

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний економічний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ПЕТРИКІВ Юрій Михайлович

ДВОРІВНЕВА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ГОЛОВНИМ ПРИВОДОМ СТАНУ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТУ /
TWO-LEVEL SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE MAIN
DRIVE OF THE FORGING OF THE PIPE-ROLLING UNIT

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
магістерська програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21
Ю.В. Петриків

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Магістерську роботу допущено до захисту:

" ____ " _____ 20__ р.

Завідувач кафедри

Я.М. Николайчук

Тернопіль 2018

Тернопільський національний економічний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
магістерська програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ Я.М.Николайчук

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ПЕТРИКІВ Юрій Михайлович

_____ (прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема магістерської роботи

_____ Дворівнева система автоматизованого управління головним приводом стану
трубопрокатного агрегату / Two-level system of automated control of the main drive of
the forging of the pipe-rolling unit _____

_____ керівник роботи _____ к.т.н., доцент А. І. Сегін

_____ затвержені наказом по університету від "14" листопада 2017 р. № 804

2. Строк подання студентом закінченої магістерської роботи 16 листопада 2018р.

3. Вихідні дані до магістерської роботи:

1. Трубопрокатний агрегат _____
2. Технологічний процес трубопрокату _____
3. Вимоги до технічної експлуатації системи _____
4. Контроль параметрів технологічного процесу _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Опис технологічного процесу. _____
2. Структура та розрахунок параметрів системи автоматичного управління. _____
3. Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання. _____
4. Застосування логіко-статистичних інформаційних моделей для контролю станів трубопрокатного агрегату. _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6. Консультанти розділів магістерської роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 14 листопада 2017 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1 | Опис технологічного процесу | 11.2017р. – 01.2018р. | |
| 2 | Структура та розрахунок параметрів системи автоматичного управління | 02.2018р. – 04.2018р. | |
| 3 | Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання | 05.2018р. – 07.2018р. | |
| 4 | Застосування логіко-статистичних інформаційних моделей для контролю станів трубопрокатного агрегату | 08.2018р. – 1.10.2018р. | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ (підпис)

Ю. М. Петриків

Керівник магістерської роботи

_____ (підпис)

к.т.н., доцент А. І. Сегін

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 70 сторінках та містить 23 рисунки, 2 таблиці, 25 джерел за переліком посилань.

Мета роботи: є розробка дворівневої системи автоматизованого управління головним приводом прошивного стану трубопрокатного агрегату.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного управління, математичної статистики та теорії джерел інформації. Інструментальні засоби моделювання, планування, математичного, алгоритмічного і програмного забезпечення задач аналізу та синтезу складних комп'ютерно-інтегрованих систем.

Результати роботи та їх новизна. Розроблена дворівневої системи автоматизованого управління головним приводом прошивного стану трубопрокатного агрегату з використанням логіко статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1.

Рекомендації по використанню результатів роботи. Розроблена система автоматизованого управління дозволяє більш надійно контролювати швидкість подачі заготовок до прошивного стану за рахунок розрахованих та спроектованих регуляторів і застосування логіко-статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1.

Можливі напрямки розвитку. Розроблену систему автоматизованого управління можливо вдосконалити ввівши багатоканальну ЛСІМ 1 для контролю більше параметрів технологічного процесу.

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС РОБОТИ ПРОШИВНОГО СТАНУ, ТРУБОПРОКАТНИЙ АГРЕГАТ, ГОЛОВНИЙ ПРИВІД ПРОШИВНОГО СТАНУ, ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ.

ABSTRACT

Work is executed on 70 pages and including 23 illustrations, 2 tables, 25 source after the list of references.

Purpose of work: is the development of a two-level system of automated control of the main drive of the forging state of the pipe rolling mill.

Research methods. Methods of the theory of automatic control, mathematical statistics and the theory of sources of information. Instrumental means of modeling, planning, mathematical, algorithmic and software problems of analysis and synthesis of complex computer-integrated systems.

Results of work and their novelty. The two-level system of automated control of the main actuator of the shaft state of the pipe-rolling unit was developed with the use of the logical statistical information model LSIM 1.

Recommendations after the use of job performances: The developed system of automated control allows more reliable control over the speed of delivery of billets to the bare state at the expense of designed and designed regulators and the application of the logical-statistical information model LSIM 1.

Possible development. The developed automated control system can be improved by introducing multichannel LSIM 1 to control more parameters of the technological process.

Keywords: TECHNOLOGICAL PROCESS OF PROFESSIONAL STATE, PIPE-BASED AGGREGATE, PRESSURE PROFILE, TRANSFER FUNCTION, SYSTEM OF AUTOMATED MANAGEMENT.

ЗМІСТ

ВСТУП

| | |
|--|--|
| 1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ..... | |
| 1.1 Технологія роботи прошивного стану..... | |
| 1.2 Вибір типу електроприводу і двигуна силового перетворювача..... | |
| 1.3 Обґрунтування вибору і розрахунок параметрів двигуна та тиристорного перетворювача..... | |
| 2. СТРУКТУРА ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ..... | |
| 2.1 Вибір системи автоматичного регулювання..... | |
| 2.2 Розрахунок технічних параметрів елементів системи автоматичного регулювання..... | |
| 2.3 Розрахунок регульовальної характеристики системи..... | |
| 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ..... | |
| 3.1 Вимоги до регуляторів системи автоматизованого управління трубопрокатного станка..... | |
| 3.2 Розрахунок регулятора струму..... | |
| 3.3.Розрахунок регулятора магнітного потоку..... | |
| 4 ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІКО-СТАТИСТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНІВ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТУ..... | |
| 4.1 Теорія побудови логіко-статистичних інформаційних моделей..... | |
| 4.2 Побудова логіко-статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1 для контролю швидкості подачі заготовок в прошивний стан..... | |
| ВИСНОВОК | |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | |

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з актуальних задач, що стоїть перед трубною промисловістю народного господарства України, є скорочення виробничих затрат при забезпеченні високої якості продукції, що випускається. Виробництво труб на трубопрокатних агрегатах (ТПА) з безперервними станами отримало найбільший розвиток у зв'язку з високою продуктивністю і економічністю. З огляду на велику потребу всіх галузей промисловості в сталевих трубах в нашій країні побудовані і будуються високопродуктивні агрегати по трубному виробництву. Одним з основних способів виробництва безшовних гарячекатаних труб є безперервне розкочування на довгій рухомій оправці. Такий спосіб отримання чорнових труб використовується, зокрема на станку ТПА-30-102. Розробка електроприводу і системи автоматичного регулювання прошивного стану ТПА 30-102 відповідно до сучасних вимог з використанням досягнень науки і техніки є темою даної випускної кваліфікаційної роботи.

В даний час для промисловості пропонується широке коло засобів автоматизації, застосування яких дозволить створити системи управління електроприводів агрегатів відповідно до поставлених вимог технології.

На базі представлених на ринку засобів автоматизації в роботі розробляється система автоматизованого управління головного приводу прошивного стану трубопрокатного агрегату з врахуванням особливостей технологічного процесу.

Мета досліджень полягає у модернізації системи автоматизованого управління головного електроприводу прошивного стану (ТПА) з використанням логіко-статистичних інтегральних моделей, які дозволять контролювати різноманітні параметри та скоротити кількість аварійних ситуацій.

Предметом дослідження є система автоматизованого управління

головного електроприводу прошивного стану.

Об'єктом дослідження є електрообладнання прошивного стану (ТПА 30-102).

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні вибору та застосуванні логіко-статистичної інформаційної моделі для контролю параметрів об'єкта управління з метою підвищення надійності системи автоматичного управління.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що використання ефективних систем автоматичного управління в трубопрокатних агрегатах дозволяє забезпечити зменшення кількості аварійних ситуацій, підвищення продуктивності та надійності і здешевлення виробництва в цілому.

Напрямки подальшого розвитку. Результати роботи в подальшому дозволять модернізувати розроблену систему автоматизованого управління за рахунок використання більш сучасних контролерів та мікропроцесорних засобів збору і обробки інформації від об'єкту управління та генерування керуючих впливів на виконавчий механізм.

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Технологія роботи прошивного стану

Трубопрокатна установка складається з двох нагрівальних печей, валкового прошивного стану, автоматичного стану, двох обкатних машин, калібрувального стану, охолоджувального столу, трубопрокатного стану (рисунок 1).

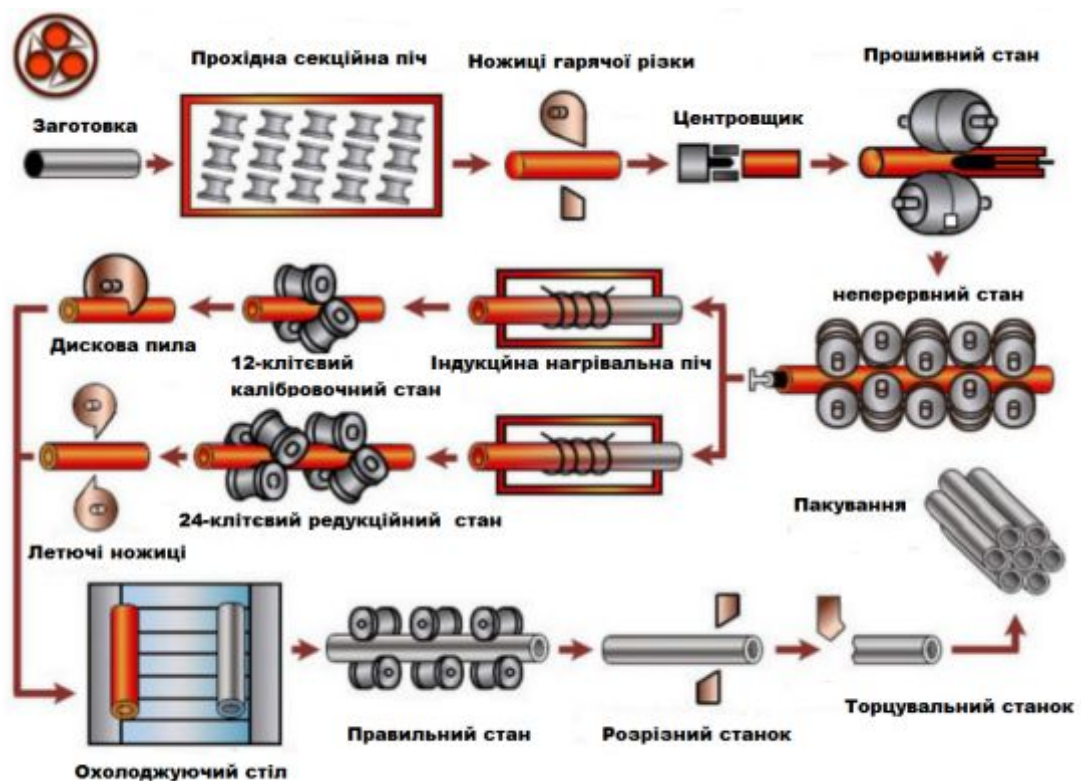


Рисунок 1.1 – Схема виробництва.

До кожної печі заготовки подають краном і укладають на стелажі перед завантажувальними вікнами. Завантаження їх у піч і кантування проводиться вручну.

Нагріті до заданої температури в методичних печах заготовки видаються по черзі з кожної печі фрикційними виштовхувачами в загальний жолоб видачі, розташований між обома печами. з жолоба заготовки

пневматичними скидачами, наявними у кожної печі, видаються на похилу решітку, потім вони скочуються на рольганг перед пневматичним центрувальником.

У разі неякісного нагріву або тривалої затримки перед прошивкою заготовка в стан не ставиться, а відводиться рольгангом в зворотному напрямку і скидається в кишеню. Центрувальником заготовка передається пневматичним скидачем на похилу решітку, розташовану перед прошивним станом, з якої вона скочується в приймальний жолоб прошивного стану. Щоб уникнути сильного биття заднього кінця заготовки при прошивці, жолоб закривається спеціальною кришкою. Заготовка подається у валки прошивного стану пневматичним штовхачем через вхідну воронку, встановлену між шпинделями на передній стороні робочої кліті. Для запобігання передчасної подачі заготовок у воронці встановлений упор, який при подачі забирається.

На вихідній стороні стану розміщені такі механізми: роликові й секторні центрувальники, кришки проводок, привідний відтяжний ролик, круговий викидач і підпрірний підшипник, який переміщається від канатного електроприводу.

Прошиті гільзи перекочуються по похилій решітці в приймальний жолоб автоматичного стану. Автоматичний стан розгортає гільзи в труби із заданою товщиною стінки. Розкачування гільзи до необхідної товщини стінки проводиться, як правило, в два проходи в одному і тому ж калібрі. Труби, які не потребують калібрування, і труби підвищеної точності по стінці прокочуються в три проходи.

У комплекс механізмів автоматичного стану входять: робоча кліть, головний привід, передній і задній столи, механізм роликів зворотної подачі з приводом і допоміжне обладнання (пневматичний викидач, заштовхувач, клиновий пристрій підйому валка).

На передньому столі розміщені довгоходові пневматичні заштовхувачі. Середня секція жолобу виконана підйомно-поворотною для того, щоб можна було поставити трубу в валки іншим кінцем. Підйом цієї секції разом з трубою здійснюється пневматичним циліндром. Стіл вздовж калібрів валків пересувається від самостійного електроприводу.

В кінці заднього столу розташований упор для закріплення стрижня. Після кожного проходу оправлення знімається зі стрижня вручну. Перед поданням для другого проходу трубу кантують на 90° також вручну. Прокатана на автоматичному стані труба викидачем видається на похилу решітку до обкатних машин.

Обкатані машини призначені для розкочування зовнішніх і внутрішніх вад на трубах, головним чином, рисок. В результаті розкочування на обкатних машинах діаметр труби збільшується на 2 ... 3 мм, а труба набуває правильну круглу форму. При обкатці зменшується різниця в товщині стінок труби.

Перед вступним жолобом першої обкатом машини встановлений механізм для вирівнювання труб, що скочуються по похилій решітці, а також для подальшого підштовхування їх до ввідного жолобу другої обкатної машини.

Подання труб в обкатані машини проводиться по черзі. Якщо ввідний жолоб першої обкатної машини перекритий перекивачем, то чергова труба перекочується по похилій решітці в приймальний жолоб другої машини. В комплекс механізмів обкатом машини входить фрикційний заштовхувач, робоча кліть, головний привід, підпирний підшипник, центрувачі, кришки провідок, скидач, привідний відтягуючий ролик, замкова кліть.

Регулювання обтиску на машині здійснюється вручну за показаннями амперметра, що змінює навантаження двигуна головного приводу. Після обкатки труби з обох машин видаються викидачами по решіткам на

загальний відвідний рольганг, по яким вони транспортуються в калібрувальний стан для калібрування на заданий діаметр.

Після калібрування труби надходять по відвідному рольгангу до скидача, яким передаються на першу секцію охолоджувального столу ланцюгового типу, після чого проміжним рольгангом вони передаються на другу секцію.

Для подання заготовки в прошивний стан, встановлений довгоходовий пневматичний циліндр. Подача заготовки у валки прошивного стану здійснюється пневматичним штовхачем, керованим вальцовщиком стану за допомогою дистриб'ютора (направляючого апарату). Валки стану конусоподібні, осі обертання яких знаходяться під кутом один до одного.

Валки обертаються в одну сторону, надаючи заготовці обертовопоступальний рух. Рухаючись уздовж осі прошивки, заготовка обжимається валками і зустрічає на своєму шляху оправлення, яке входить в заготовку і прошиває її, утворюючи із заготовки порожнисту гільзу. Для можливості прокатки на автоматичній установці широкого асортименту труб як за розмірами, так і за марками сталі, валки прошивного стану мають можливість змінювати кут нахилу до осі прошивки. Прошивка заготовки з вуглецевих і легованих марок сталі виробляється на незмінюваній оправці, яка встановлюється в наконечник стрижня підпірного підшипника. Прошивка заготовки з високолегованих, нержавіючих марок сталі і сплавів проводиться на незмінюваній оправці, яка встановлюється в наконечник стрижня підпірного підшипника після кожної прошивки заготовки.

Прошита заготовка (гільза) відводиться від валків робочої клітини підйомним приводним роликком, з оправкою виводиться із гільзи зворотним ходом підпірного підшипника. Звільнена від стрижня гільза круговими викидачами видається на похилу решітку, через яку викочується в вирівнювальний рольганг, а звідти передається в жолоб автомат стану.

