

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____Дідик О.К.

« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Модернізація системи автоматичного керування
температурою пресу технологічної лінії»**

**«Modernisation of the automatic press temperature control
system of the production line»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи АК-23 М-1 (1,4)

174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»

_____Панченко А.П.

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи

д.т.н, професор

_____Мацуї А.М.

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент

_____ 2024 р.
« ____ » _____

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ

1. Огляд і аналіз технологічного процесу виробництва полімерних трубчастих виробів
 - 1.1 Технологія виробництва трубчастих виробів
 - 1.2 Параметри процесу екструзії
 - 1.3 Аналіз системи електрообладнання та автоматизації лінії
 - 1.4 Задачі проектування
2. Модернізація системи керування лінії
 - 2.1 Модернізація схеми електричної принципової керування охолодження преса
 - 2.2 Модернізація схеми електричної принципової керування приводом барабанів
3. Обґрунтування системи керування
 - 3.1 Розрахунок та вибір джерела живлення
 - 3.2 Розрахунок силового ланцюга електропривода
 - 3.3 Розрахунок перетворювача двигуна
 - 3.4 Розрахунок елементів захисту
 - 3.5 Розрахунок характеристик привода
Розрахунок ККД перетворювача
 - 3.6 Розрахунок і побудова часових діаграм перетворювача
 - 3.7 Вибір типу комплектного тиристорного перетворювача
 - 3.8 Обґрунтування системи імпульсно-фазного керування
4. Розрахунок динамічних характеристик
 - 4.1 Розрахунок швидкісних характеристик в системах електропривода
 - 4.2 Розрахунок і побудова динамічних характеристик електропривода
 - 4.3 Дослідження динамічних процесів у контурах САК на цифровій

моделі

Висновки

Список літератури

Додаток А. Охорона праці

ВСТУП

Завдання покращення якості поліетиленових труб, що виробляються на технологічних лініях ЛТ63х3О-25/63, найефективніше вирішується шляхом оновлення та вдосконалення наявного обладнання. Модернізаційні заходи зазвичай передбачають впровадження інноваційних автоматизованих систем, що дають змогу контролювати технологічний процес у чітко визначених параметрах з високим рівнем точності. Сучасні засоби автоматизації сприяють стабільному дотриманню технологічних режимів, мінімізуючи ймовірність відхилень та підвищуючи загальну ефективність виробництва.

Ця випускна кваліфікаційна робота спрямована на підвищення ефективності та модернізацію технологічної лінії шляхом впровадження сучасного комплектного електропривода, а також використання інноваційного мікропроцесорного регулятора для точного контролю температурного режиму преса. Основною метою дослідження є удосконалення системи керування технологічного обладнання для підвищення продуктивності та енергоефективності. В процесі реалізації поставленої мети було вирішено низку важливих задач, зокрема:

У системі керування приводами барабанів впроваджено технологію регулювання роботи електродвигуна постійного струму на основі системи тиристорного перетворювача частоти (ТПЧ) у поєднанні з двигуном постійного струму (ДПС).

Було проведено детальний аналіз та обґрунтований вибір джерела живлення разом з його складовими елементами. Визначено основні параметри силового ланцюга електропривода, виконано розрахунки захисних компонентів та побудовано основні характеристики перетворювача. Оптимізовано контури регулювання системи автоматичного керування (САК) для забезпечення її ефективності. Здійснено розрахунок швидкісних характеристик у замкненому та відкритому контурах САК, а також проведено моделювання системи керування на цифровій платформі. Окрім цього, розроблено систему імпульсно-фазового керування, що забезпечує необхідну точність і

стабільність роботи.

Для спостереження за зміною частоти обертання барабанів без оцінки її значення з нормованою точністю застосовано індикатор частоти обертання.

Для вимірювання струму, споживаного електродвигуном, передбачено вимірювальний прилад.

В схемі електричній принциповій охолодження преса для регулювання температури зон преса застосовано багатоканальний регулятор температури типу.

1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІМЕРНИХ ТРУБЧАСТИХ ВИРОБІВ

1.1 Технологія виробництва трубчастих виробів

Виробництво полімерних труб є безперервним та високотехнологічним процесом, що забезпечує масове отримання якісної продукції для різних сфер застосування. Одним з ключових методів виготовлення труб з полімерних матеріалів виступає екструзія, яка полягає у продавлюванні розплавленого полімеру через формуючу головку, що дозволяє надавати виробам необхідну форму та розмір.

Екструзія – це технологічний процес формування виробів із полімерної сировини (гранул, порошку або розплавленого матеріалу), у ході якого розплавлений полімер під тиском продавлюється крізь спеціальну формуючу головку. У результаті виходять вироби із заданою формою поперечного перерізу, які після цього піддаються охолодженню для надання їм стабільності та необхідних характеристик. Завдяки цьому методу можна виробляти різноманітну продукцію, таку як листові матеріали, труби, плівки, ущільнювальні прокладки, поручні для сходів та інші профільні вироби. Екструзія також широко застосовується для нанесення полімерного ізоляційного шару на дроти й кабелі, а також для покриття полімерними матеріалами різних основ, зокрема паперу, картону, фольги тощо.

Основним технологічним обладнанням у процесі виготовлення полімерних труб виступає екструдер.

Вітчизняні машинобудівні заводи пропонують широкий асортимент моделей екструдерів, які відрізняються за конструкцією та принципом дії робочих органів. Залежно від конфігурації робочого елемента, екструдери можна класифікувати на шнекові (черв'ячні), дискові та комбіновані установки, що поєднують різні технологічні рішення. У технічній літературі екструдери, що мають черв'як у якості робочого органу, часто називають черв'ячними пресами.

- 1) одночерв'ячні преси;
- 2) двочерв'ячні преси;
- 3) дискові екструдери;
- 4) комбіновані екструдери каскадного типу;
- 5) черв'ячні осцилюючі змішувачі, вживані при пластикації композиційних матеріалів.

Одночерв'ячні преси. Ці машини є найбільш поширеними в різних сферах застосування. Вони класифікуються залежно від орієнтації циліндра і поділяються на горизонтальні та вертикальні конструкції. На рис.1.1 представлено схему одночерв'ячного преса, в якому циліндр має горизонтальне розташування.

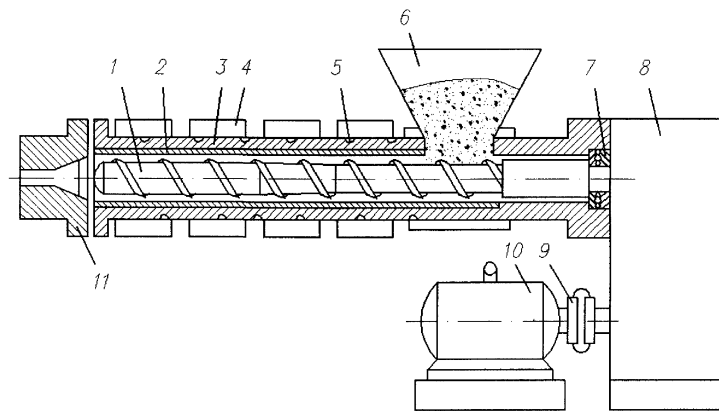


Рисунок 1.1 – Одночерв'ячний прес з горизонтальним розташуванням циліндра:

1 - черв'як; 2 - гільза; 3 - циліндр; 4 - електронагрівач; 5 - система охолодження; 6 - завантажувальна воронка; 7 - вузол упорного підшипника; 8 - редуктор; 9 - муфта; 10 - електродвигун; 11 - формуюча головка

Циліндр преса 3 закріплений на вузлі підшипника, що забезпечує його надійне функціонування під навантаженням. Зовнішня оболонка циліндра виготовлена із товстостінної зварної труби, всередині якої розташована високостійка до зносу гільза 2, створена з азотованої сталі. Для підтримання необхідного температурного режиму циліндр оснащений електричними нагрівальними елементами 4, які розділяють його на кілька незалежних теплових зон. Зона завантаження циліндра відділена від першого

нагрівального сегмента за допомогою водяної сорочки. Це рішення дозволяє запобігти передчасному розплавленню та злипанню термопластичного матеріалу під час роботи преса, а також захистити упорний підшипник редуктора від надмірного теплового впливу. Така конструкція сприяє стабільності робочих процесів і підвищенню довговічності обладнання.

Електродвигун 10 передає обертальний рух через еластичну муфту 9, яка приводить у дію зубчасті передачі редуктора 8 та черв'як 1. Регулювання швидкості обертання черв'яка здійснюється завдяки застосуванню змінних зубчастих коліс редуктора. На вихідному валу редуктора розташовано вузол упорного підшипника, що забезпечує сприйняття осьових навантажень, які виникають під час процесу екструзії розплавленого матеріалу. Для подачі термопласту в екструдер використовується завантажувальна воронка 6, обладнана оглядовим вікном, що дозволяє контролювати рівень поданого матеріалу. На зовнішній поверхні робочого циліндра закріплені трубчасті змійовики 5, які забезпечують циркуляцію охолоджувальної води. Системи нагрівання та охолодження черв'ячного преса створені для автоматизованого контролю та підтримки необхідного температурного режиму в окремих зонах обладнання. Для реалізації цього завдання в кожній температурній зоні встановлені термопари, показники яких виводяться на мілівольтметр або потенціометр, забезпечуючи точний моніторинг та регулювання температури.

Сучасні екструдери вирізняються своєю багатофункціональністю, високим рівнем продуктивності та надійними експлуатаційними характеристиками. Останні моделі черв'ячних пресів оснащені удосконаленою конструкцією, що включає виносний упорний підшипник та електродвигун, які значно спрощують процес технічного обслуговування. Крім того, новітні системи охолодження та нагріву забезпечують ефективний контроль температурних режимів, а стильний і сучасний дизайн додає обладнанню естетичної привабливості.

В екструдерах, що використовуються для оброблення полімерних матеріалів, схильних до термічної деструкції (наприклад, полівінілхлориду,

ацетилцелюлозних ефірів та інших аналогічних речовин), передбачені спеціальні механізми для видалення летких компонентів. Конструктивна особливість черв'яків у таких пристроях полягає у наявності зони дегазації, яка розташована відразу після зони стиснення. На відміну від стандартних черв'яків, глибина нарізки у зоні дегазації є значно меншою порівняно з попередньою зоною стиснення. Через це витки черв'яка в зазначеній зоні не заповнюються полімерним розплавом повністю, що дозволяє ефективно виділяти газоподібні продукти та леткі речовини. Важливим конструктивним елементом є отвір газовідвідного каналу, який розташований у стінці матеріального циліндра саме на рівні зони дегазації. Завдяки такому рішенню процеси дегазації підвищуються в ефективності, що є критично важливим для обробки нестабільних полімерів.

Двочерв'ячні преси. На відміну від одночерв'ячних пресових установок, конструкція двочерв'ячних машин передбачає паралельне розташування двох черв'яків у робочому циліндрі. Залежно від конфігурації їхнього взаємного розташування та напрямку обертання, двочерв'ячні машини поділяються на два основні типи: зі взаємодіючими черв'яками (зачіплюваними) і незалежними (незачіплюваними). Окрім цього, черв'яки можуть обертатися в однаковому напрямку або в протилежному (зустрічному). На рис.1.2 наведено принципову схему функціонування двочерв'ячного преса, що демонструє основні елементи та взаємодію його компонентів.

Прес складається з нагрівального циліндра 1, черв'яків 2 та 2а, які взаємодіють з блоками упорних підшипників 5 і 5а, оснащених косозубими зубчастими колесами 4 і 4а. Триступінчастий редуктор 7, що з'єднується з веденим черв'яком через ланцюгову передачу 6, забезпечує передачу руху. Привід черв'яків виконується від електродвигуна 8, який є джерелом обертального моменту. Матеріал, що підлягає переробці, подається у завантажувальну воронку 3, де він плавиться та подається у формуючу головку 9. У результаті відбувається процес екструзії — видавлювання розплавленої маси крізь формувальний отвір для отримання кінцевого виробу.

На рис.1.3 проілюстроване зачеплення черв'яків у двочерв'ячному пресі, які обертаються у спільному напрямку. Таке конструктивне рішення забезпечує ефективну подачу матеріалу та рівномірний розподіл навантаження.

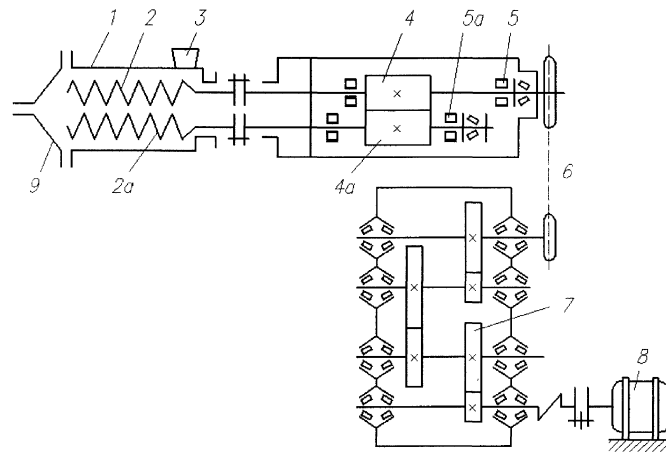


Рисунок 1.2 – Принципова схема двочерв'ячного преса:

1 - циліндр; 2, 2а - черв'яки; 3 -завантажувальна воронка; 4, 4а - шестірня; 5, 5а - блок упорних підшипників; 6 - ланцюгова передача; 7 - редуктор; 8 - електродвигун; 9 - головка

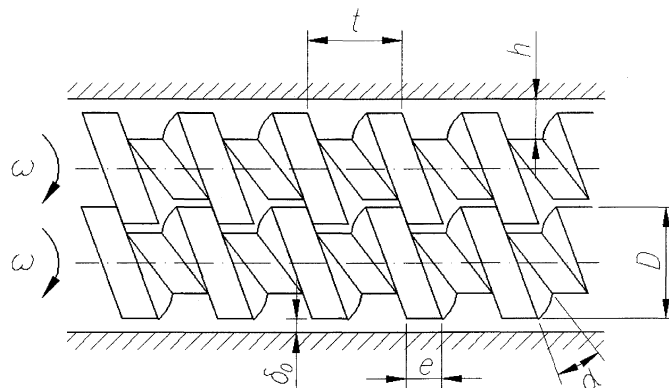


Рисунок 1.3 – Зачеплення черв'яків двочерв'ячного преса

Двочерв'ячні преси використовуються для оброблення порошкоподібних матеріалів, які характеризуються низькою насипною густиною та невеликим коефіцієнтом тертя об стінки циліндра. Це пояснюється тим, що на відміну від одночерв'ячних пресів, продуктивність двочерв'ячних агрегатів не залежить від сил тертя між матеріалом та робочими органами. Завдяки особливостям конструкції, матеріал захоплюється обертальними черв'яками та примусово транспортується уздовж циліндра. Важливими факторами, що впливають на продуктивність зони живлення, є обсяг простору між витками черв'яків та

стабільність подачі матеріалу. Двочерв'ячні преси набули широкого застосування для перероблення порошкоподібних сумішей на основі полівінілхлориду (ПВХ), що обумовлено їх ефективністю та здатністю працювати з матеріалами складної консистенції.

Дискові екструдери. Принцип роботи дискового екструдера проілюстровано на рис. 1.4. Термопластичний матеріал подається через завантажувальну воронку до периферійної зони зазору (поз. 7), який формується обертовим диском (поз. 1) та нерухомим корпусом екструдера (поз. 3). У цій зоні матеріал підхоплюється і втягується у круговий рух завдяки обертанню диска. Для забезпечення необхідного температурного режиму корпус екструдера оснащений електронагрівачем (поз. 4), а сам диск також має систему електричного підігріву. Під час контакту термопластичного матеріалу з гарячими поверхнями відбувається його поступове нагрівання, що призводить до плавлення. Розплавлений матеріал під впливом деформацій зсуву, що виникають у зазорі, переміщується у напрямку центрального отвору (поз. 6). В результаті цього осьового переміщення розплав виходить через канал формуючої головки (поз. 5) у вигляді профільованого виробу. Осьовий рух забезпечується напруженнями, які виникають у процесі зсуву та спрямовані вздовж осі обертання диска.

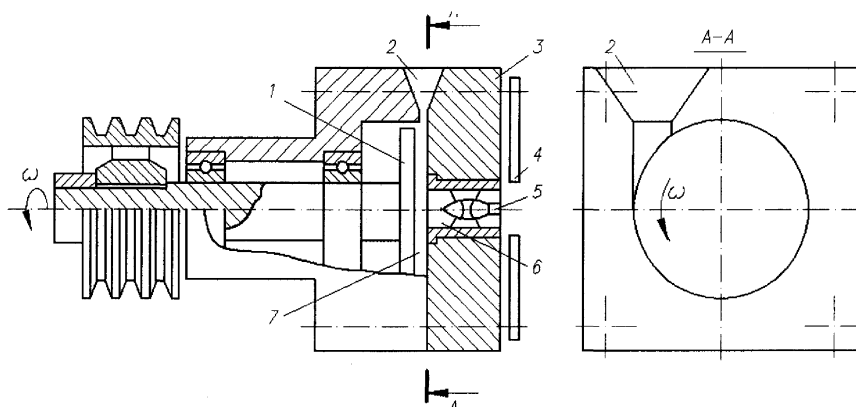


Рисунок 1.4. Принципова схема дискового екструдера:

1 - диск; 2 - завантажувальна воронка; 3 - корпус; 4 - електродвигун; 5 - канали формуючої головки; 6 - центральний отвір; 7 - дисковий робочий зазор

Дискові екструдери мають низку переваг перед черв'ячними аналогами

завдяки своїй простішій конструкції, нижчій вартості та компактним розмірам. Окрім цього, вони демонструють кращу якість змішування матеріалів і значно скорочений час перебування полімерної маси у робочій зоні. Останній фактор особливо важливий при обробці термочутливих полімерів, які вимагають делікатних умов перероблення.

Однак дискові екструдери мають і певні недоліки. Серед них – коливання продуктивності та обмежений робочий тиск у головці, що ускладнює їх застосування для екструзії через формувальні головки з великим опором. Ці недоліки частково компенсуються у дисково-черв'ячних екструдерах – комбінованих машинах, що поєднують переваги обох типів обладнання. У процесі роботи дисково-черв'ячного екструдера розплавлений полімер спочатку обробляється дисковим механізмом, а потім потрапляє у циліндр з черв'яком. Після цього матеріал виходить через формуючу головку у вигляді готового профілю. Завдяки здатності створювати високий робочий тиск, дисково-черв'ячні екструдери ідеально підходять для виробництва профільованих виробів з різноманітних полімерів.

Черв'ячні осцилюючі змішувачі (ЧОЗ) Застосовуються для пластифікації композицій на основі в'язких і термочутливих полімерних матеріалів, таких як полівінілхлорид (ПВХ), різні ефіри целюлози та інші полімери. Черв'як осцилюючого змішувача одночасно виконує обертальний і зворотно-поступальний рух, який також називають осцилюючим або коливальним. Це сприяє рівномірному перемішуванню компонентів та забезпечує високу якість кінцевої продукції. На рисунку 1.5 представлено загальний вигляд черв'ячного осцилюючого змішувача, конструкція якого дозволяє оптимізувати процес обробки полімерних матеріалів завдяки ефективному поєднанню різних видів механічного впливу.

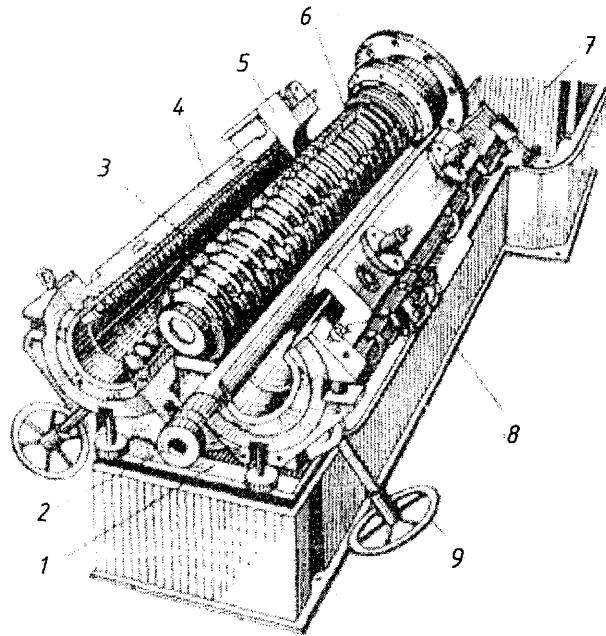


Рисунок 1.5 – Загальний вид черв'ячного осцилюючого змішувача (ЧОЗ): 1 - стійки; 2 - шарнір; 3 - зубці для перемішування матеріалу; 4 -циліндр; 5 - завантажувальний пристрій; 6 - черв'як; 7 - редуктор; 8 - станина; 9 - пристрій для розкриття циліндра

На спеціальних опорах станини 8 закріплено циліндр 4, що оснащений завантажувальним механізмом 5 і зубцями 3, розташованими на внутрішній поверхні. До станини також прикріплений пристрій 9 для відкриття циліндра та шарнір 2, який дозволяє його обертати. Циліндр має два обігрівуючі контури та одну зону охолодження, що розташована в ділянці завантажувального механізму. Обігрів здійснюється через рідкий теплоносій, що циркулює по спеціальних каналах циліндра, в той час як зона охолодження зволожується водою. Підключення теплоносія до кожної зони та його відведення здійснюються окремо; контроль за температурним режимом в кожній зоні виконується автоматично. Циліндр є розбірним, що дозволяє розкрити його на дві частини, як це видно на схемі. Частини з'єднані між собою спеціальними хомутами, що забезпечують легке розкриття під час обслуговування та надійне закріплення при експлуатації. Один бік хомутів затягується болтами, а інший – фіксується за допомогою шарніра. Така конструкція дозволяє швидко виконувати очищення або ремонт і забезпечує герметичність при роботі.

