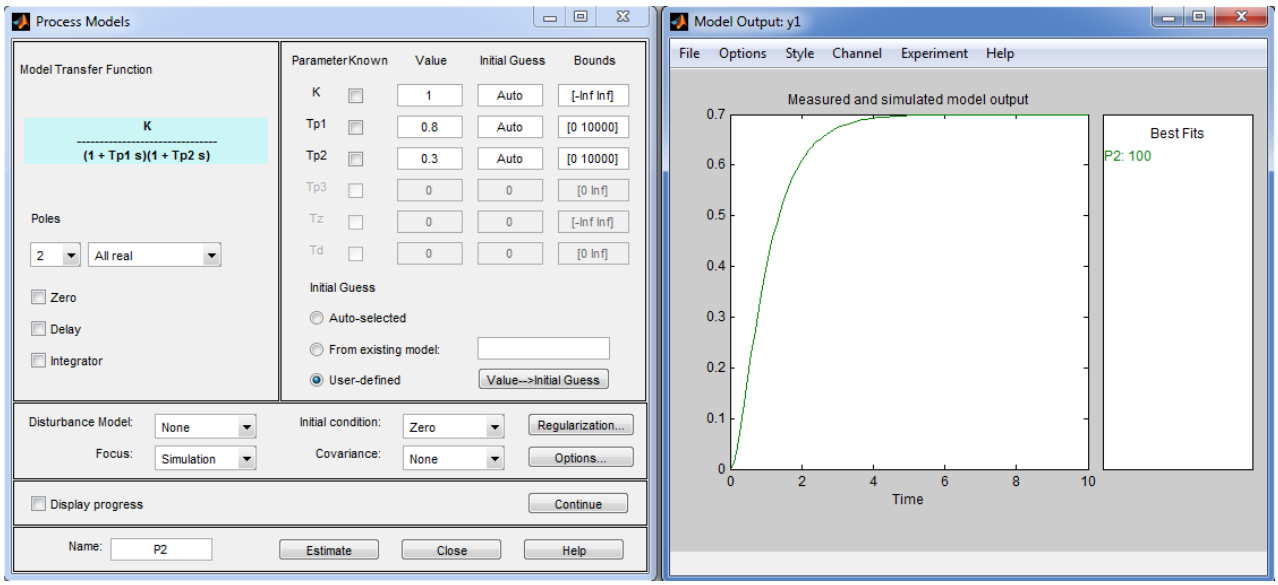


Рисунок 2.4 – Результат ідентифікації об’єкта керування представленого двома послідовно з’єднаними аперіодичними ланками

За результатами ідентифікації об'єкта управління з передаточною функцією, яка включає дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки, на рис. 2.4 видно, що перша постійна часу становить 0,3 с, а друга - 0,8 с (лівий рисунок). Відносний показник збігу експериментальної кривої з графіком перехідного процесу на виході моделі об'єкта управління досяг 100% (правий рисунок), що свідчить про ідеальну відповідність моделі об'єкта управління з реальним процесом. Це говорить про те, що модель з двома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками більш точно відображає поведінку системи.

Отже, точність ідентифікації об'єкта управління, коли передаточна функція об'єкта представлена двома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками, є вищою і перевищує точність ідентифікації при використанні однієї аперіодичної ланки на 10,45%.

Цей висновок базується на відносному показнику збігу між експериментальними даними та графіком перехідного процесу. Це свідчить про те, що використання двох аперіодичних ланок для моделювання об'єкта управління забезпечує більш точне і реалістичне відображення його поведінки.

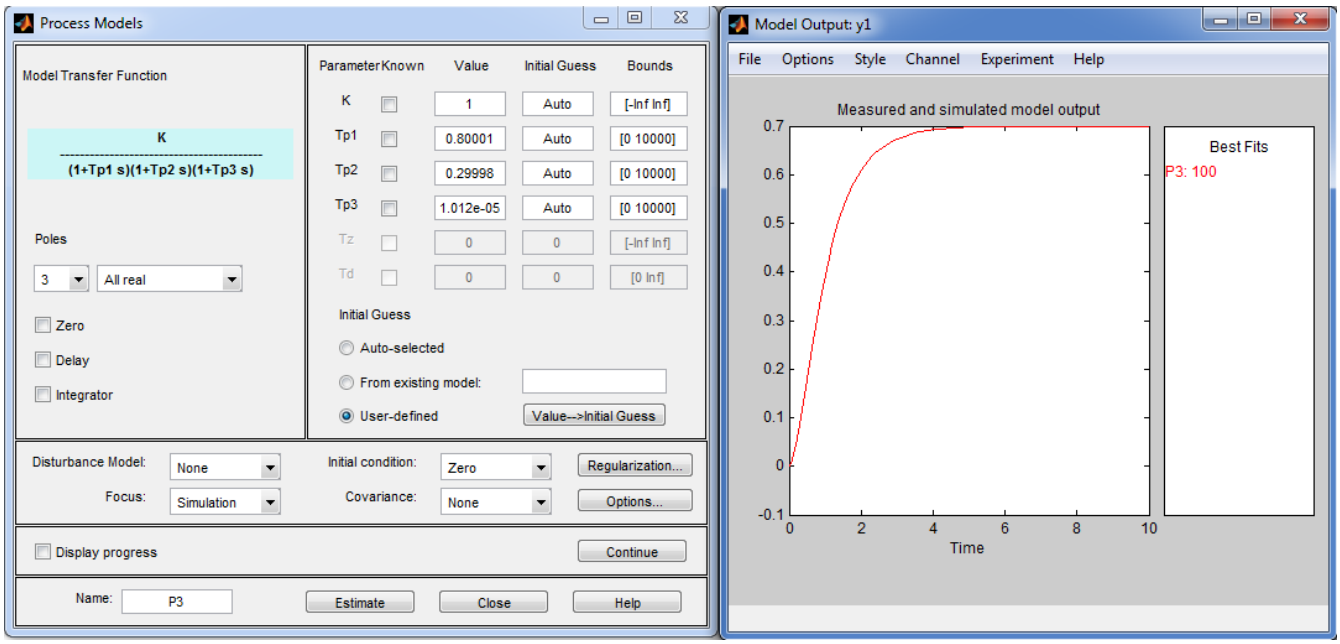


Рисунок 2.5 – Результат ідентифікації об’єкта керування представленого трьома послідовно з’єднаними аперіодичними ланками

За результатами ідентифікації об'єкта управління, використовуючи передаточну функцію з трьома аперіодичними ланками, що послідовно з'єднані на рисунку 2.5 видно, що перша постійна часу становить 0,8 с, друга – 0,3 с, а – третя $1{,}012 \cdot 10^{-5}$ с, (лівий рисунок). А відносний показник збігу графіку перехідного процесу на виході моделі об'єкта керування з експериментальною кривою дорівнює при цьому 100%.

Цей результат свідчить про те, що, навіть додавши третю аперіодичну ланку з дуже малою постійною часу, відносний показник збігу все ще дорівнює 100%, що означає ідеальну відповідність між моделлю і експериментальними даними. Однак, таке значення постійної часу третьої ланки може вказувати на надмірну складність моделі.

Отже, ми отримали однакову точність ідентифікації об'єкта управління при використанні передаточної функції з двома та трьома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками. Однак, той факт, що третя постійна часу, отримана в результаті ідентифікації на рис. 2.5, практично дорівнює нулю, свідчить про те, що в передаточній функції об'єкта управління відсутній третій полюс. Це вказує на те, що оптимальне моделювання об'єкта можна

досягти за допомогою двох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок, а третя ланка з практично нульовою постійною часу не додає жодної суттєвої інформації чи покращення в моделюванні. Таким чином, більш раціонально використовувати передаточну функцію з двома аперіодичними ланками, що спрощує модель без втрати точності.

Виходячи з порівняння результатів аналізу точності ідентифікації об'єкта керування, робимо висновок, що ПФ об'єкта керування складається з двох аперіодичних ланок, що з'єднані послідовно і мають постійні часу 0,3 с та 0,8 с відповідно.

Далі, використовуючи експериментальні дані (позначені круглими маркерами на рис. 2.6), необхідно провести ідентифікацію об'єкта керування по його статичній характеристиці. Для цього можна використати бібліотеку "Basic Fitting" системи Matlab для визначення залежності між керуючим впливом та вихідною величиною об'єкта управління.

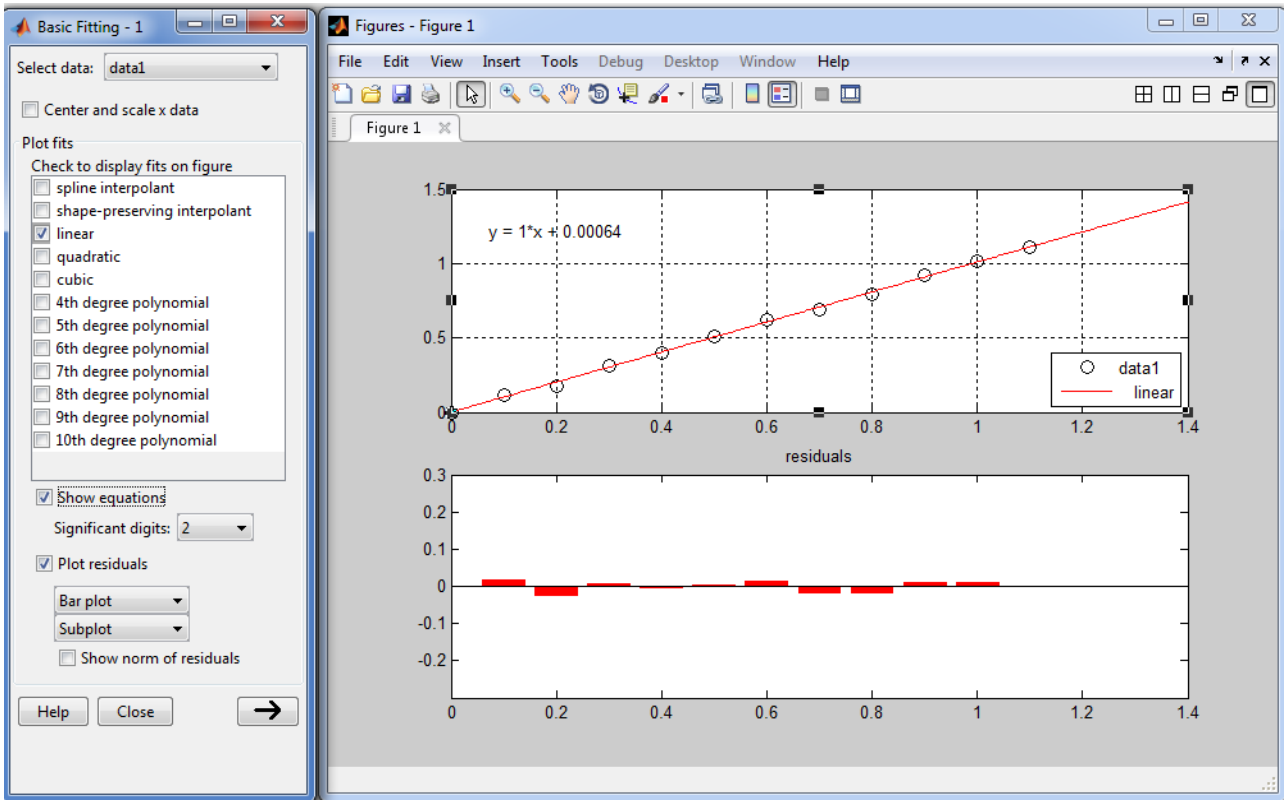


Рисунок 2.6 – Результат ідентифікації об’єкта управління за статичною характеристикою

Цей аналіз допоможе вивчити статичну поведінку системи та визначити форму рівняння регресії, яке описує відношення між вхідними та вихідними параметрами об'єкта управління. Це необхідно для подальшої побудови та оптимізації системи автоматичного керування.

На основі ідентифікації, представленої на рис. 2.6, можна зробити висновок, що об'єкт є лінійним. Це випливає з того, що абсолютні відхилення точок експериментальних вимірів від графіка рівняння лінійної регресії менш ніж 0,05 м/с, що становить менше 5% (у відносних одиницях). Відповідно, це вказує на лінійність об'єкта.

Також, виходячи з рівняння лінійної регресії на правому графіку рис.2.6, робимо висновок про те, що коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці по каналу керування. Це означає, що вихідна величина (швидкість переміщення електродів) змінюється прямо пропорційно до керуючого впливу, що дозволяє прогнозувати поведінку системи з високою точністю.

Ідентифікація моделі об'єкта керування проврдилась за швидкістю переміщення електродів ДСП. На основі цього та результатів попередньої ідентифікації була створена модель об'єкта управління в додатку Simulink програми Matlab (рис. 2.7). Ця модель дозволяє симулювати та аналізувати динамічну поведінку системи, а також експериментувати з різними параметрами для оптимізації керування електродами.

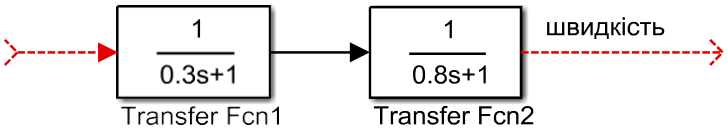


Рисунок 2.7 – Схема об’єкта керування у додатку Simulink

Система автоматичного керування швидкістю переміщення електродів у дуговій печі є частиною загальної системи керування переміщенням електродів. Вона працює у взаємозв'язку з головною системою, забезпечуючи точне позиціонування та стабільну швидкість переміщення електродів.

Згідно з вимогами технологічного процесу, існують еталони переміщення електродів, які використовуються як базові параметри для встановлення

уставок у системі автоматичного керування переміщенням електродів. Еталон зазвичай представлений як задана діаграма або профіль переміщення електроду, яка визначає необхідну швидкість, прискорення та інші параметри руху електроду в різних фазах процесу плавки.

Використовуючи цю діаграму, система автоматичного керування може забезпечити плавне та точне переміщення електродів, дотримуючись технологічних вимог та забезпечуючи оптимальний робочий процес в ДСП.