З метою скорочення часу подання заготовки у валки необхідно відразу

ж після її падіння в жолоб штовхачем подати якомога ближче до кліті стану. При готовності стану до прийому заготовки час остаточної подачі її в валки з близької відстані буде значно менший. При поверненні поршня штовхача в початкове положення не можна допускати удару поршня об кришку циліндра. Тому замість глухої задньої кришки циліндра була встановлена спеціальна демпфуюча головка, що має два вихлопних отвори з редукційним клапаном.

Щоб зафіксувати попередню зупинку штовхача з заготовкою перед кліттю стану, на вхідній воронці встановлений механічний усувний упор з пневматичним приводом.

Під час передчасної подачі заготовки упор перекриває вхід воронки, тому заготовка зупиняється. Після підготовки стану до прийому заготовки упор піднімається для остаточної подачі її у валки.

На вихідній стороні прошивного стану були реконструйовані три механізми: привід підпорного підшипника, скидач гільз і відтягуючий ролик. Для пересування підпорного підшипника передбачений електричний привід з канатної передачею. Для швидкого і надійного вилучення прошитої гільзи за межі кліті прошивного стану встановлений привідний відтягуючий ролик.

Прошивний стан призначений для прошивки в нагрітому стані заготовок круглого перетину з вуглецевих, шарикопідшипникових і легованих сталей в товстостінні гільзи. Кінематична схема прошивного стану показана на рисунку 2.1, де цифрою 1 позначений двигун, цифрою 2 – редуктор, цифрою 3 – валки, 4 – датчик швидкості.

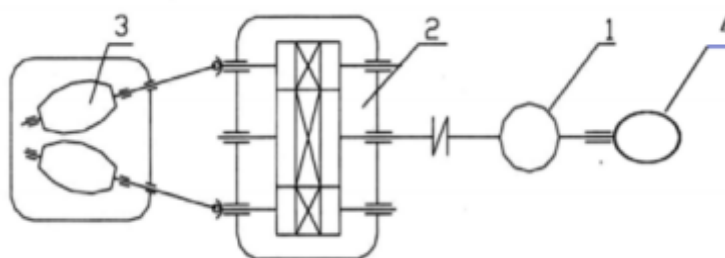


Рисунок 1.2 – Схема прошивного стану.

Прошивний стан складається з робочої кліті з двома валками, кожен з яких має максимальний діаметр $D = 1050$ мм, довжину $B = 650$ мм, вага $Q = 3650$ кг, шестеренні кліті з передавальним числом $i = 2$, двох передавальних шпинделів.

Нагрівання заготовки відбувається в двох 3-х потокових секційних печах довжиною близько 88 метрів кожна. Правильність нагріву металу контролюється фотоелектричним пірометром. Розрізку нагрітої в печі заготовки здійснюють на ножицях консольного типу з нижнім різом.

Прошивка нагрітої і відцентрованої заготовки проводиться на 2-х валковому прошивному стані з бочковидними валками і осьовою видачею.

У гільзу, отриману після прокатки на прошивному стані, вводиться довга циліндрична оправлення, після чого вона разом з оправкою направляється в валки безперервного стану. Після вилучення оправки труба довжиною близько 28 метрів направляється до стаціонарної дискової пилки, де проводиться обрізка заднього кінця труби. Всі труби після обрізки задніх кінців проходять через калібрувальні пристрою – пару роликів – з метою вирівнювання зовнішнього діаметра. Для підвищення і вирівнювання температури по довжині й перетину перед редукацією проводиться, нагрів труб в індукційних печах. На редукаційний стані прокочують труби діаметром від 32 до 76 мм, на калібрувальному - від 73 до 108 мм. З метою усунення кривизни і зменшення овальності поперечного перерізу труби після охолодження піддаються виправленню на косовалковому правильному стані.

1.2 Вибір типу електроприводу і двигуна силового перетворювача

Сучасний прокатний цех являє собою складний комплекс механічного та електричного обладнання. Слід зазначити, що прокатні цехи містять найбільшу кількість електроприводів. Так, наприклад, на безперервному

широкополосному стані 2000 гарячої прокатки встановлено близько 2000 електродвигунів. Правильний вибір типу і потужностей двигунів механізмів прокатних станів забезпечує надійну і економічну роботу електроприводу, а отже, і всього цеху. До електроприводу прокатних станів ставляться високі вимоги, пов'язані з особливостями роботи приводу цих станів. До основних особливостей роботи електроприводу валків прокатних станів відносяться: велика кількість включень (до 1000 включень в годину для реверсивних станів), ударний характер навантаження, що перевищує номінальне навантаження двигунів, а також розгін і гальмування двигуна з металом в валках, забезпечення високої продуктивності прокатних станів, необхідність регулювання швидкості в діапазоні від 1 до 4; жорсткість механічних характеристик, чим забезпечується незалежність швидкості прошивки від навантаження двигуна; привід повинен бути швидкодіючим. Час перехідного процесу, тобто відновлення швидкості при збільшенні навантаження за 0,3 – 0,5 с. Динамічна просадка швидкості в перехідному режимі не повинна перевищувати 5% від швидкості холостого ходу; надійність роботи і простота обслуговування – неодмінна умова безаварійної прокатки і малих витрат на експлуатацію електрообладнання.

З огляду на вимоги, що пред'являються до електроприводу стану, можна було б застосувати в якості приводного асинхронні двигуни, які широко застосовують завдяки своїм якостям: невисока вартість двигуна; простота конструкції і надійність; високий ККД. Недоліки використання таких двигунів полягають у тому, що для них потрібно створювати більш складну систему автоматичного регулювання по відношенню до систем регулювання електроприводу постійного струму, до того ж такі системи, особливо з високими показниками регулювання і надійності, мають високу вартість. Тому для електроприводу прошивного стану пропонується використовувати двигун постійного струму системи ТП-Д, які є головними приводами прокатних станів [2, 4]. Тому для електроприводу прошивного

стану пропонується використовувати двигун постійного струму незалежного збудження, який дозволяє отримати хорошу якість перехідних процесів і широкий діапазон зміни швидкості від 0 до $n_{ном}$ зміною напруги на якорі, а вище $n_{ном}$ ослабленням потоку збудження. Двигун працює в умовах, де навколишнє середовище невибухонебезпечне і не містить шкідливих домішок, але може мати вміст тонкого металевого пилу і підвищену температуру навколишнього середовища. В якості приводного двигуна прошивного стану обрано двигун типу П2 для металургійного виробництва.

В даний час найбільш широкого поширення набула система ТП-Д, яка є прогресивною для живлення двигунів постійного струму в наслідок наступних переваг:

- висока надійність і більш тривалий термін служби;
- високі енергетичні показники;
- постійна готовність до роботи;
- малі габарити і вага.

Але напівпровідникові вентиля мають свої недоліки – низька перевантажувальна здатність і чутливість до великих перевантажень, тому в даний час виготовляють тиристори на великі струми і розроблені методи захисту тиристорів від струмів короткого замикання і перенапруги, що дозволяє застосувати їх для широкого кола приводів. Отже, для управління приводом прошивного стану приймемо систему ТП-Д.

1.3 Обґрунтування вибору і розрахунок параметрів двигуна та тиристорного перетворювача

Момент опору для привода двох валків, які стикаються з валом двигуна (з вразуванням ККД шестерної кліті):

$$M_{on} = \frac{j(M_{np} + M_{mp} + M_{x.x})}{i \cdot \eta_{шк} \cdot \eta_{ш}} = \frac{2(132 + 0,96 + 3,96)}{2 \cdot 0,96 \cdot 0,98} = 145,5 \text{ кН},$$

де $j = 2$ – кількість валків;

$i = 2$ – передавальне число шестерної кліті;

$\eta_{шк} = 0,96$ – ККД шестерної кліті

$\eta_{ш} = 0,98$ – ККД шпинделя.

Номинальна частота обертання шпинделя, приведена до валу двигуна:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{21} = \frac{\pi \cdot 125}{21} = 13,1 \text{ с}^{-1},$$

де $n_{ном} = 125$ об/хв. – номінальна швидкість обертання валків стану.

Мінімальна потужність двигуна розраховується за виразом:

$$P = M_{\text{дв}} \omega_{ном} = 145,5 \cdot 13,1 = 1906,1 \text{ кВт}.$$

Відповідно попередньо обираємо двигун постійного струму П2-20/40-2,5 УХЛ потужністю 2500 кВт з наступними технічними характеристиками:

$$P_{ном} = 2500 \text{ кВт},$$

$$I_{ном} = 2870 \text{ А},$$

$$U_{ном} = 930 \text{ В}$$

$$I_{\epsilon} = 100 \text{ А},$$

$$U_{\epsilon} = 110 \text{ В},$$

$$M_{ном} = 190 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$\omega_{ном} = 13 \text{ с}^{-1},$$

$$\omega_{max} = 33 \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_{ном} = 1,8,$$

$$\lambda_{max} = 2.$$

На основі розрахунку діаграми навантаження перевіримо відповідність потужності двигуна головного приводу для заданого режиму роботи виконавчого механізму на предмет нагрівання та перевантажувальної здатності. В приводі, з метою покращення умов захоплення заготовки валками робочої кліті, захват здійснюється на пониженій швидкості, яка на 20-30% нижча номінальної, а захоплену заготовку прошивають на швидкості на 20-30% вище номінальної [6,10].

Швидкість обертання вала двигуна при пониженій швидкості:

$$n_n = 0,8 \cdot n_{ном} = 0,8 \cdot 125 = 100 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання вала двигуна при прошивці:

$$n_p = 1,2 \cdot n_{ном} = 1,2 \cdot 125 = 150 \text{ об/хв.}$$

Коефіцієнт послаблення поля:

$$K_n = \frac{n_p}{n_{ном}} = \frac{150}{125} = 1,2.$$

Приймаючи прискорення при розгоні $a = 60$ об/хв, рівним уповільнення при гальмуванні сумарний момент інерції буде рівний

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_{мех} = 9850 + 3100 = 12950 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

де $J_{дв} = 9850 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – момент інерції двигуна;

$J_{мех} = 3100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – момент інерції механізму.

Динамічний момент при розгоні і гальмуванні:

$$M_{дин.р} = M_{дин.г} = \frac{J_{\Sigma} \cdot a}{9,55} = \frac{12950 \cdot 60}{9,55} = 81 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Пусковий момент:

$$M_n = -M_{дин.г} + M_{х.х} = 145,5 + 81 = 226,5 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Гальмівний момент:

$$M_г = -M_{дин.р} + M_{х.х} = -81 + 3,96 = -77 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

При роботі на швидкості вищій основної дійсний момент збільшується з врахуванням коефіцієнта послаблення поля.

Фіктивний максимальний момент при пуску на швидкості вище основної:

$$M'_n = K_o M_n = 1,2 \cdot 226,5 = 271 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Фіктивний максимальний момент при гальмуванні на швидкості вище основної:

$$M'_г = K_o M_г = 1,2 \cdot (-77) = -92,4 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

За даними в табл. 1 прокатки час прошивки складає 7 секунд, а час паузи 8 секунд.

Час розгону при повному потоці:

$$t_2 = \frac{(n_{ном} - n_{п})}{\alpha} = \frac{(125 - 100)}{60} = 0,42 \text{ с}.$$

Фіктивний момент при прошивці на робочій швидкості:

$$M'_p = K_o M_{сnp} = 1,2 \cdot 145,5 = 175 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Час розгону при ослабленому потоці:

$$t_2 = \frac{(n_p - n_{\text{НОМ}})}{\alpha} = \frac{(150 - 125)}{60} = 0,42 \text{ с.}$$

Час прошивки на робочій швидкості:

$$t_p = t_{np} - t_1 - t_2 = 7 - 0,42 - 0,42 = 6,16 \text{ с.}$$

Час гальмування при ослабленому потоці:

$$t_3 = \frac{(n_p - n_{\text{НОМ}})}{\alpha} = \frac{(150 - 125)}{60} = 0,42 \text{ с.}$$

Час гальмування при повному потоці:

$$t_4 = \frac{(n_{\text{НОМ}} - n_{\text{П}})}{\alpha} = \frac{(125 - 100)}{60} = 0,42 \text{ с.}$$

Магнітний потік двигуна при робочій швидкості:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{K_o} = \frac{26,3 \cdot 10^{-2}}{1,2} = 21,9 \cdot 10^{-2} \text{ Вб,}$$

де $\Phi_{\text{НОМ}} = 23,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ – номінальний потік двигуна.

Час роботи двигуна на пониженій швидкості (холостому ході):

$$t_{x.x} = t_n - (t_3 + t_4) = 8 - (0,5 + 0,4) = 7,1 \text{ с.}$$

Час робочого циклу:

$$t_u = t_{np} + t_{n2} = 7 + 8 = 15 \text{ с.}$$

На основі отриманих даних побудуємо діаграму навантаження (рис.1.3) і проведемо перевірочний розрахунок на основі потужності обраного двигуна головного приводу на відповідність потужності обраного двигуна та заданого режиму роботи виконавчого механізму по умовам нагрівання і перевантажувальної здатності.

Умова правильного вибору двигуна за нагрівом: $M_{\text{екв}} \leq M_{\text{ном}}$:

$$\begin{aligned} M_{\text{екв}} &= \sqrt{\frac{M_{np}^2 t_1 + M_{np}'^2 t_2 + M_p'^2 t_p + M_T'^2 t_3 + M_T'^2 t_4 + M_{x.x}'^2 t_{x.x} +}{t_u}} = \\ &= \sqrt{\frac{227^2 \cdot 0,42 + 271^2 \cdot 0,42 + 175^2 \cdot 6,16 + 92,4^2 \cdot 0,42 + 77^2 \cdot 0,42 + 3,96^2 \cdot 6,46 +}{15}} = \\ &= 134,2 \text{ кН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$M_{\text{екв}} = 134,2 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_{\text{ном}} = 190 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Звідки видно, що умова виконується і відповідно двигун підходить за нагрівом.

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$K_3 = \frac{M_{\text{екв}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{134,2}{190} = 0,71.$$

Перевіркою двигуна за перевантажувальною здатністю є виконанням умови: $\lambda_p \leq \lambda_{\text{max}}$, де λ_p – коефіцієнт навантаження.

$$\lambda_p = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{271}{190} = 1,4,$$

де $M_{\text{max}} = M'_{\text{ном}} = 271 \text{ кН} \cdot \text{м}$ – максимальний момент за робочий цикл:

$$\lambda_p = 1,4 \leq \lambda_{\text{max}} = 2,$$

відповідно, двигун за перевантажувальною здатністю підходить для даного випадку.