Черв'як змішувача отримує комбінований обертально-поступальний рух від редуктора 7. Черв'якове різьблення має канали, в яких фіксуються зубці 3, що допомагають розбивати потік розплавленого матеріалу. Це сприяє більш ефективному перемішуванню та гомогенізації розплаву під час його руху через циліндр.

Основні технічні характеристики черв'ячних пресів включають діаметр черв'яка D , співвідношення робочої довжини черв'яка до його діаметра L/D та продуктивність при обробці різних термопластичних матеріалів. Перші два показники, як правило, вказуються в маркуванні обладнання. Окрім цього, важливими є також інші параметри екструдерів, серед яких варто відзначити діапазон частот обертання черв'яка, потужність електричних установок, а також кількість температурних зон, що дозволяють ефективно контролювати процес обробки матеріалу.

У табл.1.1 та 1.2 представлені ключові технічні характеристики одночерв'ячних та двочерв'ячних екструдерів, що вже випускаються серійно або плануються до виробництва українською промисловістю. Окрім того, зазначено кілька моделей, які активно використовуються на вітчизняних підприємствах, що займаються переробкою пластмас, зокрема машини виробництва компанії «Трузіома».

Таблиця 1.1

Технічні характеристики одночерв'ячних пресів

Модель черв'ячного пресу	Продуктивність по ПЕНП, кг/год	D , мм	L/D	Діапазон частот обертання черв'яка, об/хв	Встановлена потужність електроустат-	Габаритні розміри, мм
				25-250		
ЧП 20x25	12	20	25	30-300	5.15	1860x2600x1600
				35-350		
				25-250		
ЧП 32x25	50	32	25	30-300	74,57	1500x2120x1600
				35-350		
				20-200		
ЧП 45x25	100	45	25		36	3315x2960x2830
				33-330		

ЧП 63x30	200	63	30	15-150	81	3075x2500x1862
ЧП 90x30	320	90	30	9,4-94	153	4085x2720x2330
				10,5-105		
ЧП 125x25	550	125	25		260	7380x5530x4620
				74,5-745		
				8-80		
ПГИ-90	300	90	25		124	4500x3530x3130
				13.7-137		
ПГИ-160	550	160	25	9,4-94	270	7430x3700x2950

Таблиця 1.2

Технічні характеристики двочерв'ячних пресів

Модель черв'ячного пресу	Продуктивність кг/год	D мм	L/D	Діапазон частот обертання черв'яка	Потужність електро-нагрівача	Число зон обігрівання циліндра	Габарити мм
ЧП 2-90x15	180	90	75	4,4-25	20	79	3230x5070x2^00
ЧП 2-125x20	550	125	20	3.5-35	48	75	5790x3955x2390
Машини фірми «Трузіона»:							
Е 2.63	80-140	63	20	3-40	12	18,5	3000x1000x2500
Е 2.90	250-400	90	20	3-40	25	42,5	6055x1520x2860
Е 2.130	300-500	130	20	2-24	60	13	6985x1x00x3270
Е 2.160	1000	160	20	5-75	60	255	10250x1500x3600

1.2 Параметри процесу екструзії

До основних технологічних параметрів екструзії відносяться:

- температура розплаву в циліндрі і в головці;
- тиск розплаву в головці;
- частота обертання черв'яка.

Обираючи найкращий режим обробки матеріалу, необхідно враховувати ряд важливих аспектів, які можуть істотно впливати на ефективність цього процесу.

- виду термопласту, його молекулярної маси;
- складу композиційного матеріалу;
- вигляду, розмірів і конфігурації виробу;

- типу устаткування, що використовується.

При виборі температурного режиму екструзії важливо поступово збільшувати температуру циліндра від завантажувальної зони до головки, щоб забезпечити рівномірний процес. Температура матеріального циліндра в зоні біля завантажувального бункера зазвичай встановлюється на 10-15°C вище температури плавлення матеріалу. У разі, якщо основа завантажувальної воронки або сам циліндр охолоджуються водою, це дозволяє досягти вищих температур у цій частині системи. Температура в головці екструдера може бути на рівні останньої зони циліндра або на 5-10 °C нижчою, що сприяє кращій гомогенізації розплаву. Найвища температура, як правило, задається в ділянці, де розташовано фільтрувальний пристрій, оскільки він створює найбільший опір потоку матеріалу.

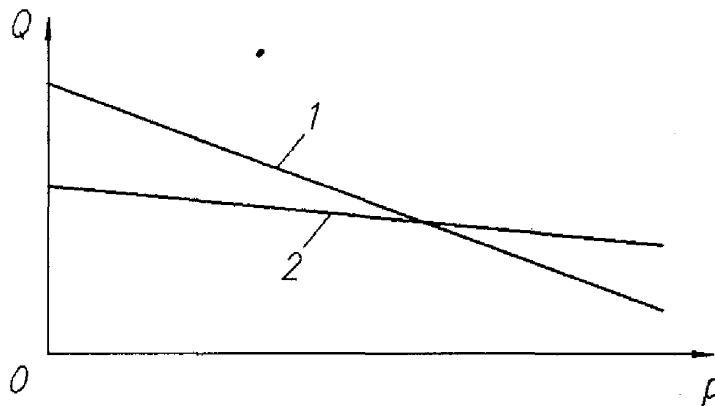


Рисунок 1.6 – Характеристики черв'яків з глибоким (1) і мілким (2) каналами

Тиск розплаву в екструзійній головці залежить від опору, що створюють сама головка та фільтруючі сітки. Це забезпечує ефективне перемішування розплавленого матеріалу. Якщо тиск недостатній, можуть виникати різноманітні дефекти в роботі екструдера, такі як утворення «віспин» на поверхні листових матеріалів, шорсткість на трубах, утворення раковин, зниження блиску поверхні та погіршення механічних характеристик виробу.

Частота обертання черв'яка є важливим параметром, що визначає ефективність екструзії та якість кінцевого виробу. При високих швидкостях екструзії на поверхні основних робочих елементів машини – циліндра та

черв'яка — можуть з'являтися шорсткості, що спричиняє утворення тьмяної поверхні екструдера. Зі збільшенням частоти обертання черв'яка в розплаві через внутрішнє тертя виникає значне тепловиділення, що може призводити до руйнування матеріалу, знижуючи його фізико-механічні властивості. Висока частота обертання черв'яка може також спричинити виникнення пульсуючої течії (що іноді називають еластичною турбулентністю), що призводить до утворення горбистих, нерівних поверхонь екструдата, погіршуючи його якість. Параметри, при яких екструзія переходить у нестабільний режим, отримали назву критичних умов.

Збільшення температури обробки та застосування формуючого інструменту з ретельно хромованою та полірованою поверхнею сприяють підвищенню швидкості екструзії, при цьому не виникає нестабільного течії розплаву. Це дозволяє підвищити критичні параметри екструзійного процесу.

Ці рекомендації можуть стати основою для початкового вибору технологічних параметрів екструзії. Остаточний підбір оптимальних значень процесу здійснюється в ході практичного налаштування виробничого процесу.

У табл.1.3 представлені приблизні показники температури та тиску плавлення при обробці різних термопластичних матеріалів за допомогою екструзії.

Основними стадіями виробництва труб є:

- прийом і зберігання сировини;
- розтарювання сировини;
- вхідний контроль сировини;
- підготовка сировини

Трубопроводи створюються із поліетилену з високою густиною (ПЕВГ) та поліетилену з низькою густиною (ПЕНГ), що забезпечує різні механічні та фізичні властивості матеріалів, які використовуються в залежності від вимог до міцності та еластичності виробів.

Таблиця 1.3

Орієнтовні режими екструзії деяких типів полімерів

Тип полімеру	Виріб	Температура циліндра по зонах $\pm 5^{\circ}\text{C}$					Температура формуючого інструмента, $^{\circ}\text{C}$		Тиск в формуючому інструменті, МПа
		1	2	3	4	5	головка	формуюча лінія	
	Рукавні плівки	125	135	135	745	745	745	745	10-18
ПЕНГ	Плоскі плівки	155	165	180	795	795	795	200	15-25
	Листи	130	140	150	180	180	180	190	-
ПЕСГ	Листи	120	150	160	170	170	190	195	10-16
	Рукавні плівки	130	140	140	150	150	150	150	13-20
ПЕВГ	Листи	130	150	170	180	180	190	200	10-18
	Рукавні плівки	НО	150	160	170	170	180	185	15-20
ПП	Листи	190	210	220	230	230	230	230	—
	Плоскі плівки	196	220	245	260	260	265	265	20-32
Непластифікований ПВХ	Листи	150	165	175	190	190	180	185	10-20
Удароміцний ПС	Листи	170	180	195	200	200	195	205	15-25
ПММА	Листи	160	165	170	170	170	170	180	5-Ю
ПК	Листи	165	180	190	220	250	300	305	25-40
	Плоскі плівки								
Ацетат целюлози	Плоскі плівки	160	175	195	200	200	200	205	15-20

Труби з поліетилену, які виготовляються за допомогою безперервної шнекової екструзії, повинні відповідати актуальним стандартам якості та технічним вимогам. Згідно з ними, труби з поліетилену високої густини (ПЕВГ) мають діаметр в межах від 10 до 630 мм (середній зовнішній розмір), а труби з низькогустинного поліетилену (ПЕНГ) – від 10 до 160 мм. Продукція випускається як у вигляді відрізків різної довжини (6, 8, 10, 12 м), так і у вигляді бухт, зокрема труби діаметром до 40-50 мм часто поставляються в бухтах для зручності транспортування та монтажу.

Держстандарти передбачають виготовлення труб чотирьох типів:

Тип труби	Максимальний тиск води при 20°C , МПа
Л (легкий)	0,25
СЛ (середньолегкий)	0,4
С (середній)	0,6
В (важкий)	1,0

Основна технологічна схема виробництва поліетиленових труб з використанням порошкоподібної композиції зображена на рис.1.7.

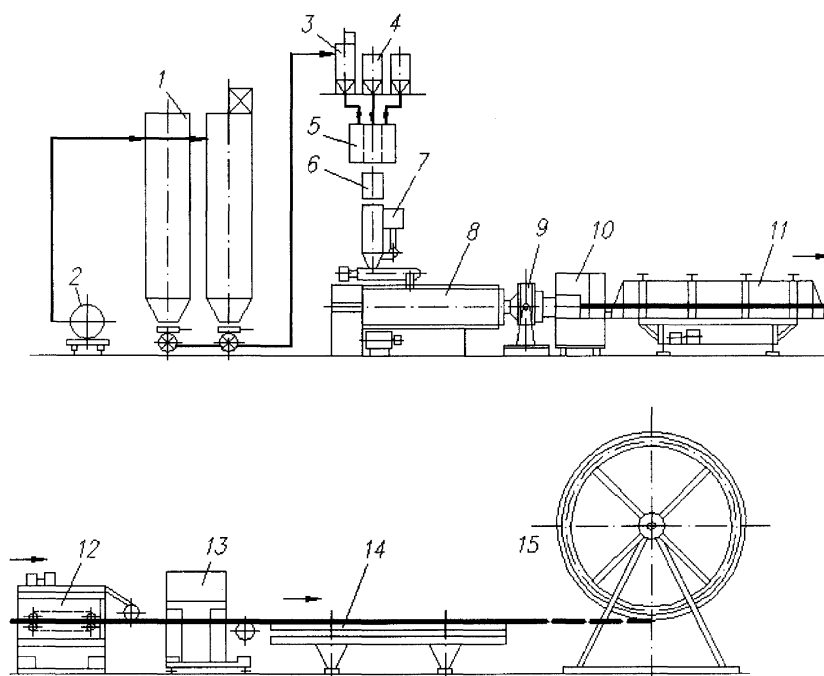


Рисунок 1.7 – Принципова схема виробництва труб з поліетилену:

7 - місткості для зберігання сировини; 2 - цистерна; 3 - проміжна місткість для поліетилену; 4 - проміжні місткості для добавок; 5 - пристрій для дозування трьох компонентів; 6 - прилад для виявлення металевих частинок; 7 - пристрій для підсушення і підігріву гранул; 8 - екструдер; 9 - головка; 10 - калібруючий пристрій; 11 - ванни охолодження; 12 - тягнучий і рахунково-маркіруючий пристрій; 13 - відрізний пристрій; 14 - приймальний пристрій; 15 - намотувальний пристрій

Сировина, що представляє собою гранульований поліетилен, надходить у великому обсязі в цистернах 2, з яких через централізовану систему пневмотранспорту подається у склади 1. Далі поліетилен переміщується в проміжні ємності 3 за допомогою цієї ж системи. Для точного дозування матеріалів та можливих добавок, таких як фарбники або стабілізатори, з ємностей 4, використовують спеціалізовані дозуючі пристрої 5. Враховуючи, що використання технологічних відходів у виробництві напірних труб суворо заборонено, для цього процесу застосовуються трикомпонентні дозатори.

Після проходження через пристрій для виявлення металевих частинок 6, сировина піддається обробці для підігріву та підсушування за допомогою спеціальної установки 7.

Подання сировини до завантажувальної зони екструдера 8 відбувається при стабільному рівні матеріалу. Температурний режим цієї зони повинен бути сталим, що досягається завдяки її охолодженню водою з визначеними параметрами.

Для виготовлення труб з гранульованого поліетилену використовуються лінії, оснащені одночерв'ячними екструдерними установками.

Готові труби формуються в пакети за допомогою дерев'яних каркасів, які розташовуються на відстані 1,5 метра один від одного. Після цього пакети труб переміщуються до місця їхнього технологічного складування, а згодом – на склад готової продукції.

Продукція труб певного асортименту та якості значною мірою залежить від повноти оснащення виробничих ліній.

Гранульований матеріал переміщується за допомогою черв'яка, піддається ущільненню, плавленню, гомогенізації та видавлюється через головку 9 у вигляді початкової форми труби. Потім ця заготовка калібрується в спеціальному пристрої 10, охолоджується в першій ванні, а після цього потрапляє до наступних охолоджувальних ванн.

Відбір труб здійснюється за допомогою пристрою витягування 12. Обсяг виготовлених труб, виражений у метрах, реєструється лічильником, що працює у складі комплексу з рахунково-маркувальним пристроєм. Труби обрізаються на відрізки точної довжини за допомогою відрізного механізму 13 та подаються на приймальний механізм 14 або на намотувальний механізм 15.

Продуктивність виробничої лінії для виготовлення труб з поліолефінових матеріалів залежить від технічних параметрів обладнання, а також від типу та діаметра вироблених труб. Показники продуктивності машин і механізмів при виробництві труб із ПЕНГ вказані в паспортних

характеристиках устаткування, а також наведені в табл.1.4 як рекомендовані значення для розрахунку потужностей.

Таблиця 1.4

Продуктивність устаткування при виготовленні труб з ПЕНГ

Діаметри труб, мм	Продуктивність, кг/год		
	ЛТ45-6/20	ЛТ63/25-25/63	ЛТ90/25-75/160
10-12	15	-	-
16-25	32	35	-
32-50	-	62	-
63-90	-	85	90
110-160	-	-	110
Продуктивність за паспортними даними	До 65	До 150	До 300

Інформація про продуктивність лінії для виробництва труб із ПЕВГ наведена в табл.1.5.

Таблиця 1.5

Продуктивність устаткування при виготовленні труб з ПЕВГ

Діаметри труб, мм	Продуктивність, кг/год			
	ЛТ63/25-25/63	ЛТ90/25-75/160	ЛТ125/25-140/400	ЛТ160/25-400/800
32-50	-70	-	-	-
63-90	-90	115	-	-
110-160	-	140	250	-
180-400	-	-	280	385
450-630	-	-	-	400
Продуктивність за паспортними даними	До 150	До 300	До 350	До 500

Відгуки працівників, які безпосередньо займаються експлуатацією обладнання, надають важливу інформацію для оцінки якості виготовленої продукції. Вони вказують на те, що виробництво труб із поліетилену середньої потужності (від 25 до 50 тисяч метрів на рік) має здійснюватися за допомогою обладнання, оснащеного сучасною системою управління.

Важливими факторами, що визначають параметри технологічного процесу, є тип виготовлених труб, а також вибір сировини та специфікацій устаткування, яке використовується в процесі виробництва.

Температурний режим виробництва труб з ПЕНГ такий (наближено):

Черв'ячний прес

Зона t, °C

I.....160

II.....160-170

III і подальші.....175-185

Головка

Зона t, °C

V.....170

VI і подальші.....145-160

Температурний режим при виробництві труб з ПЕВГ дещо інший:

Черв'ячний прес

Зона t, °C

I.....135-175

II.....170-175

III.....175-200

IV.....180-200

Головка

Зона t, °C

V.....170-200

VI.....170-190

подальші.....160-190

Лінія ЛТ 63х30-25/63 стала однією з найпоширеніших вітчизняних установок для виробництва поліетиленових труб. Технологічна схема роботи цієї лінії представлена на рис. 1.8.

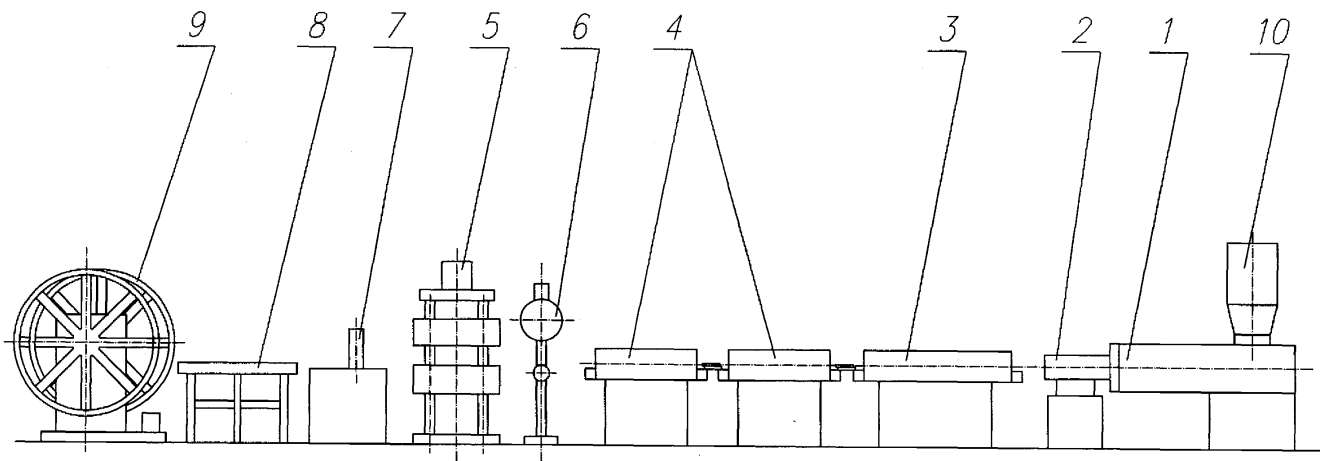


Рисунок 1.8 – Принципова технологічна схема лінії ЛТ 63х30-25/63

Лінія включає в себе низку ключових машин та технічного обладнання, серед яких:

- прес черв'ячний ЧП 63х30 (1);
- головка трубка ГТ 25-63 (2);
- ванна охолодження вакуумна (3);

- ванни охолодження (4);
- витягувальна машина (5);
- пристрій маркування (6);
- пристрій відрізний (7);
- пристрій приймальний (8);
- машина намотувальна (9);
- бункер (10).

Продуктивність лінії залежить від типу матеріалу, який обробляється, а також від розміру та типу труби. Ці параметри мають відповідати значенням, наведеним у табл.1.6.

Таблиця 1.6

Продуктивність лінії в залежності від матеріалу

Матеріал труби	Діаметр труби, мм	Тип труби згідно ДСТУ 18599-94	Товщина стінки, мм	Продуктивність, кг/год, не менше
ПЕНТ	25+0,3	С	2,0+0,4	135
		Т	2,3+0,5	140
	32+0,3	С	2,0+0,4	140
		Т	3,0+0,5	170
		СЛ	2,0+0,4	150
	40+0,4	С	2,3+0,5	170
		Т	3,7+0,6	210
		СЛ	2,0+0,4	190
	50+0,5	С	2,9+0,5	255
		Т	4,6+0,7	210
		Л	2,0+0,4	220
		СЛ	2,5+0,5	255
	63+0,6	С	3,6+0,6	255
		Т	2,8+0,8	210
		СЛ	2,0+0,4	90
ПЕВТ	25+0,3	С	2,7+0,5	100
		Т	4,2+0,7	130
		Л	2,0+0,4	100
		СЛ	2,4+0,5	110
	32+0,3	С	3,5+0,6	130
		Т	5,4+0,8	170
		Л	2,0+0,4	100
		СЛ	3,0+0,5	130
	40+0,4	С	4,3+0,7	150
		Т	6,7+0,9	200
		Л	2,4+0,5	130
		СЛ	3,7+0,6	190
	50+0,5	С	5,4+0,8	255
		Т	8,4+1,1	210

		Л	3,0+0,5	200
		СЛ	4,7+0,7	255
	63+0,6	С	6,8+0,9	255
		Т	10,5+0,3	210

Принцип роботи лінії

Гранульований матеріал надходить до бункера преса, звідки його подають у циліндр, де він плавиться та проходить процес гомогенізації. Після цього матеріал виводиться у вигляді гладкої трубчастой заготовки через формуючий отвір головки. Заготовка потрапляє в калібр, де здійснюється її калібрування за зовнішнім діаметром, а також відбувається попереднє охолодження, в результаті якого на зовнішній поверхні труби утворюється тверда кірка. Остаточне охолодження до температури 30-40°C здійснюється у спеціальних ваннах. Протягування труби через калібр і охолоджувальні ванни здійснюється за допомогою тягучої машини, після чого труби подаються на відрізний пристрій, де їх розрізають на шматки довжиною до 6 м. Після цього відрізки труби направляються на приймальний лоток, і за сигналом кінцевого вимикача скидаються в накопичувач. Тут формуються пакети, які потім перев'язують вручну за допомогою металевої або пластикової стрічки.

При намотуванні труби в бухту, після досягнення визначеної довжини труби, система подає сигнал для виконання відрізання та вимкнення барабана намотувальної машини.