Регулятор потужності, яку споживають електроди в печі, контролює її шляхом зміни позиції електродів. Однак особливості електромеханічного механізму переміщення електродів вимагають, щоб зміна їхньої позиції відбувалася за визначеною еталонною діаграмою. Відповідно до цієї діаграми, електроди мають переміщуватися зі швидкістю, яка дозволяє подолати один метр за 12 секунд.

Це обмеження забезпечує плавність та контрольованість процесу переміщення електродів, запобігає надмірним навантаженням на механізм і сприяє більш стабільному процесу плавки. Виконання цього еталону гарантує, що зміни в позиції електродів відбуваються без раптових стрибків чи надмірної швидкості, які можуть негативно вплинути на процес плавки та загальну продуктивність печі.

Оскільки система автоматичного керування швидкістю переміщення електродів є складовою частиною складнішої двоконтурної системи керування переміщенням електродів, важливо перевірити ефективність її роботи шляхом моделювання в додатку Simulink програми Matlab. Для цього можна створити модель, яка імітує зміну уставки переміщення електродів відповідно до еталонної діаграми.

Для побудови такої моделі в Simulink можна використовувати спеціальні блоки для обмеження діапазону зміни сигналу та зміни швидкості у часі. А діапазон зміни положення електродів повинен відповідати технічним характеристикам печі (наприклад, від 0 до 5 метрів). Такі блоки допоможуть контролювати швидкість переміщення електродів, забезпечуючи відповідність

еталонній діаграмі та дотримуючись обмежень щодо швидкості та позиції.

Ця модель дозволить перевірити, наскільки система автоматичного керування відповідає заданим параметрам і вимогам еталонної діаграми, а також допоможе визначити будь-які потенційні проблеми чи необхідність подальшої оптимізації.

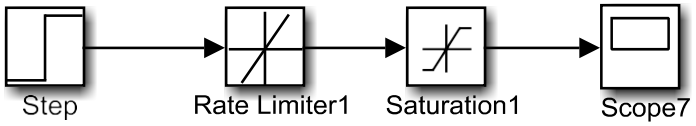


Рисунок 2.8 – Модель імітації діаграми переміщення електроду ДСП

На рисунку 2.8 швидкість зміни уставки переміщення електродів у часі контролюється блоком "Rate Limiter1", який має коефіцієнти "Rising Slew Rate" та "Falling Slew Rate" встановлені відповідно на 5/60 і -5/60. Ці коефіцієнти обмежують швидкість зростання та зниження уставки, забезпечуючи плавність зміни позиції електродів.

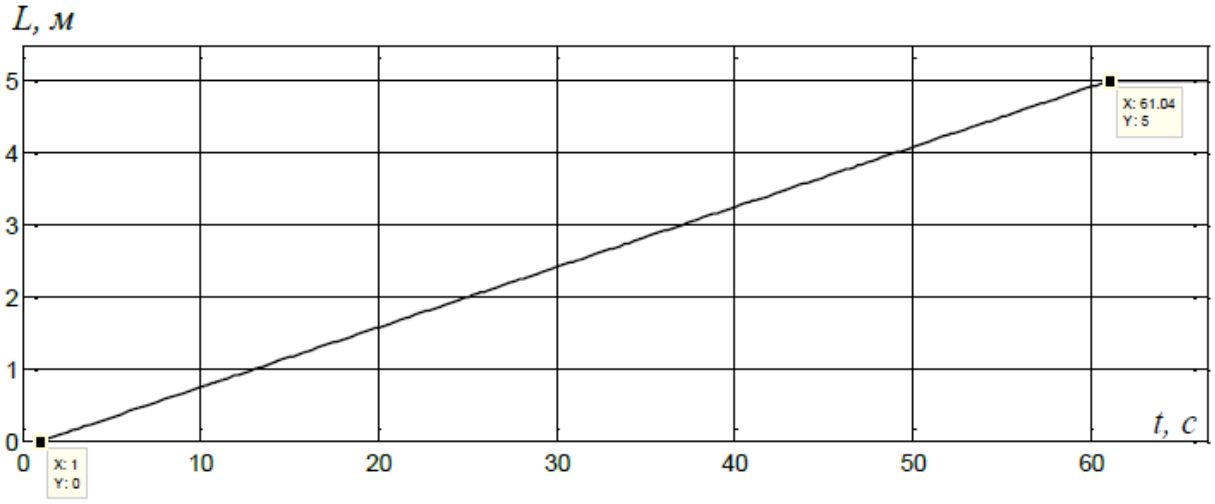
Блок "Saturation1" задає діапазон зміни позиції електрода. У цьому блоці поля "Upper Limit" і "Lower Limit" встановлюються відповідно до максимальної та мінімальної відстані, на яку можуть переміщуватися електроди, що в даному випадку становить 5 метрів (верхня межа) та 0 метрів (нижня межа).

Таке налаштування блоків гарантує, що зміни уставки відбуватимуться в рамках заданого діапазону, а також з певною плавністю, що дозволяє уникнути різких стрибків і зберегти стабільність та надійність системи автоматичного керування переміщенням електродів.

На рисунку 2.9 представлено результат генерування зміни у часі уставки переміщення електродів ДСП на базі еталонної діаграми для моделі рис.2.8 .

Як видно з рис. 2.9, уставка переміщення електродів у печі змінюється з часом за лінійним законом, що відповідає еталонній діаграмі. Це означає, що електроди проходять відстань 5 метрів за 60 секунд, що відповідає заданому

показнику.



суцільна – еталонна діаграма переміщення електроду; пунктирна – уставка

Рисунок 2.9 – Імітації еталонної діаграми переміщення електроду ДСП

Такий лінійний характер зміни уставки забезпечує рівномірне і плавне переміщення електродів, мінімізуючи ризик раптових змін, які можуть негативно вплинути на процес плавки та термін служби обладнання.

Цей результат свідчить про те, що модель, побудована за допомогою блоків "Rate Limiter1" та "Saturation1", працює належним чином і дотримується обмежень, необхідних для коректної роботи системи автоматичного керування переміщенням електродів у дуговій печі.

2.3 Критерії якості функціонування розробленої системи

Основним завданням САК швидкістю переміщення електродів є забезпечення заданої динаміки руху електродів, забезпечуючи при цьому ефективну роботу системи керування переміщенням електродів у дуговій сталеплавильній печі. Це включає в себе підтримку стабільної швидкості переміщення протягом більшої частини циклу, а також плавне прискорення та гальмування на початку і в кінці руху.

З аналізу еталонної діаграми переміщення електродів, представленої на рис. 2.9, можна зробити висновок, що в основному електроди переміщуються

з постійною швидкістю. Етапи розгону та гальмування займають лише до 10% всього циклу переміщення. Це вказує на те, що більша частина циклу передбачає рівномірне переміщення електродів, що сприяє стабільності процесу плавки та знижує навантаження на механізм.

Забезпечення стабільної та контрольованої швидкості на протязі більшої частини циклу дозволяє системі керування ефективно підтримувати необхідні параметри, мінімізуючи ризик раптових змін і перевантажень, які можуть порушити процес плавки та негативно вплинути на якість сталі.

Таким чином, система автоматичного керування швидкістю переміщення електродів повинна бути розроблена таким чином, щоб мінімізувати швидкісну похибку під час розгону та гальмування електродів, особливо на основній частині діаграми. Отже, критерій якості роботи САК швидкістю переміщення електродів у ДСП визначається під час синтезу системи автоматичного керування переміщенням електродів.

При цьому необхідно враховувати технологічні вимоги до плавного переміщення електродів, що допомагає подовжити термін експлуатації обладнання механізму переміщення електродів, запобігаючи різким перепадам моментів опору та зносу деталей. Зважаючи на технічні характеристики механізму переміщення електродів і досвід його експлуатації, рекомендовано обмежити прискорення електродів до рівня 0,25 м/с².

Ці обмеження забезпечують не тільки стабільність процесу плавки, але й захист механізму переміщення електродів від пошкоджень, спричинених надмірними прискореннями або різкими рухами. Таким чином, система автоматичного керування повинна враховувати ці фактори, щоб забезпечити надійність та ефективність роботи дугової сталеплавильної печі, а також підтримувати якість процесу плавки сталі.

Оскільки на даному етапі неможливо чітко визначити критерії ефективності, враховуючи описані вище специфічні умови її ефективної роботи, розглянемо основні часові критерії якості перехідного процесу. Для цього розглянемо ці критерії на прикладі східчастої зміни уставки. Критеріями

є:

- Час перехідного процесу ($t_п$): час, який потрібен системі, щоб досягти стабільного стану після зміни уставки. Це час, за який система виходить з перехідного процесу і наближається до усталеної величини.

- Перерегулювання (*A1*): величина, на яку система може перевищити або недосягнути цільового значення уставки. Перерегулювання вимірюється у відсотках від заданого значення.

- Статична похибка ($x(t)$-$y(\infty)$): різниця між усталеною величиною системи і бажаним значенням. Ця похибка показує, наскільки система може відхилятися від заданого значення в усталеному стані.

Ці критерії дозволяють оцінити якість системи керування та визначити, наскільки ефективно вона працює при різних умовах. Аналізуючи ці параметри, можна зробити висновки про стабільність, точність та ефективність системи керування переміщенням електродів у дуговій печі.

Проаналізуємо більш детально кожен з перелічених критеріїв для нашої системи автоматичного керування швидкістю переміщенням електродів.

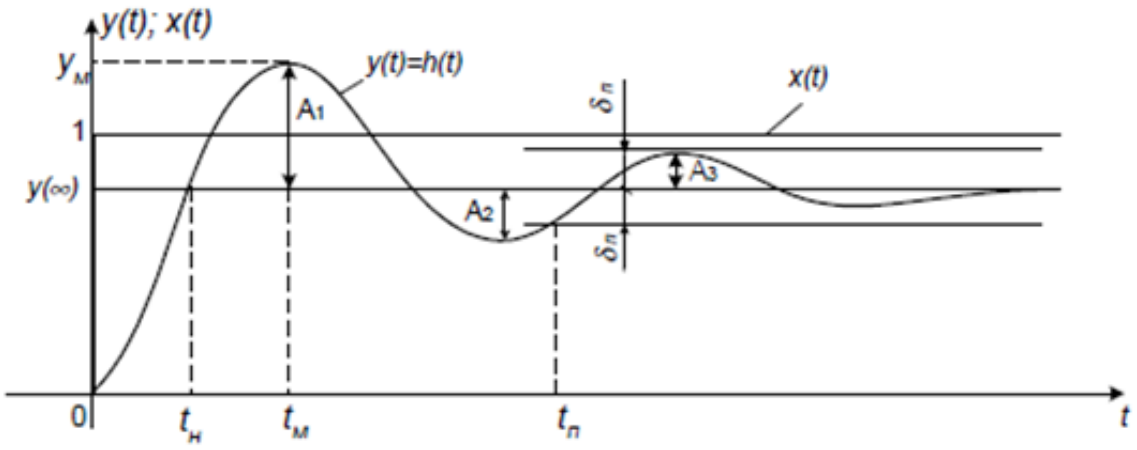


Рисунок 2.10 − Критерії якості САК

Коливання в перехідному процесі, показані на рис. 2.10, можуть свідчити про порушення плавності переміщення електродів. Це небажано, оскільки різкі зміни можуть спричинити механічне навантаження на систему та вплинути на якість плавки. Отже, для забезпечення плавності та

стабільності руху електродів необхідно мінімізувати перерегулювання (*А1*).

З урахуванням допустимого прискорення руху електродів, оптимальним є обмеження перерегулювання на рівні, що не перевищує 0,5%. Такий низький рівень перерегулювання забезпечить плавність руху електродів, запобігаючи різким стрибкам, що можуть спричинити небажані впливи на механізм переміщення та стабільність процесу плавки.

Отже, одним з головних критеріїв якості системи автоматичного керування швидкістю переміщення електродів є перерегулювання, яке не повинно перевищувати 0,5%. Такий критерій забезпечує безперебійну та ефективну роботу системи, захищає механізм від перевантажень і сприяє стабільному процесу плавки.

Чим вища швидкодія САК швидкістю переміщення електродів ДСП, тим менша ймовірність швидкісної похибки під час їх позиціонування. Тому, щоб забезпечити точність і ефективність керування, потрібно прагнути до мінімального часу перехідного процесу (t_n). Однак, при цьому важливо дотримуватися вимоги щодо максимального допустимого прискорення руху електродів, щоб уникнути механічного навантаження та потенційних пошкоджень.

Статична похибка у САК швидкістю переміщення електродів повинна бути відсутня, щоб забезпечити максимально точне відтворення еталонної діаграми переміщення. Нульова статична похибка гарантує, що позиціонування електродів відповідає заданим значенням без відхилень, які можуть негативно вплинути на процес плавки та якість сталі.

З огляду на ці вимоги, необхідно знайти баланс між швидкодією системи та її стабільністю. Зменшення часу перехідного процесу та досягнення нульової статичної похибки мають бути реалізовані в рамках обмежень щодо допустимого прискорення. Це забезпечить точне та стабільне керування електродами в дуговій печі, сприяючи підвищенню продуктивності та якості кінцевого продукту.

2.4 Синтез системи автоматичного керування

Основним вимогам до системи автоматичного керування рухом електродів потрібно відповідати на рівні високої точності у позиціонуванні електроду або у відтворенні еталонної діаграми його переміщень. Найоптимальніший результат щодо якості роботи системи можна досягти лише за умови використання методів синтезу автоматичного керування, які враховують оптимізацію за вибраним критерієм. В такому випадку рекомендовано звертатися до аналітичного методу синтезу системи автоматичного управління.

Серед аналітичних методів синтезу системи автоматичного керування в інженерній практиці виберемо широко використовуваний метод параметричної оптимізації. При прагненні досягнути оптимальних значень обраного критерію якості перехідного процесу слід віддати перевагу більш точним, аналітичним методам розрахунку систем автоматичного керування. Ці методи дозволяють визначити параметри системи, що забезпечують найкращі показники якості.

Один із підходів до вирішення цієї задачі полягає у застосуванні параметричної оптимізації, де використовується характеристичний поліном замкнутої системи. Форма перехідного процесу визначається відповідним вибором коренів цього полінома. При цьому немає необхідності вручну знаходити корені, оскільки в літературі вже надані характеристичні поліноми, переході процеси для яких вже проаналізовані. Тому ці криві є оптимальними з певного критерію та рекомендуються як еталони бажаного вигляду.