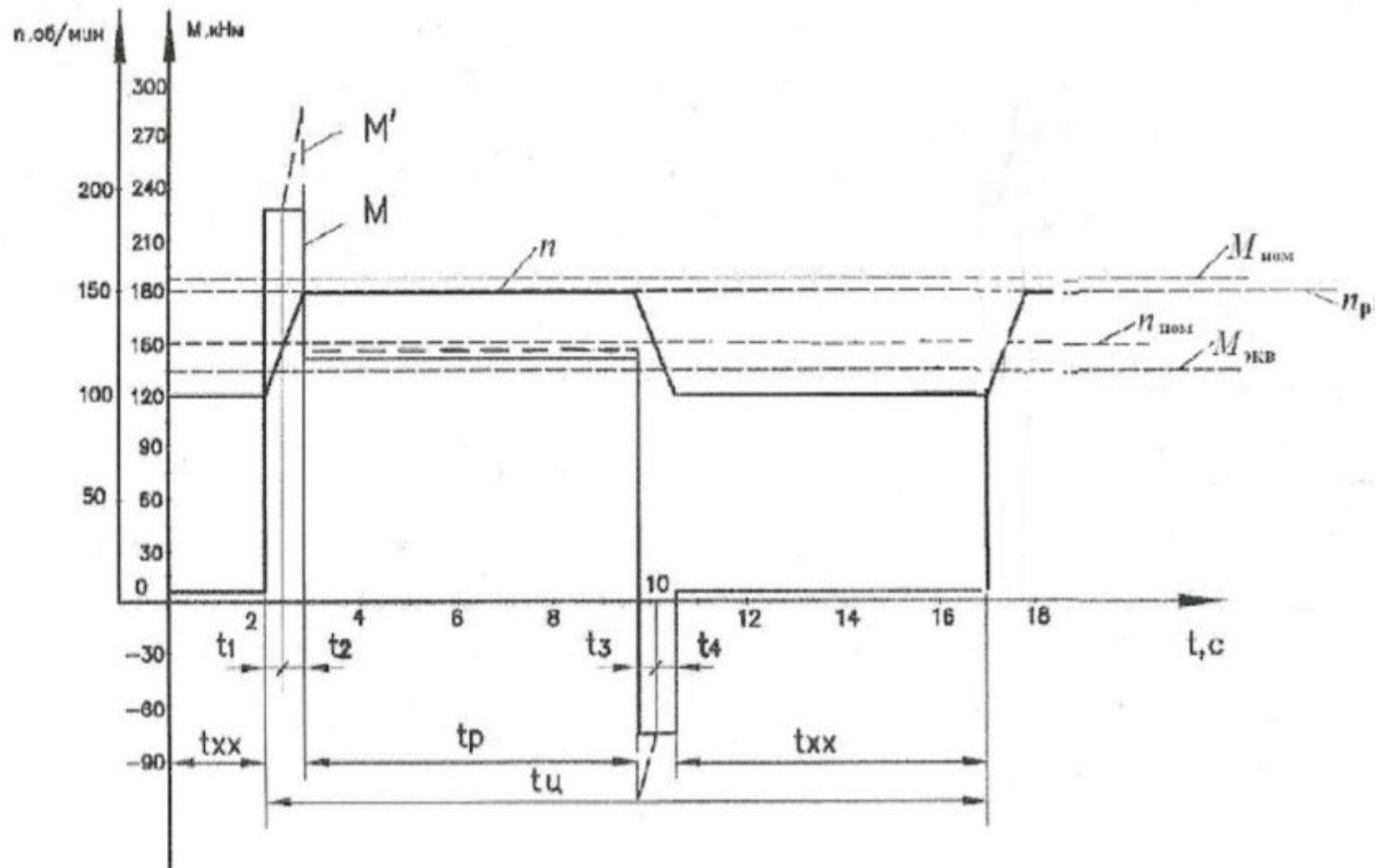


Рисунок 1.3 – Тахограма і діаграма навантаження тахогенератора.

Для двигуна постійного струму потрібно обрати тиристорний перетворювач. Навантаження тиристорних агрегатів вибирається за двома умовами: середньоквадратичному струму і обмеженню максимальної температури в тиристора в робочих режимах.

Для двигуна постійного струму для постійного потоку справедливе співвідношення:

$$I_{\text{ср.кв.}} = \frac{M_{\text{ср.кв.}} I_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{134,2 \cdot 2870}{190} = 2027 \text{ A.}$$

Обмеження максимальної температури тиристорів пов'язано з перевантаженнями.

Із навантажувальної діаграми $M_n = 226 \text{ кН} \cdot \text{м}$ визначаємо $I_{C \text{ max}}$.

$$I_{C \text{ max}} = \frac{M_n I_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{227 \cdot 2870}{190} = 3415 \text{ A.}$$

Напруга, необхідна для живлення якора двигуна: $U_{\text{ном}} = 930 \text{ В}$.

При виборі тиристорного перетворювача необхідно дотримуватись умов: номінальний випрямлений струм повинен бути більший $I_{\text{ср.кв.}}$, $I_{d_n} > I_{\text{ср.кв.}}$, максимальний струм тиристорного перетворювача повинен бути більший $I_{C \text{ max}}$ [19, 20].

Враховуючи приведені вище умови, для живлення двигуна постійного струму обрано комплектний тиристорний електропривід уніфікованого типу КТЕУ–4000/930Е–12Т208ДТ54-УХЛ4 з наступними характеристиками:

Номінальний випрямлений струм: $I_{d_n} = 4000 \text{ А}$.

Номінальна випрямлена напруга: $U_{\text{ном}} = 930 \text{ А}$.

Напруга мережі живлення: $U_m = 930 \text{ A}$.

У відповідності до заданих характеристик здійснено перевірку тиристорного перетворювача

$$I_{d_n} = 4000 \text{ A} > I_{ср.кв.} = 2027 \text{ A};$$

$$I_{\max} = 7200 \text{ A} > I_{C_{\max}} = 3415 \text{ A}$$

де $I_{\max} = \lambda I_{ном} = 1,8 \cdot 4000 = 7200 \text{ A}$.

Задані умови виконуються, відповідно тиристорний перетворювач може бути застосований до даної задачі.

Електричний розрахунок силового трансформатора виконується з метою визначення необхідних параметрів трансформатора, за якими здійснити всі інші розрахунки:

Номінальний вторинний струм трансформатора:

$$I_{2_n} = K_2 I_{d_n} = 4000 \cdot 0,816 = 3266 \text{ A},$$

де $K_2 = 0,816$ – коефіцієнт лінійного вторинного струму трансформатора.

Наближена номінальна вторинна напруга трансформатора визначається з необхідної ЕРС перетворювача:

$$U_{2_n} = \frac{K_R K_a K_{ном}}{K_c K_e} = \frac{1,05 \cdot 1 \cdot 930}{0,9 \cdot 1,35} = 900 \text{ B},$$

де $K_c = 0,9$ – коефіцієнт зниження напруги в мережі;

$K_a = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує зниження напруги в реверсних перетворювачах;

$K_e = 1,35$ – коефіцієнт випрямленої напруги;

$K_R = 1,05$ – коефіцієнт, що враховує зниження напруги на внутрішніх опорах перетворювача і реакторів.

ЕРС перетворювача при номінальних напругах і куті управління $\alpha = 0$:

$$E_{d0} = K_c \cdot U_{2_n} = 1,35 \cdot 900 = 1215 \cdot 4000 = 1215 \text{ кВА},$$

Габаритна потужність трансформатора:

$$S_T = K_T E_{d0} \cdot 10^{-3} = 1,047 \cdot 1215 \cdot 4000 = 5088 \text{ кВА},$$

де $K_T = 1,047$ – коефіцієнт типової потужності.

Оберемо трансформатор ТМПД-6300/10У2 з характеристиками:

Номинальна потужність трансформатора $S_T = 5090$ кВА

Номинальна випрямлена напруга перетворювача: $U_{d_n} = 930$ В;

Номинальний струм первинної обмотки: $I_{1_n} = 389$ А;

Номинальний струм вентильної обмотки: $I_{2_n} = 389$ А;

Номинальна напруга вентильної обмотки: $U_{1_n} = 6000$ В;

Коефіцієнт зниження мережі живлення: $K_c = 0,93$

ЕРС короткого замикання трансформатора: $e_k = 6,6\%$;

Втрати короткого замикання трансформатора: $\Delta P_{кз} = 30$ кВт ;

Випрямлений номінальний струм перетворювача: $I_{d_n} = 4000$ А;

Напруга керування, що відповідає ЕРС холостого ходу перетворювача:

$$U_y = 8 \text{ В};$$

Коефіцієнт випрямлення по напрузі: $K_{eU} = 1,35$;

Коефіцієнт випрямлення по струму: $K_{eI} = 0,471$

ЕРС холостого ходу перетворювача ($\alpha = 0$).

$$E_{d0} = K_{eU} \cdot U_{2_n} = 1,35 \cdot 900 = 1215 \text{ В}.$$

Коефіцієнт передачі перетворювача по напрузі:

$$K_{II} = \frac{E_{d0}}{U_y} = \frac{1215}{8} = 152.$$

Індуктивний X_Δ і пасивний опір R_Δ фази трансформатора, підведеної до вторинної обмотки:

$$X_\Delta = \frac{U_{2_n}}{K_{eI} I_{d1}} \cdot \frac{e_k}{100} = \frac{900}{0,41 \cdot 4000} \cdot \frac{7}{100} = 0,035 \text{ Ом};$$

$$R_\Delta = \frac{\Delta P_{кз}}{3(K_{eI} I_{d_n})^2} = \frac{3 \cdot 10^2}{3(0,471 \cdot 4000)^2} = 0,0052 \text{ Ом};$$

Індуктивний X_λ і активний R_λ опір фази трансформатора, підведеного до вторинної обмотки в еквівалентній зірці:

$$X_\lambda = \frac{X_\Delta}{3} = \frac{0,035}{3} = 0,0117 \text{ Ом};$$

$$R_\lambda = \frac{R_\Delta}{3} = \frac{0,0052}{3} = 0,0017 \text{ Ом};$$

Еквівалентний опір перетворювача:

$$R_{\Sigma\Pi} = \frac{3}{\pi} X_\lambda + 1,75R_\lambda = \frac{3}{\pi} \cdot 0,0117 + 1,75 \cdot 0,0017 = 0,014 \text{ Ом.}$$

Індуктивність трансформатора:

$$L_{mp} = \frac{3X_\lambda}{2\omega_c} = \frac{3 \cdot 0,0117}{2 \cdot 314} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

де $\omega_c = 314 \text{ с}^{-1}$ – кутова частота в мережі.

Індуктивність реактора в ланцюгу випрямленого струму вибирається, виходячи із задовільнення однієї з перерахованих нижче умов: обмеження пульсації струму якоря, обмеження зони переривистого струму, обмеження швидкості наростання струму короткого замикання.

Щоб величина діючого значення змінної складової струму якоря не перевищувала допустимого значення, індуктивність якірного ланцюга повинна бути:

$$L_{ял} = \frac{E_{d(p)}^* E_{d0}}{p \omega_c I_{я(p)}^* I_{ном}} = \frac{0,13 \cdot 1215}{12 \cdot 314 \cdot 0,02 \cdot 2870} = 710 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

де $E_{d(p)}^* = 0,13$ – відносна величина діючого значення ЕРС нижньої гармоніки перетворювача;

$p = 12$ – пульсивність перетворювача;

$I_{я(p)}^* = 0,02$ – відносна величина діючого значення струму нижньої гармоніки перетворювача.

Для того, щоб струм якоря був неперервний при значеннях струму більших $I_{я.зр..max}^* = 0,11$ А, необхідна індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{ял} = \frac{K_r E_{d0}}{p \omega_c I_{я.зр..max}^* I_{ном}} = \frac{0,096 \cdot 1215}{12 \cdot 314 \cdot 0,11 \cdot 2870} = 690 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

де $K_r = 0,096$ – коефіцієнт пульсації схеми.

Прийmemo найбільше значення $L_{ял} = 0,71$ мГн.

$$L_{ял} = \frac{C_k U_{ном}}{\omega_{ном} p_n I_{ном}} = \frac{0,1 \cdot 930}{13,1 \cdot 5 \cdot 0,11 \cdot 2870} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

де $C_k = 0,1$ – коефіцієнт компенсації;

$p_n = 5$ – кількість пар полюсів.

Індуктивність реактора::

$$L_p = L_{ял} - L_{яд} - L_n = 0,71 - 0,35 - 0,05 = 0,31 \text{ мГн}.$$

Для обмеження швидкості наростання струму при короткому замиканні необхідна індуктивність реактора:

$$L_p = \frac{2,1 U_{2н}}{\omega_c (I_N - I_{дн})} - L_n = \frac{2,1 \cdot 716}{314(1600 - 4000)} - 50 \cdot 10^{-6} = 350 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

Де $I_N = 16$ кА – допустиме значення ударного струму тиристора у відкритому стані при довготривалому протіканні 10 мс і максимальній допустимій температурі переходу.

Прийmemo найбільше можливе значення $L_p = 0,35$ мГн.

В якості реактора оберемо СРОС-1800:4000 А, 0, 377 мГн. з активним опором:

$$R_p = \frac{78L_p}{I_{d_n}^{0,52}} = 78 \cdot 0,377 \cdot \frac{10^{-3}}{4000^{0,52}} = 0,39 \text{ м Ом.}$$

2. СТРУКТУРА ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

2.1 Вибір системи автоматичного регулювання.

Підвищення вимоги до точності підтримки заданої швидкості прокатки, а також обмежений час відновлення швидкості при її динамічних просадках є основними особливостями електроприводу прошивного стану.

Для реалізації цих вимог застосовано уніфіковану систему регулювання. Перевагою системи, виконаних на операційних підсилювачах, є можливість реалізації з високою точністю бажаних передавальних функцій, мала потужність управління, що дозволяє застосувати датчики і задатчики регульованих параметрів з невеликими втратами, порівняна легкість і простота настройки електроприладів [13,17].

Для розглянутого електроприводу такими параметрами є:

- струм якоря двигуна;
- струм обмотки збурення;
- швидкість і ЕРС двигуна.

На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому і дійсному значенням, а вихідна напруга регулятора є заданою для наступного контуру регулювання. Перевагою даної системи є також можливість найпростішими засобами обмежувати будь-яку з координат системи. Кожен контур САР включає дві структурних ланки: регулятор і ланка об'єкта управління. Синтез системи регулювання проводиться шляхом послідовної оптимізації окремих контурів з умови отримання заданого часу реакції на ступінчатий управляючий вплив і допустимість статичної помилки.

В загальному управління електроприводом з реверсом напруги якоря реалізується, як двозонна система регулювання.

Одним з основних елементів об'єкта управління є двигун. В роботі обрано двигун постійного струму з технічними характеристиками

Технічні дані двигуна типу П2-20 / 40-2,5УХЛ.

Номинальна потужність двигуна: $P_{ном} = 2870 \text{ A}$;

Номинальний струм двигуна: $U_{ном} = 930 \text{ B}$;

Номинальна напруга обмотки збурення: $U_{в.ном} = 110 \text{ B}$

Номинальний струм збурення: $I_{в.ном} = 100 \text{ A}$;

Номинальний момент двигуна: $M_{ном} = 190 \text{ кН} \cdot \text{м}$;

Номинальна частота обертання: $n_{ном} = 125 \text{ об / хв}$;

Максимальна частота обертання: $n_{max} = 250 \text{ об / хв}$;

Кількість пар полюсів: $p = 5$;

Кількість витків обмотки збурення на полюс: $\omega_{об} = 360 \text{ в/п}$;

Опір обмотки якоря (15° C): $R_{яо} = 0,00843 \text{ Ом}$;

Опір обмотки додаткових полюсів: $R_{дп} = 0,00073 \text{ Ом}$;

Опір обмотки збурення (15° C): $R_{оз} = 1,798 \text{ Ом}$;

Спад напруги на щітках: $\Delta U_{щ} = 2 \text{ B}$;

Момент інерції двигуна: $J_{\delta} = 9850 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

Перевантажувальна здатність: $\lambda = 2,0$;

Максимально-допустима похідна струму якоря: $\left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{дон} = 60 \text{ с}^{-1}$

Відношення кількості активних провідників якоря до кількості пар полюсів паралельних гілок обмотки якоря: $\frac{N}{a} = \frac{675}{5} = 135$.

Технічні дані тиристорного перетворювач КТЕУ-4000/930Е-12Т208ДТ54-УХЛ4 якірного ланцюга.

Основний параметр, що регулюється – швидкість двозонного регулювання. Даний тиристорний перетворювач з лінійним контактом і динамічним гальмуванням [8,18,19].

Номинальна випрямлена напруги перетворювача: $U_{d.ном} = 930$ В.

Номинальний випрямлений струм: $I_{d.ном} = 4000$ А;

Лінійна напруга вентильної обмотки $U_{2л} = 900$;

Номинальний струм вентильної обмотки $I_{2л} = 3270$ А.

Схема ланцюга збуджувача: однофазна з діодним випрямляючим мостом і симістором в колі змінного струму, нереверсивна.

Пульсивність: $m = 2$.

Для обраного перетворювача використовується стандартний дросель СРОС1800: 4000 А; 0,377 мГн, який має такі номінальні характеристики:

$$I_{d_n} = 4000 \text{ А}; \square\square\square\square$$

$$L_p = 0,377 \text{ мГн}; \square\square\square\square$$

$$R_p = 0,39 \text{ мОм}.$$

Використаний вбудований збуджувач входить в комплект тиристорного перетворювача КТЕУ–4000/930Е–12Т208ДТ54–УХЛ4. Збуджувач нереверсивний зі зміною полярності напруги на якорі, має реакторне живлення.

На стороні змінного струму є автоматичний вимикач А3726Б.

Номинальна випрямлена напруги перетворювача $U_{n.ном} = 440$ В.

Номинальний випрямлений струм $I_{n.ном} = 100$ А;

Діюче значення лінійної номінальної вторинної напруги $U_{2ном} = 380$ В;

Пульсивність: $m = 6$.

Максимальна опорна напруга $U_{оп.мах} = 10$ В.