Одночасно активується світловий індикатор, що сповіщає про виконання операції. Далі оператор вручну фіксує кінець труби на другому барабані, що залишається вільним, і включає його для подальшого процесу. Після цього він вмикає перший барабан, що дає змогу доповністю намотати залишок труби, який був відрізаний, перев'язати бухту та зняти її з машини.

Прес черв'ячний використовується для безперервної обробки гранульованих термопластичних матеріалів з метою отримання однорідного розплаву. Підготовлений матеріал під тиском подається до формуючої головки, забезпечуючи рівномірний процес екструзії.

Основні конструктивні елементи преса включають: приводний механізм, опорну раму (станину), завантажувальну воронку для подачі сировини, робочий корпус, а також систему охолодження для підтримання оптимальних температурних режимів під час роботи пристрою.

Привод преса черв'ячного: Електричний двигун постійного струму працює у поєднанні з полікліновим приводом, який має передавальне відношення $i = 1$. До складу конструкції входить циліндричний редуктор одноступінчатого типу зі швидкісним передавальним відношенням $i = 4,4$. У редукторі передбачено вбудований упорний підшипник, що виконує функцію компенсації та сприйняття осьових навантажень, які створюються черв'ячним механізмом преса.

Воронка завантажувальна Конструкція складається із основного корпусу та вставної гільзи.

На зовнішній частині корпусу розміщено електронагрівальний елемент, який забезпечує необхідний рівень нагріву. Для підтримання оптимального температурного балансу передбачені спеціальні канали для циркуляції охолоджуючої рідини.

Контроль за температурою поверхні вставної гільзи здійснюється шляхом використання термоелектричного датчика-перетворювача, що дозволяє оперативно відстежувати зміни температурного режиму.

Робочий температурний стан завантажувальної воронки регулюється шляхом зміни інтенсивності подачі охолоджуючої води, що проходить через охолоджувальні канали.

Корпус виготовлено з товстостінної труби, з'єднаної фланцем. Для підвищення експлуатаційної стійкості та довговічності внутрішню поверхню корпусу покривають зносостійким матеріалом методом порошкового напилення, що забезпечує додатковий захист від механічного та термічного зношування.

Корпус обладнаний чотирма зонами, які обігріваються за допомогою електричних нагрівачів опору. Для охолодження кожної із зон

використовується окремий, незалежний вентилятор, що забезпечує ефективне відведення тепла. Контроль робочих параметрів здійснюється за допомогою термоелектричних датчиків, встановлених на корпусі. Внутрішній простір поділено на окремі секції спеціальними перегородками, що забезпечують чітке зонування. Зовнішня поверхня конструкції вкрита захисним кожухом з теплоізоляційного матеріалу, який мінімізує теплові втрати та підвищує енергоефективність.

Система охолодження призначена для зниження температури завантажувальної воронки, черв'ячного вузла та мастила, яке знаходиться у картері редуктора.

Головка трубка використовується для виготовлення заготовок поліетиленових труб (з поліетилену низького та високого тиску) діаметром від 25 до 63 мм.

Вакуумна охолоджувальна ванна призначена для зниження температури труб, виготовлених з термопластичних матеріалів, під час процесу вакуумного та пневматичного калібрування.

Охолоджувальна ванна занурювального типу використовується для остаточного охолодження труб з термопластів. Вона встановлюється на лінії безпосередньо після вакуумної охолоджувальної ванни для забезпечення повного процесу охолодження.

Витягувальна машина використовується для протягування труб через калібруючий елемент, що дозволяє виготовляти продукцію відповідних розмірів, і подальшої подачі труб на машину для різання. Цей пристрій розташовується в виробничій лінії після системи охолодження, що забезпечує необхідний температурний режим для труб.

Пристрій для маркування служить для нанесення відповідних марок на труби, виготовлені з термопластичних матеріалів, за допомогою нагрітого металевого штампа методом тиснення. Це дає змогу точно і чітко позначити труби, дотримуючись вимог до ідентифікації продукції.

Різальний пристрій застосовується для відрізання труб з полімерних матеріалів на точні мірні довжини. Цей механізм встановлюється в лінії після витягувальної машини, виконуючи функцію різання готових труб, що дозволяє забезпечити їх відповідність вимогам до довжини та стандартам якості.

Відрізний пристрій включає такі основні компоненти: станина, каретка та механізм, що забезпечує переміщення каретки.

Станина складається з двох опор — правої та лівої, які з'єднуються між собою стяжкою та направляючими елементами. Для забезпечення плавного переміщення деталей на вхідній і вихідній частинах станини передбачено встановлення спеціальних направляючих роликів.

Корпус каретки являє собою рухомий візок, що пересувається вздовж направляючих станини. На ньому розташовані такі елементи: маятниковий вузол, система управління рухом маятника, пристрої для фіксації виробу, блок пневматичної апаратури та пульт керування.

Маятник являє собою важіль, що обертається у підшипниковій опорі, яка надійно закріплена на корпусі каретки. До маятника фіксується привід відрізного механізму, до складу якого входять електродвигун змінного струму та клинопасова передача. Завдяки цим елементам обертальний рух передається безпосередньо на відрізний пристрій. Поворот маятника під необхідним кутом, що дозволяє здійснювати процес різання труби, відбувається завдяки механізму, який відповідає за його переміщення.

Пристрій приймальний призначення цього обладнання полягає у прийманні полімерних труб, виготовлених за допомогою екструзійного методу, та подальшому їх пакуванні у накопичувальні пристрої. Монтується приймальний механізм у технологічній лінії безпосередньо після відрізного пристрою, що забезпечує послідовність операцій та оптимізацію виробничого процесу."

Намотувальна машина використовується для формування бухт із пластмасових труб діаметром від 25 до 63 мм. Вона забезпечує ефективний

процес намотування та організоване складання труб у компактні бухти для подальшого транспортування чи зберігання.

Намотувальна машина включає в себе такі ключові компоненти: привідний механізм, дві бухтовочні головки, основний корпус, систему розкладки, пневматичну систему, керуючий пульт та електричну шафу управління.

Приводний механізм включає в себе електродвигун постійного струму, з'єднаний з черв'ячним редуктором. Від редуктора крутний момент передається на проміжний вал за допомогою ланцюгової передачі. На цьому проміжному валу розташовані зірочки, які фіксуються на ньому через електромагнітні муфти з вільним обертанням. Зірочки проміжного вала взаємодіють із відповідними зірочками, закріпленими на валах барабанів. При активації конкретної електромагнітної муфти запускається обертання барабана, що відповідає цій муфті. Завдяки такій конструкції забезпечується точний і контрольований привід для кожного барабана

Розкладчик складається з корпусу, приводу, гвинта і каретки.

Корпус виконує функцію базового елемента для кріплення усіх складових частин розкладчика. На ньому закріплено гвинт із трапецеїдальним профілем різьби, який приводиться в обертання за допомогою електродвигуна через систему редуктора та ланцюгової передачі. Обертання гвинта забезпечує переміщення каретки вздовж напрямних завдяки плаваючій гайці. На каретці розташована штанга, кінці якої оснащені двома вузлами з направляючими роликами. Ці вузли включають дві пари вертикальних роликів та одну пару горизонтальних, які забезпечують точне позиціонування труби під час її спрямування на барабан. Додатково вузли оснащені сельсин-датчиком, що відповідає за підтримання стабільного натягу труби у процесі намотування. Номінальний діаметр труби, що намотується на барабан, становить 25 мм.

Підтримка постійного натягнення намотуваної труби діаметром більше 25 мм здійснюється релейно-контактною схемою керування.

Під час досягнення трубою крайнього положення з будь-якого боку барабана (лівого чи правого), каретка за допомогою свого упору активує відповідний кінцевий вимикач. Цей вимикач передає сигнал на систему керування для зміни напрямку руху приводу розкладника, що призводить до реверсування каретки. Процес роботи розкладчика організований наступним чином: при кожному повороті колеса упор, зафіксований на ньому, приводить у дію кінцевий вимикач, який активує електродвигун розкладника. Після запуску електродвигуна відбувається обертання гвинта, на якому змонтований диск із чотирма пелюстками. Ці пелюстки взаємодіють з безконтактним вимикачем завдяки входженню в його пази. Кожен поворот однієї пелюстки (тобто один імпульс) відповідає переміщенню каретки на 2 мм уздовж барабана. Залежно від розмірів труби, що намотується, на реле обліку імпульсів налаштовується необхідна кількість імпульсів, яка відповідає діаметру конкретної труби. Після того, як реле обліку зафіксує задану кількість імпульсів, воно автоматично вимикає електродвигун розкладника. Цей цикл функціонування повторюється з кожним обертом барабана, забезпечуючи систематичний і точний розподіл труби.

Пневматична система розміщена на бічній поверхні корпусу обладнання. Її конструкція включає повітряні розподільники, пневматичні дроселі та редукційні клапани. Основне призначення системи — забезпечення функціонування пневмоциліндрів, які відповідають за поворот пелюсток бухтовочних головок. Завдяки чіткій взаємодії усіх компонентів система забезпечує плавний і контрольований рух робочих елементів.

1.3 Аналіз систем електрообладнання та автоматизації лінії.

Комплект електричного обладнання лінії призначений для контролю та управління приводами: головного преса та допоміжних механізмів машин і

пристроїв, що входять до складу технологічної лінії. Він включає в себе пульт управління та шафу управління.

Управління головним приводом преса на постійному струмі здійснюється безпосередньо з пульта керування, тоді як допоміжними приводами керують за допомогою локальних постів, встановлених безпосередньо на відповідних машинах і пристроях.

Крім того, привод витягувальної машини може бути керований як із локальних постів, так і з основного пульта управління, на якому передбачена дублююча апаратура для забезпечення зручності та безперебійного контролю.

Релейно – контакторна апаратура, розташована в шафі керування.

Живлення силових електричних ланцюгів лінії відбувається через мережу змінного струму з параметрами лінійної напруги 380 В і частоти 50 Гц. Електропостачання здійснюється через ввідний автоматичний вимикач, який встановлено в шафі управління. У той самий час, керуючі ланцюги живляться змінною фазною напругою 220 В.

Для екстреного припинення роботи приводів усього технологічного обладнання, за винятком секції вакуумної ванни охолодження, передбачено аварійні кнопки, розташовані на пульті управління та посту відрізного пристрою.

Попри позитивні відгуки з боку експлуатаційного персоналу й технологів, наявна система керування технологічним процесом має певні обмеження, що знижують ефективність лінії. Через ці недоліки відбувається зниження якості продукції – поліетиленових труб, які виготовляються на підприємстві.

Сучасна система управління технологічним процесом на даній виробничій лінії не забезпечує:

- управління електродвигуном постійного струму на основі системи тиристорного перетворювача частоти (ТПЧ) та двигуна постійного струму (ДПС), що застосовується в механізмах приводу барабанів.

- спостереження за зміною частоти обертання барабанів;

- вимірювання струму, споживаного електродвигуном;
- ефективне регулювання температурних режимів у зонах пресування в принциповій схемі системи охолодження преса.

Метою цієї випускної кваліфікаційної роботи є вдосконалення системи автоматизованого управління виробничою лінією для виготовлення поліетиленових труб, що спрямовано на підвищення якості кінцевої продукції.

1.4 Задачі проектування

Для досягнення поставленої мети у межах виконання випускної кваліфікаційної роботи слід вирішити комплекс завдань, що включає:

- реалізацію системи керування приводом барабанів шляхом організації роботи електродвигуна постійного струму за допомогою системи тиристорного перетворювача частоти та двигуна постійного струму (ТПЧ-ДПС);
- впровадження індикатора для контролю зміни частоти обертання барабанів, що дозволяє вести моніторинг динаміки її зміни без обов'язкової оцінки абсолютних значень із заданою точністю;
- передбачення встановлення вимірювального пристрою, необхідного для обліку величини струму, споживаного електродвигуном під час його роботи;
- розробку системи регулювання температурного режиму з метою підтримки необхідних параметрів охолодження у різних зонах преса відповідно до електричної принципової схеми.
- розрахувати надійність елементів СКЕП.

2. МОДЕРНІЗАЦІЯ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ЛІНІЇ

2.1 Модернізація схеми електричної принципової керування охолодження преса

Схема керування призначена для регулювання роботи електродвигунів змінного струму, які приводять у дію вентилятори охолодження пресового обладнання. Конструкцією передбачено охолодження чотирьох окремих зон преса для забезпечення оптимального температурного режиму під час його роботи.

Живлення електродвигунів з індексами 1М6–1М9 здійснюється через автоматичні вимикачі, позначені як 1QF6–1QF9, а також за допомогою магнітних пускачів типу 1KM6–1KM9. Для запобігання перевантаженням та коротким замиканням в електродвигунах застосовуються автоматичні вимикачі, які виконують функції захисту та відключення у разі аварійної ситуації.

Процес увімкнення та вимкнення електродвигунів реалізується за допомогою комплектного терморегуляційного пристрою моделі «Електротерм-1100», який забезпечує точне регулювання температури в кожній зоні преса, підтримуючи стабільність його робочих характеристик.

Система регулювання температури, за відгукami технологів і працівників, що обслуговують дану виробничу лінію, не відповідає встановленим технологічним вимогам. Зокрема, температурні показники демонструють значні коливання, які детально наведені у табл.2.1.

Таблиця 2.1

Тип поліетилену	Номер зони							
	1	2	3	4	5	6	7	8
НТ 273-79	160 ± 5	220 ± 6	240 ± 10	250 ± 8	250 ± 6	245 ± 9	250 ± 8	240 ± 10
ВТ 102-04	120 ± 5	150 ± 6	170 ± 10	170 ± 8	165 ± 6	175 ± 9	170 ± 8	165 ± 10

Такі коливання ведуть до випуску бракованої продукції.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було здійснено модернізацію температурної системи регулювання. Для реалізації цього завдання використовувався багатоканальний мікропроцесорний регулятор температури «микроТЕРМ», модель С137.11.01. Застосування цього пристрою

дозволило підвищити точність та ефективність контролю температурних режимів, забезпечивши стабільність роботи системи в різних умовах.

ПРИЗНАЧЕННЯ РЕГУЛЯТОРА

Терморегулятор призначений для точного вимірювання, контролю та підтримки температури в системах обігріву технологічного обладнання, що використовується у різноманітних промислових галузях.

Цей пристрій працює на основі цифрового ПД/ПІД-алгоритму управління та оснащений двопозиційним аналоговим вихідним сигналом, що забезпечує стабільність і точність регулювання.

Особливістю терморегулятора є наявність окремих виходів для управління процесами нагрівання й охолодження, з можливістю індивідуального налаштування параметрів для кожного режиму.

Детальний перелік технічних характеристик пристрою наведено у табл.2.2.

Таблиця 2.2

Технічна характеристика регулятора температури

Найменування параметра	Показники параметрів
1. діапазон регулювання температури, °C	0 ÷ 500
2. дискретність завдання температури, °C	0,1
3. закон регулювання	Цифровий ПД/ПІД
4. похибка в усталеному режимі, % від верхнього значення діапазону регулювання	± 0,25
5. кількість основних каналів контролю/регулювання температури	8
6. кількість додаткових каналів контролю температури	4
7. тип термопар	XK68
8. діапазон контролюємих сигналів по основним і додатковим каналам, мВ	0 ÷ 50
9. діапазон компенсованих температур холодних кінців термопар, °C	5 ÷ 40
10. похибка схеми термокомпенсації, °C	± 2
11. діапазон завдання параметрів настройки: коефіцієнт підсилення (K), %/°C постійна диференціювання (T), с постійна інтегрування (Ti), с період квантування (To), с	0,1 ÷ 9999 0 ÷ 9999 0,1 ÷ 9999 3,0 ÷ 654
12. дискретність завдання параметрів настройки	0,1
13. дискретність завдання струму навантаження, А	0,1
14. час спрацювання захисту від КЗ в навантаженні, мс, не більше	10,0

15. дискретний вихідний сигнал керування обігрівом/охолодженням високий рівень, В низький рівень, В струм керування, А	24 ± 10% 1,5 0,1
16. аналоговий вихідний сигнал керування обігрівом/охолодженням	0 ÷ ± 10 або 0 ÷ ± 5 мА

БУДОВА ТА РОБОТА РЕГУЛЯТОРА

Регулятор реалізовано у формі касетного модуля, що містить у своєму складі мережевий блок (БМ), блок завдання (БЗ), а також функціональні модулі з універсального комплексу. Ці елементи формують блок керування (БК) регулятора.

На рис.2.1 представлено структурну схему температурного регулятора.

Регулятор включає в себе датчик температури холодних кінців термопар (ДХК), який монтується на лінії в точці під'єднання холодних кінців термопар до клемної колодки. Для підключення датчика до входу регулятора використовується екранований кабель з витою парою. Конструкція датчика ДХК заснована на мікросхемі К101КТ1А. Сигнал, який генерує датчик, пропорційно відображає температуру в зоні підключення холодних кінців термопар і надходить на вхід додаткового термокомпенсаційного каналу модуля підсилення аналогових сигналів (МПАС). У діапазоні зміни температури від +5°C до ±40°C вихідний сигнал додаткового каналу модуля коливається в межах від 2,7 В до 3,13 В.

Блок БМ є функціонально завершеним вузлом регулятора, що використовується для забезпечення живлення його модулів. Залежно від конструктивного виконання, регулятор може бути обладнаний вбудованим, виносним або дистанційним блоком БЗ. Цей блок призначений для завдання та відображення технологічних параметрів, а також для здійснення діагностичного контролю функціонування модулів блока БК. З огляду на значну протяжність лінії, регулятор додатково оснащується дистанційним

пультом управління, який можна розмістити на відстані до 500 метрів. Така конфігурація забезпечує гнучкість у розташуванні обладнання та спрощує експлуатацію системи у великих технологічних комплексах.

Інтегрований блок БЗ складається з модулів, об'єднаних між собою за допомогою крос-плати.

- модуль завдання параметрів і режимів (МЗПР);
- модуль індикації параметрів і режимів (МПР);
- модуль пам'яті блока завдання (МПБЗ).

Зв'язок між модулями регулятора реалізується через стандартизований інтерфейс міжмодульної комунікації (УІМЗ). Модуль МПАС виконує підсилення сигналів від термопар до нормованих значень у діапазоні від 0 до 10 В. Обробка сигналів здійснюється по восьми основних та чотирьох додаткових каналах. Окрім цього, модуль працює з даними від датчика температури холодного спаю термопар, який монтується безпосередньо в місці підключення до клемної колодки. Це забезпечує точне вимірювання і корекцію температури для підвищення точності роботи системи.

Модуль МАЦП виконує функцію аналого-цифрового перетворення для шістнадцяти основних та двох додаткових каналів, що приймають нормовані сигнали від модулів МПАС. Крім того, він забезпечує адресацію каналів і ініціалізацію схем для контролю стану термопар. Основні канали двох модулів підключаються до відповідних виходів основних ліній двох пристроїв МПАС. Перший додатковий канал обробляє сигнали, що надходять із виходів модулів МПАС, а другий додатковий канал призначений для прийому сигналів термокомпенсаційного каналу. Завдяки такій структурі модуль забезпечує високоточну обробку даних, контроль температурних умов та ефективну адресацію входів для подальшого аналізу.

Модуль МЦПК виконує функції логічної та арифметичної обробки даних у реальному часі, а також відповідає за операції зберігання, введення та виведення інформації під час роботи регулятора. Конструктивно цей модуль є одноплатною мікроЕОМ, яка оснащена постійним програмним



системі обігріву. Зокрема, контролюється як частковий або повний обрив нагрівальних елементів, так і наявність короткого замикання. У разі виявлення короткого замикання в одному з каналів, модуль автоматично відключає сигнали на всіх виходах, що відповідають за керування обігрівом, щоб запобігти подальшому пошкодженню системи. Їй модуль забезпечує надійну роботу системи завдяки своїм функціям контролю та можливості індивідуальної настройки параметрів, що робить його ефективним інструментом для автоматизованого управління процесами кліматичного регулювання.

Модуль МІЖН призначений для трансформації стандартної мережевої напруги 220 В, 50 Гц у послідовність імпульсів із частотою, що не перевищує 40 кГц, та амплітудами, необхідними для формування стабільних вихідних напруг: «+5 В» та «±12 В». Основний принцип функціонування модуля базується на імпульсному методі стабілізації напруги, при якому регулюється шпаруватість імпульсів, а частота залишається незмінною.

До складу модуля МІЖН входять такі основні компоненти:

- Випрямляч, який забезпечує перетворення змінної напруги в постійну;
- Інвертор, що виконує зворотне перетворення напруги у високочастотні імпульси;
- Генератор синхронізації, який задає необхідну частоту роботи пристрою;
- Формувач пилкоподібної напруги для управління імпульсними процесами;
- Підсилювач потужності, що забезпечує необхідний рівень енергії для живлення навантаження;
- Підсилювач зворотного зв'язку, який контролює та підтримує стабільність вихідної напруги;
- Допоміжне джерело живлення, що забезпечує роботу внутрішніх ланцюгів модуля;

- Схеми захисту від перенапруги та перевантажень інвертора, які гарантують надійність та безпеку функціонування пристрою.

Інтерфейс УІМЗ виконаний у вигляді компактної крос-плати, що забезпечує ефективне використання простору на модульній конструкції. Він займає лише верхній ряд роз'ємів для підключення модулів, що дозволяє нижній ряд залишити вільним для забезпечення зв'язку регулятора з об'єктом управління. Передача сигналів інтерфейсу здійснюється через груповані за функціональним призначенням шини, що підвищує надійність та оптимізує процеси передачі даних.

Програмне забезпечення регулятора включає комплекс керуючих та виконавчих програм, кожна з яких має своє функціональне призначення (рис. 2.2):

1. Головна керуюча програма (Головний монітор) – забезпечує загальне управління регулятором.

2. Програма діагностичного контролю системи (Монітор ДКС) – виконує функції перевірки працездатності та виявлення можливих збоїв у системі.

3. Програма для вводу технологічних параметрів (Монітор ВТП) – відповідає за налаштування та введення параметрів роботи системи.