Після порівняння коефіцієнтів характеристичних поліномів стандартної моделі та бажаної реальної системи визначають значення цих коефіцієнтів, які забезпечують оптимальний графік перехідного процесу. Важливо враховувати, що коефіцієнти характеристичного полінома залежать не лише від параметрів регулятора, а й від параметрів інших елементів системи. Це дозволяє досягти заданих значень коефіцієнтів характеристичного полінома шляхом зміни всіх вказаних параметрів, що значно розширює можливості синтезу.

Серед багатьох критеріїв якості перехідного процесу, які запропоновані в літературі, ми виберемо найбільш прийнятний з урахуванням обраного основного критерію якості роботи системи автоматичного управління - швидкісної похибки керування. Відповідно обираємо модель, в якій дорівнює нулю швидкісна похибка.

Стандартна модель Еллерта характеризується тим, що максимальне перерегулювання перехідного процесу не перевищує 10% (при ступінчастому керуючому впливі), а швидкісна похибка тут дорівнює нулю. В таблиці 2.1 наведені характеристичні поліноми цієї моделі. Передаточна функція моделі Еллерта має наступний вигляд:

$$W(s) = \frac{a_1 q_0^{n-1} + q_0^n}{s_n + a_{n-1} + \cdots + a_1 q_0^{n-1} s + q_0^n} \tag{2.1}$$

Таблиця 2.1 – Характеристичні поліноми моделі Еллерта

Поліном $П_n(s)$
$\Pi_2(s) = s^2 + 2{,}5q_0 s + q_0^2$
$\Pi_3(s) = s^3 + 5{,}1q_0 s^2 + 6{,}3q_0^2 s^2 + q_0^3$
$\Pi_4(s) = s^4 + 7{,}2q_0 s^3 + 16q_0^2 s^2 + 12q_0^3 + q_0^4$
$\Pi_5(s) = s^5 + 9q_0 s^4 + 29q_0^2 s^3 + 385q_0^3 s^2 + 18q_0^4 s + q_0^5$
$\Pi_5(s) = s^6 + 11q_0 s^5 + 43q_0^2 s^4 + 83q_0^3 s^3 + 73q_0^4 s^2 + 25q_0^5 s + q_0^6$

На рисунку 2.11 представлені перехідні характеристики моделей Еллерта. З нього видно, що зі збільшенням порядку моделі Еллерта зростає час перехідного процесу.

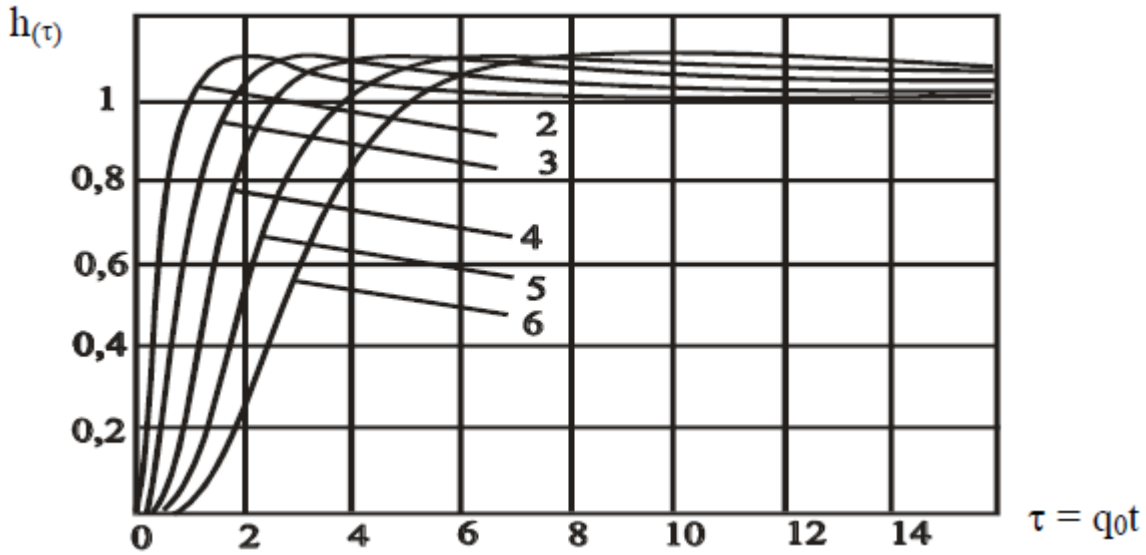


Рисунок 2.11 – Вигляд перехідних процесів моделей Еллерта

На рисунку 2.11 по вісі абсцис зображений відносний час перехідного процесу $\tau=q_0t$. А в таблиці 2.1 у всіх поліномах присутній параметр q_0, який є коренем характеристичного полінома, від якого залежить швидкодія системи. Ці параметри пов'язані за допомогою формули:

$$q_0 = \frac{\tau}{t}$$

де t – фактичний час перехідного процесу, с.

Варто відзначити, що метод параметричної оптимізації не ураховує обмеження на подвійний диференціал керованої величини - він оптимізує лише переміщення електродів. Для того щоб задовольняти вимогу щодо відсутності перевищення прискорення електродів допустимого рівня, необхідно окремо керувати швидкістю переміщення електродів шляхом уведення внутрішнього контуру управління.

Враховуючи це та результати ідентифікації об’єкта керування побудована модель САК переміщенням електродів у ДСП. У цій моделі реалізовано двоконтурне керування: внутрішній контур - керування за швидкістю, зовнішній контур - керування за переміщенням електродів.

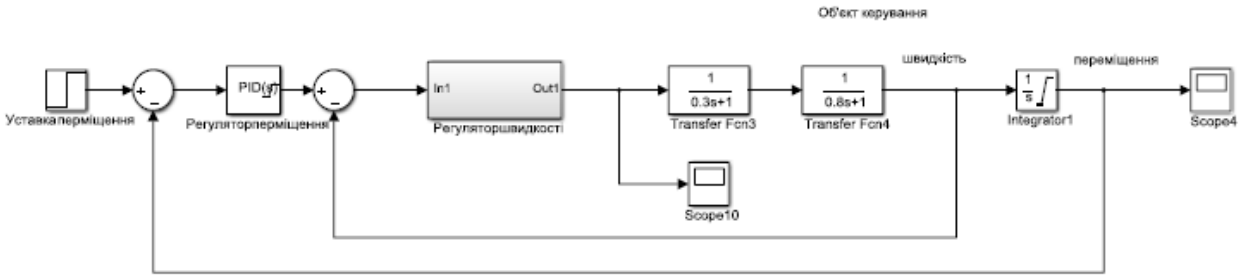


Рисунок 2.12 – Вигляд моделі САК

Під час синтезу САК переміщенням електродів у ДСП методом параметричної оптимізації необхідно досягти такого вигляду передаточної функції замкнутої системи, який відповідає рівнянню (2.1).

З метою досягнення максимальної швидкодії системи (забезпечення нульової швидкісної похибки якнайшвидше) ми обираємо модель Еллерта другого порядку, тому що вона забезпечує найшвидший перехідний процес (див. рис.2.11). У такому випадку передаточна функція замкненої системи для обох контурів управління має мати такий вигляд:

$$W_з(s) = \frac{2{,}5q_0 s + q_0^2}{s^2 + 2{,}5q_0 s + q_0^2}$$

Для визначення бажаної передаточної функції для розімкненої системи автоматичного управління ми можемо скористатися відомою формулою структурного перетворення.

$$W_{роз}(s) = \frac{W_з(s)}{1 - W_з(s)} = \frac{2{,}5q_0 s + q_0^2}{s^2} \qquad (2.2)$$

Варто відзначити, що формула (2.1) представляє собою передаточну функцію системи, яка складається з послідовно з'єднаних пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора та інтегратора.

$$W_{роз}(s) = (K_p + \frac{K_1}{s}) \cdot \frac{1}{s} = \frac{K_p s + K_1}{s^2} \qquad (2.3)$$

Для того щоб забезпечити відповідність між передаточною функцією розімкненої системи з ПІ-регулятором переміщенням (2.3) та стандартною моделлю Еллерта з урахуванням зворотного від'ємного зв'язку (2.2), потрібно прирівняти коефіцієнти доданків чисельника в обох формулах (2.1) та (2.3).

$$\begin{cases} K_p = 2{,}5 \cdot q_0 \\ K_1 = q_0^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Зважаючи на структуру імітаційної моделі САК переміщенням електроду у ДСП, яка зображена на рис. 2.12, умови, викладені у формулі (2.4), будуть виконані, якщо в якості регулятора переміщення електродів буде використаний ПІ-регулятор, параметри якого обчислюються за допомогою формули (2.4). Однак при цьому необхідно перетворити на підсилювальну ланку (коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці) внутрішній контур керування, оскільки він не враховувався у формулі (2.3).

Отже, передаточна функція регулятора швидкості повинна бути налаштована таким чином, щоб компенсувати постійний час об'єкта керування.

$$W_{\text{шв}}(s) = \frac{(0{,}3s + 1)}{(T_{\text{шв}}s + 2)} \cdot \frac{(0{,}8s + 1)}{T_{\text{шв}}s}$$

де $T_{шв}$ – постійна часу регулятора швидкості, с.

З урахуванням вищезазначеної вимоги, передаточна функція регулятора швидкості $W_{\text{шв}}(s)$ обрана таким чином, щоб компенсувати постійну часу ОК.

Знаменники складових передаточної функції регулятора вибрані таким чином, щоб вони:

1) забезпечували астатичність внутрішнього контуру;

2) забезпечували дійсні корені характеристичного рівняння передаточної функції та швидкодію системи керування з постійною часу регулятора $T_{шв}$.

З іншого боку, динаміка розгону електроду, обмежена прискоренням 0,25м/с², також визначається постійною часу регулятора швидкості $T_{шв}$.

Для обґрунтування цієї постійної часу регулятора, отримано залежності між інтегральною похибкою керування (інтегралом відхилення перехідного процесу на виході внутрішнього контуру від ступінчастого сигналу), та між постійною часу регулятора і максимальним (фактичним) прискоренням руху електродів (відповідно, рис. 2.13 та рис. 2.14).

З рисунка 2.13 видно, що інтегральна похибка керування прямо пропорційна постійній часу регулятора швидкості руху електродів.

Отже, робимо висновок, що постійна часу повинна бути якомога меншою. Однак, з графіка на рисунку 2.14, де представлена залежність максимального прискорення руху електродів від постійної часу регулятора, видно, що ця залежність є оберненою та нелінійною. Зменшення постійної часу менше рівня 0,12 с призводить до перевищення допустимого значення прискорення, яке становить 0,25 м/с².

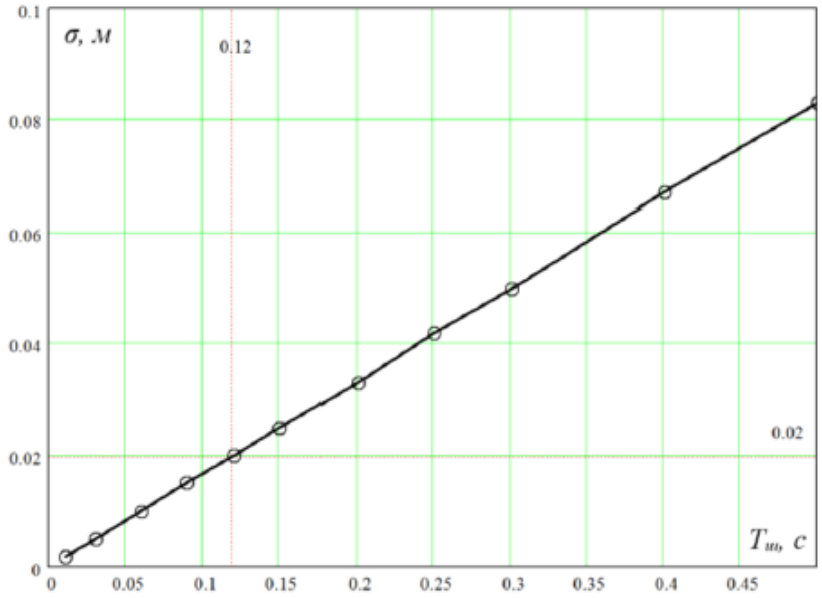


Рисунок 2.13 – Залежність між постійною часу РШ та максимальним прискоренням електродів

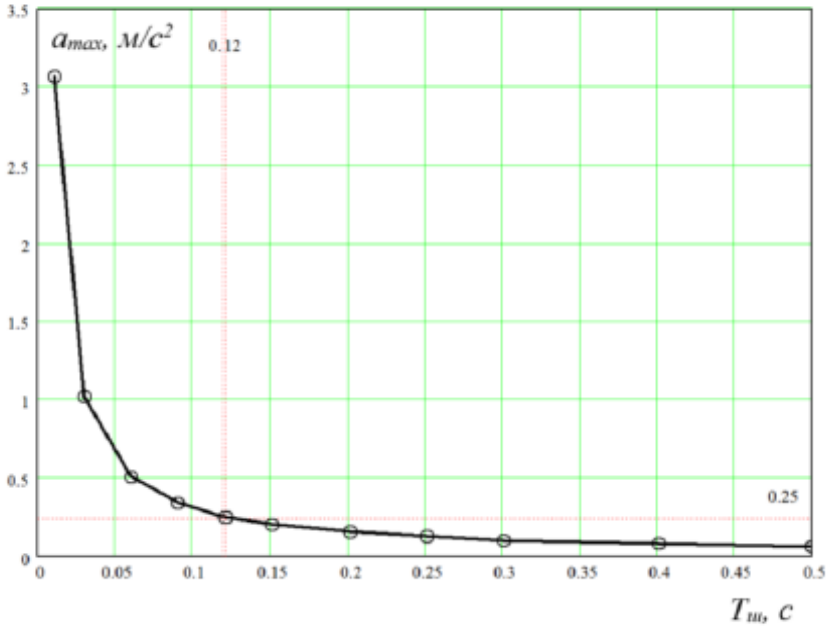


Рисунок 2.13 – Залежність між постійною часу РШ та прискорення переміщення електродів

Отже, оптимальною є постійна часу регулятору швидкості руху електродів, яка дорівнює 0,12 с.