Для обраного перетворювача використовується струмообмежувальний реактор РТСТ-41, -1,01-УЗ, який має такі номінальні дані:

Номинальна лінійна напруга мережі живлення: 380 В;

Номинальний фазний струм: 82 А;

Активний опір обмотки $R_{mo} = 175$ мОм.

Номинальна індуктивність фази $L_{mo} = 1,08$ мГн;

2.2 Розрахунок технічних параметрів елементів системи автоматичного регулювання

Активний опір якірного ланцюга двигуна:

$$R_{яд} = K_t (R_{яо} + R_{кд} + R_{он}) + R_{щ} = 1,24 \cdot (0,0032 + 0,0026 + 0,00037) + 0,0007 = 0,014 \text{ Ом},$$

де K_t – коефіцієнт, що враховує зміну опору при нагріванні, залежить від класу ізоляції і матеріалу провідників;

$R_{щ} = 0,0007 \text{ Ом}$ – активний опір щіткового контакту.

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга:

$$T_{яд} = \frac{L_{яд}}{R_{яд}} = \frac{0,35}{0,014} = 0,041 \text{ с.}$$

Максимальна ЕРС перетворювача:

$$E_{d,max} = \sqrt{2} U_{2л} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \sqrt{2} \cdot 900 \cdot \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} = 1264 \text{ В.}$$

Активний опір шин приймається:

$$R_{щ} = 0,1 R_{я} = 0,1 \cdot 0,0014 = 0,00014 \text{ Ом.}$$

Активний опір трансформатора:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{m.mp}}{I_{дн}^2} = \frac{40000}{4000^2} = 0,0024 \text{ Ом},$$

де $\Delta P_{m.mp} = 40 \text{ кВт}$ – втрати в міді трансформатора.

Активний опір згладжуючого реактора:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{m.p}}{I_{дн}^2} = \frac{10700}{4000^2} = 0,0004 \text{ Ом},$$

де $\Delta P_{m.p} = 10,7 \text{ кВт}$ – втрати в міді реактора.

Активний (еквівалентний) опір головного ланцюга:

$$R_{\Sigma} = R_{яд} + R_{щ} + R_{mp} + R_p + R_{эн} = 0,014 + 0,0014 + 0,0024 + 0,004 + 0,014 = 0,0358 \text{ Ом}$$

Індуктивність головного ланцюга:

$$L_{\Sigma} = L_{\Sigma} + L_{mp} + L_{dp} = (0,35 + 0,056 + 0,5) \cdot 10^{-3} = 0,906 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Електромагнітна постійна часу головного ланцюга:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,906 \cdot 10^{-3}}{0,0358} = 0,025 \text{ с.}$$

Номінальна ЕРС двигуна:

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{ном} R_{яд} - \Delta U_{щ} = 930 - 2870 \cdot 0,014 - 2 = 888 \text{ В.}$$

$$k\Phi_{ном} = \frac{E_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{888}{13,1} = 68,88 \text{ В.}$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} R_{\Sigma}}{(k\Phi_{ном})^2} = \frac{12950 \cdot 0,0358}{68,88^2} = 0,097 \text{ с.}$$

За основні базисні величини для силової частини прийняті:

$$\text{Номінальна ЕРС якоря } U_{\sigma} = E_{дн} = 888 \text{ В;}$$

$$\text{Номінальний струм якоря двигуна } I_{\sigma} = I_{ном} = 2870 \text{ А;}$$

$$\text{Номінальна швидкість двигуна } \omega_{\sigma} = \omega_{ном} = 13,1 \text{ с}^{-1}$$

$$\text{Номінальний електромагнітний момент } M_{\sigma} = M_{ном} = 190 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Базисний опір:

$$R_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{888}{2870} = 0,309 \text{ Ом.}$$

Параметри головного ланцюга в системі відносних одиниць наступні.

Активний опір головного ланцюга:

$$r_{\sigma} = \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma}} = \frac{0,0358}{0,309} = 0,1 \text{ в.о.}$$

Механічна постійна часу:

$$T_j = \frac{J\omega_{\sigma}}{M_{\sigma}} = \frac{12950 \cdot 13,1}{190 \cdot 10^3} = 0,89 \text{ с}$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$k_n = K_n \frac{U_{\sigma.p}}{U_{\sigma}} = 152 \cdot \frac{7}{888} = 1,198 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{\sigma m} = k_{\sigma m} \frac{U_{\sigma p}}{I_{\sigma}} = 1 \cdot \frac{7}{2870} = 0,002 \text{ В/А,}$$

де $k_{\sigma m} = 1$ – коефіцієнт передачі датчика струму в відносних одиницях.

Коефіцієнт передачі датчика швидкості:

$$K_{\sigma c} = k_{\sigma c} \frac{U_{\sigma p}}{\omega_{\sigma}} = 1 \cdot \frac{7}{13,1} = 0,6 \text{ В}\cdot\text{с,}$$

де $k_{\sigma c} = 1$ – коефіцієнт передачі датчика швидкості в відносних одиницях.

Коефіцієнт передачі датчика ЕРС:

$$K_{\sigma \varepsilon} = k_{\sigma \varepsilon} \frac{U_{\sigma p}}{U_{\sigma}} = 1 \cdot \frac{7}{888} = 0,0097,$$

де $k_{\partial'} = 1$ - коефіцієнт передачі датчика ЕРС в відносних одиницях.

Параметри ланцюга збурення системи двозонного регулювання розраховуються наступним чином.

Струм збурення по кривій намагнічування при ослабленому потоці:

$$I_{\text{в.}0,8\Phi_{\text{ном}}} = 0,55\Phi_{\text{ном}} = 0,55 \cdot 100 = 55 \text{ А.}$$

Номінальне значення потоку розсіювання:

$$\Phi_{\text{ном}}^{\sigma} = \sigma\Phi_{\text{ном}} = 0,18 \cdot 0,216 = 0,048 \text{ Вб,}$$

де $\sigma = 0,18$ – коефіцієнт розсіювання.

Номінальне значення головного потокозчеплення:

$$\Psi_{\text{м.ном}} = \frac{2pw_{\text{в}}\Phi_{\text{ном}}}{m_{\text{в}}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 266 \cdot 0,267}{2} = 355 \text{ В}\cdot\text{с,}$$

де $w_{\text{в}} = 266$ – кількість витків обмотки збурення;

$m_{\text{в}} = 2$ – кількість паралельних гілок обмотки збурення.

Значення головного потокозчеплення при ослабленому полі:

$$\Psi_{\text{м.}0,8\Phi_{\text{ном}}} = 0,8\Psi_{\text{м.ном}} = 0,8 \cdot 355 = 284 \text{ В}\cdot\text{с.}$$

Значення струму намагнічування при ослабленому полі:

$$I_{\text{м.}0,8\Phi_{\text{ном}}} = 0,8I_{\text{м.ном}} = 0,55 \cdot 100 = 55 \text{ А.}$$

Номінальне значення потокозчеплення розсіювання:

$$\Psi_{\text{б.ном}} = \sigma\Psi_{\text{м.ном}} = 0,18 \cdot 355 = 63,9 \text{ В}\cdot\text{с}$$

Активний опір обмотки збурення:

$$R_{\text{ов}} = K_1 R'_{\text{ов}} = 1,24 \cdot 1,45 = 1,798 \text{ Ом.}$$

Активний опір еквівалентного контуру вихрових струмів:

$$R_{\text{вт}} = \frac{R_{\text{ов}}}{\alpha_{\text{вт}}} = \frac{1,798}{0,05} = 35,96 \text{ Ом},$$

де $\alpha_{\text{вт}} = 0,05$ – коефіцієнт, що залежить від конструкції машини.

За основні базисні величини для ланцюга збурення прийняті:

$$\text{Номінальний струм збурення } I_{\text{б.в.}} = I_{\text{в.ном}} = 100 \text{ А};$$

$$\text{Опір ланцюга збурення двигуна } \square R_{\text{б.в.}} = R_{\text{о.в.}} = 1,798 \text{ Ом};$$

$$\text{Номінальний потік збурення } \Phi_{\text{б}} = \Phi_{\text{ном}} = 0,267 \text{ Вб};$$

Номінальне головне потокозчеплення обмотки збурення:

$$\Psi_{\text{б.в.}} = \Psi_{\text{м.ном}} = 355 \text{ Вб};$$

Базисна напруга збурення:

$$U_{\text{б.в.}} = R_{\text{б.в.}} \cdot I_{\text{б.в.}} = 1,798 \cdot 100 = 179,8 \text{ В}.$$

Базисна індуктивність збурення:

$$L_{\text{б.в.}} = \frac{\Psi_{\text{б.в.}}}{I_{\text{б.в.}}} = \frac{355}{100} = 3,55 \text{ Гн}.$$

Постійна розсіювання:

$$T_{\text{б.в.}} = \frac{\Psi_{\text{б.в.}}}{U_{\text{б.в.}}} = \frac{355}{179,8} = 1,97 \text{ с}.$$

Індуктивність, обумовлена головним потоком машини в точці номінального режиму і при ослабленні потоку:

$$L_M^{\circ} = (d \Psi_M / dI_M)_{I_{MO}=I_{M.\text{ном}}}$$

$$l_M^{\circ} = (d \Psi_M / dI_M)_{I_{MO}=1_M} = (\Delta \Psi_M / \Delta I_M)_{I_{MO}=1_M}$$

Відповідно до цієї формули, збільшення потоку машини і її струму намагнічування в відносних одиницях можна знайти по кривій намагнічування $\Psi_M(\Delta I_M)$ попередньо розрахованої і потім перерахованої у відносні одиниці для даного двигуна. Але існує аналітичний метод визначення, на основі аналітичних виразів для кривої намагнічування: $i_M = \alpha \Psi_M + b \Psi_M^n$, де $\square \square n$ -

показник степеня, що приймається рівним семи для двигунів постійного струму. Він дозволяє відшукати потрібну величину, не вдаючись до кривої намагнічування.

Складемо схему рівнянь для двох значень потокозчеплення:

$$I = a \cdot 1 + b \cdot 1^7$$

$$0,55 = a \cdot 0,8 + b \cdot 0,8^7$$

Розв'язавши цю систему щодо a і b , отримаємо $a = 0,577$; $b = 0,423$. Тоді відносні значення потокозчеплення, обумовлених головним потоком машини:

$$l_M^\circ = \frac{1}{a + nb\Psi_M^{n-1}}.$$

$$\text{При } i_M^\circ = 1 \quad l_M^\circ = 0,27$$

$$\text{При } i_M^\circ = 0,55 \quad l_M^\circ = 0,708$$

Знайдемо абсолютні значення потокозчеплення, обумовлених головним потоком машини:

$$L_M^\circ = L_{\sigma.g.} l_M^\circ.$$

$$\text{При } i_M^\circ = 1 \quad l_M^\circ = 0,96 \text{ Гн.}$$

$$\text{При } i_M^\circ = 0,55 \quad l_M^\circ = 2,5 \text{ Гн.}$$

Індуктивності розсіювання обмотки збурення:

$$L_{ov}^\sigma = L_{\sigma.g.} l_g^\sigma = 3,55 \cdot 0,18 = 0,639 \text{ Гн.}$$

$$\text{де } l_g^\sigma = l_M^\sigma + l_{ov}^\sigma$$

При $i_M^\circ = 1$: $l_M^\sigma = 0,27$, $l_{об}^\sigma = 0,18$, $l_M^\circ = 0,27 + 0,18 = 0,45$,
 $L_\sigma^\circ = 3,55 \cdot 0,45 = 1,597$ Гн.

При $i_M^\circ = 0,55$: $l_M^\sigma = 0,708$, $l_{об}^\sigma = 0,18$, $l_\sigma^\circ = 0,78 + 0,888 = 1,668$,
 $L_\sigma^\circ = 3,55 \cdot 0,888 = 36,15$ Гн.

Активний опір обмотки збурення в відносних одиницях:

$$r_{об} = \frac{R_{об}}{R_{б.в.}} = \frac{1,798}{1,798} = 1.$$

Активний опір фіктивної короткозамкненою обмотки в відносних одиницях:

$$r_{вт} = \frac{R_{вт}}{R_{б.в.}} = \frac{35,96}{1,798} = 20.$$

Параметри перетворювача ланцюга збурення приведені нижче.

Максимальна випрямлена ЕРС:

$$E_{d_{об}} = K_e U_{2н.в.} = 1,35 \cdot 380 = 513\text{В},$$

де $U_{2н.в.} = 380\text{В}$ – номінальна напруга вентильної обмотки трансформатора.

Активний опір перетворювача ланцюга збурення:

$$R_{н.в.} = 2R_{р.в.} = 2 \cdot 0,175 = 0,35\text{Ом}.$$

Індуктивність вентильного перетворювача ланцюга збурення:

$$L_{н.в.} = 2L_{р.в.} = 2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} = 2,16\text{мГн}.$$

Еквівалентні параметри ланцюга збурення:

$$R_{\sigma} = R_{o\sigma} + R_{n\sigma} = 1,798 + 0,35 = 2,148 \text{ Ом.}$$

$$L_{\sigma} = L_{o\sigma} + L_{n\sigma} = 0,639 + 0,00216 = 0,641 \text{ Гн.}$$

Постійні часу моделі ланцюга збурення:

$$T_{\sigma}^{\sigma} = T_{\sigma.o.}^{\sigma} \frac{l_{o\sigma}^{\sigma}}{r_{o\sigma}}, \quad T_{\sigma.m}^{\sigma} = T_{\sigma.o.}^{\sigma} \frac{l_M^{\sigma}}{r}, \quad T_{\sigma}^{\sigma} = T_{\sigma.o.}^{\sigma} \frac{l_{\sigma}^{\sigma}}{r_{o\sigma}},$$

$$T_{\sigma.o.}^{\sigma} = 1,97 \text{ с}; \quad r_{o\sigma} = 1; \quad r_{\sigma.m} = 20$$

При $i_M^{\circ} = 1$:

$$l_{o\sigma}^{\sigma} = 0,18; \quad l_M^{\sigma} = 0,27, \quad l_{\sigma}^{\sigma} = 0,45,$$

$$T_{\sigma}^{\sigma} = 0,35, \quad T_{\sigma.m}^{\sigma} = 0,026, \quad T_{\sigma}^{\sigma} = 0,886.$$

При $i_M^{\circ} = 0,55$:

$$l_{o\sigma}^{\sigma} = 0,18; \quad l_M^{\sigma} = 0,27, \quad l_{\sigma}^{\sigma} = 0,45,$$

$$T_{\sigma}^{\sigma} = 0,35, \quad T_{\sigma.m}^{\sigma} = 0,069, \quad T_{\sigma}^{\sigma} = 1,75 \text{ с.}$$

2.3 Розрахунок регулювальної характеристики системи

Регулювальна характеристика перетворювача розрахована нижче:

Вираз регулювальної характеристики:

$$E_d = E_{d0} \sin\left(\frac{K_{\alpha} U_y}{57,3}\right) = 513 \sin\left(\frac{11 \cdot U_y}{57,3}\right) = 513 \sin(0,192 U_y).$$

Знайдемо максимальне напруження рівняння $U_{y.max}$:

$$E_{n.max} = E_{d0} \sin(0,192U_{y.max}).$$

Після цього виразу отримаємо $U_{y.max} = 8,2 \text{ В}$.

Регульовальна характеристика перетворювача в системі відносних одиницях наступна.

Коефіцієнт кута управління:

$$k_{\alpha} = \frac{K_{\alpha} U_{\delta.p.}}{57,3} = \frac{11 \cdot 7}{57,3} = 1,344.$$

ЕРС перетворювача:

$$e_{d0} = \frac{E_{d0}}{U_{\delta.p.}} = \frac{513}{179,8} = 3,48.$$

Знайдемо максимальну напругу управління, яка забезпечує e_{d0} :

$$\sin(1,344 \cdot u_{y.max}) = 1.$$

$$1,344 \cdot u_{y.max} = \arcsin 1 = 1,57$$

$$u_{y.max} = 1,268.$$

Значення ЕРС перетворювача, забезпечують $\varphi^0 = 1$ і $\varphi^0 = 0,8$:

$$e_d^0 = \frac{E_d^0}{U_{\delta.в.}}, \quad E_n^{\sigma} = R_{\sigma} J_{\sigma}.$$

$$\text{При } i_M^{\circ} = 1: \quad E_d^{\sigma} = 2,148 \cdot 100 = 214,8 \text{ В}; \quad e_d^0 = \frac{214,8}{147,4} = 1,46.$$

$$\text{При } i_M^{\circ} = 0,55: \quad E_d^{\sigma} = 2,148 \cdot 55 = 118,14 \text{ В}; \quad e_d^0 = \frac{118,14}{147,4} = 0,80.$$

Регулювальна характеристика перетворювача в системі відносних одиниць представлена на рисунку 2.1.