4. Програма режиму роботи (Монітор РАБ) – забезпечує керування основними робочими процесами.

5. Програми обслуговування індикації та клавіатури – відповідають за зчитування даних з клавіатури та їх відображення на індикаційних пристроях.

6. Діагностичні тести – забезпечують оперативну перевірку технічного стану регулятора.

7. Програми запису та зчитування параметрів – дозволяють зберігати і відновлювати робочі дані регулятора.

8. Програми, що реалізують основні робочі функції регулятора – забезпечують виконання алгоритмів управління.

9. Програми контролю аварійних ситуацій – відповідають за

моніторинг і оперативне реагування на виникнення позаштатних або небезпечних ситуацій у системі.

Кожен монітор відповідає за встановлення послідовності виконання робочих програм, які забезпечують функціонування регулятора у відповідних режимах. Для забезпечення взаємодії між керуючими та виконавчими програмами використовується спеціалізована система обміну даними, що ґрунтується на застосуванні так званих «поштових скриньок». Ці скриньки створюються та функціонують у складі ЗУПВ (засобів управління процесами виконання).

Поточний стан регулятора відображається у спеціальній передаючій «поштової скриньці» та узагальнюється у слові стану процесу (ССП). Ця «поштова скринька» забезпечує передачу даних для відображення на індикаційній панелі блоку БЗ. Серед інформації, що відображається, є параметри поточного стану регулятора, зокрема: температурні показники зон обігріву, наявність аварійних ситуацій, а також некоректно встановлені параметри чи відхилення від норми.

Характеристики та керуючі параметри, необхідні для встановлення режимів функціонування регулятора, розміщуються у спеціальній приймальній області, що має назву «поштова скринька». У спрощеному вигляді ці дані також інтегруються у слово керування процесом (СКП). Параметри й керуючі ознаки вносяться до «поштової скриньки» головним монітором після проведення аналізу актуального стану регулятора та встановлених умов регулювання.

У каналах, що функціонують у режимі «Контроль температури», регулятор здійснює вимірювання температурних показників та відображає як задані, так і поточні значення температури на індикаторній панелі блоку БЗ. Цей режим призначений для контролю температури розплаву в процесі пластикації матеріалу. Отримані дані про температуру розплаву можуть слугувати основою для оптимізації процесу, особливо в системах із

багатопараметричним управлінням, де точні вимірювання відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності та якості кінцевого продукту.

У каналах, що функціонують у режимі «Температурне регулювання», контролер відповідає за досягнення об'єктом необхідного температурного режиму та стабільне утримання встановлених температурних параметрів у кожному з каналів. Окрім функцій, що пов'язані із безпосереднім моніторингом і регулюванням температурних показників, система виконує додаткові операції, які забезпечують ефективність роботи, а також можливість оперативного реагування на зміни умов або відхилення від заданих норм.

РАБ здійснює оперативний моніторинг та контроль за всією системою регулювання температури, включаючи наступні важливі аспекти: 1) перевірка наявності всіх фаз трифазної мережі; 2) виявлення обриву та забезпечення правильності встановлення термопар; 3) перевірка працездатності схеми аналого-цифрового перетворювача (АЦП) модуля МАЦП; 4) виявлення часткових або повних обривів нагрівальних елементів; 5) контроль за справністю тиристорів; 6) виявлення можливих коротких замикань у нагрівальних елементах; 7) контроль за межами температурних значень, зокрема верхніми та нижніми граничними температурами.

Алгоритм обробки даних у підрежимі «Регулювання температури» представлений на рис.2.3.

У цьому режимі регулювальний пристрій здійснює циклічну процедуру контролю та регулювання температури, яка виконується по кожному каналу із заданою періодичністю квантування теплових процесів. Цей процес включає послідовність основних етапів: вимірювання температурних параметрів, обробку отриманих значень, визначення поточної температури, аналіз розбіжностей між виміряною та заданою температурою, розрахунок коригувального впливу й подальше керування системою обігріву або охолодження.

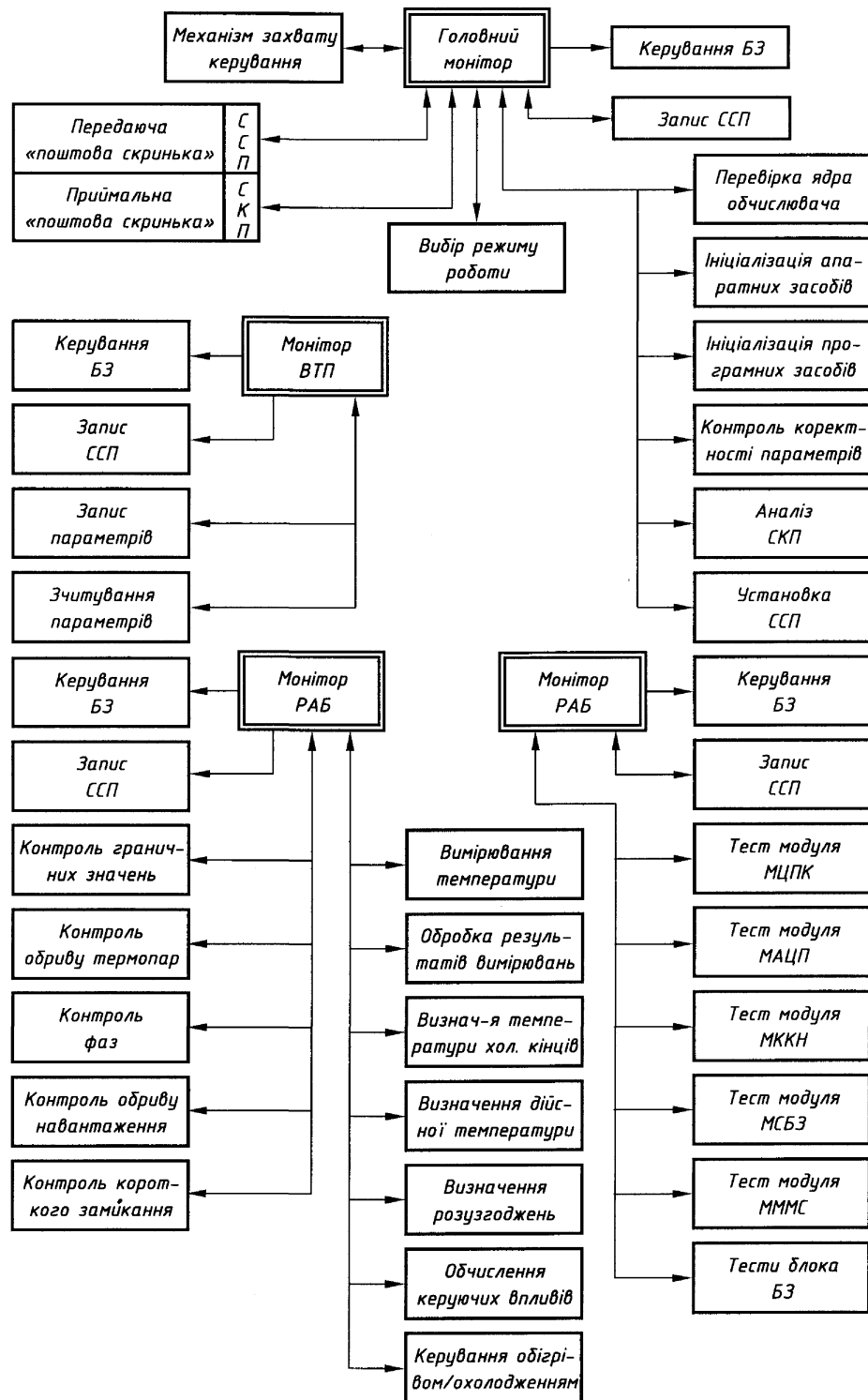


Рисунок 2.2 – Структура програмного забезпечення регулятора

Робочий цикл регулятора стартує з фіксації температури у каналі термокомпенсації, після чого виконується вимірювання в основних каналах. Отримані сигнали від термопар, які є пропорційними температурним показникам відповідних зон нагріву, надходять на входи основних та додаткових каналів модуля МПАС. У цьому блоці сигнали піддаються

підсиленню до встановленого нормованого рівня для подальшої обробки й аналізу.

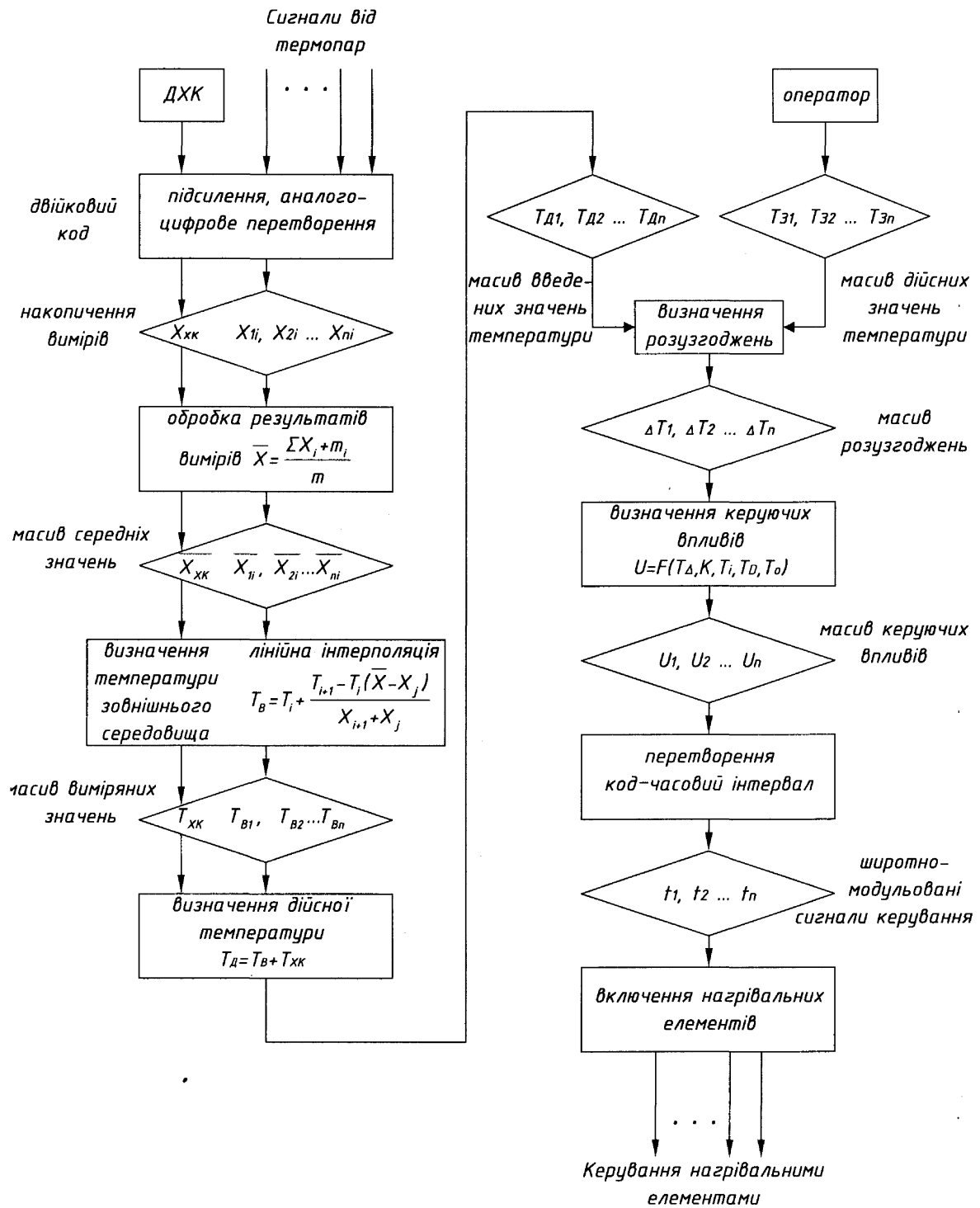


Рисунок 2.3 – Алгоритм роботи системи в режимі регулювання температурних показників

Сигнал, що надходить через додатковий канал термокомпенсації, також підсилюється до нормованого значення. Цей сигнал формується датчиком

температури холодних спаїв термопар, який розташований у точці підключення термопар до клемної колодки обладнання. Підсилені дані передаються на основні та додаткові входи багатоканального модуля аналогово-цифрового перетворювача (МАЦП). Модуль здійснює послідовне опитування всіх підключених каналів, включно з термокомпенсаційним, та конвертує отримані сигнали у цифрові коди, що відповідають амплітуді вхідних сигналів. метою покращення точності вимірювання температури та мінімізації впливу перешкод, кожен канал, основний і додатковий, опитується 16 разів. Під час цього процесу у запам'ятовуючому пристрої модуля (ЗУПВ) накопичуються результати аналогово-цифрового перетворення у вигляді масиву з 16 комірок. Після досягнення необхідної кількості даних проводиться статистична обробка отриманих значень, що дозволяє обчислити середньостатистичний результат для кожного каналу. наступним етапом є лінійна інтерполяція отриманих середньостатистичних значень згідно з градуальною характеристикою термопар ХК63. В результаті цього обчислюється остаточне значення температури. Воно визначається як сума результату вимірювання з основного каналу та значення компенсації температури, отриманого з додаткового каналу термокомпенсації.

$$t_{д}^0 = t_{вим}^0 + t_{хк}^0 \quad (2.1)$$

де $t_{д}^0$ - дійсне значення температури в n-му каналі; $t_{вим}^0$ - вимірне значення температури в n-му каналі; $t_{хк}^0$ - значення температури холодних кінців термопар.

Здійснюється одночасний контроль щодо відповідності температури встановленим граничним значенням, а також перевіряється допустимість можливих відхилень від цих норм.

$$t_{nn}^0 < t_n^0 < t_{on}^0$$

де t_{on}^0 - задано допустима мінімальна температура в n-му каналі; t_{nn}^0 - задана допустима максимальна температура в n-му каналі.

Згодом проводиться процедура оцінки невідповідності між заданими та фактичними значеннями температурного тангенсу. Виявлена невідповідність використовується для розрахунку коригувального впливу, який залежить від величини розбіжності та налаштувань параметрів системи керування.

$$U = f(e, K, T_i, T_d, T_0) \quad (2.2.)$$

Визначення керуючої дії в поточному циклі регулювання здійснюється на основі цифрового ПД або ПІД-алгоритму. Розраховані значення керуючих сигналів для кожного каналу є вхідною інформацією для функціонування модуля МККН.

На рис.2.4 показана часова діаграма роботи регулятора, де виділено два основних режими: перехідний процес та усталений стан.

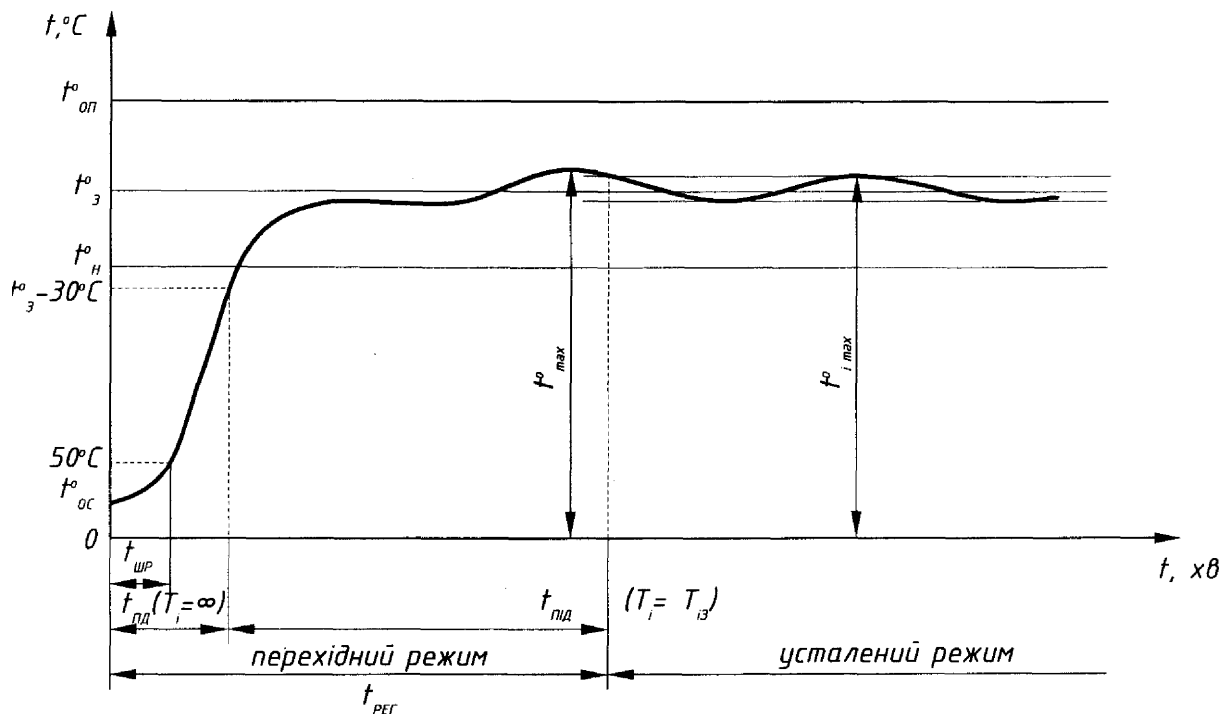


Рисунок 2.4 – Часова діаграма роботи регулятора

У перехідному режимі, коли температура змінюється в діапазоні від $t_D^0 = t_3^0 - 30^\circ\text{C}$ до досягнення об'єктом заданого значення t_3^0 , регулювання виконується за допомогою ПІД-алгоритму. Такий підхід дозволяє забезпечити поступове та плавне наближення до необхідної температури з мінімальним рівнем перерегулювання, що значно підвищує стабільність

роботи системи. Після досягнення температурою встановлених параметрів $t^0 < t_{on}^0$ на всіх контрольованих каналах, на виході «Блок» модуля МККН формується сигнал високого рівня (напруга $U > 21,6$ В $U > 21,6$ В, В $U > 21,6$ В). Цей сигнал використовується у системі автоматичного керування технологічним процесом, зокрема, під час виробництва поліетиленових труб, що забезпечує точність і оперативність управління. У стабільному (усталеному) режимі регулятор підтримує температуру на заданому рівні для кожного з каналів із високою точністю, що відповідає параметрам, наведеним у таблиці 2.2. Таким чином, забезпечується надійність та ефективність температурного контролю в умовах виробничого процесу.

2.2 Модернізація схеми електричної принципової керування приводом

У процесі реалізації кваліфікаційної роботи було впроваджено керування системою динамічного приводу ДПС на основі ТПЧ-ДПС. З огляду на технологічні вимоги, використано реверсивний привод, що забезпечує зміну напрямку обертання двигуна.

Регулювання швидкості обертання якоря електродвигуна відбувається шляхом зміни напруги на якорі, при цьому струм збудження залишається постійним. Таке рішення дозволяє досягти стабільної та ефективної роботи електроприводу.

Живлення напругою 380 В здійснюється через ввідний автоматичний вимикач 9QF1 та магнітний пускач 9KM1, після чого напруга подається на тиристорний перетворювач. Електродвигун підключено до перетворювача через дросель, що сприяє згладжуванню імпульсів напруги та підвищує надійність роботи системи.

Ланцюги керування живляться змінною напругою 220 В. Наявність напруги на ланцюгах керування та активацію ввідного автомата контролює сигнальна лампа 9HL1, яка візуально інформує про стан системи.

Вся апаратура, що відповідає за пуск, вимірювання та сигналізацію, компактно розташована на пульті управління, змонтованому на корпусі обладнання. Елементи релейно-контакторної системи та тиристорний перетворювач розміщені у шафі управління для зручності обслуговування та безпеки.

Керування запуском і зупинкою електродвигуна виконується за допомогою кнопок 9SB2 (вмикання) і 9SB1 (вимикання), що дозволяє оперативно керувати процесом. Такий підхід забезпечує надійну та безперебійну роботу системи електроприводу.

Для регулювання швидкості обертання якоря електричного двигуна використовується ручний резисторний регулятор, побудований на основі резистора типу ППБ-50Г.

Автоматичне утримання необхідної швидкості обертання забезпечується жорстким від'ємним зворотним зв'язком, який реагує на зміну частоти обертання двигуна.

В якості пристрою для вимірювання швидкості обертання застосовано тахогенератор моделі 9ВР, що конструктивно з'єднаний із валом електродвигуна. Вихідна напруга тахогенератора, яка є пропорційною до частоти обертання, підключається у зустрічному напрямку до напруги, що надходить із регулятора частоти 9R1, розташованого на резисторному задатчику.

Сформований сигнал від різниці напруг передається на вхід тиристорного перетворювача для подальшого керування електродвигуном.

Запуск електродвигуна можливий виключно з нульового значення частоти обертання, що відповідає початковому положенню резисторного задатчика. У цьому випадку контакт мікроперемикача 9SQ1 залишається замкнутим, що забезпечує безпечний запуск системи.

Схема передбачає такі типи захисту:

- захист електродвигуна від розриву ланцюга збудження, який реалізується за допомогою реле мінімального струму типу 9KA1;

- максимальний струмовий захист, що виконується реле максимального струму 9KA2;
- захист від коротких замикань та тривалих перевантажень за допомогою розчеплювачів автоматичного вимикача 9QF1.

Для контролю зміни частоти обертання барабанів без потреби в точному вимірюванні використовували індикатор частоти обертання моделі 9PV типу M42300. Для налаштування шкали вольтметра відповідно до маркування на табличці застосовували регульований резистор 9R4.

З метою вимірювання струму, що споживається електродвигуном, був використаний амперметр 9PA типу M42300.

Для регулювання натягу труби з діаметром менше 25 мм під час намотування її на барабан намотувальної машини використовується спеціальна рамка. Ця рамка контролює положення петлі прогину труби та механічно з'єднана з ротором сельсина. Кут повороту ротора відображає величину зусилля натягу труби, оскільки він пропорційний цьому параметру. Сигнал, що знімається із сельсина, піддається перетворенню та надходить до системи керування електроприводом, яка забезпечує підтримку стабільного натягу труби відповідно до заданих параметрів.