2.5 Оцінка якості функціонування системи керування

Для оцінки ефективності роботи синтезованої САК швидкістю руху електродів у ДСП, використовуючи запропонований аналітичний метод, були порівняні три однотипні моделі з різними налаштуваннями регулятора швидкості руху електродів трьох постійних часу регулятора швидкості: оптимальної, зменшеної та збільшеної (рис. 2.15).

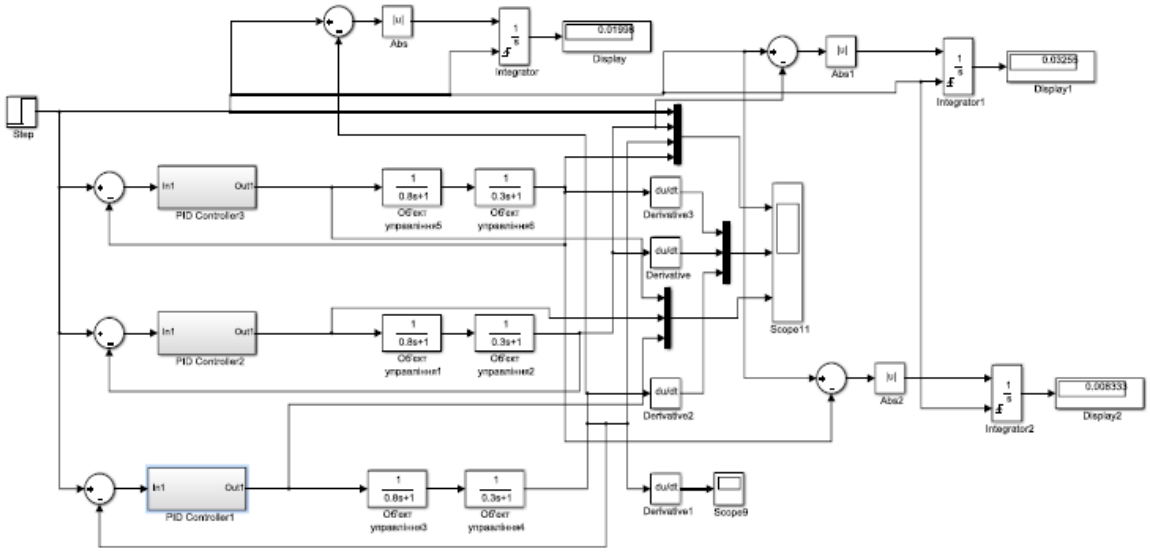


Рисунок 2.15 – Суміщені моделі САК швидкістю переміщення електродів

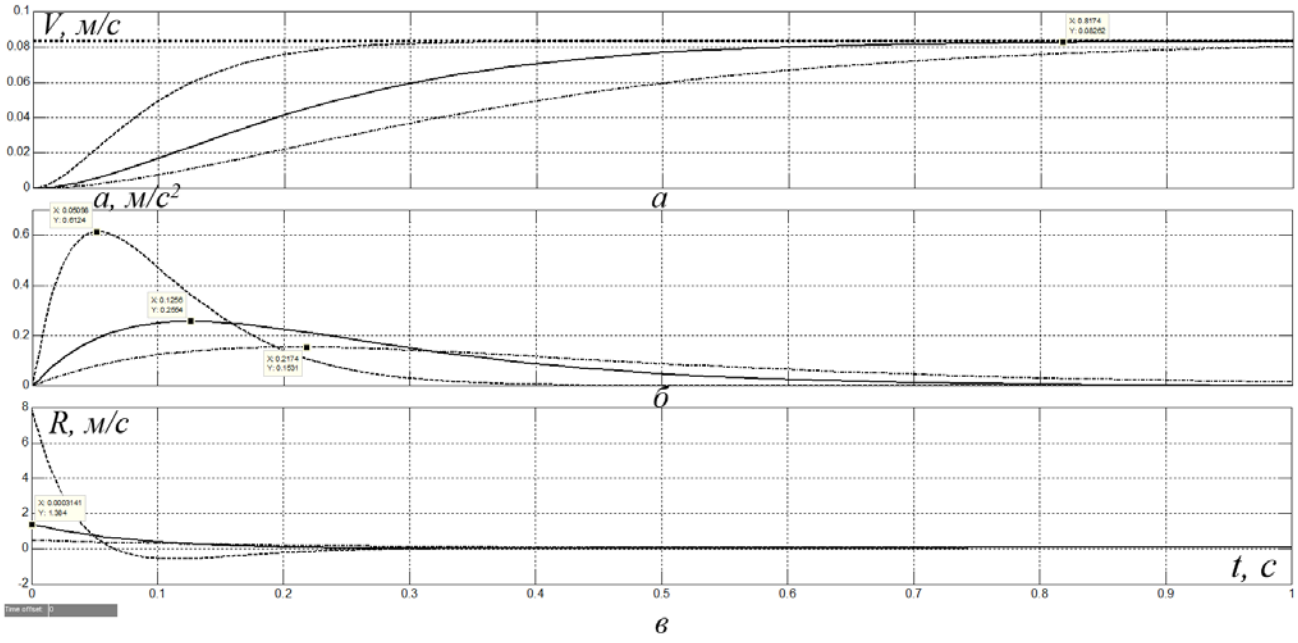
Моделі на рисунку 2.15 надають інформацію про зміну фактичної швидкості й прискорення руху електродів у часі, а також про керуючий сигнал на виході регулятора. Варто зазначити, що на рис. 2.15 верхня схема відповідає $T_{шв} = 0{,}05$ с, середня схема – $T_{шв} = 0{,}2$ с, а нижня схема – оптимальному значенню $T_{шв} = 0{,}12$ с.

Зазначимо, що у даній моделі інтегровано блоки суматорів, обчислення модуля сигналу та інтегратори, які використовуються для визначення якості роботи системи через сумарне відхилення реальної швидкості переміщення електродів від встановленої норми. Отже, критерієм якості є область між

кривою перехідного процесу та горизонтальною віссю, яка має бути мінімізована згідно з попередньо встановленими вимогами до системи керування. Чим меншою є ця область, тим ближче динамічні характеристики системи автоматичного керування швидкістю руху електродів до характеристик підсилювальної ланки, і тим меншою буде швидкісна помилка під час керування переміщенням електродів.

Тепер перейдемо до аналізу результатів моделювання, представлених на рисунку 2.16, які базуються на моделях систем керування з рисунка 2.15.

З рисунку 2.16,а можна побачити, що при оптимальному налаштуванні регулятора тривалість перехідного процесу становить 0,82 секунди (показано суцільною лінією). У випадках зі зменшеною та збільшеною постійною часу спостерігаються, відповідно, більш швидкі (пунктирна лінія) та повільніші перехідні процеси (штрих-пунктирна лінія).



а – фактична швидкості руху електродів у ДСП; *б* – фактичне прискорення руху електродів; *в* – сигнал керування на виході регулятора

Рисунок 2.16 – Залежності зміни у часі переміщення електродів

Рисунок 2.16,б підтверджує коректність налаштування регулятора. На цьому графіку видно, що при оптимальній настройці (суцільна лінія) максимальне фактичне прискорення руху електродів досягає свого

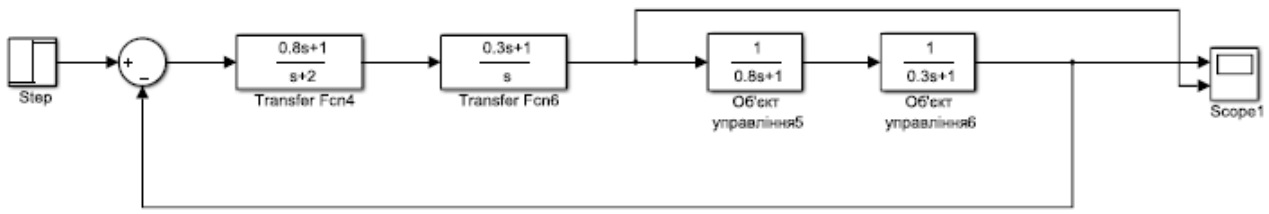
допустимого рівня 0,255 м/с². При великій постійній часу, фактичне прискорення також не перевищує дозволеного порогу (штрих-пунктирна лінія), проте перехідний процес при цьому є повільнішим. Водночас, варіант із зменшеною постійною часу 0,05 с визнається неприйнятним, адже в такому випадку максимальне фактичне прискорення значно перевищує допустиме значення.

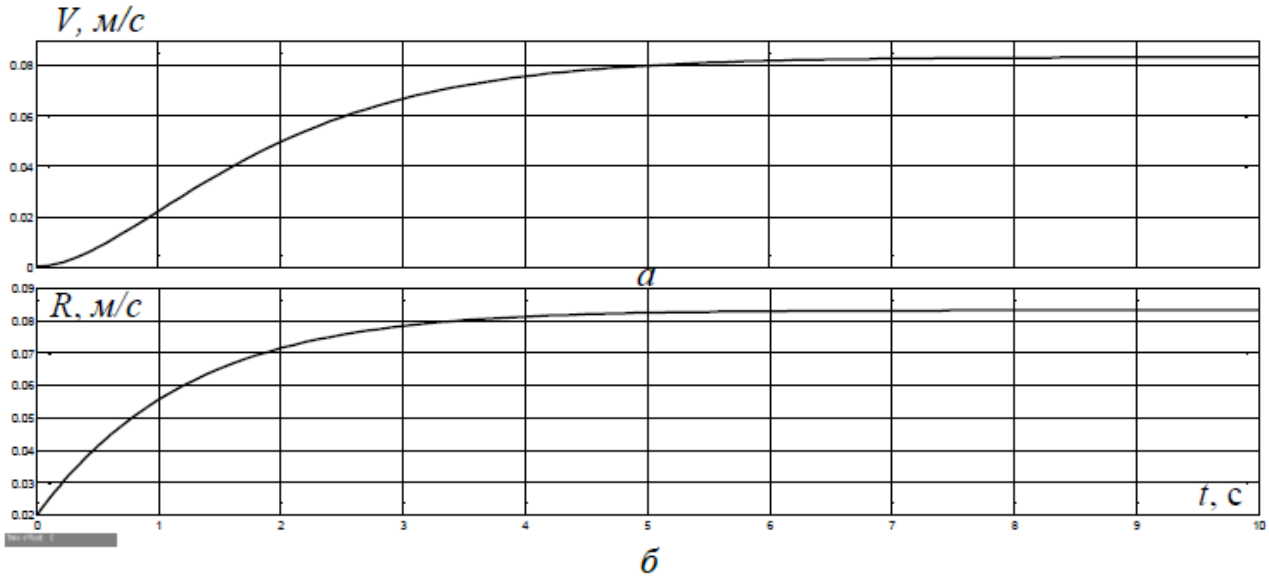
З аналізу даних на рисунку 2.16,в випливає, що для досягнення максимальної швидкодії системи керування без порушення допустимих меж прискорення, механізм переміщення повинен забезпечувати швидкість руху електродів на рівні 1,384 м/с.

Отже, можна стверджувати, що САК швидкістю переміщення електродів у ДСП, налаштована відповідно до запропонованої методики, відповідає всім визначеним критеріям якості керування.

2.6 Цифрова модель об'єкта керування

Для представлення розробленої САК, (рис. 2.17) у вигляді цифрової моделі об’єкта керування, необхідно провести заміну неперервних елементів на цифрові аналоги. Конвертація неперервних аперіодичних ланок виконується за допомогою спеціально розробленої програми на мові програмування MATLAB (лістинг коду наведено на рис. 2.18)





а) модель САК; б) результати моделювання

Рисунок 2.17 – Синтезована САК при при уставці 0,083 м/с

```
>> %Перетворення у цифрову форму першої аперіодичної ланки
wa1=tf([1], [0.8 1]);
wa1z=c2d(wa1, 0.1);
[a_a1, b_a1]=tfdata(wa1z);
a_a1=cell2mat(a_a1)
b_a1=cell2mat(b_a1)
%Перетворення у цифрову форму другої аперіодичної ланки
wa2=tf([1], [0.3 1]);
wa2z=c2d(wa2, 0.1);
[a_a2, b_a2]=tfdata(wa2z);
a_a2=cell2mat(a_a2)
b_a2=cell2mat(b_a2)

a_a1 =

         0    0.1175

b_a1 =

    1.0000   -0.8825

a_a2 =

         0    0.2835

b_a2 =

    1.0000   -0.7165
```

Рисунок 2.18 – Лістинг коду програми

Завдяки результатам роботи програми, було створено цифрову модель об’єкта керування, яка представлена на рисунку 2.19. Також сформовано модель САК в цілому, зображену на рисунку 2.20, встановивши часовий крок квантування - 0,1 секунди.