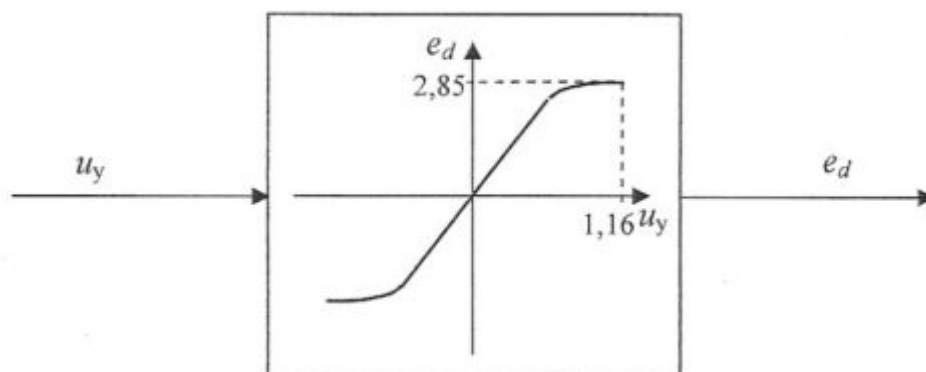


Рисунок 2.1 – Регулювальна характеристика.

Напряга управління, що забезпечує $\varphi^0 = 1$ і $\varphi^0 = 0,8$:

$$u_y^0 = 1,44 \cdot \arcsin\left(\frac{e_d^0}{e_{d0}}\right);$$

$$U_y^0 = u_y^0 U_{б.р.}$$

$$\text{При } i_M^0 = 1: u_y^0 = \frac{1}{1,344} \cdot \arcsin\left(\frac{1,19}{2,85}\right) = 0,32; \quad U_y^0 = 0,32 \cdot 7 = 2,24$$

$$\text{При } i_M^0 = 0,55: u_y^0 = \frac{1}{1,344} \cdot \arcsin\left(\frac{0,66}{2,85}\right) = 0,174; \quad U_y^0 = 0,174 \cdot 7 = 2,18.$$

Коефіцієнт посилення вентильного перетворювача в околі точок $\varphi^0 = 1$ і $\varphi^0 = 0,8$:

$$\text{При } \varphi^0 = 1: \quad u_y = 0,32.$$

$$k_{не}^0 = 2,85 \cdot 1,344 \cdot \cos(1,344 \cdot 0,32) = 3,48.$$

$$K_{не}^0 = 3,48 \cdot \frac{179,8}{7} = 89,39.$$

$$\text{При } \varphi^0 = 0,8: \quad u_y^0 = 0,174.$$

$$k_{не}^0 = 2,85 \cdot 1,344 \cdot \cos(1,344 \cdot 0,174) = 3,726.$$

$$K_{нс}^0 = 3,726 \cdot \frac{179,8}{7} = 95,7.$$

Коефіцієнт передачі датчика струму збурення:

$$K_{ДТВ} = \frac{k_{ДТВ} U_{б.р.}}{I_{б.р.}} = \frac{1 \cdot 7}{100}.$$

Лінеаризована еквівалентна модель ланцюга збурення представлена на рисунку 2.2.

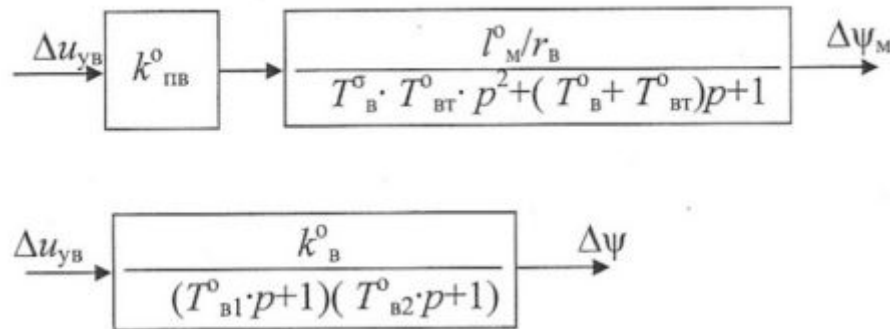


Рисунок 2.2 – Модель ланцюга збурення

Значення результуючого коефіцієнта передачі і постійних часу ланцюга збурення визначають за формулами:

$$k_г^0 = \frac{k_{н.г}^0 \cdot l_м^0}{r_г};$$

$$T_{г.1,2} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_1}{2}\right)^2 - T_2^2};$$

$$T_1 = T_в^0 + T_{вт}^0.$$

При $\varphi^0 = 1$: $T_1 = 0,912$ с.; $T_2^2 = 0,024$ с.; $T_{B1}^0 = 1,8$ с.; $T_{B2}^0 = 0,1$; $k_г^0 = 0,94$.

При $\varphi^0 = 0,8$: $T_1 = 1,819$ с.; $T_2^2 = 0,024$ с.; $T_{B1}^0 = 1,8$ с.; $T_{B2}^0 = 0,013$;

$k_г^0 = 2,64$.

Складемо таблиці результатів розрахунку моделі двозонної системи управління головного електроприводу прошивного стану (таблиці 2.1 і 2.2).

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку двозонної системи управління для кола якоря двигуна

| Коло якоря | $\frac{k_{\Pi}}{K_{\Pi}}$ | r_{ε} | $T_{\varepsilon}[c]$ | $T_m[c]$ | $T_j[c]$ | $\frac{k_{ДГ}}{K_{ДГ}}$ | $\frac{k_{ДС}}{K_{ДС}}$ | $\frac{k_{ДЭ}}{K_{ДЭ}}$ |
|-------------------|---------------------------|-------------------|----------------------|----------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\varphi^0 = 1$ | $\frac{1,789}{160}$ | 0,06 | 0,064 | 0,089 | | $\frac{1}{0,0023}$ | $\frac{1}{0,6}$ | $\frac{1}{0,0097}$ |
| $\varphi^0 = 0,8$ | — | — | — | 0,097 | — | — | — | — |

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку двозонної системи управління для кола збурення

| Коло збурення | $T_{\varepsilon}^0[c]$ | $T_{\varepsilon}^0[c]$ | $T_{\varepsilon m}^0[c]$ | l_m^0 | l_{ε}^0 | r_B | r_{BT} |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|---------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| $\varphi^0 = 1$ | 0,886 | 0,35 | 0,026 | 0,27 | 0,45 | 1,0 | 20 |
| $\varphi^0 = 0,8$ | 1,75 | — | 0,069 | 0,708 | 0,888 | — | — |
| Коло збурення | $\frac{k_{ПВ}^0}{K_{ПВ}^0}$ | | $\frac{k_{ДТВ}}{K_{ДТВ}}$ | | $T_{\varepsilon 1}^0[c]$ | $T_{\varepsilon 2}^0[c]$ | k_{ε}^0 |
| $\varphi^0 = 1$ | $\frac{3,48}{89,39}$ | | 14,286 | | 0,9 | 0,1 | 0,94 |
| $\varphi^0 = 0,8$ | $\frac{3,726}{95,7}$ | | — | | 1,8 | 0,94 | 2,64 |

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Вимоги до регуляторів системи автоматизованого управління трубопрокатного станка

В даному проекті структура управління електроприводу базується на критеріальних оцінках динамічних процесів і вимог до системи в сталих режимах її роботи. Тут застосована система управління електроприводами з основним і допоміжними контурами регулювання. Двухзонними САР дозволяють регулювати швидкість як, нижче так і вище основної. Перевагою двухзонних САР в порівнянні з однозонними є краще використання встановленої потужності основного устаткування [8,17].

Для раціонального управління процесами електромеханічного перетворювача енергії в ланцюгах живлення обмоток якоря і збурення двигуна постійного струму передбачається керувані перетворювачі.

У регулюючій частині встановлюються регулятори: струму якоря РТ, швидкості РС, магнітного потоку РМП, електрорушійної сили РЕ; датчики: напруги ДН, і струму якоря ДТ, струму збурення ДТВ, швидкості ДС, електрорушійної сили ДЕ; фільтри: в каналі якоря Ф і в каналі збурення ФВ. Канал впливу по ланцюгу якоря являє собою систему регулювання швидкості з підлеглим контуром регулювання струму якоря. Так як ослаблення магнітного поля двигуна неглибоке (0,8) і істотного впливу на коефіцієнт швидкості регулятора швидкості не має, від розмножувального елемента в ланцюзі регулятора швидкості можна відмовитися.

Канал впливу по ланцюгу збурення виконується також у вигляді двухзонної САР, але містить внутрішній контур регулювання магнітного потоку і зовнішнього контуру регулювання ЕРС.

Зв'язуючою ланкою для функціонування даних каналів є ЕРС якоря,

тобто дані канали управління пов'язані між собою через внутрішні зв'язки об'єкта регулювання. Представлення тиристорного перетворювача безінерційною ланкою може бути здійснено лише для певних частот при не дуже швидких змінах управляючої напруги $U_y(t)$. При дуже швидких змінах починають проявлятися ряд факторів, основним з яких є дискретність перетворювача. Параметром, що визначає швидкодію контуру, є постійна часу T_μ . Аналіз стійкості з урахуванням дискретності ТП показує, що граничні значення постійних часу складають $T_\mu = \frac{\pi}{2m\omega_c}$ с.

При менших значеннях T_μ САР стає нестійкою, в ній можуть виникнути незгасаючі коливання. Щоб САР була працездатною, необхідно визначити запас стійкості. Як показує досвід, тут достатньо дворазового запасу і мінімально допустиме значення постійної часу T_μ може для кола якоря складати:

$$T_\mu = \frac{\pi}{m\omega_c} = \frac{\pi}{12 \cdot 314} \approx 0,001 \text{ с},$$

де m – пульсивність.

Для ланцюга збурення:

$$T_{\mu.в.} = \frac{\pi}{m\omega_c} = \frac{\pi}{6 \cdot 314} = 0,00167 \text{ с}.$$

При синтезі регулятора розглядаються наступні завдання.

Регулятор повинен компенсувати вплив тієї ланки, яка потрапляє в даний контур. Для вирішення цього завдання в передавальну функцію вводяться множник, що показано у виразі:

$$R_{k2}(p) = W_t^{-1}(p).$$

Регулятор повинен забезпечувати астатизм контуру по керуючому впливу, тобто забезпечити нульову статичну помилку управління. Для цього в регуляторі має бути присутня передавальна функція інтегруючої типу:

$$R_i(p) = \frac{1}{T_i p}$$

Тим самим забезпечуються певні властивості:

$$R_i(p) = R_{ki}(p) \cdot R_{vi}(p) = (T_i p W_i(p))^{-1},$$

де T – постійна інтегрування регулятора.

3.2 Розрахунок регулятора струму.

Синтез регулятора струму якоря показаний на рисунку 3.1.

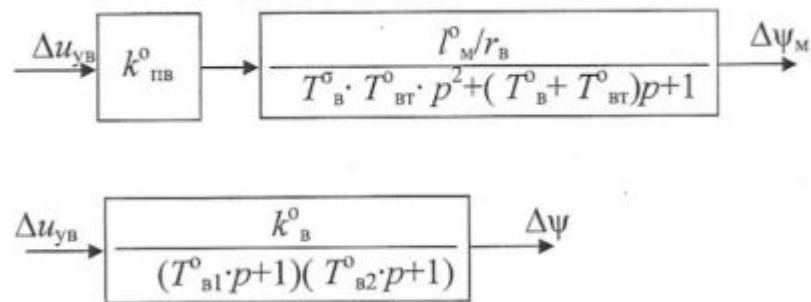


Рисунок 3.1 – Контур регулятора струму якоря.

При синтезі приймається $e_d = 0$.

Налаштування САР на модульний оптимум:

$$T_i = 2T_\mu = 2 \cdot 0,001 = 0,002 \text{ с.}$$

Передавальна функція регулятора струму:

$$R_i(p) = \frac{(T_\mu p + 1) r_\mu}{k_{II} T_i p}$$

У підсумку отримуємо ПІ–регулятор.

Коефіцієнт підсилення регулятора струму якоря:

$$K_{pm} = \frac{T_\vartheta r_\vartheta}{k_n T_i} = \frac{0,025 \cdot 0,1}{1,198 \cdot 0,002} \text{ с.}$$

Постійна часу регулятора:

$$T_{pm} = \frac{T_i k_n}{r_\vartheta} = \frac{0,002 \cdot 1,198}{0,1} = 0,024 \text{ с.}$$

Так як в реальній системі $e_\delta \neq 0$, то ЕРС обертання впливає на САР, тобто по відношенню до завданого стану вносить усталену помилку, яка залежить від електромеханічних властивостей і швидкодії контуру.

Впливом ЕРС можна знехтувати при дотриманні наступної умови:

$$T_m \geq 20T_\mu$$
$$0,097 > 20 \cdot T_\mu = 20 \cdot 0,001 = 0,02 \text{ с.}$$

Умова виконується, отже, впливом ЕРС можна знехтувати.

Перевіримо умову обмеження похідної струму якоря:

$$\left(\frac{di_\alpha}{dt} \right)_{max} \leq \left(\frac{di_\alpha}{dt} \right)_{до\delta} = 60 \text{ с}^{-1}.$$

За умови встановлення на вході контуру швидкості задавача інтенсивності:

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = \frac{0,21i_{я.max}}{T_{\mu}} = \frac{0,2 \cdot 1,4}{0,001} = 294c^{-1};$$

Оскільки умова не виконується, необхідно перед регулятором швидкості встановити фільтр, постійну часу якого, знайдемо з відношення:

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = \frac{0,21i_{я.max}}{T_{\mu.з}} = 60c^{-1}.$$

Звідки

$$T_{\mu.з} = \frac{0,21i_{я.max}}{60} = 0,0049 \text{ с.}$$

Знаючи $T_{\mu.з}$ знайдемо $T_{фс}$:

$$T_{фс} = 2T_{\mu} - T_i = 2 \cdot 0,0049 - 0,002 = 0,0078 \text{ с.}$$

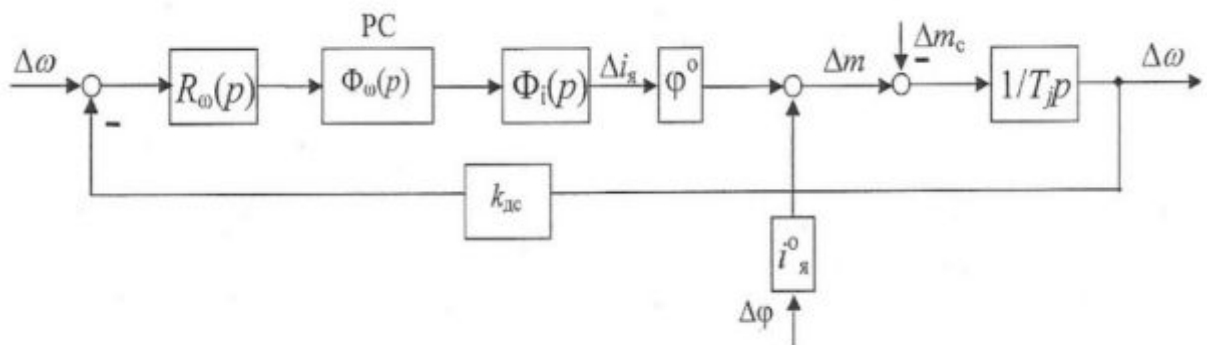


Рисунок 3.2 – Регулятор струму.

Синтез ведеться при $m_c = 0$ і $\Delta\varphi=0$.

Передавальна функція регулятора швидкості:

$$R_{\omega}(p) = \frac{T_j}{\varphi^0 T_{\omega}} = \frac{0,89}{1 \cdot 0,0196} = 44,5;$$

де $T_{\omega} = 4T_{\mu.з} = 4 \cdot 0,0049 = 0,0196 \text{ с.}$

Таким чином, регулятор швидкості являє собою П-регулятор.

3.3. Розрахунок регулятора магнітного потоку.

Синтез регулятора магнітного потік показаний рисунком 3.3.