Для підтримання стабільного натягу труб діаметром понад 25 мм застосовується інший метод регулювання. У цьому випадку натяг контролюється шляхом налаштування рівня струмової відсічки тиристорного перетворювача. Це здійснюється за допомогою змінного резистора 9R2, що встановлений на пульті керування машини. Завдяки цьому забезпечується точне утримання натягу труб більшого діаметру під час їх намотування.

3.1 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА

3.1.1 Розрахунок зовнішніх характеристик перетворювача

Середнє значення вихідної напруги вентиляного перетворювача залежить від двох основних параметрів: струму навантаження та кута регулювання. У режимі неперервного струму навантаження взаємозв'язок між цими змінними можна описати за допомогою наступного виразу.

$$U_d = E_{do} \cdot \cos(\alpha) - \frac{m_2 \cdot X_m}{2\pi} \cdot I_d \quad (3.1)$$

Необхідні кути регулювання знайдено з виразу

$$\alpha_n = \arccos \left[\frac{1}{E_{do}} \left(U_{dn} + \frac{m_2 \cdot X_m}{2\pi} \cdot I_{dn} \right) \right]; \quad (3.2)$$

Визначені значення кутів регулювання зведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1

$U_{дн}$	$U_{дн}=220В$	$U_{дн}/2 = 110В$	$- U_{дн}/2 = -110$	$- U_{дн} = -220$
$I_{дн}$	$I_{дн}=15,461А$	$I_{дн}/2 = 7,73А$	$- I_{дн}/2 = -7,73А$	$- I_{дн} = -15,461А$
α	$30^{\circ}57'$	$64^{\circ}36'$	$112^{\circ}48'$	$140^{\circ}48'$

Зовнішні характеристики вентиляного перетворювача для різних значень кутів керування (0° ; $30^{\circ}57'$; $64^{\circ}36'$; $\pi/2$; $112^{\circ}48'$; $140^{\circ}48'$) були побудовані з використанням математичного програмного середовища MathCAD. Графічне відображення цих характеристик наведено на рис.3.1.

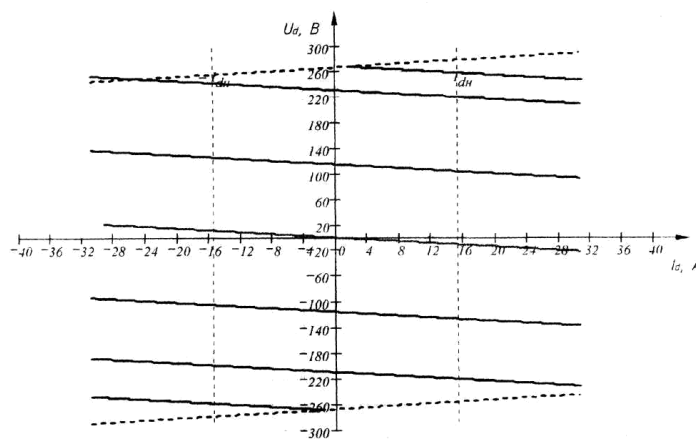


Рисунок 3.1 – Зовнішні та обмежувальні характеристики вентиляного перетворювача

3.1.2 Розрахунок регулювальних характеристик перетворювача

Регулювальні характеристики, зображені на рис.3.2, будуються за умови сталого значення струму I_d . Якщо I_d є постійним, формула (3.1) слугує аналітичним виразом для регулювальних характеристик вентильного перетворювача. Розглядаються два випадки: режим номінального навантаження, коли I_d дорівнює номінальному значенню ($I_d = I_{dн}$), та режим холостого ходу, де струм I_d дорівнює нулю ($I_d = 0$).

Таблиця 3.2

α , рад		0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	π
U_d , В	$I_d = I_{dн}$	258,367	222,261	123,617	-11,133	-145,883	-244,527	-280,63
	$I_d = 0$	269,5	233,394	134,75	134,75	-134,75	-233,394	-269,5

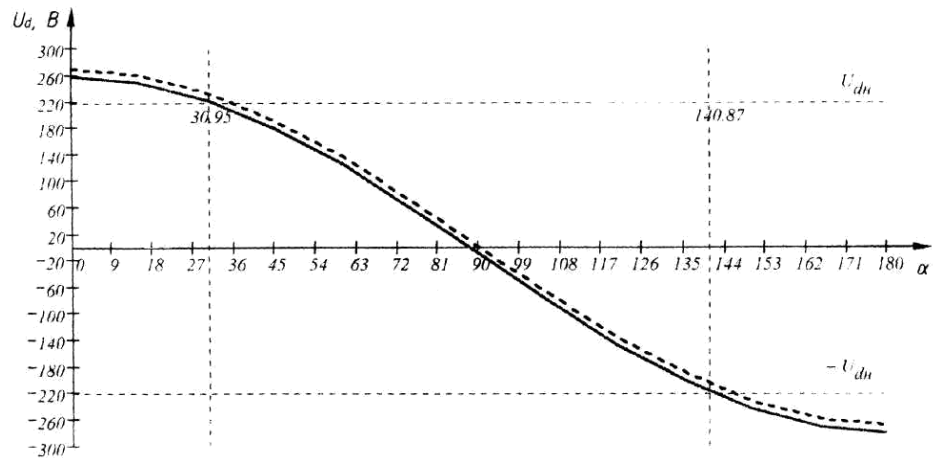


Рисунок 3.2 – Регулювальні характеристики вентильного перетворювача

3.1.3 Розрахунок електромеханічних характеристик системи ТП-ДП

Електромеханічні характеристики системи «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» визначаються шляхом підстановки у відповідну формулу електромеханічної характеристики електричної машини постійного струму значень вихідної напруги, яку генерує тиристорний перетворювач.

$$\Omega_d(\alpha, I_d) = \frac{U_d(\alpha, I_d) - I_d R_e}{C_e \Phi} \quad (3.3)$$

Електромеханічні характеристики наведені на рис.3.3.

Таблиця 3.3

I_d, A	$\Omega, \text{ рад/с}$						
	$\alpha=0$	$\alpha=30^\circ57'$	$\alpha=64^\circ36'$	$\alpha=\pi/2$	$\alpha=112^\circ48'$	$\alpha=140^\circ48'$	$\alpha=\pi$
15,461	125,596	100,749	25,529	-48,937	-123,468	-184,203	-223,47
-15,461	223,47	198,623	123,403	48,937	-25,593	-86,329	-125,596

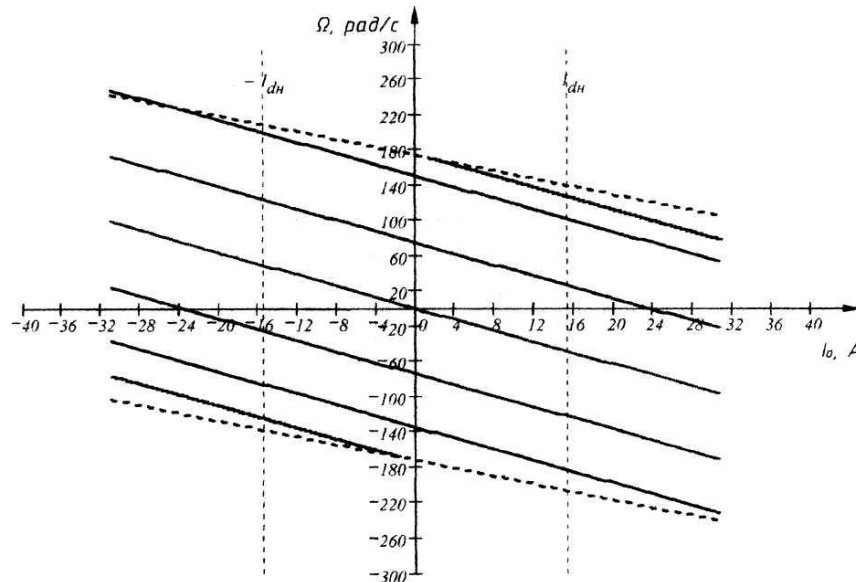


Рисунок 3.3 – Електротехнічні та обмежувальні характеристики електропривода

3.1.4. Розрахунок обмежувальних характеристик перетворювача

Під час функціонування тиристорного перетворювача в інверторному режимі система керування зобов'язана забезпечувати обмеження мінімального кута інвертування. Це необхідно для уникнення небажаного "перекидання" інвертора, що може призвести до нестабільної роботи пристрою. У результаті такого обмеження відбувається регулювання струму навантаження, який залежить від значення напруги U_d , сформованої на виході перетворювача.

Рівняння обмежувальної характеристики має вид

$$U_{d.обм} = E_{d0} \cdot \cos(\delta + \psi) + \frac{m_2 \cdot X_m}{2\pi} I_d \quad (3.4)$$

де δ - кут вмикання тиристора,

$$\delta = \omega \cdot t_q = 314.159 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 0.079 \text{ рад} = 4^\circ 30'; \quad (3.5)$$

$\psi = 3^\circ$ - кут, що враховує асиметрію імпульсів керування тиристора.

Мінімальне значення кута інверсії визначається шляхом одночасного розв'язання рівнянь, що описують як зовнішні, так і обмежувальні характеристики вентильного перетворювача. При цьому враховується потенційне зниження напруги в мережі живлення. Розрахунок даного параметра здійснюється на основі відповідної формули

$$\beta_{\min} = \arccos \left(\cos(\delta_q + \psi) - \frac{m_2 x_m I_{dH}}{\pi(1 - \Delta U_1) E_{do}} \right); \quad (3.6)$$

$$\beta_{\min} = \arccos \left(\cos(4^\circ 30' + 3^\circ) - \frac{6 \cdot 0.754 \cdot 15.461}{\pi(1 - 0.1) 269.5} \right).$$

З огляду на те, що обмежувальні характеристики є прямолінійними, для їх побудови достатньо визначити координати двох точок: $I_{dH} = 2I_{dH}$ і $I_{dH} = -2I_d$. Обмежувальні характеристики представлено на рис.3.1 та 3.3 разом із зовнішніми характеристиками та електромеханічними залежностями приводу.

3.1.5. Розрахунок енергетичних характеристик перетворювача

Основними характеристиками енергоефективності вентильного перетворювача є такі параметри, як: загальна потужність S , активна потужність P , реактивна складова Q , потужність спотворень H , а також коефіцієнт потужності K_p .

Для навантаження зі сталою силою струму I_{dH} , ці показники визначаються у відносних величинах, що розраховуються за певними співвідношеннями. Зокрема:

відносний показник загальної потужності

$$S(\alpha) = \frac{S}{P_{do}} = k_1 \cdot \sqrt{1 - k_2 \cdot \gamma(\alpha)}; \quad (3.7)$$

де $k_1 = 1.21$; $k_2 = 0.239$ - коефіцієнти схеми перетворювача;

- відносне значення активної потужності

$$P(\alpha) = \frac{P}{P_{do}} \cos\left(\alpha + \frac{\gamma(\alpha)}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma(\alpha)}{2}\right); \quad (3.8)$$

- відносне значення реактивної потужності

$$Q(\alpha) = \frac{Q}{P_{do}} = \sin\left(\alpha + \frac{\gamma(\alpha)}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma(\alpha)}{2}\right); \quad (3.9)$$

- відносне значення потужності спотворення

$$H(\alpha) = \sqrt{S^2(\alpha) - P^2(\alpha) - Q^2(\alpha)}; \quad (3.10)$$

- коефіцієнт потужності перетворювача

$$K_{II}(\alpha) = \frac{P(\alpha)}{S(\alpha)}. \quad (3.11)$$

Значення кута комутації в поданих виразах обчислюється на основі відповідної формули. $\gamma(\alpha)$

$$\gamma(\alpha) = \arccos\left(\cos(\alpha) - \frac{x_m I_{dH}}{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m2}\right)}\right) - \alpha. \quad (3.12)$$

Графіки, що ілюструють залежності енергетичних характеристик від ступеня регулювання $\cos(\alpha)$ подані на рис.3.4.

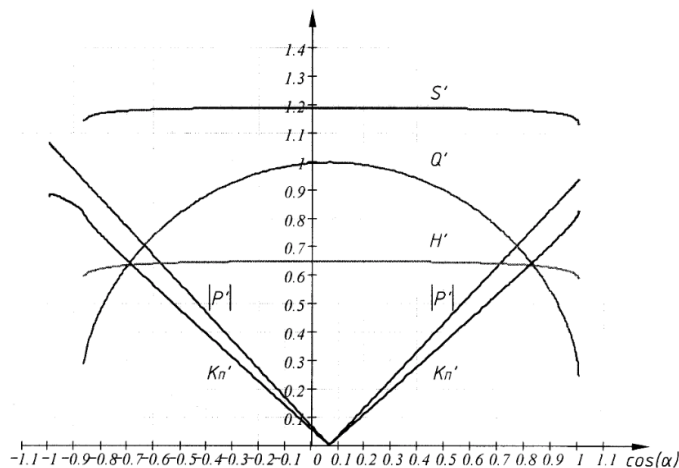


Рисунок 3.4 – Енергетичні характеристики перетворювача

3.1.6. Розрахунок ККД перетворювача

Величина сумарних втрат визначена як

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_m + \Delta P_B + \Delta P_3 = 150 + 11.626 + 9.25 = 170.876 \text{ (Вт)}, \quad (3.13)$$

де ΔP_m - втрати в силовому трансформаторі,

$$\Delta P_m = (1 - \eta_m) \cdot S_m = (1 - 0.97) \cdot 5000 = 150 \text{ (Вт)}, \quad (3.13)$$

де $\eta_m = 0.97$ – середнє значення ККД трансформаторів; ΔP_B - втрати в вентилях,

$$\Delta P_B = \Delta P \cdot p_v = 5.813 \cdot 2 = 11.626 \text{ (Вт)}, \quad (3.14)$$

де $p_v = 2$ – число одночасно обтічних струмом навантаження вентилів; ΔP_3 - втрати в ланцюгах захисту,

$$\Delta P_3 = n_3 \cdot P_3 + (P_1 + P_2) = 3 \cdot 3 + 0.125 + 0.125 = 9.25 \text{ (Вт)}, \quad (3.15)$$

де n_3 – число захисних R-C ланцюгів, шунтуючих вентиль.

Ефективність перетворювача залежить від кутової швидкості обертання вала двигуна і описується відповідним математичним співвідношенням.

$$\eta(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_\Sigma}{(C_e \phi \cdot \Omega + R_a \cdot I_d)}} \quad (3.16)$$

$$\eta(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{170.876}{(1.544 \cdot 104.72 + 2.446 \cdot 15.461) \cdot 15.461}} = 94.75\%$$

Залежності коефіцієнта корисної дії (ККД) перетворювача від частоти обертання вала двигуна для режимів нормального та часткового (50%) навантаження наведено на рис.3.5.

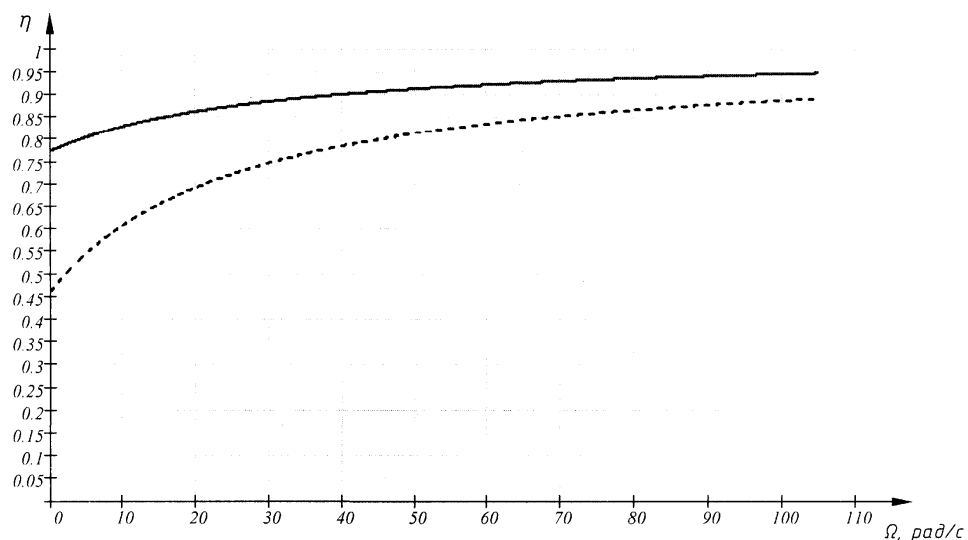


Рисунок 3.5 – Залежності ККД перетворювача від кутової швидкості обертання вала двигуна при струмах якоря $I_d = 0.5 I_{dн}$ та $I_d = I_{dн}$

3.2 Розрахунок і побудова часових діаграм перетворювача

Часові діаграми роботи перетворювача створюються на основі попередньо розрахованих параметрів для його функціонування в номінальному режимі.

Графіки вихідних напруг для випрямної, інверторної та перетворювальної груп відображаються за умови встановленого кута регулювання випрямляча, який дорівнює $\alpha = 30^{\circ}57'$.

На рис.3.6 показані часові діаграми напруги для випрямляча та інвертора. Часова діаграма вихідної напруги перетворювача зображена окремо на рис.3.7.

Діаграма зміни напруги на вентилі представлена на рис.3.8.

Графіки струму вентиля, а також споживаного струму перетворювача побудовані з урахуванням кута комутації при номінальному режимі, значення якого становить $\gamma = 0,216 \text{ рад} = 12^{\circ} 20'$. Ці часові діаграми наведені на рис.3.9 та 3.10.

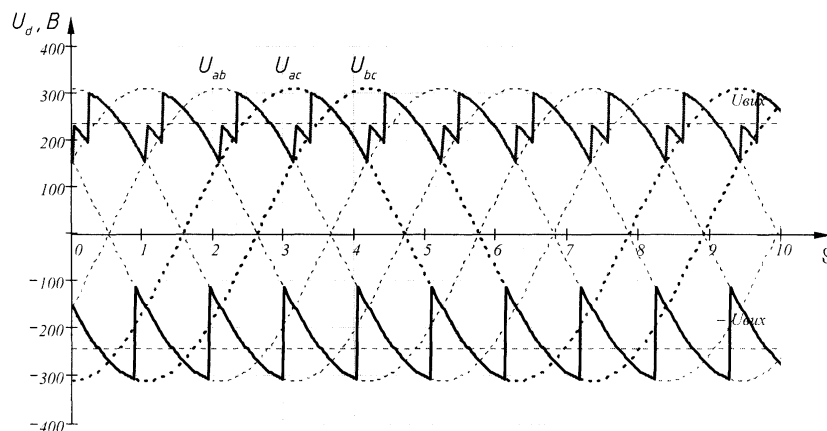


Рисунок 3.6 – Часові діаграми напруг випрямляча та інвертора

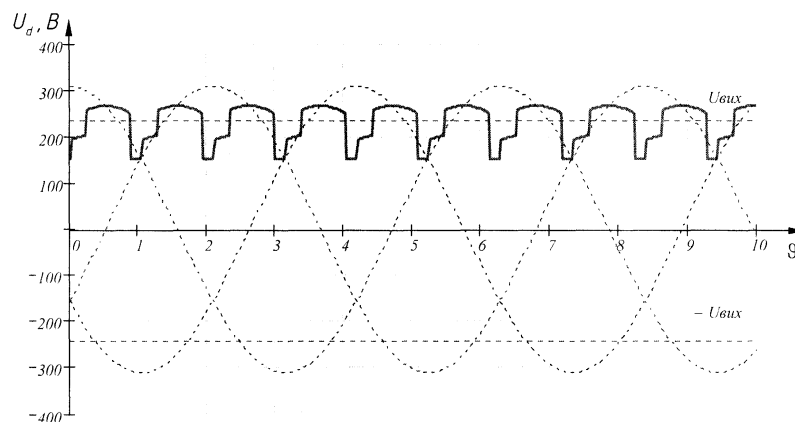


Рисунок 3.7 – Часова діаграма вихідної напруги перетворювача

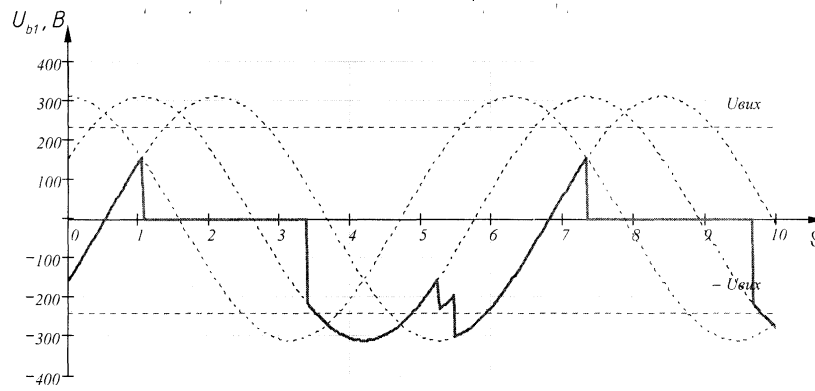


Рисунок 3.8 – Часова діаграма напруги на вентилі

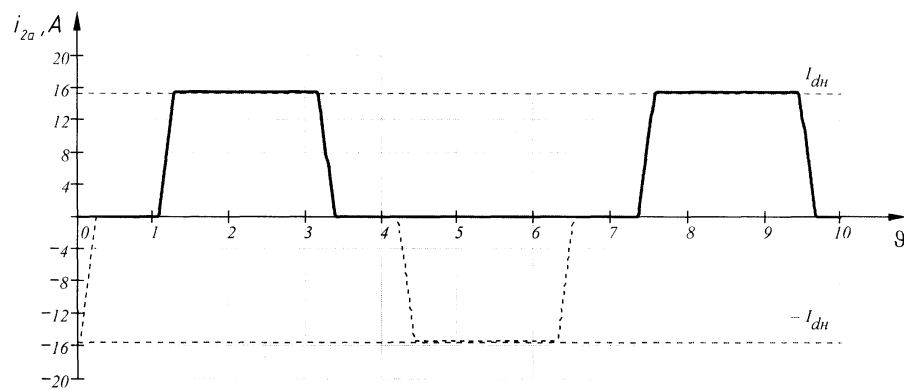


Рисунок 3.9 – Часова діаграма струму вентиля

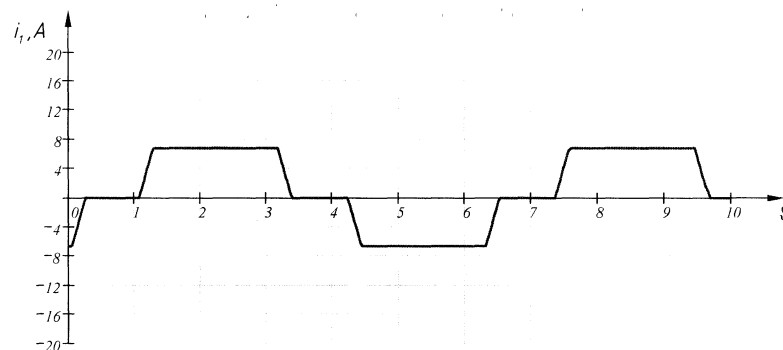


Рисунок 3.10 – Часова діаграма струму споживаного з мережі

3.3 Вибір типу комплектного тиристорного перетворювача

Системи підпорядкованого керування поєднують переваги методів послідовної корекції із можливістю контролю обмеження параметрів руху. Ця функціональність реалізується завдяки каскадному з'єднанню регуляторів, де вихідний сигнал одного регулятора виступає в ролі вхідного завдання для наступного. Під параметрами руху у даному контексті розуміють значення вихідних величин окремих ланок системи управління, що змінюються у

часовому проміжку. Серед прикладів таких параметрів можна виділити частоту обертання (n), струм (I), напругу підсилення (U_{pc}), напругу збудження (U_{pi}) тощо.