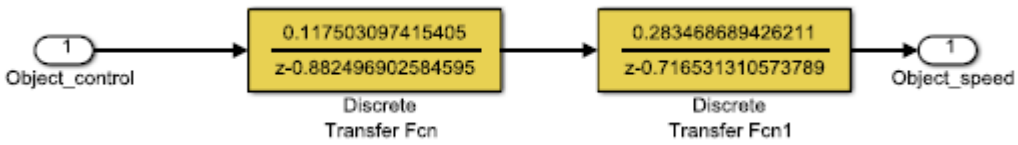


Рисунок 2.19 – Модель об’єкта керування після перетворення

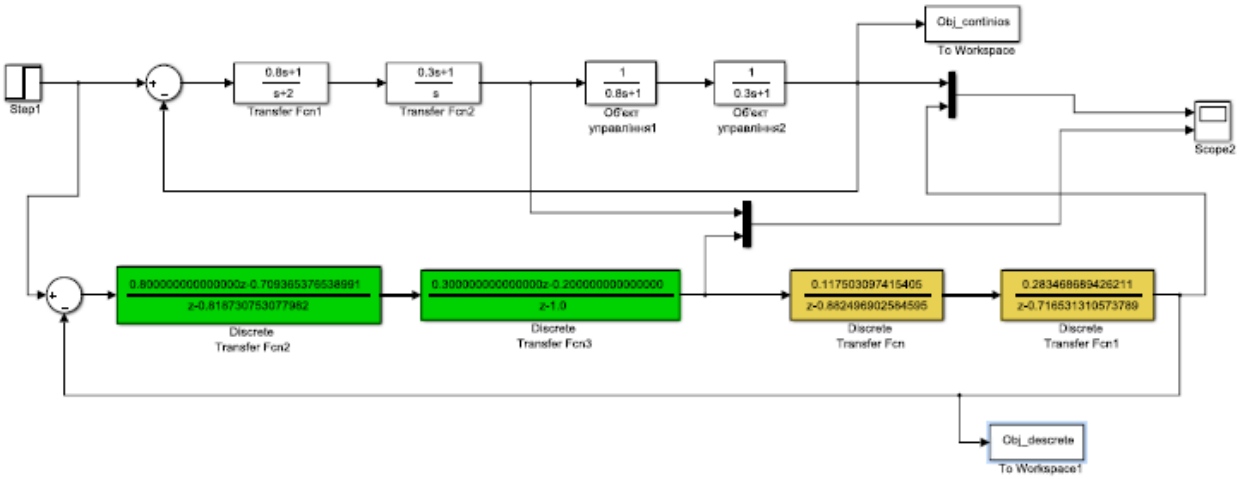
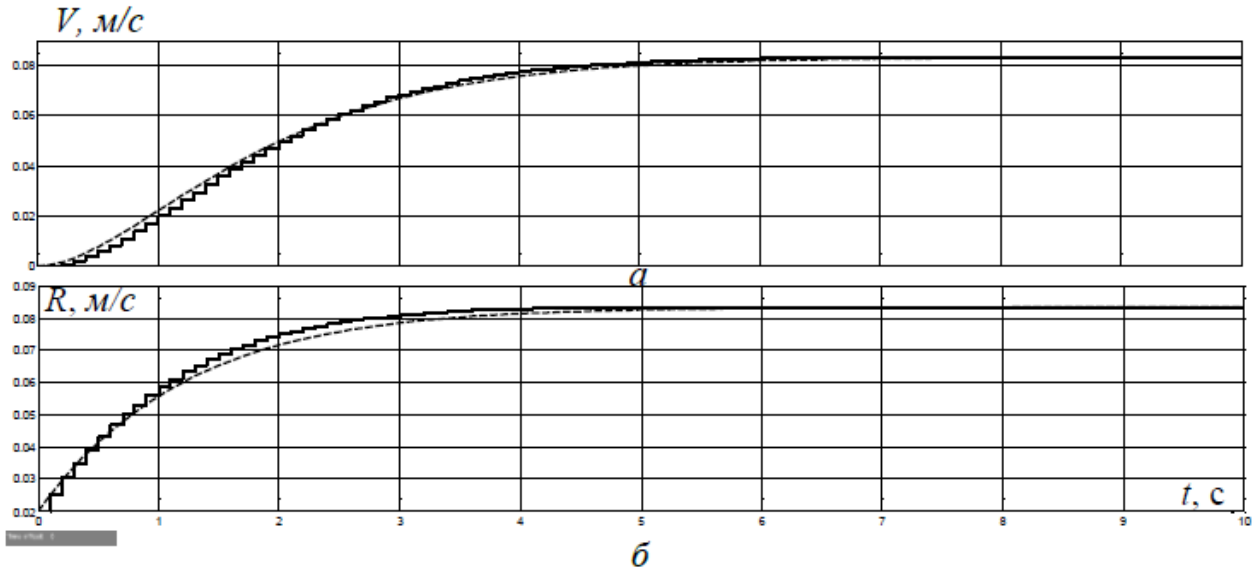


Рисунок 2.20 – Модель неперервної та цифрової САК



а – керована величина; б – керуюча величина

Рисунок 2.21 – Результати моделювання

Аналізуючи рисунок 2.21 робимо висновок, що графіки як керованої, так і керуючої величин для випадків неперервної та цифрової САК є досить схожими.

Для більш точного оцінювання збіжності цих графіків, буде виконано оцінка нормованого середньо-квадратичного відхилення між точками кривих, які представляють зміну керованої та керуючої величин у часі для обох моделей. Це дозволить підтвердити адекватність цифрової моделі системи автоматичного керування порівняно з її неперервним аналогом.

```
>> goodnessOfFit(Obj_continios,Obj_descrete, 'NRMSE')*100
ans =
 95.574883573432729
```

За результатами оцінювання з'ясувалося, що цифрова модель системи автоматичного керування має високий відсоток відповідності до неперервної моделі. Це свідчить про те, що цифрова реалізація адекватно відтворює характеристики неперервної системи.

На рисунку 2.22, у нижній частині, цифрова модель системи автоматичного керування представлена, розподілена на підсистеми. Одна з підсистем – це регулятор, а інша – об’єкт керування. Деталі підсистеми "Об’єкт керування" можна побачити на рисунку 2.22, тоді як вміст підсистеми "Регулятор" відображено на рисунку 2.23.

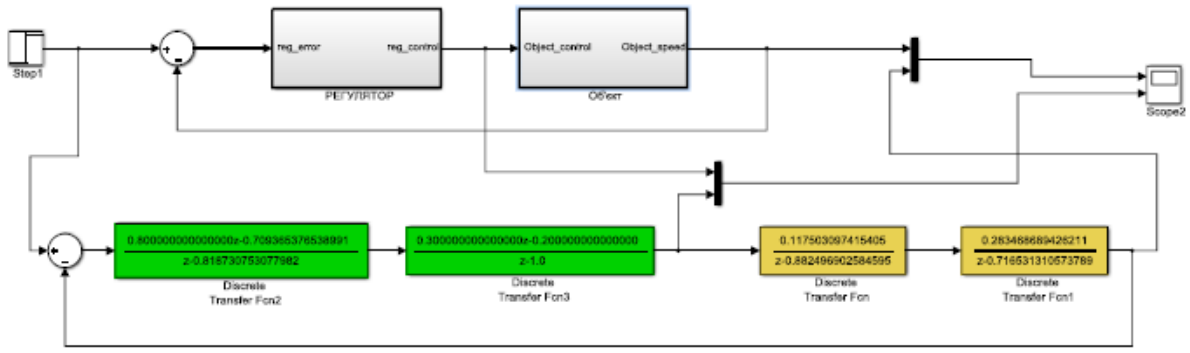


Рисунок 2.22 -Згрупована цифрова модель САК

На рисунку 2.23 цифрова модель регулятора відображена за допомогою

двох z-передаточних функцій.

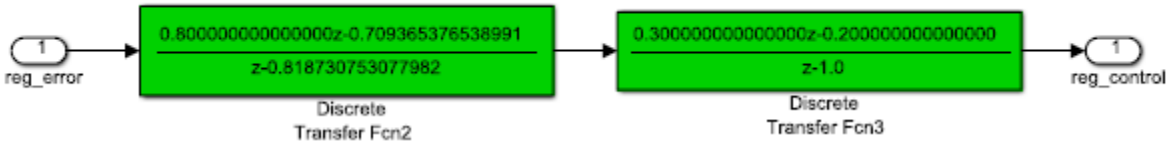


Рисунок 2.23 – Модель регулятору

Ці функції були сформовані на основі даних, отриманих від наступної програми:

```
>> %Перетворення у цифрову форму першої ланки
wal=tf([0.8 1], [1 2]);
walz=c2d(wal, 0.1);
[a_al, b_al]=tfdata(walz);
a_al=cell2mat(a_al)
b_al=cell2mat(b_al)
%Перетворення у цифрову форму другої ланки
wa2=tf([0.3 1], [1 0]);
wa2z=c2d(wa2, 0.1);
[a_a2, b_a2]=tfdata(wa2z);
a_a2=cell2mat(a_a2)
b_a2=cell2mat(b_a2)

a_al =

    0.8000   -0.7094


b_al =

    1.0000   -0.8187


a_a2 =

    0.3000   -0.2000
```

Рисунок 2.24 - – Лістинг коду програми

На основі цифрової моделі САК були розроблені програмні модулі (Додаток А)

2.7 Реалізація програмного забезпечення для системи керування

Програмне забезпечення САК структуровано на дві основні частини, кожна з яких виконана у вигляді окремого програмного блоку: регулятора та об'єкта керування.

Програмне забезпечення для регулятора розроблено спеціально для програмованого логічного контролера zenon Logic, який є частиною SCADA системи zenon. Це ПЗ забезпечує необхідну функціональність для контролю та управління процесами в автоматизованій системі.

Що стосується ПЗ об'єкта керування, то воно створено як програмне забезпечення для перевірки та моніторингу функціонування системи автоматичного керування, яке взаємодіє з драйвером пристрою керування.

Для ефективного функціонування об'єкта керування було розроблено спеціалізований драйвер, параметри якого наведено на рисунку 2.25. Цей драйвер є ключовим елементом у забезпеченні взаємодії між апаратним забезпеченням та програмним забезпеченням, гарантуючи точність та надійність системи керування.

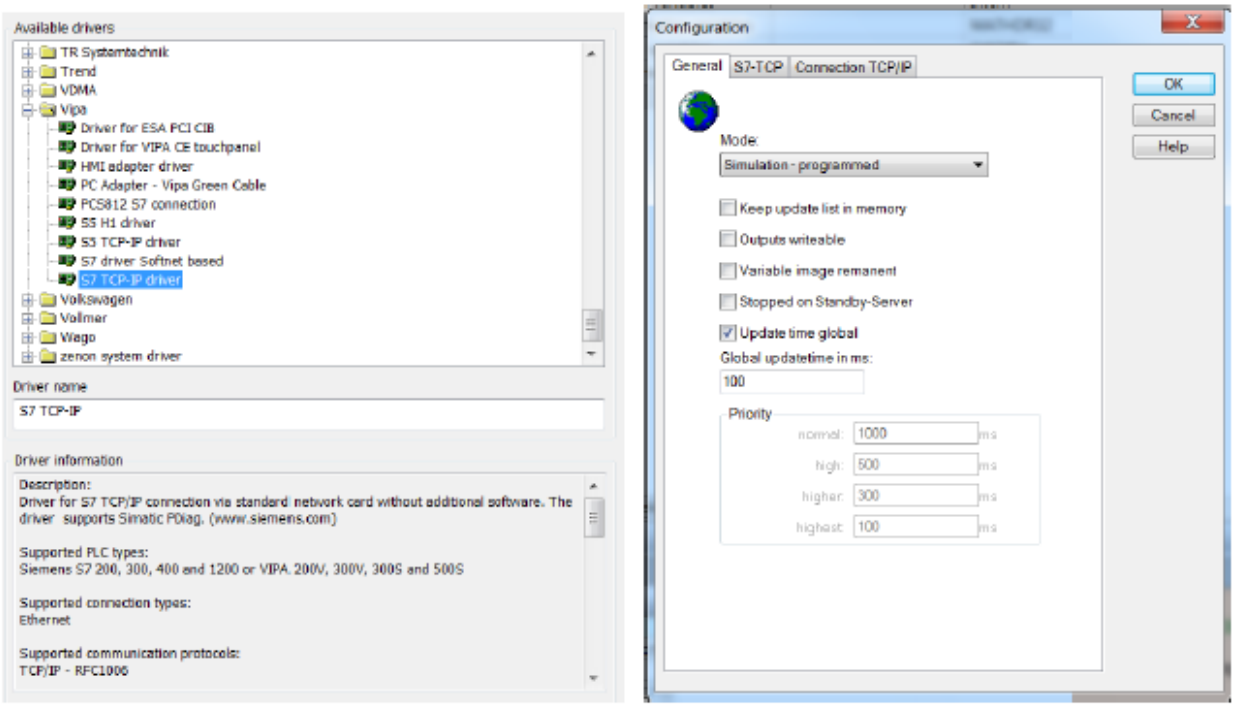
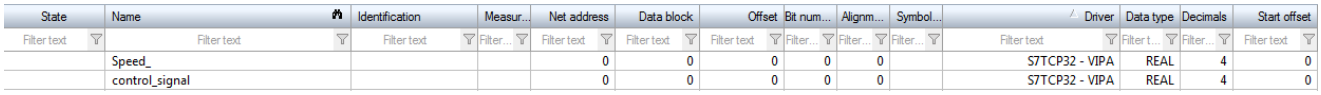


Рисунок 2.25 – Вибір та налаштування драйверу пристрою керування

Для драйверу пристрою керування були створені спеціальні змінні, які забезпечують доступ до входів та виходів об'єкта керування. Деталі цих змінних та їх конфігурації можна переглянути на рисунку 2.26. Ці змінні є ключовими для інтеграції програмного та апаратного забезпечення системи, дозволяючи ефективно керувати всіма процесами в реальному часі.

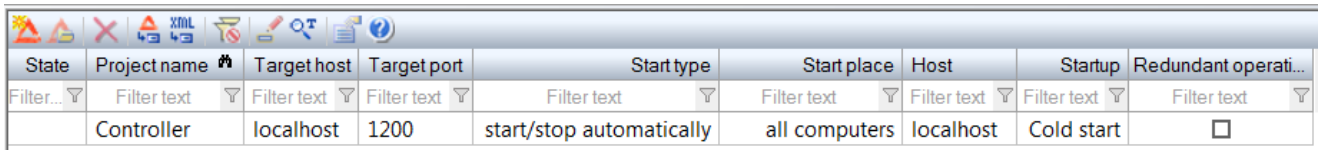


State	Name	Identification	Measur...	Net address	Data block	Offset	Bit num...	Alignm...	Symbol...	Driver	Data type	Decimals	Start offset
Filter text	Filter text	Filter text	Filter...	Filter text	Filter text	Filter text	Filter...	Filter...	Filter...	Filter text	Filter t...	Filter...	Filter text
	Speed_			0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	4	0
	control_signal			0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	4	0

Рисунок 2.26 – Змінні драйверу

У середовищі розробки zenon Logic Workbench було реалізовано модель об’єкта керування, засновану на створеному програмному модулі. Додатково, використовуючи отриманий користувацький функціональний блок, було розроблено програмне забезпечення для об’єкта керування (Додаток Б.1).

Що стосується регулятора, для реалізації його програмного забезпечення було створено окремий проект регулятора, деталі якого представлені на рисунку 2.27. Цей проект включає всі необхідні параметри та налаштування для ефективного керування процесами системи.