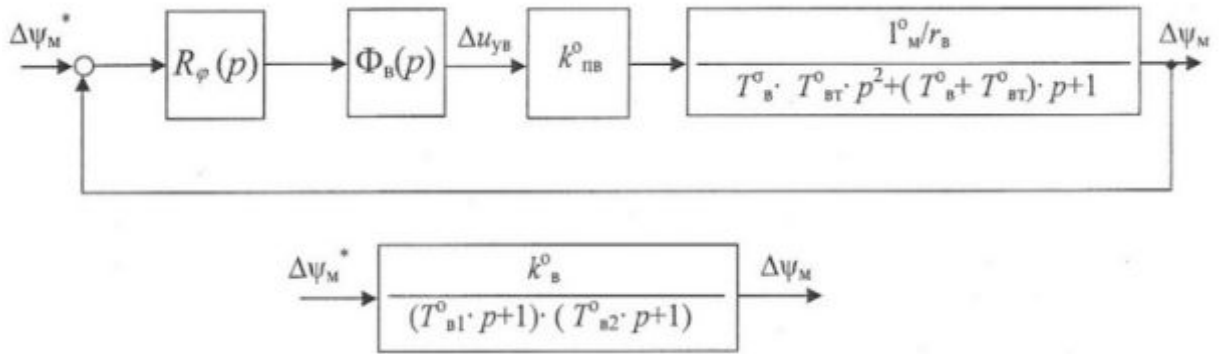


Рисунок 3.3 – Контур регулятора магнітного потоку.

Величина $T_{\epsilon 2}^0$ настільки мала, що може бути віднесена до числа не постійних часу САР потоку збурення, що не потребує компенсації. Тоді відповідно до стандартної методики синтезу передавальної функції регулятора потоку набуває вигляду:

$$R_{\varphi}(p) = \frac{T_{\epsilon 1}^0 + 1}{k_{\epsilon}^0 T_{\varphi} p}$$

$$\text{де } T_{\varphi} = 2(T_{\mu \nu} + T_{\epsilon 2}^0) = 2 \cdot (0,00167 + 0,13) = 0,029 \text{ с.}$$

В результаті отримуємо ІІІ-регулятор магнітного потоку.

Коефіцієнт підсилення регулятора:

$$K_{p\varphi}(p) = \frac{T_{\epsilon 1}^0 + 1}{k_{\epsilon}^0 T_{\varphi}} = \frac{1,8}{2,64 \cdot 0,029} = 26$$

Постійна часу:

$$T_{p\varphi} = k_{\epsilon}^0 T_{\varphi} = 2,64 \cdot 0,029 = 0,07 \text{ с.}$$

Синтез регулятора ЕРС наведено на рисунку 3.4.

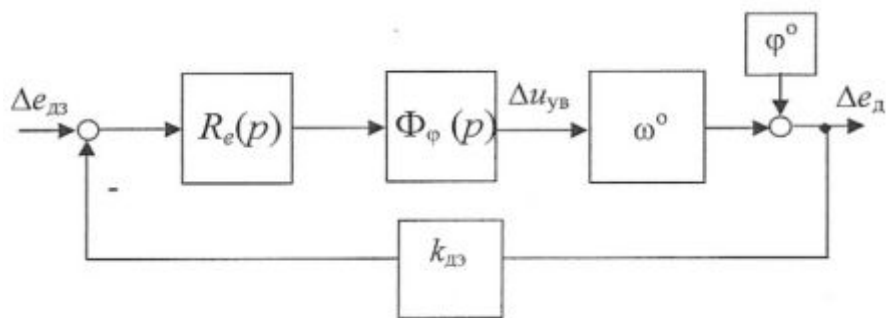


Рисунок 3.4 – Контур регулятора ЕРС

Відповідно до типової методикою отримуємо інтегральний регулятор ЕРС з передавальної функцією:

$$R_e(p) = \frac{1}{\omega^0 T_e p},$$

де $T_e = 2T_\varphi = 2 \cdot 0,029 = 0,058$ с.

Відповідно до отриманого виразу в структурі регулятора ЕРС виділена інтегруюча ланка зі змінним параметром T_e і поділювальна ланка зі змінним параметром ω^0 . Блок ділення в структурі регулятора компенсує вплив зміни швидкості на характеристики контуру ЕРС.

Постійна часу І- регулятора:

$$T_{pz} = \omega^0 T_e = 1,25 \cdot 0,058 = 0,07 \text{ с.}$$

Для виключення операції диференціювання струму в структуру обчислювача ЕРС вводиться аперіодичний фільтр з постійною часу:

$$T_{fz} = T_{яд} = 0,04 \text{ с.}$$

Функціональна і електричні схеми представлені на рисунку 3.5 і 3.6.

В реальних САР фільтр з постійного часу T_μ встановлюється не на вході СІФУ, а на входах регулятора струму в ланцюгах задань і зворотного зв'язку по струму.

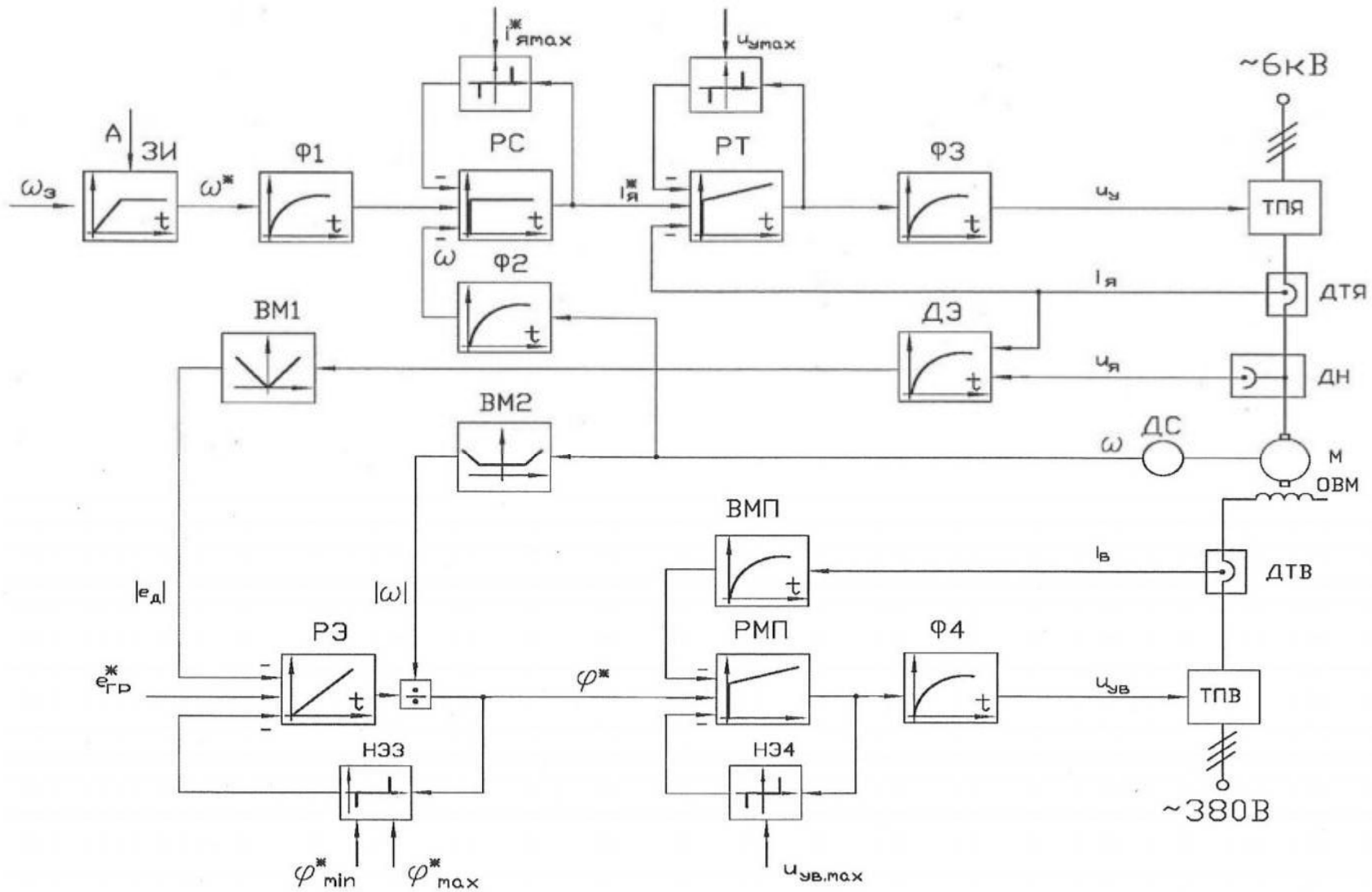


Рисунок 3.5 – Функціональна схема САУ

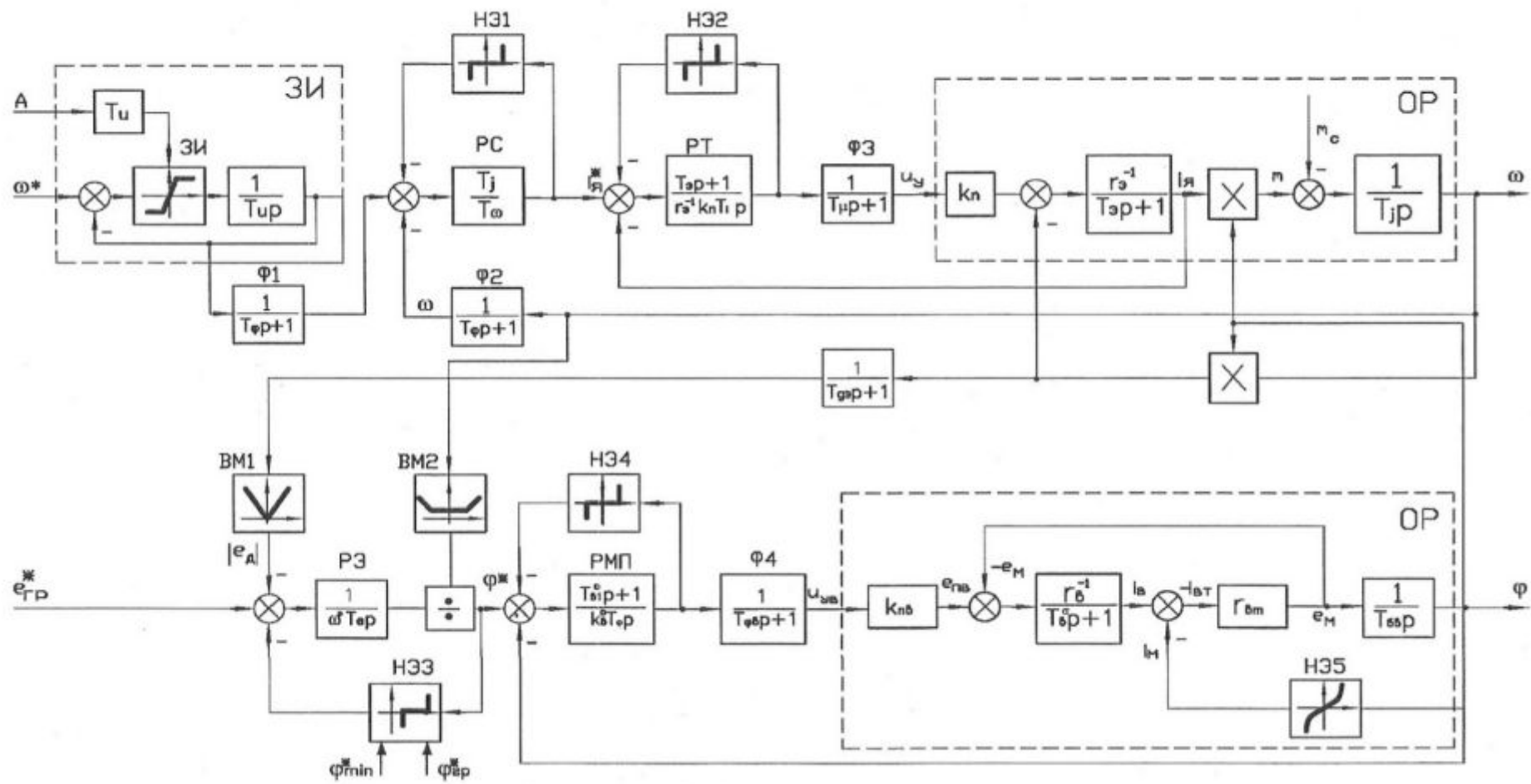


Рисунок 3.6 – Структурна схема САУ

3.4 Розробка принципової схеми САУ

Для системи автоматичного управління обрано задавачі даних з наступними технічними характеристиками.

В якості давача швидкості вибрано прецизійний тахогенератор ПТ-42 з такими основними параметрами.

Потужність номінальна Вт;

Напруга номінальна

$$U_{н.тг.} = 230В ;$$

Струм якоря номінальний

$$I_{н.тг.} = 0,5А ;$$

Швидкість номінальна:

$$n_{н.тг.} = 400 об / хв ;$$

Напруга збурення номінальна

$$U_{з.н.тг.} = 55В ;$$

Струм збурення номінальний

$$I_{з.н.тг.} = 1А ;$$

Зубцеві пульсації

$$\delta_{з.тг.} = 1,4\% ;$$

Полюсні пульсації:

$$\delta_{п.тг.} = 0,5\% ;$$

Колекторні пульсації:

$$\delta_{к.тг.} = 1,4\% ;$$

Оборотні пульсації:

$$\delta_{о.тг.} = 1,2\%$$

Давачем струму використано РГ8. Даний давач первинну інформацію отримує з шунта. Вибираємо шунт 75ШСМ:

Струм шунта:

$$I_{ш.н.} = 0,5А ;$$

Напруга шунта:

$$U_{ш.н.} = 230В ;$$

Коефіцієнт шунта:

$$K_{ш} = \frac{U_{ш.н.}}{I_{ш.н.}} = \frac{0,075}{4000} = 1,8 \cdot 10^{-5} В/А.$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{ядт} = \frac{U_{кд}}{K_{ш}} = \frac{0,002}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 106.$$

Як датчик напруги використовується РГ8. Даний датчик первинну інформацію отримує з двигуна.

Як датчик струму збурення використовується також РГ8, який первинну інформацію отримує з шунта.

Тут також оберемо шунт 75ШСМ з характеристиками:

Струм шунта: $I_{ш.ном.} = 100A$;

Напруга шунта: $U_{ш.ном.} = 75мВ$.

Коефіцієнт шунта:

$$K_{ш} = \frac{U_{ш.ном.}}{I_{ш.ном.}} = \frac{0,075}{100} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ В/А.}$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{ДС} = \frac{U_{КД}}{K_{ш}} = \frac{0,07}{75 \cdot 10^{-3}} = 93.$$

Базисні величини для системи автоматичного управління. В системі САР-08-М1 використовуються наступні види операційних підсилювачів (ОП): К553 УД2 і К140 УД7.

Приведена похибка САР в номінальному режимі: $\delta = 0,005$;

Коефіцієнт посилення операційного підсилювача: $K_{ОУ} = 2 \cdot 10^4$;

Струм ланцюга обмеження регулятора: $I_{об.мах} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$;

Максимальна напруга на виході ОУ: $U_{ОУ.мах} = \pm 10В$;

Вихідний опір: $R_{вх} = 400кОм$.

Базовий струм САР:

$$I_{б.р.} \geq \frac{1}{\delta} \cdot \frac{U_{ОУ.мах}}{R_{ОУ} R_{вх}} + I_{об.мах} = \frac{1}{0,005} \cdot \frac{10}{2 \cdot 10^4 \cdot 400 \cdot 10^3} + 2 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Приймаємо:

$$I_{б.р.} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \quad U_{б.р.} = 7В; \quad R_{б.р.} = \frac{U_{б.р.}}{I_{б.р.}} = \frac{7}{0,7 \cdot 10^{-3}} = 10кОм.$$

Структурна схема регулятора струму представлена на рисунку 3.7.