Регулювання або обмеження вихідної напруги попереднього регулятора, відповідно до заданого закономірного принципу, призводить до зміни або обмеження параметра, що є об'єктом контролю наступним регулятором. У результаті цього можна досягти необхідного обмеження кількох координат руху за допомогою багатоконтурної системи управління. Такі системи дозволяють ефективно контролювати кілька змінних одночасно, забезпечуючи стабільну роботу складних динамічних об'єктів.

Для реалізації системи автоматичного керування (САК) приводом барабанів, з урахуванням проведених попередніх розрахунків, було обрано комплектний тиристорний перетворювач, побудований на базі БТУ 3601. Його функціональна схема детально відображена у графічній частині роботи.

Ця система керування характеризується можливістю регулювання швидкості обертання приводу та стабілізації струму збудження. Вона реалізована на основі концепції підпорядкованого регулювання та включає два основних контури управління: внутрішній контур регулювання струму якоря і зовнішній контур контролю швидкості.

Внутрішній контур керування струмом якоря (РС) складається з ПІ-регулятора струму, вентильного перетворювача якоря електродвигуна (ВПЯ), ланцюга якоря двигуна та датчика, що вимірює струм якоря.

Зовнішній контур регулювання швидкості (РШ) включає ПІ-регулятор швидкості, підпорядкований контур контролю струму, механічну частину приводу, а також датчик швидкості, який відслідковує обертання двигуна.

На вхід контуру регулювання швидкості подається сума двох сигналів: напруги завдання U_z , сформованої за допомогою задатчика швидкості (ЗШ), і зворотного сигналу від тахогенератора BR, який забезпечує зворотний зв'язок для контролю фактичної швидкості обертання. Така структура системи дозволяє підвищити точність керування та ефективно стабілізувати роботу

приводу барабанів.

Вихідний сигнал регулятора швидкості (РШ) $U_{рш}$ виконує функцію задаючого сигналу для внутрішнього контуру струму. Застосування резистора R17 обмежує максимальне значення вихідного сигналу, що, своєю чергою, призводить до обмеження максимально допустимого струму як у перехідних режимах, так і під час перевантажень. У складі регулятора швидкості використовується термостабільний попередній підсилювач регулятора швидкості (ППРШ), який реалізований на основі системи з подвійним перетворенням сигналу. Така структура включає модулятор, підсилювач та демодулятор з коефіцієнтом підсилення, що наближається до значення 100. Модулятор та демодулятор працюють на частоті від 2 до 3 кГц, що генерується генератором прямокутних імпульсів.

Параметри ПІ-регуляторів коригуються шляхом відповідного налаштування резисторів R10, R20 та конденсаторів C3, C4 і C7, що розташовані на платі E1.

Для збереження стабільності коефіцієнта підсилення керованого випрямляча як у режимі безперервного струму, так і в умовах переривистого струму, в канал регулювання інтегрована нелінійна ланка (НЛ). Її характеристика є оберненою до регулювальної характеристики випрямляча в режимі переривистого струму.

Напруга керування U_k , яка формується на виході нелінійної ланки, є сумою сигналів, пропорційних струму та електрорушійній силі (ЕРС) двигуна:
$$U_k = U_{рс} + U_E.$$

Сигнал U_E , що є величиною, пропорційною електрорушійній силі (ЕРС) двигуна, генерується завдяки використанню функціонального перетворювача ЕРС (ФПЕ), який характеризується арксинусною залежністю. Регулювання цього сигналу здійснюється за допомогою змінного резистора R16 при роботі двигуна на номінальній швидкості в режимі холостого ходу. При налаштуванні досягається таке значення сигналу, за якого середнє значення вихідної напруги регулятора струму $U_{рс}$ стає рівним нулю. У цьому випадку сигнал $U_{рс}$

залежить виключно від струму двигуна. Максимальна величина цього сигналу обмежується резистором R33, що, у свою чергу, забезпечує обмеження максимальної складової випрямленої напруги $U_{d-E} = I_d R_e$. Саме ця напруга є основним параметром, що визначає струм якоря електродвигуна.

Таким чином, реалізується додаткове обмеження максимально допустимого струму двигуна, що є функцією попереджувального струмообмеження. Основний процес обмеження струму відбувається через контроль максимальної амплітуди сигналу $U_{рш}$, який регулюється за допомогою резистора R17 РШ на платі E1. Додаткове обмеження струму застосовується виключно для контролю початкового імпульсного стрибка струму, що виникає на старті роботи.

Для забезпечення сумісності однополярної регулювальної характеристики системи імпульсно-фазового керування (СІФК) з реверсивним сигналом U_k використовується пристрій перемикання характеристик (ПХ). Цей пристрій побудований на основі операційного підсилювача A1 та транзисторних ключів VT1, які забезпечують належне перемикання сигналів для досягнення необхідної стабільності та точності регулювання. $\alpha = f(U_{ex})$

Керуючий орган СІФК використовується для встановлення початкового значення кута регулювання, а також для обмеження його діапазону. Налаштування початкового кута, який дорівнює 120 електричних градусів, здійснюється за допомогою резистора R41. Для визначення максимального значення кута регулювання, що складає 150 електричних градусів, застосовується резистор R49. Мінімальний кут, який варіюється у межах 5–10 електричних градусів, можна налаштувати за допомогою резистора R50.

Сигнал зворотного струмового зворотного зв'язку формується завдяки датчику струму (ДС), який отримує живлення від трансформаторів струму ТА2-ТА4. Ці трансформатори розташовані у ланцюзі живлення тиристорного комплекту КТ «В» і «Н». Для реверсування струмового сигналу зворотного зв'язку використовуються транзисторні ключі V16, що розташовані на платі E2.

СІФК підключається до відповідного комплекту тиристорів через

логічний пристрій (ЛП). До складу ЛП входять: перемикач характеристик (ПХ), ключі V16, нуль-орган (НО), тригери напрямку струму (заданого – T1 та істинного – T2), схема співпадання стану тригерів (СС), елемент відліку часу витримки та датчик провідності вентилів (ДПВ). Функція логічного пристрою полягає у перемиканні груп вентилів при зміні полярності вихідного сигналу на блоці НЛ. Це перемикання відбувається лише після того, як датчик провідності вентилів (ДПВ) зафіксує відсутність струму у вентилях протягом періоду, що визначається елементом часу витримки. У випадку, якщо за цей безструмовий проміжок полярність сигналу знову зміниться на попередню, логічний пристрій без додаткової затримки повторно вмикає попередній комплект вентилів. Такий алгоритм керування дозволяє мінімізувати безструмові паузи та забезпечує стабільну і надійну роботу системи приводу, знижуючи час реакції та підвищуючи ефективність процесу перемикання вентилів.

3.4 Обґрунтування системи імпульсно-фазового керування

Система імпульсно-фазного регулювання призначена для перетворення постійної керуючої напруги у серію імпульсів заданої фази, які подаються на керуючі електроди тиристорів силових вентильних блоків. Це забезпечує синхронне та ефективне керування процесами у силових електронних пристроях, що використовуються для стабілізації або регулювання електричних параметрів у схемах енергетичного обладнання.

СІФК включає в себе наступні вузли (рис.3.11):

- джерело синхронізуючої напруги;
- три формувача імпульсів ФІ;
- керуючий орган КО;
- шість підсилювачів імпульсів ПІ;
- шість ввідних пристроїв ПВ.

Формувач імпульсів включає в себе кілька основних вузлів: фільтр (Ф), пару порогових елементів (ПЕ), блок формування синхронізуючих імпульсів

(ФСІ), генератори напруги пілкоподібної форми (ГПН), нульовий орган (НО), тригер типу RS (Т) та пристрій для формування тривалості імпульсів (ФТІ).

Кожен із трьох каналів системи імпульсно-фазового контролю (СІФК) забезпечує управління двома вентилями, які належать до однієї фази випрямного мосту. Це дозволяє максимально усунути можливу асиметрію керуючих сигналів у режимі протифазного керування. Фазозсувні канали реалізовані на основі вертикального методу управління, де використовується опорна напруга з лінійно зростаючою характеристикою.

З метою забезпечення максимальної продуктивності пристрою при застосуванні одного комплекту СІФК, кожен канал готується до генерації керуючих імпульсів не лише перед початком напівперіоду синхронізуючої напруги, а й у будь-який інший момент за сигналом U_p . Цей сигнал формується логічним блоком під час відліку останньої паузи без струму, що виникає в процесі перемикання силових комплектів вентилів. Повторна подача керуючих імпульсів відбувається виключно у тих каналах, де рівень опорної напруги перевищив оновлене значення керуючої напруги.

Синхронізована фазна напруга, що надходить від джерела стабільної напруги, зазнає зсуву на 30 електричних градусів завдяки фільтру Φ . На виході цього фільтра напруга трансформується в протифазні прямокутні імпульси за допомогою порогових елементів ПЕ1 та ПЕ2. Тривалість цих імпульсів визначає часовий інтервал, у межах якого дозволяється формування керуючих сигналів. Для фаз «а» і «х» цей інтервал становить орієнтовно 176 електричних градусів. Це забезпечує запобігання одночасному надходженню керуючих імпульсів на вентилі однієї й тієї ж фази випрямного мосту.

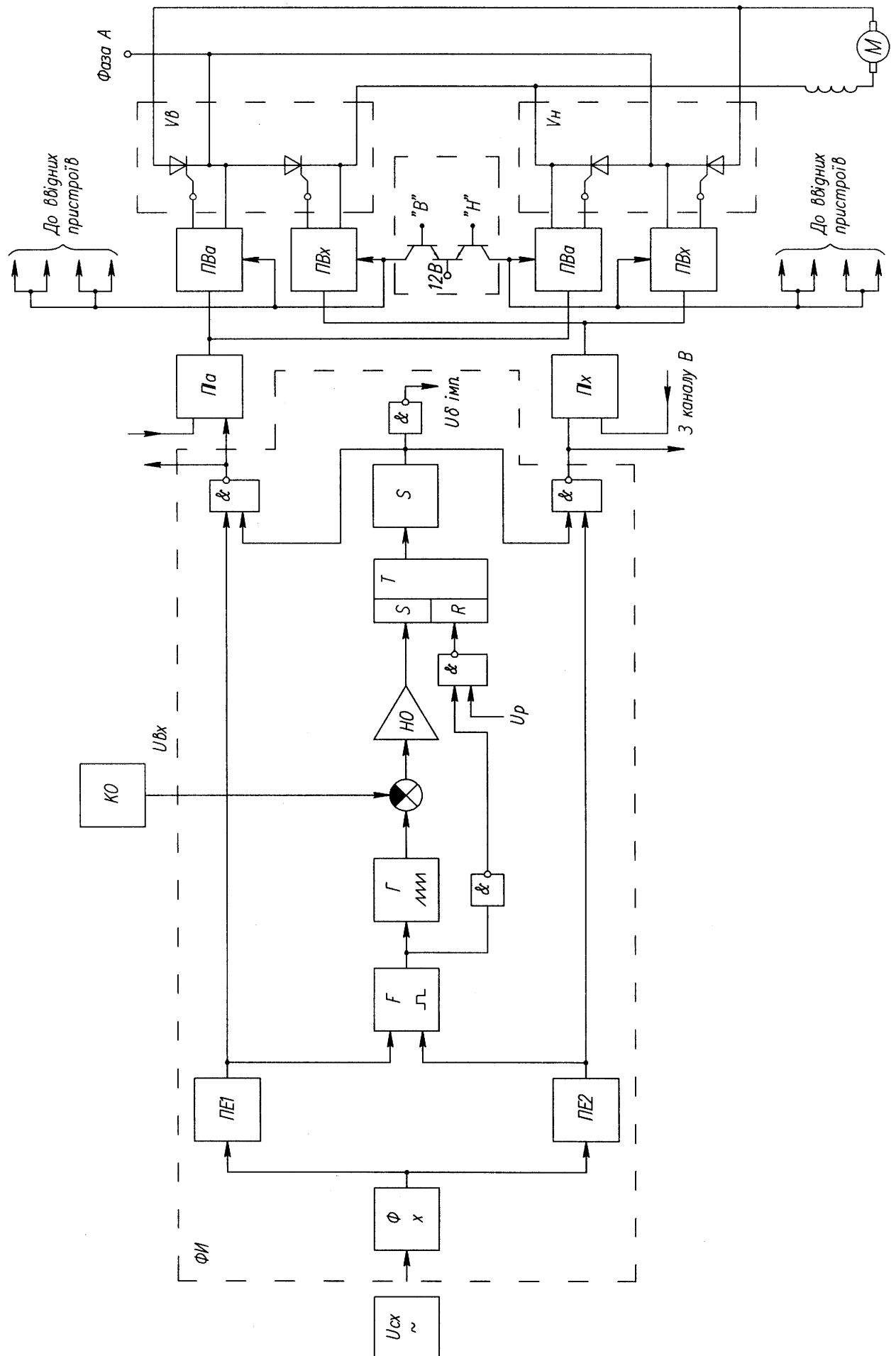


Рисунок 3.11 – Функціональна схема каналу СІФК

Коли на виходах обох порогових елементів формується сигнал рівня «0», на виході формувача синхроімпульсу (ФСІ) генерується синхронізуючий імпульс у вигляді сигналу «1». Цей імпульс виконує функцію скидання напруги на інтегруючій ємності генератора пилоподібної напруги (ГПН), миттєво знижуючи її до нульового рівня. Після завершення синхроімпульсу напруга на виході генератора розпочинає поступово й лінійно підвищуватися від 0 до 10 В. У момент, коли напруга ГПН перевищує рівень керуючої напруги, що подається від відповідного регулюючого органу, нуль-орган фіксує цю подію. Це спричиняє зміну його стану з «1» на «0». Тригер Т, реагуючи на цей стан, перемикається, і на його виході формується сигнал «0». Саме цей сигнал призводить до появи керуючого імпульсу на виході формувача тимчасових імпульсів (ФТІ) з тривалістю в межах 10-15 електричних градусів. Далі цей імпульс через логічний елемент «І» надходить на вхід одного з підсилювачів — або ПІ «а», або ПІ «х». Вибір відповідного підсилювача здійснюється на основі сигналів, що надходять від порогових елементів ПЕ1 та ПЕ2. Таким чином, узгоджена робота усіх компонентів забезпечує стабільну роботу системи й контроль за рівнем керуючої напруги.

Імпульсний підсилювач оснащений двома входами: перший приймає «свій» імпульс, а другий призначений для «чужого» сигналу, який надходить від іншого генератора імпульсів та зміщений відносно першого на 60 електричних градусів. Така конфігурація дозволяє формувати здвоєні імпульси, що є необхідною умовою для ефективного управління трифазним мостовим випрямлячем.

Після проходження через ПІ підсилені та зсунуті імпульси спрямовуються на ввідний модуль керування тиристорного комплекту, який працює у режимах «Вперед» або «Назад». Цей пристрій забезпечує електричну ізоляцію між системою управління та силовим ланцюгом. Тригер Т, реагуючи на появу сигналу «0» на виході елемента НІ, зберігає своє поточне положення до моменту надходження на його інший вхід синхронізуючого імпульсу від ФСІ або сигналу U_g , що генерується пристроєм ПЛ. Сигнал U_g формується в

процесі відліку паузи без струму, яка виникає під час переключення груп. Саме ця пауза готує тригер для подальшої подачі нового керуючого імпульсу.

3.5. Оптимізація контуру струму якоря

Розпочато процес оптимізації системи, що функціонує на основі підпорядкованого регулювання, із внутрішнього контуру регулювання струму якоря.

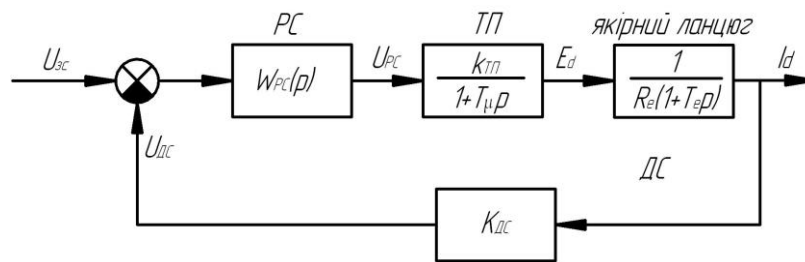


Рисунок 3.12 – Структурна схема контуру струму якоря

РС – пристрій для регулювання струму;

- ТП – тиристорний перетворювач, що керує якорем електродвигуна;
- ДС – вимірювальний датчик для контролю струму.

Оптимізація системи виконана за умови таких припущень:

- усі незначні значення постійних часу зосереджені всередині тиристорного перетворювача.

$$T_{\mu} = T_{ТП} + T_{ДС} + T_{\mu PC};$$

- датчик струму вважається безінерційним;
- двигун загальмований ($E=0$).

Оптимізація контуру струму на модульний оптимум

$$W^{p_{KC}}(p) = W_{KC}(p) \frac{k_{ТП}}{(1 + T_{\mu} p) \cdot R_e \cdot (1 + T_e p)} \cdot k_{ДС} = \frac{1}{2T_{\mu} p \cdot (1 + T_{\mu} p)} \quad (3.17)$$

Тоді

$$W_{PC}(p) = \frac{R_e \cdot (1 + T_e p)}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДС} p} \cdot \frac{T_e}{T_e} = \frac{R_e \cdot T_e}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДС}} \cdot \frac{T_e p + 1}{T_e p} = k_{PC} \frac{T_e p + 1}{T_e p} \quad (3.18)$$

де

$$k_{PC} = \frac{R_e \cdot T_e}{2T_\mu \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДС}} = \frac{R_e \cdot T_e}{2T_\mu \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДСЯ} \cdot k_{шя}} \quad (3.19)$$

Одержана передавальна функція відповідає струмовому регулятору пропорційно-інтегрального (ПІ) типу, який забезпечує ефективне керування струмом у системі.

Передавальна функція замкненого контуру струму має вигляд

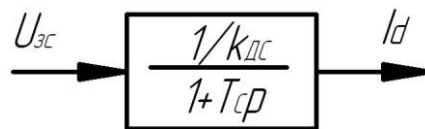
$$W_{KC}^3(p) = \frac{W_{KC}^P(p) / k_{ДС}}{1 + W_{KC}^P(p)} = \frac{\frac{1}{2T_\mu p(1 + T_\mu p)k_{ДС}}}{1 + \frac{1}{2T_\mu p(1 + T_\mu p)}} = \frac{\frac{1}{k_{ДС}}}{1 + 2T_\mu p + 2T_\mu^2 p^2} \quad (3.20)$$

Оскільки величина T_μ^2 мала, то доданком $2T_\mu^2 p^2$ можна знехтувати, тоді вважаючи $2T_\mu^2 p^2 \approx 0$, отримано

$$W_{KC}^3(p) \approx \frac{\frac{1}{k_{ДС}}}{1 + 2T_\mu p} = \frac{\frac{1}{k_{ДС}}}{1 + T_c p}, \quad (3.21)$$

де $T_c = 2T_\mu$ - Еквівалентна постійна часу контуру струму, налаштованого відповідно до критеріїв модульного оптимуму.

Структурна схема замкнутого контуру струму має вигляд:



Розрахунок параметрів регулятора струму:

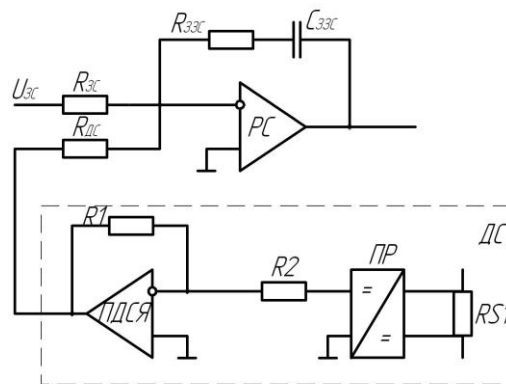


Рисунок 3.13 – Регулятор струму якоря

Значення ємності конденсатора, що використовується у зворотному зв'язку операційного підсилювача для регулятора струму, обране з урахуванням необхідних параметрів стабільності та ефективності роботи системи $C_{33C} = 1,5 \text{ мкФ}$.