State	Project name	Target host	Target port	Start type	Start place	Host	Startup	Redundant operati...
Filter...	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
	Controller	localhost	1200	start/stop automatically	all computers	localhost	Cold start	☐

Рисунок 2.27 – Проект регулятора

Крім основних налаштувань, для регулятора були створені спеціалізовані змінні, що відображають уставку швидкості переміщення електродів дугової сталеплавильної печі, фактичне значення витрат, а також керуючий вплив. (Додаток Б.2).

Для забезпечення взаємодії між програмним забезпеченням об'єкта керування та регулятора було використано механізм розподілу «Allocations», який дозволяє синхронізувати дані та керувальні команди між різними частинами системи. Цей зв’язок детально представлено на рисунку 2.28, який

ілюструє, як координовано взаємодіють компоненти системи для забезпечення її ефективної роботи.

Name	Source variable	Target variable	Trigger variable	Trigger ty...
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
zenon_to_PLC	Controller/Global/Control_Reg	control_signal	< no variable linke...	Edge
PLC_to_zenon	Speed_	Controller/Global/Control__Speed	< no variable linke...	Edge

Рисунок 2.28 – Механізм розподілу «Allocations»

Отже, було створено два основних розподіли. Перший забезпечує копіювання значень швидкості руху електродів до регулятора, тоді як другий відповідає за передачу значень швидкості руху штока механізму переміщення електродів з регулятора до об'єкта керування. Ці механізми розподілу забезпечують взаємодію та координацію між різними компонентами системи для забезпечення точності та ефективності процесу керування.

2.8 Реалізація програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу

Людино-машинний інтерфейс (HMI) є однією з ключових складових програмного забезпечення САК. Цей інтерфейс є важливим для забезпечення ефективного управління та моніторингу системи, а також для взаємодії оператора з машиною. Основні функції, які повинен виконувати людино-машинний інтерфейс, включають:

- Моніторинг перехідного процесу: Це дозволяє операторам спостерігати за ходом процесів в реальному часі, відслідковуючи будь-які значущі зміни чи аномалії.

- Моніторинг параметрів об’єкта керування: Оператори можуть бачити актуальні дані про стан та роботу системи, що допомагає у прийнятті рішень.

- Моніторинг стану технологічного процесу з оповіщенням про аварійні події: Ця функція забезпечує безпеку обладнання та персоналу, оперативно інформуючи про будь-які проблеми або збої в системі.

З огляду на важливість цих функцій, основні вимоги до людино-машинного інтерфейсу можна визначити наступним чином:

- Мінімальне розширення екрану: Інтерфейс має бути розроблений так, щоб відображатися на мінімумі 1024x920 пікселів, що забезпечує достатню чіткість та деталізацію зображення для комфортної роботи оператора.

- Кількість зображень: Потрібно мати щонайменше 5 різних зображень, кожне з яких оснащене кнопками для навігації. Це включає зображення технологічної схеми, списку подій, графіку перехідного процесу та списку тривог, що дозволяє операторам швидко переходити між різними видами інформації для керування та контролю.

На рисунку 2.29 представлені кнопки людино-машинного інтерфейсу, кожна з яких призначена для виконання певної функції у системі управління:

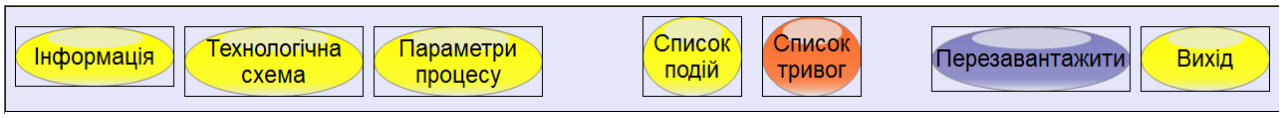


Рисунок 2.29 – Панель кнопок HMI

- Кнопка «Об’єкт керування»: Натискання цієї кнопки ініціює перехід до зображення технологічної схеми (рис. 2.30), на якій відображені датчики та виконавчі пристрої. Реалізація цієї кнопки використовує функцію "switch screen", що дозволяє змінювати екранний дисплей на інше зображення.

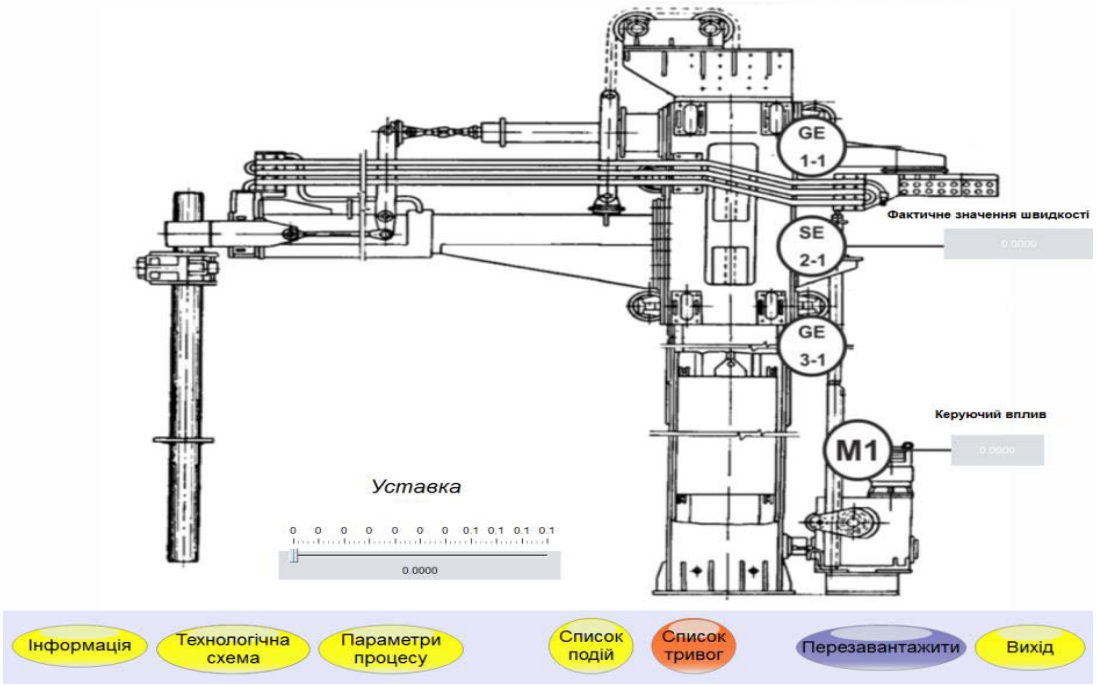


Рисунок 2.30 – Технологічна схема

- Кнопки «Діаграма зміни параметрів», «Список тривог», «Список подій»: Ці кнопки виконані за аналогічним принципом і дозволяють переходити до відповідних зображень, які представлені на рис. 2.31-2.33. Вони забезпечують доступ до деталізованої інформації про зміни параметрів, тривоги та події в системі.

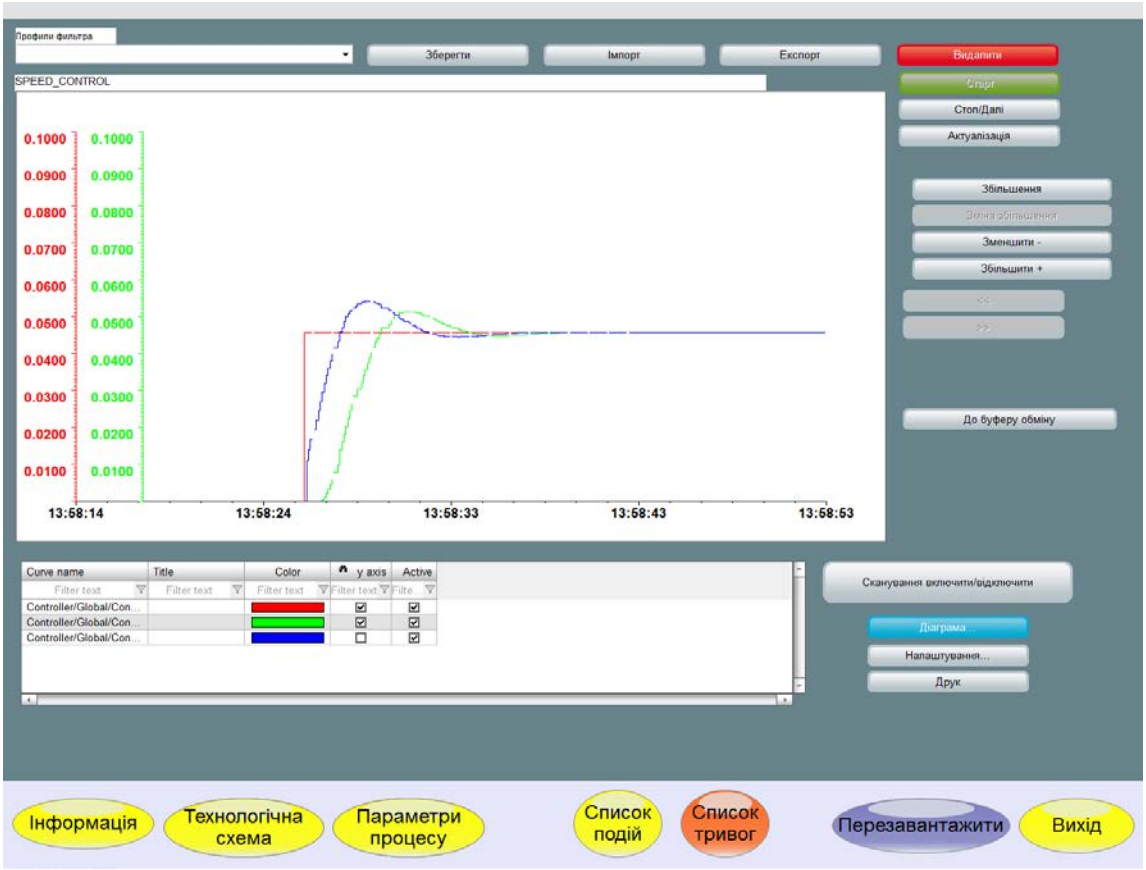


Рисунок 2.31 – Графік перехідного процесу

- Кнопки «Вихід» та «Перезавантажити»: Ці кнопки створені для критичних функцій керування інтерфейсом, де "Вихід" завершує роботу інтерфейсу за допомогою функції "exit runtime", а "Перезавантажити" викликає перезавантаження проекту через "reload project". Це дозволяє оператору швидко реагувати на потреби системи чи вирішувати проблеми оперативно.

Ці елементи інтерфейсу важливі для забезпечення зручності та ефективності роботи оператора, дозволяючи легко навігувати між різними розділами системи керування та відповідно реагувати на зміни у роботі обладнання або системних умов.