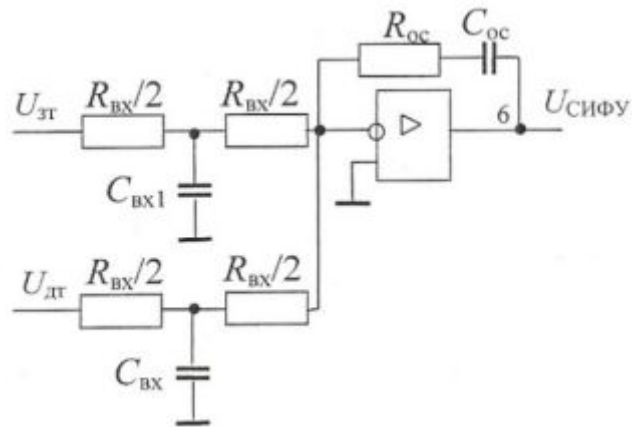


Рисунок 3.7 – Регулятор струму

Приймаємо:

$$R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ос}} = K_{\text{рм}} R_{\text{вх}} = 1,4 \cdot 20 = 28 \text{ кОм}$$

$$C_{\text{ос}} = \frac{T_{\text{рм}}}{R_{\text{вх}}} = \frac{0,024}{20} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Структурна схема регулятора швидкості представлена рисунку 3.8.

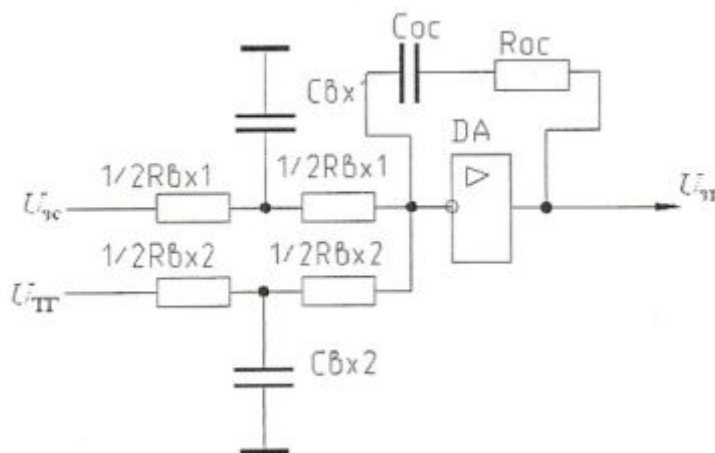


Рисунок 3.8 – Регулятор швидкості

Приймаємо: $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$

$$R_{ос} = K_{рм} R_{вх} = 44,5 \cdot 5 = 222,5 \text{ кОм}$$

Структурна схема струму збурення представлена на рисунку 3.9.

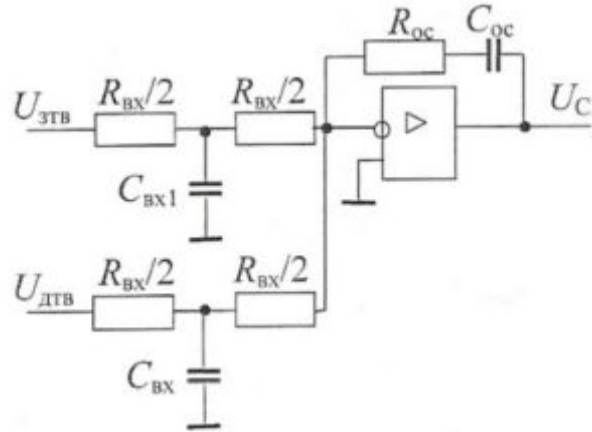


Рисунок 3.9 – Регулятор струму збурення.

Приймаємо: $\frac{R_{вх}}{2} = R_{б.р.} = 50 \text{ кОм}$;

$$R_{ос} = K_{рм} R_{вх} = 26 \cdot 100 = 2600 \text{ кОм};$$

$$C_{вх} = \frac{T_{\phi}}{R_{вх}} = \frac{4 \cdot 0,0017}{100} = 0,06 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{ос} = \frac{4T_{р\phi}}{R_{вх}} = \frac{4 \cdot 0,07}{100} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Структурна схема ЕРС представлена на рисунку 3.10.

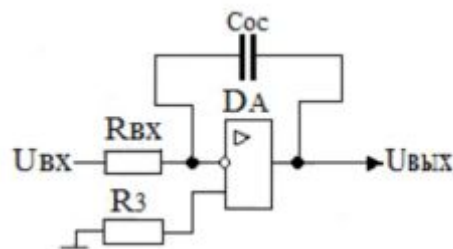


Рисунок 3.10 – Регулятор ЕРС

Приймаємо:

$$\frac{R_{\text{вх}}}{2} = R_{\text{б.р.}} = 50 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ос}} = K_{\text{рз}} R_{\text{вх}} = 1 \cdot 300 = 300 \text{ кОм};$$

$$C_{\text{вх}} = \frac{T_{\phi}}{R_{\text{вх}}} = \frac{4 \cdot 0,04}{300} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{\text{ос}} = \frac{4T_{\text{рз}}}{R_{\text{вх}}} = \frac{4 \cdot 0,07}{300} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Розраховані регулятори хоч і дозволяють з високою точністю регулювати швидкість прокатки труб при динамічних навантаженнях трубопрокатного стану в цілому і зокрема, його головного приводу, для підвищення надійності роботи системи автоматичного управління запропоновано використати логіко-статистичні інформаційні моделі (ЛСІМ).

РОЗДІЛ 4.

ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІКО-СТАТИСТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНІВ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТУ

4.1 Теорія побудови логіко-статистичних інформаційних моделей

Система логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ) дозволяє охопити широкий клас задач дослідження сигналів, що формуються джерелами інформації (ДІ), первинної обробки повідомлень в реальному часі, контролю відхилень та ідентифікації станів об'єкту керування (ОК).

В основі першої ЛСІМ лежать апробовані методи ідентифікації допустимих відхилень станів ОК від встановленої норми. Така модель багатоканального ДІ описується вектором булевих змінних:

$$L1 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, \quad (4.1)$$

де m – загальна кількість каналів ДІ.

Якщо спостереження за ДІ ведеться протягом деякого інтервалу часу, то на цьому інтервалі формується послідовність векторів $L1_k$, які характеризують ДІ в кожен дискретний момент часу k .

Значення булевих змінних визначається за умовою:

$$a_{i_k} = \begin{cases} 0, & \text{при } x_{i_k} \in E1_i, \\ 1, & \text{при } x_{i_k} \notin E1_i; \end{cases} \quad (4.2)$$

де x_{k_i} – значення амплітуди сигналу в i -му каналі;

k – дискретний системний час;

$E1_i$ – апертура допустимих відхилень в i -му каналі.

Перша ЛСІМ (4.2) має декілька модифікацій, які полягають у

використанні статистичних характеристик сигналів і відповідних апертур в умові визначення координат вектора (4.3):

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{при } M_{x_i} \in E11_i, \\ 1, & \text{при } M_{x_i} \notin E11_i; \end{cases} \quad a_i = \begin{cases} 0, & \text{при } M_{j_i} \in E12_i, \\ 1, & \text{при } M_{j_i} \notin E12_i; \end{cases} \quad a_i = \begin{cases} 0, & \text{при } D_{x_i} \in E13_i, \\ 1, & \text{при } D_{x_i} \notin E13_i; \end{cases} \quad (4.3)$$

де в першій умові визначаючим фактором є оцінка вибіркового математичного сподівання, в другій умові – оцінка ковзного математичного сподівання, а в третій умові – оцінка дисперсії.

Перевагами наведених модифікацій є нечутливість до окремих випадкових відхилень, інтегральна чутливість моделі і зменшення об'єму даних.

На рис. 4.1 наведено приклад, який відображає принцип формування булевих змінних в першій ЛСІМ та її модифікаціях для одного каналу ДІ.

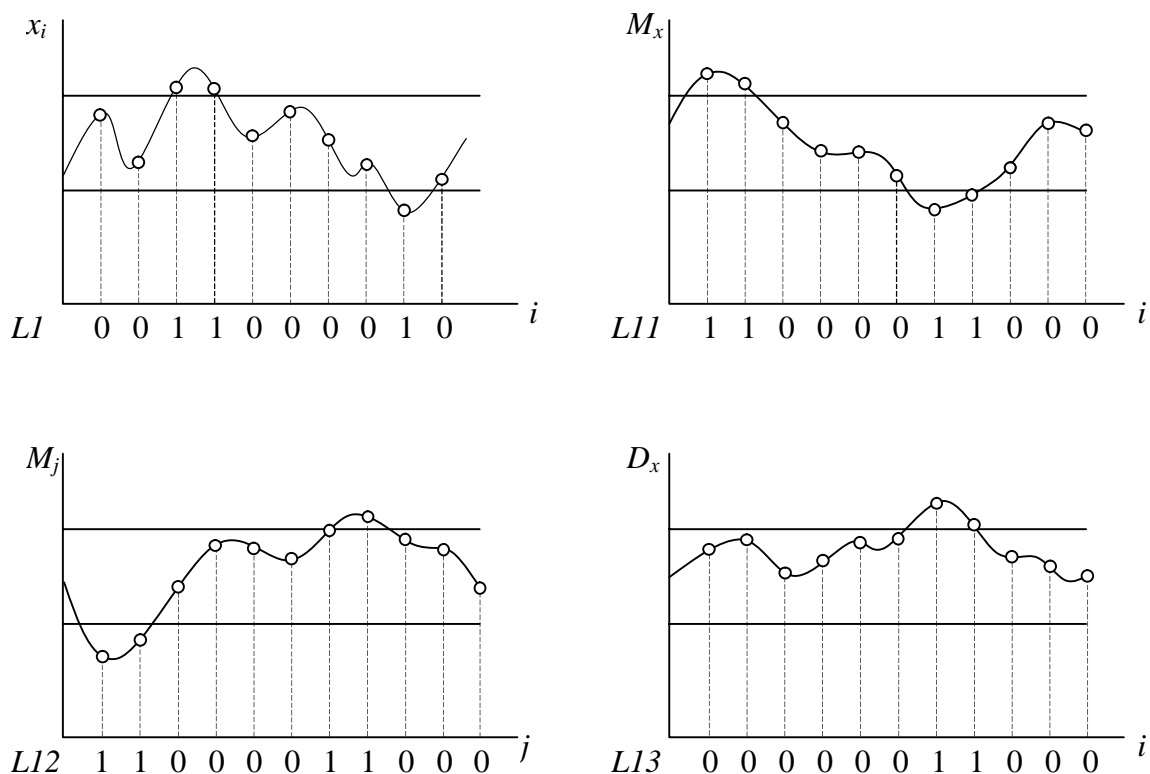


Рисунок – 4.1. Формування значень вектора першої ЛСІМ та її модифікацій.

Контроль динамічних параметрів об'єкту можна здійснювати за допомогою другої ЛСІМ. В її основу покладено визначення параметрів функції автокореляції, які відображають динамічні властивості сигналів. Друга ЛСІМ також описується вектором булевих змінних:

$$L2 = \{b_1, b_2, \dots, b_m\},$$

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{при } R_{x_i x_i}(j_0) < E2_i, \\ 1, & \text{при } R_{x_i x_i}(j_0) \geq E2_i, \end{cases} \quad (4.4)$$

де $R_{x_i x_i}(j_0)$ – значення функції автокореляції при часовому зсуві j_0 ;

$E2_i$ – апертура амплітуди автокореляційної функції.

Формування координат логічного вектора $L2$ може проводитись з використанням інших автокореляційних оцінок: $K_{xx}(j)$, $C_{xx}(j)$, $G_{xx}(j)$, $F_{xx}(j)$ (див. п. 2.2) в ролі функцій, що характеризують динамічні властивості сигналів. При цьому необхідно вибрати відповідні значення j_0 і $E2$.

На рис. 4.2 наведено приклад формування значень другої ЛСІМ одноканального ДІ при зміні динаміки сигналу.

Другу ЛСІМ можна модифікувати, що дозволить розширити її функціональні можливості контролю динаміки сигналу. Модифікація полягає в тому, що аналіз кореляційних оцінок проводиться не при одному значенні j_0 , а на деякому інтервалі (j_1, j_2) (рис. 4.3.).

В основі третьої ЛСІМ лежить процедура визначення коефіцієнтів взаємокореляції між контрольованим і еталонним сигналами. Як і попередні моделі третя ЛСІМ описується вектором булевих змінних

$$L3 = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}, \quad (4.5)$$

але координати c_i визначаються за іншою умовою:

$$c_i = \begin{cases} 0, & \text{при } \rho_{x_i e_i}(j) < E3_i, \\ 1, & \text{при } \rho_{x_i e_i}(j) \geq E3_i, \end{cases} \quad (4.6)$$

де $\rho_{x_i e_i}(j)$ – коефіцієнт кореляції між i -им сигналом x_i та відповідним еталоном e_i .

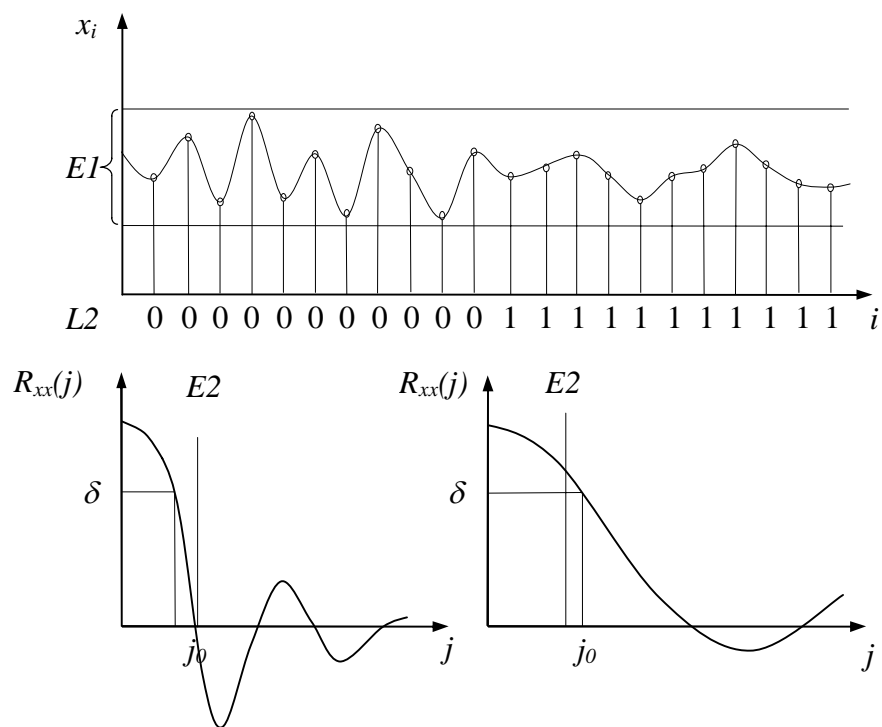


Рисунок – 4.2. Формування значень другої ЛСІМ.

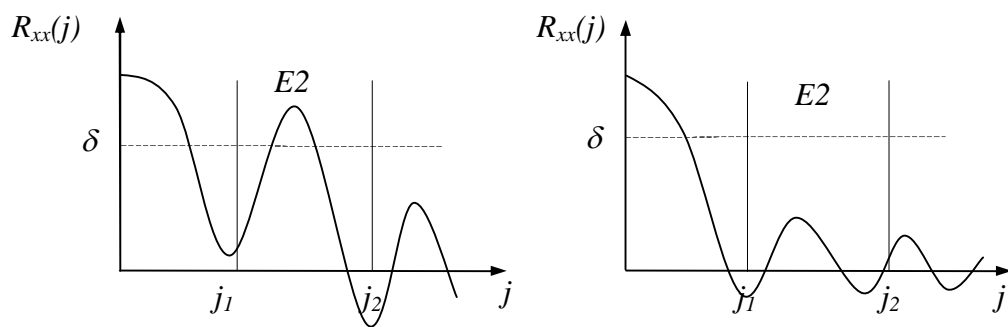


Рисунок 4.3 – Приклади встановлення інтервальних апертур в другій ЛСІМ

Суть третьої ЛСІМ полягає в ідентифікації фазових відхилень контрольованого сигналу від норми, поданої у вигляді еталонного сигналу e_i (рис. 4.4).