Опір резистора, що знаходиться у колі зворотного зв'язку операційного підсилювача, який застосовується для регулювання струму в системі

$$R_{33C} = \frac{T_e}{C_{33C}} = \frac{0,0114}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 7,63 \cdot 10^3 = 7,63 \text{ (кОм)} \quad (3.22)$$

Опір в ланцюзі датчика струму

$$R_{ДС} = \frac{2T_\mu \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДС} \cdot k_{шя}}{R_e \cdot C_{33C}} = \frac{2 \cdot 0,0095 \cdot 93,362 \cdot 86 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3}}{4,307 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} = 88,6 \cdot 10^3 \text{ (Ом)} \quad (3.23)$$

Опір в ланцюзі за датчика струму знайдено з умов сталого режиму, в якому $U_{3C} = U_{ДС}$, звідки

$$\frac{U_{3C \max}}{R_{3C}} = \frac{U_{ДС \max}}{R_{ДС}} \Rightarrow R_{3C} = R_{ДС} \frac{U_{3C \max}}{U_{ДС \max}} = 88,6 \text{ (кОм)} \quad (3.24)$$

вважаючи $U_{3C \max} = U_{ДС \max}$.

Коефіцієнт підсилювача датчика струму якоря

$$k_{ДСя} = k_{ПР} \cdot k_{ПДСя} \quad (3.25)$$

де $k_{ПР} = 1$ - коефіцієнт підсилення пропорційного регулятора.

Тоді

$$k_{ПДСя} = \frac{k_{ДСя}}{k_{ПР}} = \frac{86}{1} = 86 \quad (3.26)$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом

$$k_{ДС} = k_{шя} \cdot k_{ДСя} \frac{R_{3C}}{R_{ДС}} = 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot 86 \frac{88,6 \cdot 10^3}{88,6 \cdot 10^3} = 0,323 \quad (3.27)$$

Коефіцієнт регулятора струму

$$k_{РС} = \frac{T_e \cdot R_e}{2T_\mu \cdot k_{ТП} \cdot k_{ДС}} = \frac{0,0114 \cdot 4,307}{2 \cdot 0,0095 \cdot 93,362 \cdot 0,323} = 0,086 \quad (3.28)$$

Максимальна напруга завдання для струму якоря становить

$$U_{3C \max} = I_n \cdot I_{\max} \cdot k_{ДС} = 15,461 \cdot 30,922 \cdot 0,323 = 154,182 \quad (\text{В}) \quad (3.170)$$

Для визначення опору R2 використане співвідношення

$$k_{ПДСя} = \frac{R1}{R2} \quad (3.29)$$

де R1 прийнято 5 кОм, тоді $R2 = R1 \cdot k_{ПДСя} = 5 \cdot 86 = 430 \text{ (кОм)}$.

3.6. Оптимізація контуру швидкості

Оптимізацію швидкісного контуру виконано з використанням модульного оптимуму згідно з представленою структурною схемою (рис.3.14).

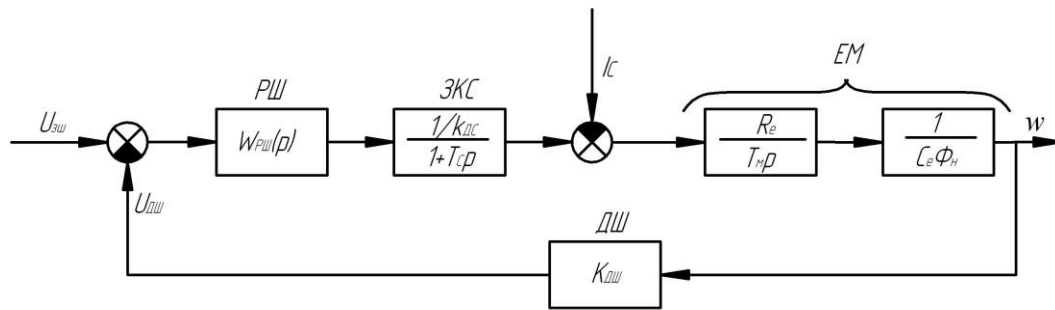


Рисунок 3.14 – Структурна схема контуру швидкості

РШ (регулятор швидкості) – це пристрій, що управляє швидкістю обертання механізмів або агрегатів. ЗКС (замкнений контур струму) забезпечує підтримку стабільного струму в системах управління. ЕМ (електромеханічна частина двигуна) відповідає за перетворення електричної енергії в механічну. ДШ (датчик швидкості) використовується для вимірювання швидкості руху або обертання.

Передавальна функція для розімкненого контуру швидкості, оптимізованого до модульного рівня, характеризується здатністю до досягнення стабільної роботи системи з високою точністю, де враховуються всі параметри, необхідні для досягнення максимально ефективної роботи в заданих умовах.

$$W_{КШ}^p(p) = W_{РШ}(p) \cdot \frac{1/k_{ДС}}{1 + T_с p} \cdot \frac{R_e}{T_m p} \cdot \frac{1}{C_e \Phi_n} k_{ДШ} = \frac{1}{2T_с p(1 + T_с p)} \quad (3.30)$$

Тоді

$$W_{PШ}(p) = \frac{(1+T_C p)T_M p \cdot C_e \phi_n \cdot k_{ДС}}{2T_C p(1+T_C p)R_e k_{ДШ}} = \frac{T_M C_e \phi_n k_{ДС}}{2T_C R_e k_{ДШ}} = k_{PШ} \quad (3.31)$$

Передавальна функція, що була отримана, відповідає регулятору швидкості пропорційного типу (П-регулятор). Використання такого регулятора забезпечує астатичну поведінку системи при заданні вхідного сигналу, проте вона залишається статичною при впливі зовнішніх збурень.

Передавальна функція замкнутого контуру швидкості

$$W_{КШ}^p(p) = W_{PШ}(p) \frac{W_{PШ}^p(p) / k_{ДШ}}{1 + W_{КШ}^p(p)} = \frac{1}{1 + 2T_C p + 2T_C^2 p^2} \approx \frac{1}{1 + T_{Ш} p} \quad (3.32)$$

де $T_{Ш} = 2T_C = 4T_{\mu}$ – еквівалентна постійна часу налаштованого на модульний оптимум контуру швидкості.

Зважаючи на інерційність датчика швидкості, перехідний процес у системі характеризується значним перерегулюванням. Щоб знизити цей небажаний ефект, до входу системи підключають фільтр, часова стала якого відповідає інерційності самого датчика. Використання такого фільтра дозволяє ефективніше згладжувати коливання і мінімізувати перевищення встановленого значення під час перехідного режиму

$$W_{КШ}^{3+\Phi}(p) = \frac{1}{1+T_{Ш} p} \cdot \frac{1}{1+2T_{Ш} p} \approx \frac{1}{1+3T_{Ш} p} \quad (3.33)$$

Розрахунок параметрів регулятора швидкості:

Коефіцієнт датчика швидкості

$$k_{ДШ} = \frac{U_{ДШ \max}}{\Omega_0} = \frac{10}{104,72} = 0,096 \quad (\text{Вс/рад}) \quad (3.34)$$

де $U_{ДШ \max} = 10 \text{ В}$ – максимальний вихідний сигнал датчика швидкості.

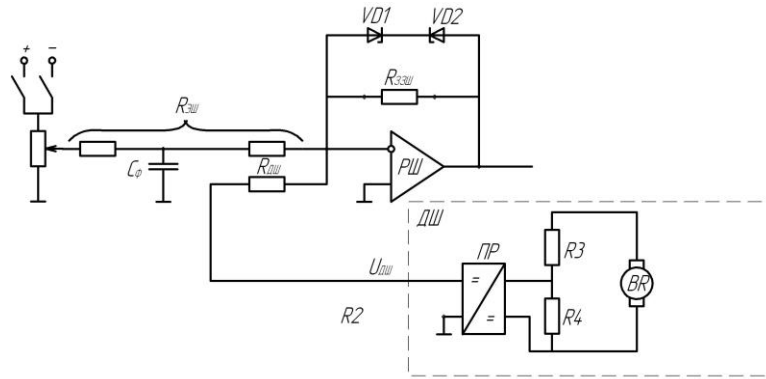


Рисунок 3.15 – Регулятор швидкості

Передавальний коефіцієнт регулятора швидкості

$$k_{PШ} = \frac{T_M C_\phi k_n k_{ДС}}{2 T_C R_\epsilon k_{ДШ}} = \frac{0,232 \cdot 1,544 \cdot 0,323}{2 \cdot 0,019 \cdot 4,307 \cdot 0,096} = 7,381$$

Опір у зворотному контурі операційного підсилювача, що використовується в схемі регулювання напруги:

$$R_{ЗШ} = k_{PШ} \cdot R_{ДШ} = 7,381 \cdot 10 \cdot 10^3 = 73,81 \text{ (кОм)} \quad (3.35)$$

де $R_{ДШ}$ - опір вихідному ланцюзі регулятора швидкості. Прийнято $R_{ДШ} = 10 \text{ кОм}$.

Опір резистора в ланцюзі за датчика швидкості

$$R_{ЗШ} = R_{ЗШ} \cdot \frac{U_{ЗШ \max}}{\Omega_0 k_{ДШ}} = 73,81 \frac{10}{142,487 \cdot 0,096} = 7,35 \text{ (кОм)} \quad (3.36)$$

де $U_{ЗШ \max} = 10 \text{ В}$ – максимальний вихідний сигнал за датчика швидкості.

Ємність фільтру на вході (для зниження перерегулювання)

$$C_\phi = \frac{4T_\phi}{R_{ЗШ}} = \frac{16T_C}{R_{ЗШ}} = \frac{16 \cdot 0,019}{7,35 \cdot 10^3} = 41,4 \text{ (мкФ)} \quad (3.37)$$

Коефіцієнт дільника виражено з формули $k_{ДШ} = k_{m2} \cdot k_{ПР} \cdot k_{дיל}$ (3.38)

$$k_{дил} = \frac{k_{ДШ}}{k_{m2} \cdot k_{ПР}} = \frac{0,096}{2,1 \cdot 1} = 0,045 \quad (3.39)$$

де $k_{ПР} = 1$ - передавальний коефіцієнт пропорційного регулятора.

Опри резисторів дільника визначені з виразу

$$k_{дил} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad R_3 = R_4 \frac{1 - k_{дил}}{k_{дил}} = 1 \cdot 10^3 \frac{1 - 0,045}{0,045} = 21 \cdot 10^3 = 21 \text{ (кОм)} \quad (3.39)$$

де R_4 прийнято рівним 1 кОм.

Обмеження вихідного сигналу регулятора швидкості досягається за допомогою двох стабілітронів VD1 та VD2, які підключені зустрічно. Оскільки цей вихідний сигнал виконує функцію завдання для струму, його обмеження автоматично забезпечує обмеження струму електродвигуна на рівні, що не перевищує максимально допустиме значення. Це дозволяє захистити електродвигун від перевантажень і сприяє підвищенню надійності роботи системи.

$$U_{VD} = U_{PII}^{\max} - \Delta U_{VD} = 10 - 1 = 9 \text{ (В)} \quad (3.40)$$

де $U_{PII}^{\max}$ В – максимально допустима напруга завдання на струм; ΔU_{VD} В – падіння напруги на стабілізаторах.

Метою процесу оптимізації є забезпечення стабільного рівня струму збудження на номінальних значеннях, незалежно від впливу зовнішніх збурень або коливань параметрів системи.

3.7. Оптимізація контуру струму збудження двигуна

Оптимізація контуру струму збудження за методом модульного оптимуму виконується на основі структурної схеми, зображеної на рис. 3.16.

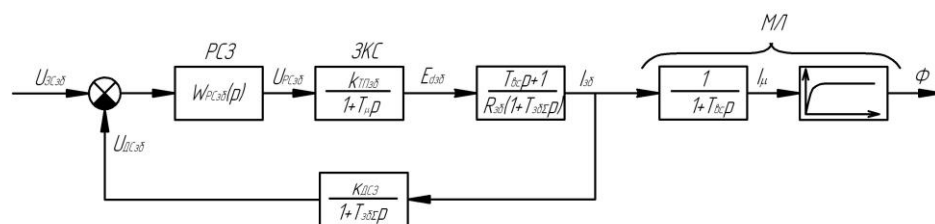


Рисунок 3.17 – Структурна схема контуру струму збудження

РЗС – регулятор струму збудження;

ТПЗ – тиристорний перетворювач обмотки збудження;

ОЗ – електричний ланцюг обмотки збудження ;

МЛ – магнітний ланцюг обмотки збудження;

ДСЗ – датчик струму збудження.

Передавальна функція регулятора струму збудження виражена з виразу

$$W_{KC\bar{z}\bar{b}}^p(p) = W_{PC\bar{z}\bar{b}}(p) \frac{k_{ТП\bar{z}\bar{b}}}{1 + T_{\mu\bar{b}}p} \cdot \frac{T_{вс}p + 1}{R_{з\bar{b}}(1 + T_{з\bar{b}\Sigma}p)} \cdot k_{ДСЗ} \frac{1}{1 + T_{вс}p} = \frac{1}{2T_{\mu\bar{b}}p(1 + T_{\mu\bar{b}}p)} \quad (3.41)$$

$$W_{PC\bar{z}\bar{b}}(p) = \frac{(1 + T_{\mu\bar{b}}p)R_{з\bar{b}}(1 + T_{з\bar{b}\Sigma}p)}{2T_{\mu\bar{b}}p(1 + T_{\mu\bar{b}}p)k_{ТП\bar{z}\bar{b}} \cdot k_{ДСЗ}} = \frac{(1 + T_{з\bar{b}\Sigma}p)R_{з\bar{b}}}{2T_{\mu\bar{b}}pk_{ТП\bar{z}\bar{b}} \cdot k_{ДСЗ}} \cdot \frac{T_{з\bar{b}\Sigma}}{T_{з\bar{b}\Sigma}} =$$

$$\frac{R_{з\bar{b}}T_{з\bar{b}\Sigma}}{2T_{\mu\bar{b}}k_{ТП\bar{z}\bar{b}} \cdot k_{ДСЗ}} \cdot \frac{T_{з\bar{b}\Sigma}p + 1}{T_{з\bar{b}\Sigma}p} = k_{PC\bar{z}\bar{b}} \frac{T_{з\bar{b}\Sigma}p + 1}{T_{з\bar{b}\Sigma}p} \quad (3.42)$$

де $k_{PC\bar{z}\bar{b}}$ - коефіцієнт регулятора струму збудження,

$$k_{PC\bar{z}\bar{b}} = \frac{R_{з\bar{b}}T_{з\bar{b}\Sigma}}{2T_{\mu\bar{b}}k_{ТП\bar{z}\bar{b}} \cdot k_{ДСЗ}} \quad (3.43)$$

Згідно з отриманою передавальною функцією, регулятор струму збудження є ПІ-регулятором. Проте, враховуючи особливості системи, є можливість застосувати більш спрощений варіант у вигляді П-регулятора, який характеризується передавальною функцією. $T_{з\bar{b}\Sigma} \gg T_{\mu}$

$$W_{PC\bar{z}\bar{b}}(p) = k_{PC\bar{z}\bar{b}} = \frac{R_{з\bar{b}}T_{з\bar{b}\Sigma}}{2T_{\mu\bar{b}}k_{ТП\bar{z}\bar{b}} \cdot k_{ДСЗ}} \quad (3.44)$$

Розрахунок ланцюга регулятора струму збудження

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача ланцюга збудження

$$k_{ТП\bar{z}\bar{b}}(I_{з\bar{b}н}) = \frac{\pi E_{d0\bar{z}\bar{b}}}{4U_{он}} \sin \alpha_{з\bar{b},н} = \frac{3,14 \cdot 342}{4 \cdot 10} \sin(115^{\circ}27') = 24,29 \quad (3.45)$$

де $E_{d0\bar{z}\bar{b}}$ - максимальна випрямлена ЕРС перетворювача ланцюга збудження

$$E_{d0\bar{z}\bar{b}} = k_{сх} U_{1л} = 0,9 \cdot 380 = 342 \text{ (В)} \quad (3.46)$$

де $k_{сх}$ - коефіцієнт схеми; $\alpha_{з\bar{b},н}$ - номінальний кут керування перетворювача ланцюга збудження

$$\alpha_{з\bar{b},н} = \arccos\left(\frac{4U_{з\bar{b},н}}{E_{d0\bar{z}\bar{b}}} - 3\right) = \frac{4 \cdot 220}{342} - 3 = 115^{\circ}27' \quad (3.47)$$

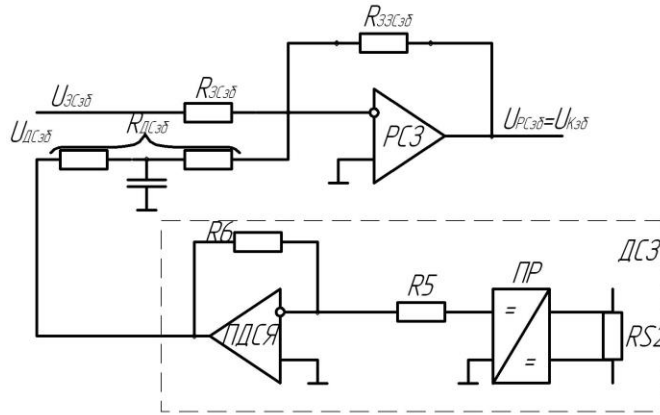


Рисунок 3.18 – Регулятор струму збудження

Коефіцієнт передачі регулятора струму збудження

$$k_{PC3б} = \frac{R_{зб} T_{зб\Sigma}}{2T_{\muвб} k_{ППзб} \cdot k_{ДСЗ}} = \frac{166,16 \cdot 0,173}{2 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 24,3 \cdot 7,553} = 8,248$$

де $k_{ДСЗ}$ - коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом збудження прийнято

$$k_{ДСЗ} = k_{ДСЗб} \cdot k_{изб} = 503 \cdot 0,015 = 7,553 \text{ Д.} \quad (3.48)$$

Місткість конденсатора в контурі зворотного зв'язку регулятора струму збудження визначена. $C_{ДСЗб} = 1,5 \text{ кФ.}$

Опір резистора, що знаходиться у ланцюзі зворотного зв'язку регулятора струму для збудження.

$$R_{33C3б} = \frac{T_{зб\Sigma}}{C_{33C3б}} = \frac{0,176}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 1,153 \cdot 10^5 \text{ (Ом)} \quad (3.49)$$

Опір резистора в ланцюзі датчика струму збудження

$$R_{ДСЗб} = \frac{R_{33C3б}}{k_{PC3б}} = \frac{1,153 \cdot 10^5}{8,248} = 14 \text{ (кОм)} \quad (3.50)$$

Опір резистора в ланцюзі за датчика струму збудження

$$R_{3C3б} = R_{ДСЗб} \frac{U_{3C3б}}{k_{изб} \cdot k_{ДСЗб} I_{зб.н}} = 11,11 \cdot 10^3 \frac{15}{0,015 \cdot 400 \cdot 1,324} = 20,98 \text{ (кОм)} \quad (3.51)$$

де $U_{3C3б}$ – номінальна напруга завдання на струм збудження. Прийнято $U_{3C3б} = 15 \text{ В.}$

Ємність конденсатора в ланцюзі датчика струму збудження

$$C_{ДСзб} = \frac{4T_{вс}}{R_{ДСзб}} = \frac{4 \cdot 0,016}{11,11 \cdot 10^3} = 5,66 \cdot 10^{-6} (\Phi) \quad (3.52)$$

Коефіцієнт підсилювача датчика струму збудження

$$k_{ДСзб} = k_{узб} \cdot k_{ПР} \cdot k_{ПДСзб} \quad (3.53)$$

де $k_{ПР} = 1$ - коефіцієнт підсилення пропорційного регулятора.

Тоді

$$k_{ПДСзб} = \frac{k_{ДСзб}}{k_{узб} \cdot k_{ПР}} = \frac{503}{0,015 \cdot 1} = 33,57 \cdot 10^3$$

Для визначення опору R6 використане співвідношення

$$k_{ПДСзб} = \frac{R6}{R5} \quad (3.54)$$

де R5 прийнято рівним 1 кОм, тоді $R6 = R5 k_{ПДСзб} = 1000 \cdot 33,57 \cdot 10^3 = 33,57 \text{ (МОм)}$

4. РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.1. Розрахунок швидкісних характеристик в системах електропривода

Механічні характеристики двигуна постійного струму відрізняються лінійністю, завдяки чому їх можна будувати, використовуючи дві основні точки. Перша точка відповідає режиму холостого ходу, а друга – номінальному навантаженню.

Вираз для розрахунку механічних характеристик має вигляд

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega \quad (4.1)$$

де Ω_0 – кутова швидкість ідеального холостого ходу

$$\Omega_0 = \frac{U_n}{C_e \Phi_n} = \frac{220}{1,544} = 142,487 \quad (\text{рад/с}) \quad (4.2)$$

$\Delta\Omega$ - величина падіння швидкості, що визначається моментом навантаження.

Значення напруги, що відповідає режиму роботи пристрою на швидкості холостого ходу, має бути визначене з урахуванням відповідних параметрів та технічних характеристик.

$$\Omega_{xx} = \Omega_0 \quad \text{і} \quad \Omega_{xx} = 0,5\Omega_n$$

$$U_{3ш \max} = k_{дш} \Omega_0 = 0,07 \cdot 142,487 = 10 \quad (\text{В})$$

$$U_{0,5 \text{ ш}} = k_{дш} 0,5\Omega_0 = 0,07 \cdot 0,5 \cdot 142,487 = 5 \quad (\text{В}) \quad (4.3)$$

Розмір зниження швидкості при заданому номінальному навантаженні.