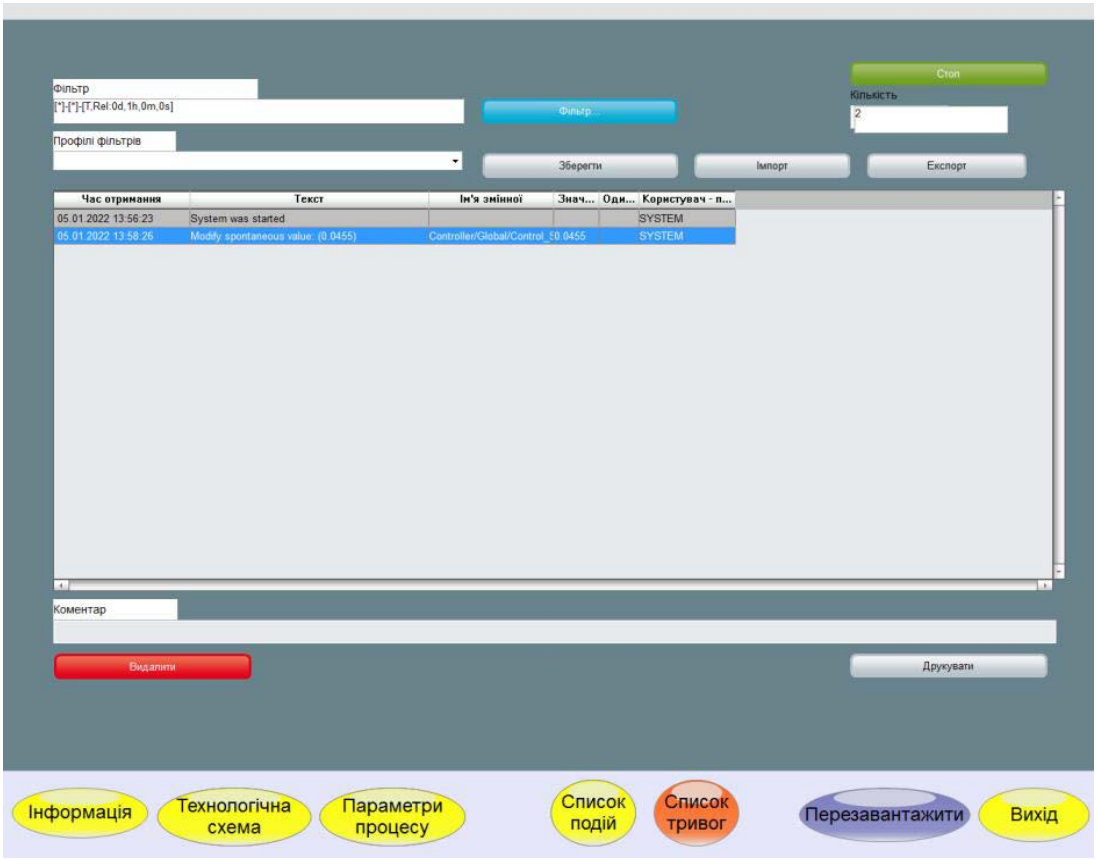


Рисунок 2.32 – Список подій

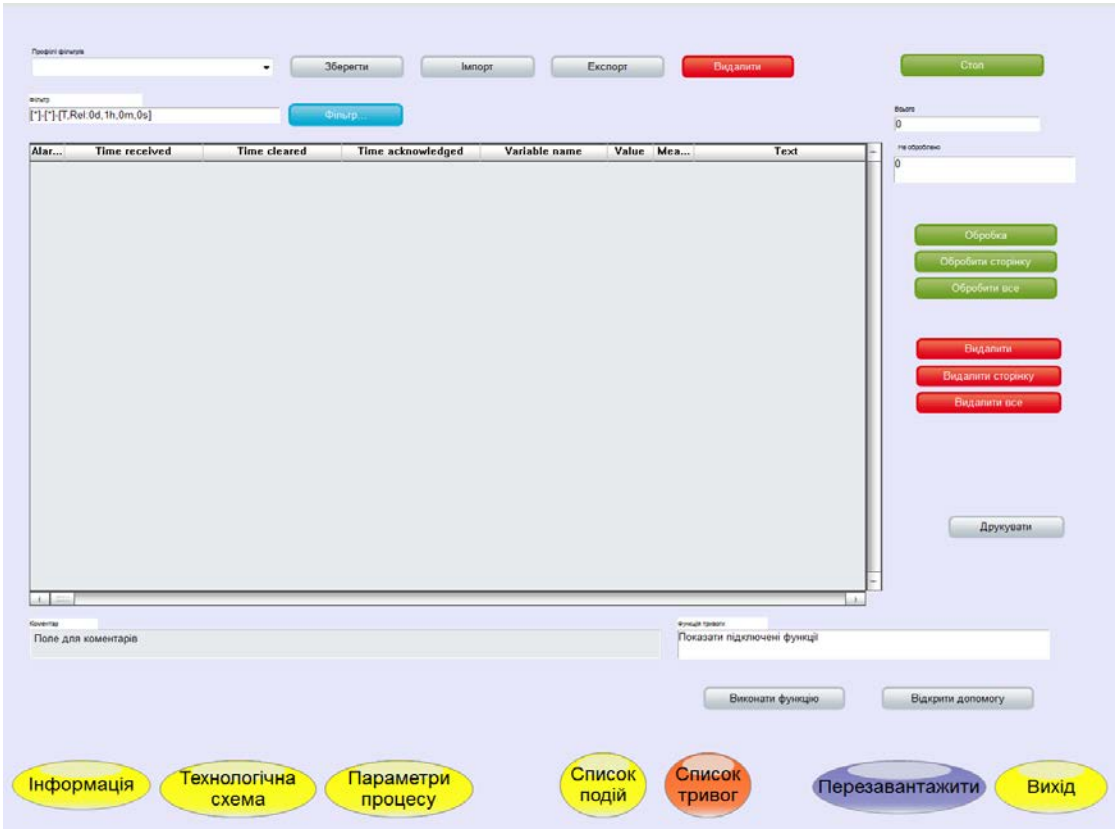


Рисунок 2.33 – Список тривог

Основні зображення людино-машинного інтерфейсу організовані у основному фреймі, тоді як зображення з кнопками відокремлені в окремий фрейм, який є статичним і відображається постійно. Це дозволяє забезпечити легкий доступ до основних функцій управління системою в будь-який час.

Для розробки зображень «Список подій» та «Список тривог» використані шаблони, що надаються SCADA системою zenon. Ці шаблони дозволяють створити чітке та інтуїтивно зрозуміле візуальне представлення подій та тривог, яке може бути легко інтегроване в загальну систему управління.

Деталізованіше розроблене програмне забезпечення HMI, включаючи використані методи, структуру інтерфейсу та інтеграцію з іншими системними компонентами, представлено в додатку В.

Під час перевірки функціонування програмного забезпечення було встановлено уставку швидкості переміщення електродів на рівні 0,0484 м/с. Аналіз даних з рисунка 2.34 підтверджує, що об'єкт керування та регулятор працюють адекватно, відповідаючи всім вимогам до якості роботи системи автоматичного керування.

У процесі тестування людино-машинного інтерфейсу було виявлено, що всі кнопки функціонують коректно. Технологічна схема на інтерфейсі точно відображає необхідну інформацію про стан та роботу системи. В інтерфейсі списку подій відображені відомості про зміни уставки швидкості переміщення електродів. Завдяки стабільній роботі системи автоматичного керування, список тривог залишається порожнім, що свідчить про нормальний режим роботи системи без виникнення критичних ситуацій. На основі проведеної перевірки, можна зробити висновок, що воно функціонує коректно та відповідає усім технічним вимогам, що пред'являються до системи автоматичного керування.

Це програмне забезпечення забезпечує надійну взаємодію між оператором та системою, ефективно демонструє необхідні дані та реагує на команди управління. Завдяки його стабільній роботі та високій функціональності,

програмне забезпечення ЛМІ готове до впровадження та експлуатації на виробництві.

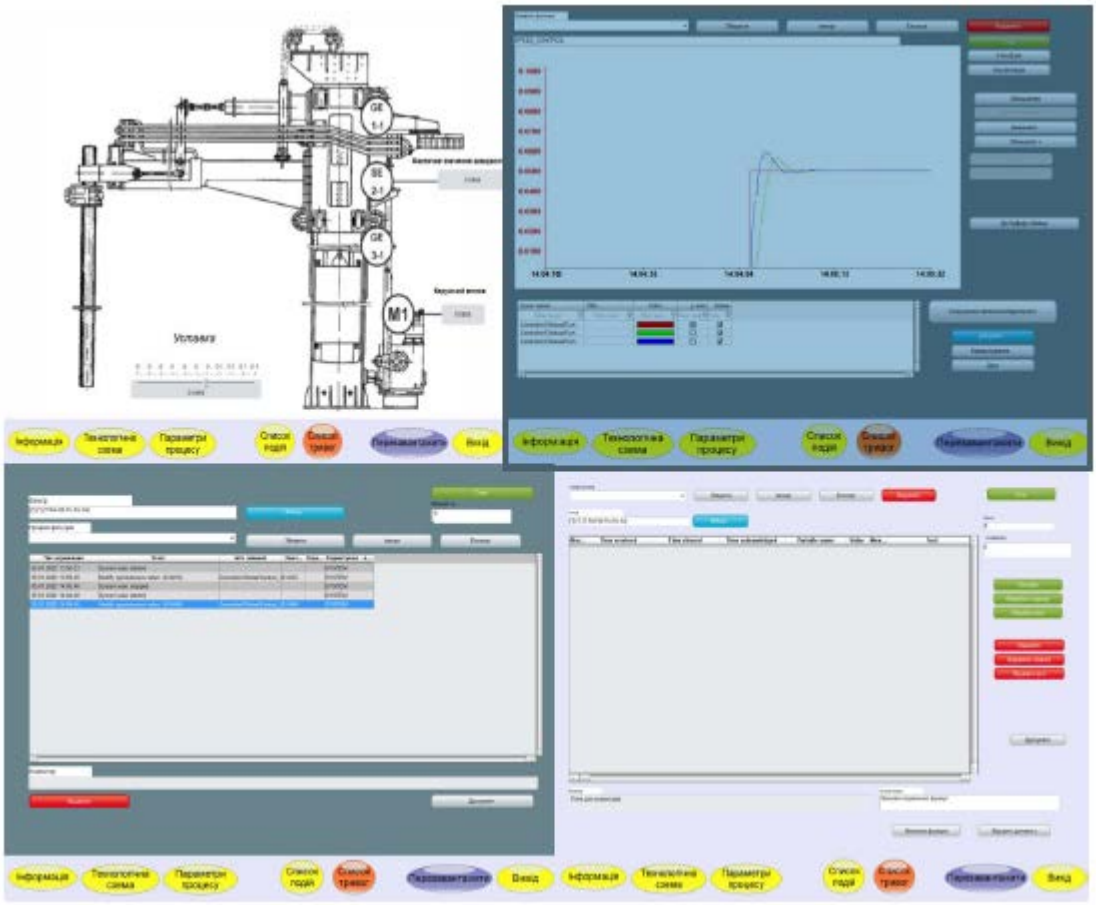


Рисунок 2.34 – Перевірка функціонування програмного забезпечення САК

Висновки до розділу:

Під час ідентифікації об'єкта керування з'ясувалося, що його передаточна функція для керуючого впливу є багатокомпонентною і складається з двох аперіодичних ланок, що з'єднані послідовно і мають постійні часу 0,3 с та 0,8 с відповідно. Це означає, що об'єкт керування має дві основні складові, кожна з яких характеризується своїм часом реакції. Високий ступінь відповідності між експериментальними даними та моделлю об'єкта, показник збігу яких дорівнює 100%, свідчить про те, що ця модель точно відображає поведінку системи та може бути використана для подальшої оптимізації керування.

На основі ідентифікації об'єкта керування за статичною

характеристикою робимо висновок, що об'єкт є лінійним. Це випливає з того, що абсолютні відхилення точок експериментальних вимірів від графіка рівняння лінійної регресії менш ніж 0,05 м/с, що становить менше 5% (у відносних одиницях). Також, виходячи з рівняння лінійної регресії видно, що коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці по каналу керування. Це вказує на те, що об'єкт реагує на керуючий вплив без затримок або втрати сигналу, що сприяє ефективному та простому управлінню ним.

Система автоматичного керування швидкістю переміщення електродів повинна бути розроблена таким чином, щоб мінімізувати швидкісну похибку під час розгону та гальмування електродів на більшій частині еталонної діаграми. Таким чином, якість роботи САК швидкістю переміщення електродів ДСП визначається при синтезі САК електродами.

При цьому необхідно враховувати технологічну вимогу щодо плавності переміщення електродів, що сприяє збільшенню терміну служби обладнання механізму переміщення електродів за рахунок запобігання різким перепадам моментів опору руху деталей обладнання. Також з урахуванням технічних характеристик механізму переміщення електродів, було визначено, що максимальне прискорення електродів має бути обмежене рівнем 0,25 м/с².

Визначено, що під час оптимізації зовнішнього контуру керування відстанню, яку проходять електроди, модель Еллерта, замкнена передаточна функція САК швидкістю переміщення електродів має відповідати підсилювальній ланці з коефіцієнтом підсилення одиниця. Однак це призводить до значного перевищення фактичним прискоренням руху електродів порівняно з допустимим значенням. Таким чином, у передаточну функцію регулятора швидкості переміщення електродів ДСП додана штучна інерційність, керована постійною часу регулятора. Критерієм якості налаштування регулятора швидкості виступає ступінь відхилення перехідного процесу від одиничного східчастого сигналу, виражений через інтегральну похибку керування, що обчислюється як площа між графіком перехідного процесу та графіком східчастого сигналу.

Встановлено, що існує пряма та майже лінійна залежність інтегральної похибки керування швидкості руху електродів від постійної часу регулятора. Водночас, залежність максимального фактичного прискорення руху електродів від цієї постійної часу є оберненою та нелінійною. Отже, згідно з першою зазначеною закономірністю, постійна часу регулятора має бути мінімальною. Однак, з огляду на другу закономірність, постійну часу вибирають так, щоб максимальне фактичне прискорення руху електродів не перевищувало своє допустиме значення.

ВИСНОВКИ

Технологічний об'єкт, розглянутий у кваліфікаційній роботі, - це механізм переміщення електродів дугової сталеплавильної печі. Основним об'єктом дослідження є одна з локальних систем автоматичного керування цієї печі, мета якої полягає в забезпеченні заданої швидкості переміщення електродів.

Об'єкт керування - неперервний та одномірний, має один керуючий вхід (перетворювач частоти - привід механізму переміщення електродів) та один керований вихід (швидкість руху електродів). Проте, керування цим об'єктом ускладнене через наявність двох важливих факторів: з одного боку, існує сувора вимога до швидкодії системи, з іншого боку – наявні обмеження щодо керуючого впливу.

Для зменшення похибки позиціонування електрода, з урахуванням обмежень на швидкість його переміщення та прискорення, пропонується застосувати систему підпорядкованого автоматичного керування. У внутрішньому контурі регулювання здійснюється за швидкістю з використанням методу параметричної оптимізації для налаштування регулятора, що дозволяє усунути похибку швидкості та, як результат, зменшити похибку позиціонування електрода. У зовнішньому контурі керування базується на відстані, яку електрод пройшов.

На основі ідентифікації об'єкта керування за статичною характеристикою робимо висновок, що об'єкт є лінійним. Це випливає з того, що абсолютні відхилення точок експериментальних вимірів від графіка рівняння лінійної регресії менш ніж 0,05 м/с, що становить менше 5% (у відносних одиницях). Також, виходячи з рівняння лінійної регресії видно, що коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці по каналу керування.

Це вказує на те, що об'єкт реагує на керуючий вплив без затримок або втрати сигналу, що сприяє ефективному та простому управлінню ним.

Система автоматичного керування швидкістю переміщення електродів повинна бути розроблена таким чином, щоб мінімізувати швидкісну похибку під час розгону та гальмування електродів на більшій частині еталонної діаграми. Таким чином, якість роботи САК швидкістю переміщення електродів ДСП визначається при синтезі САК електродами.

Отримані в ході досліджень дані дозволили розробити метод налаштування регулятора швидкості переміщення електродів в дуговій сталеплавильній печі, спеціально для системи з підпорядкованим керуванням переміщенням електродів, де контур керування за швидкістю виконує роль внутрішнього. Цей метод забезпечує мінімізацію впливу інерції контуру керування за швидкістю на перехідний процес вихідної системи підпорядкованого керування за відстанню, яку пройшли електроди. Таким чином, забезпечується висока точність позиціонування електродів без ризику перевищення динамічних обмежень їхнього переміщення.

Розроблено програмне забезпечення для об'єкта керування, регулятора та людино-машинного інтерфейсу. Проведена перевірка функціональності системи автоматичного керування та інтерфейсу підтвердила, що програмне забезпечення для об'єкта керування, регулятора та інтерфейсу працює коректно і відповідає вимогам системи автоматичного керування швидкістю переміщення електродів дугової сталеплавильної печі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи металургії, т. 1—6, М., 1961-73.
2. Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник. К.: Вища шк., 2006.503 с.
3. Верещаго, Е.Н. Модель электрической дуги в MatLab /Simulink. Електротехніка і електроенергетика. 2013. №2.С. 40-46.
4. Власов К. П. Теория автоматического управления: учебное пособие. Харьков: Гуманитарный центр, 2007. 526 с.
5. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
6. Нікіфорова В. Економічний огляд металургійної галузі України / Рейтинг: Інститут економіки промисловості НАН України. url: https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metalurhijnoi-haluzi-ukrainy/ (дата звернення 21.04.2024)
7. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. ISBN 966-7804-90-9
8. Колчеганов, Р.В., Купова А.В., Дерюжкова, Н.Е. Модель дуговой сталеплавильной печи в MatLab// Современные наукоемкие технологии. 2014. №5(1). С. 50-51.
9. Федченко, И.К. Измерение температуры электрической дуги. Киев: Техника, 1966. 154 с.
10. Bowman B., Kruger K. Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH. 2009. 245 p.
11. Cassie A.M. A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity // CIGRE. 1939. №102. PP.1-14.