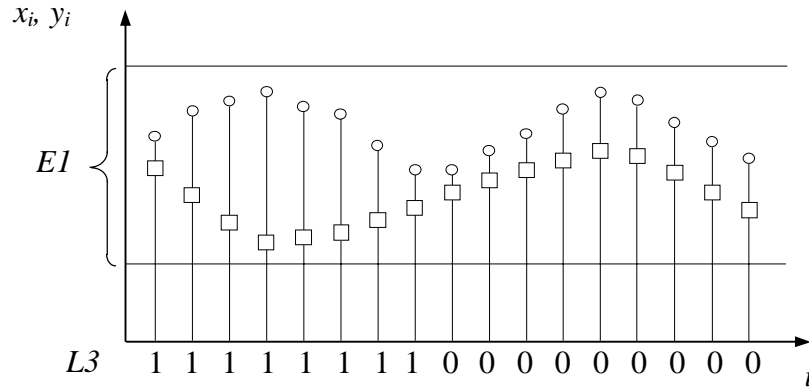


Рисунок 4.4 – Формування булевих змінних у векторі третьої ЛСІМ.

В основу четвертої ЛСІМ покладено спектральний аналіз сигналів. Задається або визначається множина $E4$ гармонік з частотами $\omega_1, \omega_2, \dots$, які повинні бути присутніми в сигналі при нормальному стані ДІ. Провівши спектральний аналіз контрольованого сигналу визначається множина гармонік A , на які розкладається досліджуваний сигнал в заданому базисі (рис. 4.5). В результаті формується логічний вектор четвертої ЛСІМ багатоканального ДІ, координати якого реагують на зміну спектрального складу сигналу у відповідному каналі:

$$L4 = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, \quad d_i = \begin{cases} 0, & \text{при } E4_i \subset A_i, \\ 1, & \text{при } E4_i \not\subset A_i. \end{cases} \quad (4.7)$$

П'ята ЛСІМ базується на матриці коефіцієнтів взаємокореляції сигналів в каналах ДІ і оцінки глобальної дисперсії D_G [25]. Вона дозволяє зафіксувати зменшення значень D_G нижче встановленої апертури $E5$, що

відповідає руйнуванню кореляційних зв'язків і деградацію системи в цілому. На відміну від попередніх ЛСІМ, дана модель виражається одною булевою змінною g (рис. 4.6), яка оцінює загальний стан багатоканального ДІ:

$$L5 = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}, \quad g = \begin{cases} 0, & \text{при } D_G > E5, \\ 1, & \text{при } D_G \leq E5. \end{cases} \quad (4.8)$$

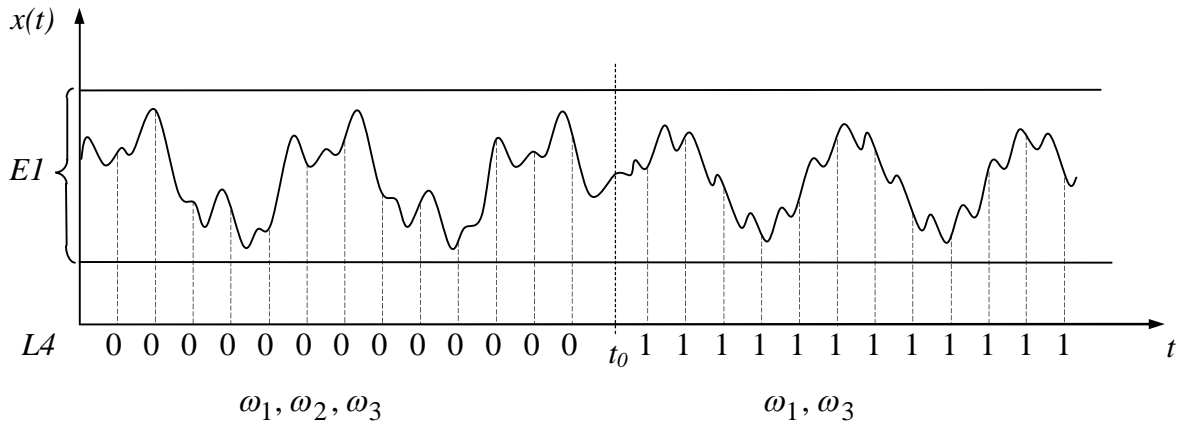


Рисунок 4.5 – Формування відліків четвертої ЛСІМ при зміні спектрального складу сигналу.

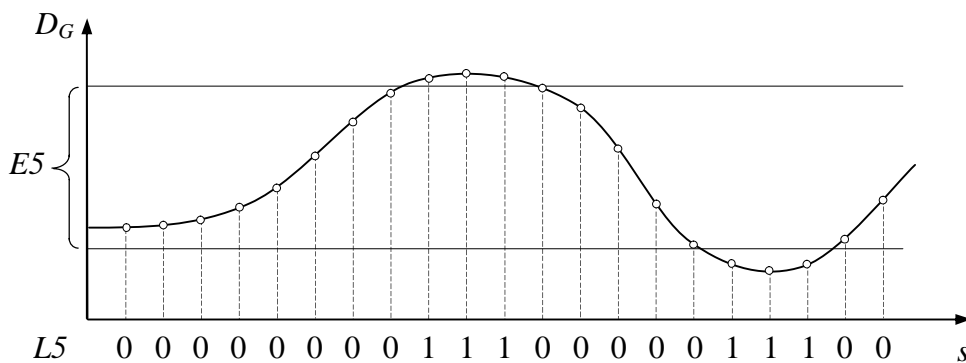


Рисунок 4.6 – Формування значень п'ятої ЛСІМ на основі глобальної дисперсії.

В п'ятій ЛСІМ можна використати за оціночний параметр семантичне значення D_S (4.9):

$$D_S = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N p_s \cdot r_s^2, \quad (4.9)$$

де $0 \leq p_s \leq 1$ – вагова функція.

Подані ЛСІМ хоч і не дозволяють кількісно оцінити відхилення параметрів сигналів ДІ, проте здатні ефективно відслідковувати критичні відхилення від норми, що відповідають виходу значень параметрів за визначені апертури $E1 - E5$. Суттєвою перевагою ЛСІМ є також значне зменшення надлишковості повідомлень, що формуються на низових рівнях автоматизованих систем, за рахунок використання однобітної системи кодування.

4.2 Побудова логіко-статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1 для контролю швидкості подачі заготовок в прошивний стан

В роботі пропонується ввести другий рівень контролю швидкості прошивного стану та температури заготовки, що подається у прошивний стан за рахунок використання ЛСІМ. Це дозволить знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій та зупину технологічного процесу внаслідок виникнення нештатних ситуацій.

З аналізу технологічного процесу проведеному в першому розділі можна зробити висновок, що подача заготовки повинна здійснюватись з максимально можливою швидкістю, щоб забезпечити високу продуктивність, але не перевищувати максимально можливу, щоб запобігти зіштовхуванням заготовок. Таким чином для контролю швидкості використаємо ЛСІМ 1 (4.1–

4.2), яка дозволить встановити відповідну апертуру для швидкості подачі заготовок і контролювати цей параметр в заданих межах. При виході параметру швидкості за встановлену апертуру ЛСІМ 1 формує попереджувальний сигнал у вигляді бінарної 1. При нормальному режимі (швидкості) роботи прошивного механізму ЛСІМ 1 формує сигнал, що відповідає рівню бінарного 0.

Так для нормальної роботи трубопрошивного механізму швидкість подачі повинна знаходитись в межах від 1 м/с до $1,5 \text{ м/с}$ для труб довжиною 25 м та діаметром від 30 мм до 75 мм . Апертура швидкості подачі може змінюватись для труб різного діаметру та матеріалу заготовки.

Розглянемо конкретний випадок для представленого вище випадку. Графік швидкості V_i подачі заготовок в трубопрошивний механізм представлено на рисунку 4.7. На цьому графіку червоною кривою позначено сам графік швидкості на деякому інтервалі спостереження від 0 с до 1000 с . При цьому верхнє значення апертури на графіку показано зеленою пунктирною лінією на рівні $1,5 \text{ м/с}$, а нижнє значення апертури зображено синьою пунктирною лінією на рівні 1 м/с .

Час дискретизації, тобто миттєві значення швидкості знімаються з періодичністю $\Delta t = 0,1\pi \text{ с}$. Спостереження швидкості здійснюється на загальному інтервалі спостереження $[0, 100\pi]$, що відповідає дискретному часу від $i=0$ до $i=1000$.

Як видно з графіку в момент дискретного часу $i=510$ швидкість виходить за межі верхньої границі апертури і знаходиться за її межами до дискретного моменту $i=690$. Відповідно, ЛСІМ 1 повинна в на інтервалі $[510, 690]$ формувати імпульси, що відповідають рівню логічної одиниці. За межами вказаного інтервалу швидкість знаходиться в межах заданої апертури і ЛСІМ 1 повинна формувати сигнали, що відповідають рівню логічного нуля.

Графік логіко-статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1 згідно (4.1) і

(4.2) представлено на рисунку 4.8.

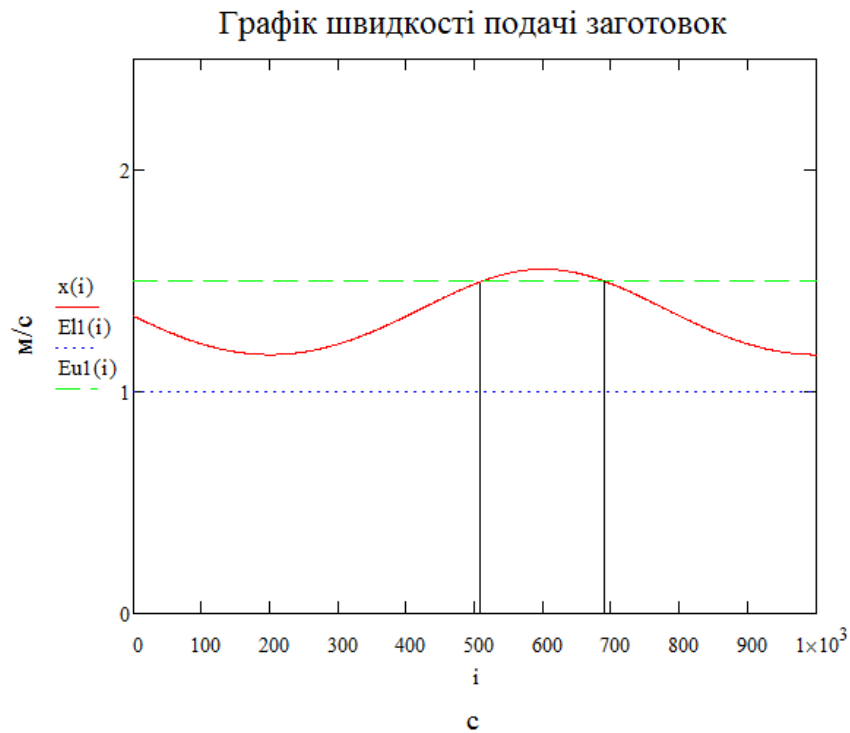


Рисунок 4.7 – Графік швидкості подачі заготовок в трубопрошивний стан.

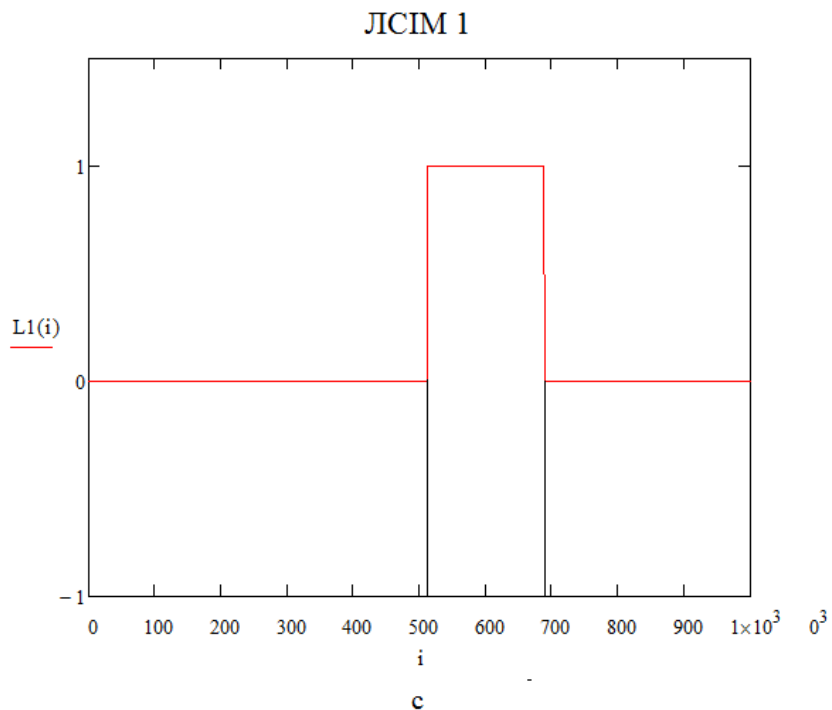


Рисунок 4.8 – Значення логіко-статистичної інформаційної моделі ЛСІМ 1, що відповідає графіку швидкості та апертури представлених на рисунку 4.7

Таким чином, розроблено другий рівень контролю швидкості подачі заготовок в трубопрошивний стан системи автоматичного управління на основі ЛСІМ 1.

ВИСНОВОК

В роботі проаналізовано технологічний процес трубопрокатної установки і запропоновано запровадження дворівневої системи автоматичного керування приводом прошивного стану.

Розраховано контури регулювання швидкості головного приводу прошивного стану та розроблено схеми регулятора швидкості, регулятора ЕРС та регулятора струму якоря електродвигуна.

На основі здійснених розрахунків обрано відповідні апаратно-технічні елементи та пристрої для розробленої системи автоматичного управління.

Також проаналізовано та показано результати роботи спроектованої САУ, що підтверджують її ефективність.

Крім того, на основі аналізу логіко-статистичних інформаційних моделей, запропоновано використати ЛСІМ 1 для організації другого рівня контролю швидкості подачі заготовок в прошивний стан.

Представлено приклад роботи ЛСІМ 1 для конкретних умов роботи прошивного стану на основі реальних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд., испр.- М.: Наука, 2004. 767с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 2009. 832с.
3. Евстафиева С. В. Протокол PROFIDRIVE в задачах управления электроприводом / С. В. Евстафиева, А. Е. Сорокоумов // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011) : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, 2011. – С. 269-270
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. М.:Энергоатомиздат, 2008. 704с.
5. Браславский И.Я., Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии для электроприводов с двигателями постоянного тока: Учебное пособие. Свердловск: УПИ, 2004. 80с.
6. Экономическая теория. /Под ред. А.А.Кочеткова. — М.: Дашков и К. — 2011. – 696с.
7. Особенности систем двухзонного регулирования скорости: Методические указания к проекту/ М.Ю. Бородин, В.П. Метельков. Свердловск: УПИ, 2011. 29с.
8. Система автоматизации S7-200. Системное руководство. Выпуск 1, 2010. 384с.
9. Туровец О.Г. Гилянкис В.Д. Вопросы экономики и организации производства в дипломных проектах. М.: Высшая школа, 1988. 174с
10. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – Учебник. – М.: Академия, 2005. – 304с.
11. Микроэкономика: учебное пособие / А.Г. Ивасенко, Я.И. Никонов. – М.: КноРус. 2013.

12. Основы экономической теории /Н.П. Костеров. – М.: Академия; Московские учебники. – 2011.
13. Современная экономическая теория. /Под ред. Дж. Харвея. — М.: ЮнитиДана. — 2012. — 703 с.
14. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд-во Академия, 2008. – 304 с. Экономическая теория. Учебник. /Под ред. В.И.Видяпина. — М.: ИНФРА. — 2011. — 714 с.
15. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л., Энергоиздат, 1982. - 392 с.
16. Кондратюк В.Н., Резинский С.Р., Евзеров И.Х. Тиристорные преобразователи: Энергия, 1978.
17. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии для электроприводов переменного тока. Учебное пособие. Свердловск, изд. УПИ им.С.М. Кирова, 1986, 72 с. 1
18. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием: Учебное пособие. Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 166 с.
19. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. ПОТ РМ – 016 – 2001., с изм. и доп. 2003г. – Москва: Изд-во НЦЭНАС. 95 БР.44.03.04.882.2017
20. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник и др. 2-е изд. перераб. и доп. Москва, Металлургия, 1988.
21. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорным электроприводом постоянного тока. Москва: Энергоатомиздат, 1987.
22. Почаевец В.С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог: Учебник для колледжей и

техникумов ж.-д. транспорта. – Москва: Маршрут, 2003. – 318с.

23. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман и др. 2-е изд. перераб. и доп. Москва., Металлургия, 1986. – 352 с.

24. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. Москва, Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

25. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації: монографія / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТНЕУ, Економічна думка, 2008. – 396 с.