					КНУ КРБ.151.24.06.00.ПЗ		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розроб.		*Пузирей К.С.*			*СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ*	*Літ.*	*Арк.* 62 / *Аркушів* 3
Перевір.		*Маринич І.А,*					
						КНУ АКІТ-20	
Н. Контр.		*Маринич І.А.*					
Затвердив		*Тронь В.В.*					

18. Cavallini A., Montanari G.C., Pitti L., Zaninelli D. ATP simulation for arc fur- nace flicker investigation // ETEP.1995. Vol. 5. №3. PP.235–241.

19. Collantes-Bellido R., Gomez T. Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation // IEEE Transactions on Power Deliv- ery.1997. Vol.12. №4. PP.1812-1817.

20. Gelada J. Electrical analysis of the steel melting arc furnace // Iron and Steel Engineer.1993. Vol.70. №5. P.35-39.

21. Heydt G.T., O'Neill-Carrillo E., Zhao R.Y. The modeling of nonlinear loads as chaotic systems in electric power engineering // Proc. Of the IEEE/PEC Interna- tional Conference on Harmonics and Quality of Power. Las Vegas.1996. PP.704- 711.

22. Higgs R.W. Sonic Signature Analysis for Arc Furnace Diagnostics and Control// Proc. of Ultrasonics Symposium. Milwaukee. 1974. PP.653-663.

23. Mallat, S. A. Wavelet tour of signal processing. Academic Press, 2009. 832p.

24. Ozgun O., Abur A. Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies // Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. № 1. P.507–511.

25. Richardson G.D. Physycal Chemistry of Melts in Metallurgy. N.Y.: Acad. Press. 1974. Vol. 1, 2.

26. Ting W., Wennan S., Yao Z. A New Frequency Domain Method for the Har- monic Analysis of power system with Arc Furnace // 4th international conference on advances in power system control. 1997. PP.552–555.

27. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології". Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

28. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

29. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

30. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

31. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

ДОДАТОК А

Програмні модулі системи управління

А1. Модуль об’єкта керування

```
(*
* File: MOD_SYS_group.exp
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "MOD_SYS_group/Об'єкт"
* Model name : MOD_SYS_group
* Model version : 1.30
* Model creator : WORK
* Model last modified by : Puzyrey
* Model last modified on : Fre Feb 07 14:22:13 2024
* Model sample time : 0s
* Subsystem name : MOD_SYS_group/Об'єкт
* Subsystem sample time : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.8 (R2018b) 06-Aug-2019
* ST code generated on : Fre Feb 07 14:22:13 2024
* Target IDE selection : 3S CoDeSys 2.3
* Test Bench included : No
*)
FUNCTION_BLOCK sfun_target
VAR_INPUT
ssMethodType: SINT;
Object_control: LREAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
Object_speed: LREAL;
END_VAR
VAR
DiscreteTransferFcn_states: LREAL;
DiscreteTransferFcn1_states: LREAL;
END_VAR
VAR_TEMP
DiscreteTransferFcn: LREAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
SS_INITIALIZE:
(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
DiscreteTransferFcn_states := 0.0;
(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1'
*)DiscreteTransferFcn1_states := 0.0;
SS_STEP:
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
DiscreteTransferFcn := 0.117503097415405 * DiscreteTransferFcn_states;
(* Outport: '<Root>/Object_speed' incorporates:
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
Object_speed := 0.283468689426211 * DiscreteTransferFcn1_states;
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' incorporates:
* Update for Inport: '<Root>/Object_control' *)
DiscreteTransferFcn_states := Object_control - (-0.882496902584595 * DiscreteTransferFcn_states);
```

```
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
DiscreteTransferFcn1_states := DiscreteTransferFcn - (-0.716531310573789 *
DiscreteTransferFcn1_states);
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
VAR_GLOBAL CONSTANT
SS_INITIALIZE: SINT := 0;
SS_STEP: SINT := 1;
END_VAR
VAR_GLOBAL
END_VAR
```

А2. Модуль регулятора

```
(*
* File: MOD_SYS_group.exp
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "MOD_SYS_group/РЕГУЛЯТОР"
* Model name : MOD_SYS_group
* Model version : 1.30
* Model creator : WORK
* Model last modified by : Puzyrey
* Model last modified on : Fre Feb 07 14:22:13 2024
* Model sample time : 0s
* Subsystem name : MOD_SYS_group/Регулятор
* Subsystem sample time : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.8 (R2018b) 06-Aug-2019
* ST code generated on : Fre Feb 07 14:22:13 2024
* Target IDE selection : 3S CoDeSys 2.3
* Test Bench included : No
* Subsystem name : MOD_SYS_group/РЕГУЛЯТОР
*)
FUNCTION_BLOCK sfun_target
VAR_INPUT
ssMethodType: SINT;
reg_error: LREAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
reg_control: LREAL;
END_VAR
VAR
DiscreteTransferFcn2_states: LREAL;
DiscreteTransferFcn3_states: LREAL;
END_VAR
VAR_TEMP
DiscreteTransferFcn2_tmp: LREAL;
DiscreteTransferFcn3_tmp: LREAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
SS_INITIALIZE:
(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn2' *)
DiscreteTransferFcn2_states := 0.0;
(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn3' *)
DiscreteTransferFcn3_states := 0.0;
SS_STEP:
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn2' incorporates:
```

```
* Inport: '<Root>/reg_error' *)
DiscreteTransferFcn2_tmp := reg_error - (-0.818730753077982 * DiscreteTransferFcn2_states);
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn3' incorporates:
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn2' *)
DiscreteTransferFcn3_tmp := ((0.8 * DiscreteTransferFcn2_tmp) + (-0.709365376538991 *
DiscreteTransferFcn2_states)) - ( -DiscreteTransferFcn3_states);
(* Outport: '<Root>/reg_control' incorporates:
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn3' *)
reg_control := (0.3 * DiscreteTransferFcn3_tmp) + (-0.2 * DiscreteTransferFcn3_states);
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn2' *) DiscreteTransferFcn2_states :=
DiscreteTransferFcn2_tmp; (* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn3' *)
DiscreteTransferFcn3_states := DiscreteTransferFcn3_tmp;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
VAR_GLOBAL CONSTANT
SS_INITIALIZE: SINT := 0;
SS_STEP: SINT := 1;
END_VAR
VAR_GLOBAL
END_VAR
```

ДОДАТОК Б

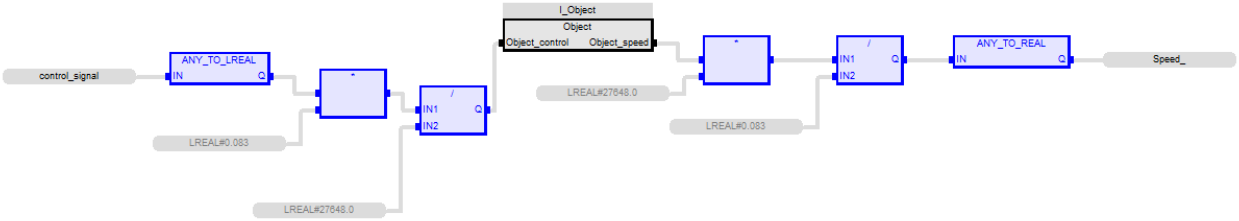
Програмне забезпечення системи керування

Б.1 Програмне забезпечення об’єкта

Б.1.1 Список програм

[FBD] Main
[ST] Object

Б.1.2 Основна програма



Б.1.3 Користувальницький функціональний блок

```
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
DiscreteTransferFcn := LREAL#0.117503097415405 * DiscreteTransferFcn_states;
(* Outport: '<Root>/Object_speed' incorporates:
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
Object_speed := LREAL#0.283468689426211 * DiscreteTransferFcn1_states;
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' incorporates:
* Update for Inport: '<Root>/Object_control' *)
DiscreteTransferFcn_states := Object_control - (LREAL#-0.882496902584595 *
DiscreteTransferFcn_states);
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
```

Б.1.4 Перелік змінних

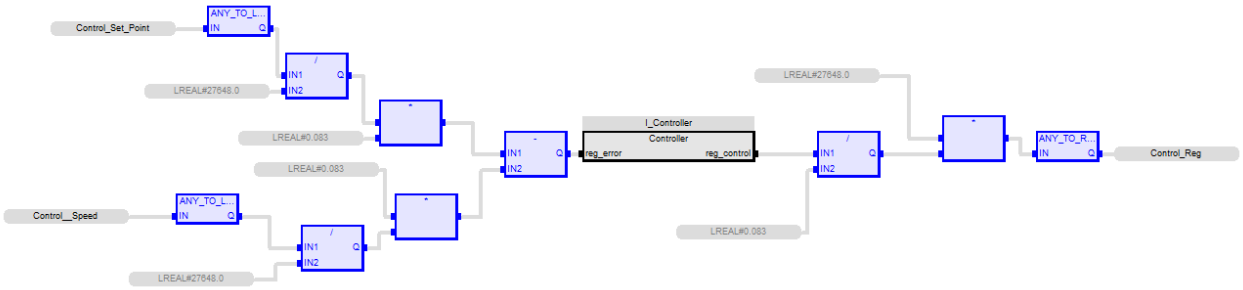
```
VAR_INPUT
Object_control : LREAL ;
END_VAR
VAR_OUTPUT
Object_speed : LREAL ;
END_VAR
VAR
DiscreteTransferFcn_states : LREAL ;
DiscreteTransferFcn1_states : LREAL ;
DiscreteTransferFcn : LREAL ;
END_VAR
```

Б.2 Програмне забезпечення регулятора

Б.2.1 Список програм

[FBD] Main
[ST] Controller

Б.2.2 Основна програма



Б.2.3 Користувальницький функціональний блок

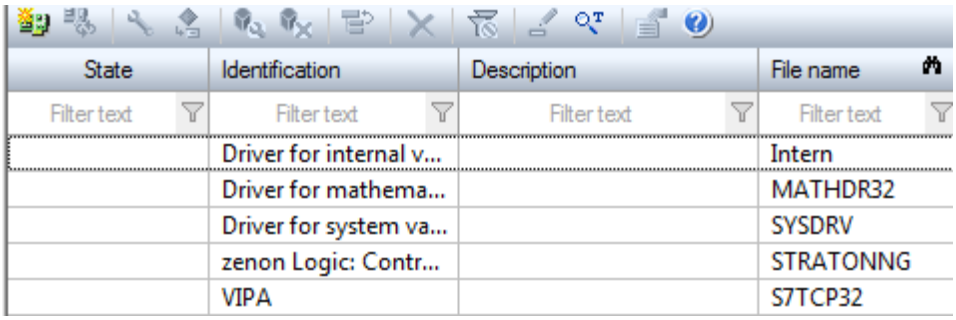
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn2' incorporates:
* Inport: '<Root>/reg_error' *)
DiscreteTransferFcn2_tmp := reg_error - (LREAL#-0.818730753077982 * DiscreteTransferFcn2_states);
(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn3' incorporates: DiscreteTransferFcn1_states := DiscreteTransferFcn - (LREAL#-0.716531310573789 * DiscreteTransferFcn1_states);

Б.2.4 Перелік змінних

VAR_INPUT
reg_error : LREAL ;
END_VAR
VAR_OUTPUT
reg_control : LREAL ;
END_VAR
VAR
DiscreteTransferFcn2_states : LREAL ;
DiscreteTransferFcn3_states : LREAL ;
DiscreteTransferFcn2_tmp : LREAL ;
DiscreteTransferFcn3_tmp : LREAL ;
END_VAR

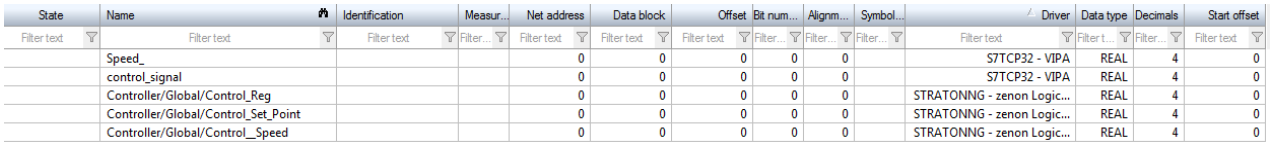
ДОДАТОК В

Програмне забезпечення людино-машинного інтерфейсу



State	Identification	Description	File name
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
	Driver for internal v...		Intern
	Driver for mathema...		MATHDR32
	Driver for system va...		SYSDRV
	zenon Logic: Contr...		STRATONNG
	VIPA		S7TCP32

Рисунок В.1 – Драйвера



State	Name	Identification	Measur...	Net address	Data block	Offset	Bit num...	Alignm...	Symbol...	Driver	Data type	Decimals	Start offset
Filter text	Filter text	Filter text	Filter...	Filter text	Filter text	Filter text	Filter...	Filter...	Filter...	Filter text	Filter t...	Filter...	Filter text
	Speed_			0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	4	0
	control_signal			0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	4	0
	Controller/Global/Control_Reg			0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	4	0
	Controller/Global/Control_Set_Point			0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	4	0
	Controller/Global/Control__Speed			0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	4	0

Рисунок В.2 – Перелік змінних

State	Name	Type	Parameter
F...	Filter text	Filter text	Filter text
	ExitRuntime	Exit Runtime	
	ReloadProject	Reload project onli...	changed objects
	SwitchTrendScreen	Screen switch	Trend (Extended Trend) - SPEED_C...
	SwitchProcessScreen	Screen switch	Tech_shem (Standard)
	SwitchCELScreen	Screen switch	CELScreen (Chronological Event Lis...
	SwitchButtonScreen	Screen switch	ButtonScreen (Standard)
	SwitchAMLScreen	Screen switch	AMLScreen (Alarm Message List) - [...
	SwitchMain	Screen switch	Main (Standard)

Рисунок В.3 –Функції