- на природній характеристиці

$$\Delta\Omega^{прх} = \frac{I_n R_a}{C_e \Phi_n} = \frac{15,461 \cdot 2,446}{1,544} = 24,491 \quad (\text{рад/с}) \quad (4.4)$$

- в розімкненій системі

$$\Delta\Omega^{PC} = \frac{I_n R_e}{C_e \Phi_n} = \frac{15,461 \cdot 4,307}{1,544} = 43,126 \quad (\text{рад/с}) \quad (4.5)$$

- в замкненій системі

$$\Delta\Omega^{3C} = \Delta\Omega^{PC} \frac{2T_m}{T_M} = 43,126 \frac{2 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{0,232} = 3,537 \quad (\text{рад/с}) \quad (4.6)$$

Механічні характеристики електропривода представлені на рис. 4.1

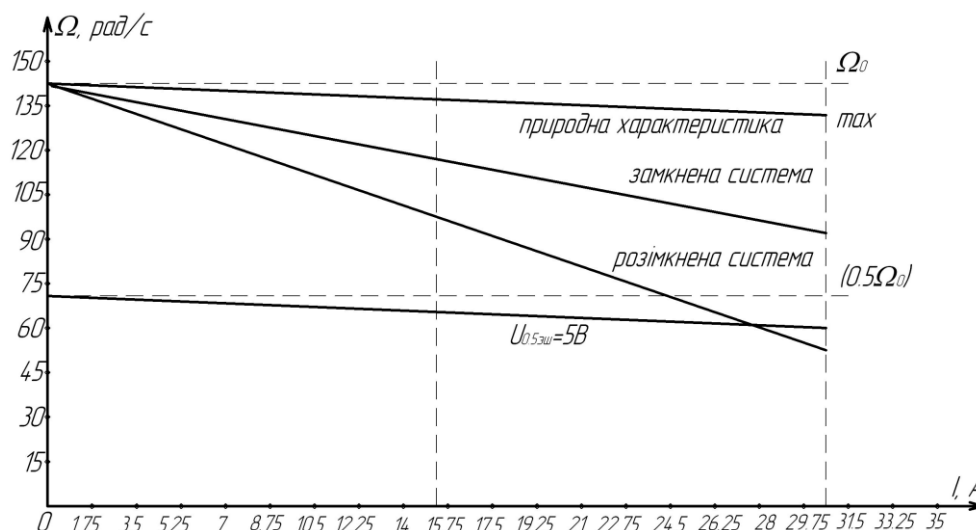


Рисунок 4.1 – Механічні характеристики електропривода

Статизм механічних характеристик

- на природній характеристиці

$$S^{npx} = \frac{\Delta\Omega^{npx}}{\Omega_0} = \frac{24,491}{142,487} = 0,172 \quad (4.7)$$

- в розімкненій системі

$$S^{PC} = \frac{\Delta\Omega^{PC}}{\Omega_0} = \frac{43,126}{142,487} = 0,303 \quad (4.8)$$

- в замкненій системі

$$S^{3C} = \frac{\Delta\Omega^{3C}}{\Omega_0} = \frac{3,537}{142,487} = 0,025 \quad (4.9)$$

Діапазон регулювання швидкості

- на природній характеристиці

$$D^{npx} = \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega^{npx}} = \frac{142,487}{24,491} = 5,818 \quad (4.10)$$

- в розімкненій системі

$$D^{PC} = \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega^{PC}} = \frac{142,487}{43,126} = 3,304 \quad (4.11)$$

- в замкненій системі

$$D^{3C} = \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega^{3C}} = \frac{142,487}{3,537} = 40,282 \quad (4.12)$$

З аналізу побудованих характеристик видно, що механічна характеристика замкненої системи вирізняється найбільшою жорсткістю, тоді як найменшу жорсткість демонструє розімкнена система. сновною причиною меншої жорсткості розімкненої системи є додатковий (еквівалентний) опір у колі якоря, що знижує її ефективність. Водночас природна характеристика системи перевищує жорсткість розімкненої через відсутність такого опору. Найвищу жорсткість механічної характеристики замкненої системи забезпечує зворотний зв'язок, що підсилює її стабільність та продуктивність.рім того, замкнена система має найбільший діапазон регулювання робочих параметрів, що робить її більш адаптивною до зміни навантажень. Натомість розімкнена система демонструє найвищий статизм, що призводить до зменшення її швидкодії у порівнянні з іншими типами систем.

На рисунку 4.2 зображена крива $\Delta\Omega = f(t)$, що демонструє динаміку зміни зниження швидкості залежно від часу t . Ця крива отримана шляхом перерахунку даних про зміну відносного падіння швидкості $\delta v = \frac{\Delta\Omega}{\Omega^{3C}}$, представлених як функція відносного часу. Параметри перехідного процесу були визначені відповідно до налаштувань, що відповідають модульному оптимуму, що забезпечує найефективніші показники для стабілізації системи.

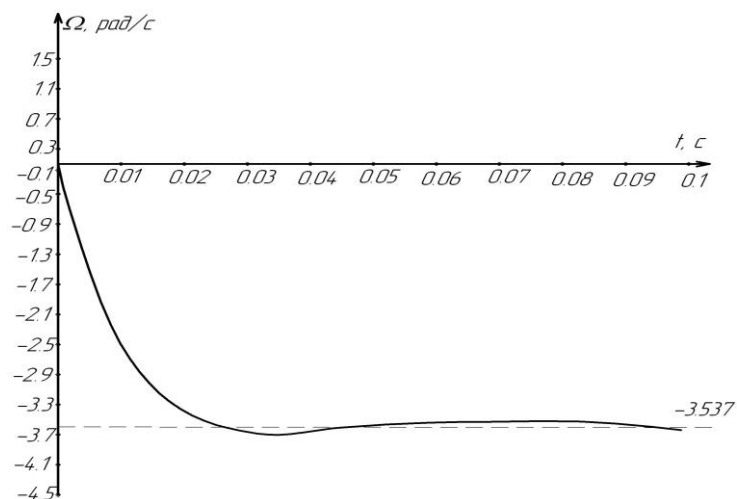


Рисунок 4.2 – Крива зміни падіння швидкості

4.2. Оцінка впливу внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС на процеси, що протікають в контурі струму

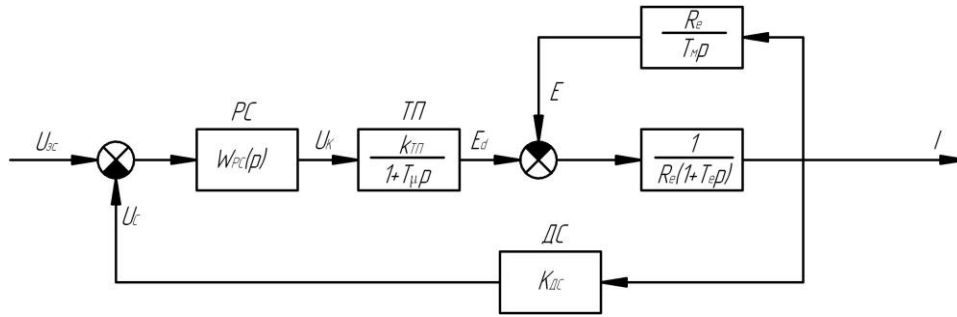


Рисунок 4.3 – Структурна схема контуру регулювання струму якоря з урахуванням дії внутрішнього ЗЗ за ЕРС

$$W_{ял}(p) = \frac{I(p)}{E_d(p)} = \frac{W_{ПК}(p)}{1 + W^p(p)} = \frac{\frac{1}{R_e(T_e p + 1)}}{1 + \frac{1}{R_e(T_e p + 1)} \cdot \frac{R_e}{T_M p}} = \frac{T_M p}{R_e(1 + T_M p + T_M T_e p^2)} \quad (4.13)$$

Передавальна функція ланки якорного ланцюга у цій ситуації проявляє диференціальні властивості, що дозволяє їй ефективно компенсувати інтегральні характеристики регулятора.

З урахуванням впливу внутрішнього зворотного зв'язку, який обумовлений електрорушійною силою (ЕРС), передавальна функція розімкненого контуру струму набуває наступного вигляду

$$W_{КС}^p(p) = \frac{T_e R_e}{2T_\mu k_{ДС} k_{ПП}} \frac{T_e p + 1}{T_e p} \cdot \frac{k_{ПП}}{T_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{R_e} \cdot \frac{T_M p}{1 + T_M p + T_e T_M p^2} \cdot k_{ДС} =$$

$$= \frac{T_M (T_e p + 1)}{2T_\mu (T_e p + 1)(1 + T_M p + T_e T_M p^2)} \quad (4.14)$$

Передавальна функція замкненого контуру струму, яка враховує вплив внутрішнього зворотного зв'язку, створеного електрорушійною силою (ЕРС).

$$W_{КС}^3(p) = \frac{\frac{T_M}{2T_\mu k_{ДС}} \cdot \frac{T_e p + 1}{(T_\mu p + 1)(1 + T_M p + T_e T_M p^2)}}{1 + \frac{T_M}{2T_\mu} \cdot \frac{T_e p + 1}{(T_\mu p + 1)(1 + T_M p + T_e T_M p^2)}} =$$

$$= \frac{\frac{T_M}{k_{ДС}} \cdot (T_e p + 1)}{2T_\mu (T_\mu p + 1)(1 + T_M p + T_e T_M p^2) + T_M (T_e p + 1)} \quad (4.15)$$

$$\text{У сталому режимі} \quad U_{3C} \lim_{p \rightarrow 0} W_{KC}^3(p) = I_{уст} \quad (4.16)$$

у контурі струму без урахування дії внутрішнього ЗЗ за ЕРС

$$I_{уст} = U_{3C} \lim_{p \rightarrow 0} W_{KC}^3(p) = U \frac{\frac{1}{k_{ДС}}}{\frac{2T_{\mu}}{T_M} + 1} \quad (4.17)$$

$$I_{уст} = \frac{I_3}{\frac{2T_{\mu}}{T_M} + 1} = \frac{I_3}{\frac{2 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{0,232} + 1} = 0,924 \cdot I_3$$

тоді (4.18)

Таким чином, у перехідному режимі (коли $\Delta E \neq 0$) контур струму набуває статичної природи, що супроводжується появою похибки. Ця похибка зростає пропорційно до збільшення сталої часу T_{μ} .

Ще одним наслідком дії внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС є виникнення явища перерегулювання в контурі струму під час динамічних процесів, таких як запуск або гальмування. Амплітуда перерегулювання зростає відносно усталеного значення струму, а не заданої величини, що свідчить про нестабільність системи в перехідних режимах.

4.3. Розрахунок і побудова динамічних характеристик електропривода

Одним із можливих підходів для оцінювання запасу стійкості системи автоматичного керування приводом барабанів є аналіз логарифмічних амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик. На основі цих характеристик визначаються значення запасу стійкості як за амплітудою ΔL , так і за фазою $\Delta \varphi$.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) системи може бути математично представлена через відповідне рівняння, яке враховує передаточну функцію системи та її динамічні властивості.

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| \quad (4.19)$$

Логарифмічна фазочастотна характеристика системи має вид

$$\phi(\omega) = \frac{180}{\pi} \cdot \arg(W(j\omega)) \quad (4.20)$$

Для створення логарифмічних характеристик було застосовано математичне програмне забезпечення MathCAD, яке широко використовується для проведення інженерних розрахунків та моделювання.

Передавальна функція розімкненої системи струму описується наступною формою:

$$W_{KC}^p(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{ТП} k_{ДС}}{(1 + T_\mu p) \cdot R_e \cdot (1 + T_e p)} \quad (4.21)$$

Передаточна функція розімкненої системи струму з урахуванням впливу внутрішнього зворотного зв'язку, що виникає за рахунок електрорушійної сили (ЕРС).

$$W_{KC}^p(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{ТП} \cdot k_{ДС} \cdot T_M p}{R_e (T_\mu p + 1)(1 + T_M p + T_e T_M p^2)} \quad (4.22)$$

Передавальна функція розімкненого контуру швидкості

$$W_{КШ}^p(p) = W_{рш}(p) \cdot \frac{R_e k_{ДШ}}{C_e \Phi_n \cdot \kappa_{ДС}} \cdot \frac{1}{T_M p (1 + T_C p)} \quad (4.23)$$

Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики для розімкнених контурів досліджуваної системи зображені на рис.4.4–4.6..

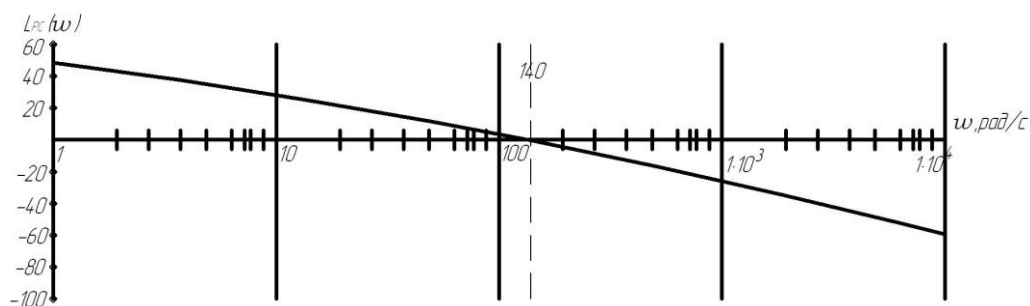


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ контуру струму

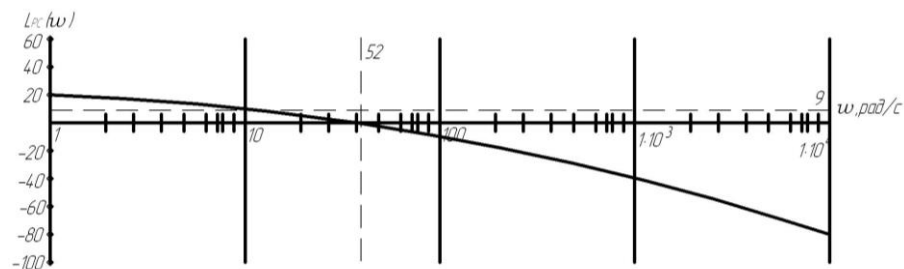


Рисунок 4.5 – ЛАЧХ контуру струму з урахуванням ЗЗ за ЕРС

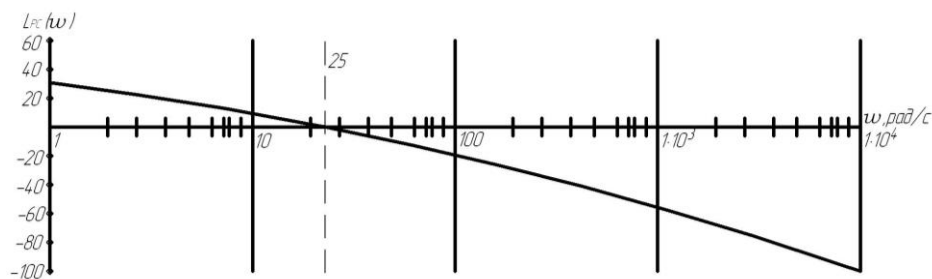


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ контуру швидкості

Побудовані логарифмічні фазочастотні характеристики відкритих контурів системи проілюстровані на рис.4.7–4.9.

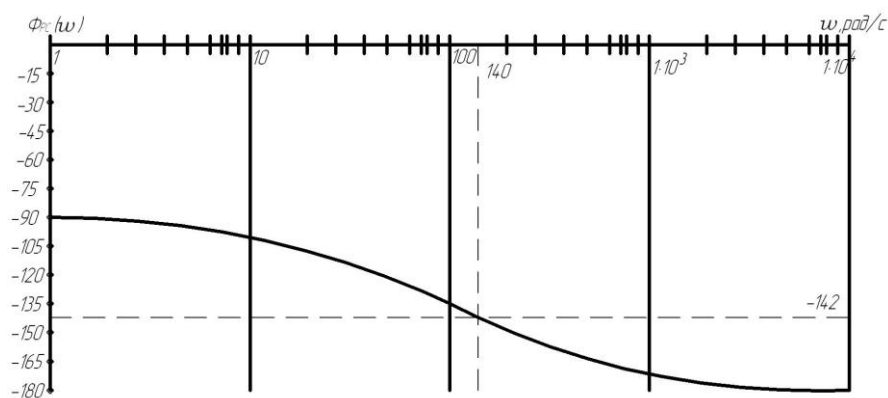


Рисунок 4.7 – ЛФЧХ контуру струму

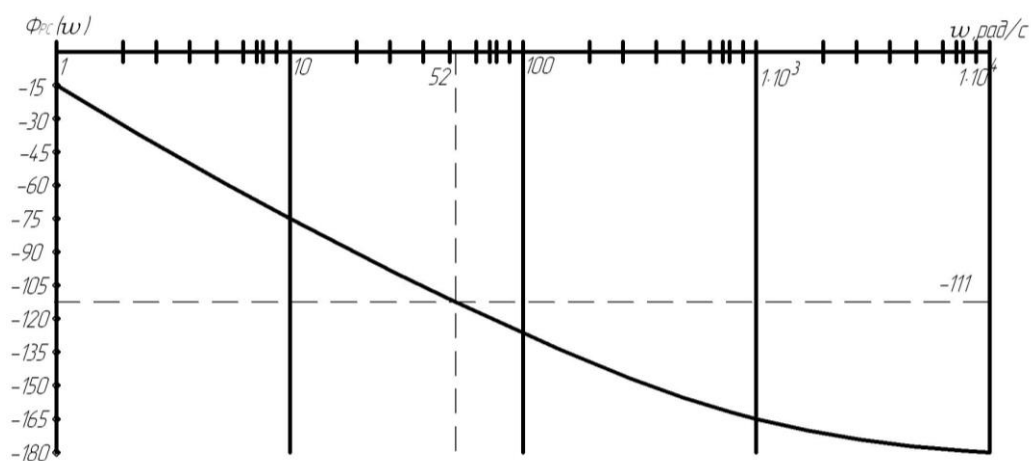


Рисунок 4.8 – ЛФЧХ контуру струму з урахуванням ЗЗ за ЕРС

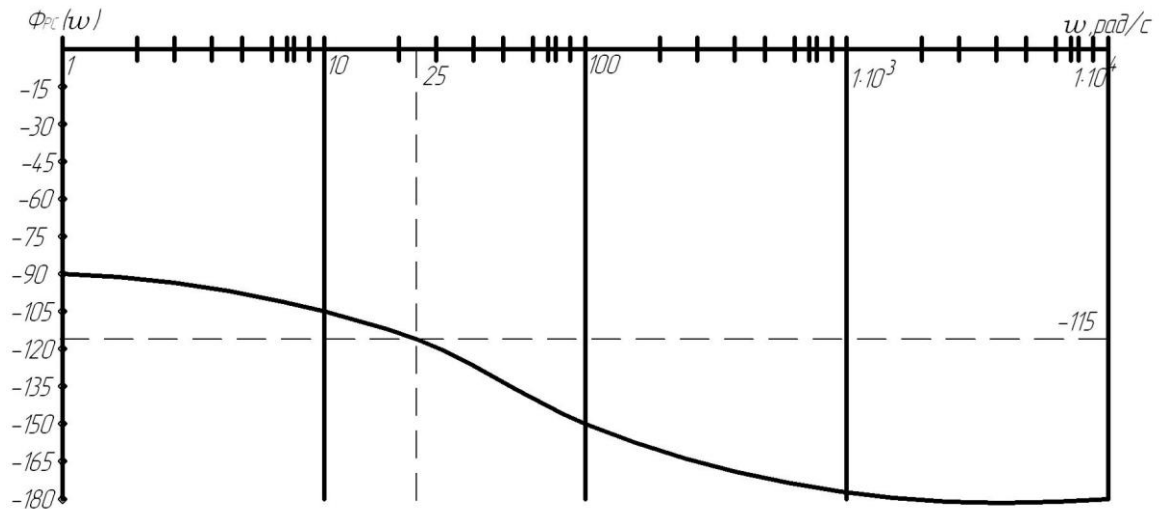


Рисунок 4.9 – ЛФЧХ контуру швидкості

Згідно з отриманими характеристиками для кожного з контурів, значення запасу по амплітуді та фазі складають наступне:

- розімкнений контур стуму $\Delta L = \infty$, $\Delta \phi = 38^\circ$;
- розімкнений контур струму з урахуванням ЗЗ за ЕРС $\Delta L = \infty$, $\Delta \phi = 69^\circ$;
- розімкнений контур швидкості $\Delta L = \infty$, $\Delta \phi = 65^\circ$

4.4. Дослідження динамічних процесів у контурах САК на цифровій моделі

Дослідження динамічних процесів, що відбуваються в контурі струму якоря та впливають на швидкість обертання електродвигуна, виконано за допомогою математичного інструментарію програмного середовища Matlab

Вихідні параметри:

Швидкість обертання при холостому ході в умовах зниженої напруги.

$$\Omega_{0,5} = 0,5 \cdot \Omega_0 = 0,5 \cdot 142,487 = 71,24 (\text{rad} / \text{c}) \quad (4.25)$$

Сигнал завдання на швидкість холостого ходу $U_{зхх} = 5 \text{ В}$.

4.4.1 Розрахунок контуру струму. Дослідження налаштування контуру струму

Таблиця 4.1

Параметри структурної схеми електропривода	
Електромагнітна постійна часу ланцюга ТП-Д, с	0,0114
Некомпенсована постійна часу якірного ланцюга, с	0,0095
Опір ланцюга ТП-Д, с	4,307
Коефіцієнт підсилення регулятора струму	0,086
Коефіцієнт передачі вентильного перетворювача	93,362
Коефіцієнт передачі датчика струму якоря	0,323

Таблиця 4.2

Параметри навантажувальної діаграми	
Тривалість ділянки, с	Сигнал завдання на струм, В
0,2	5
0	-5

На рис.4.7 зображено дев'ять графіків, що відображають перехідні процеси. Графіки упорядковані по горизонталі (зліва направо) відповідно до зростання сталої часу регулятора T_p , а по вертикалі (згори вниз) — за зменшенням коефіцієнта передачі регулятора k_p . Центральний графік демонструє перехідний процес для системи, налаштованої на модульний оптимум. З аналізу представлених графіків можна помітити, що зі збільшенням сталої часу T_p коливальність перехідного процесу зменшується. Водночас зменшення коефіцієнта передачі k_p призводить до зниження перерегулювання системи. Найкращі динамічні характеристики досягаються у випадку, коли система налаштована на модульний оптимум, що дозволяє забезпечити оптимальний баланс між швидкодією та якістю процесу регулювання.

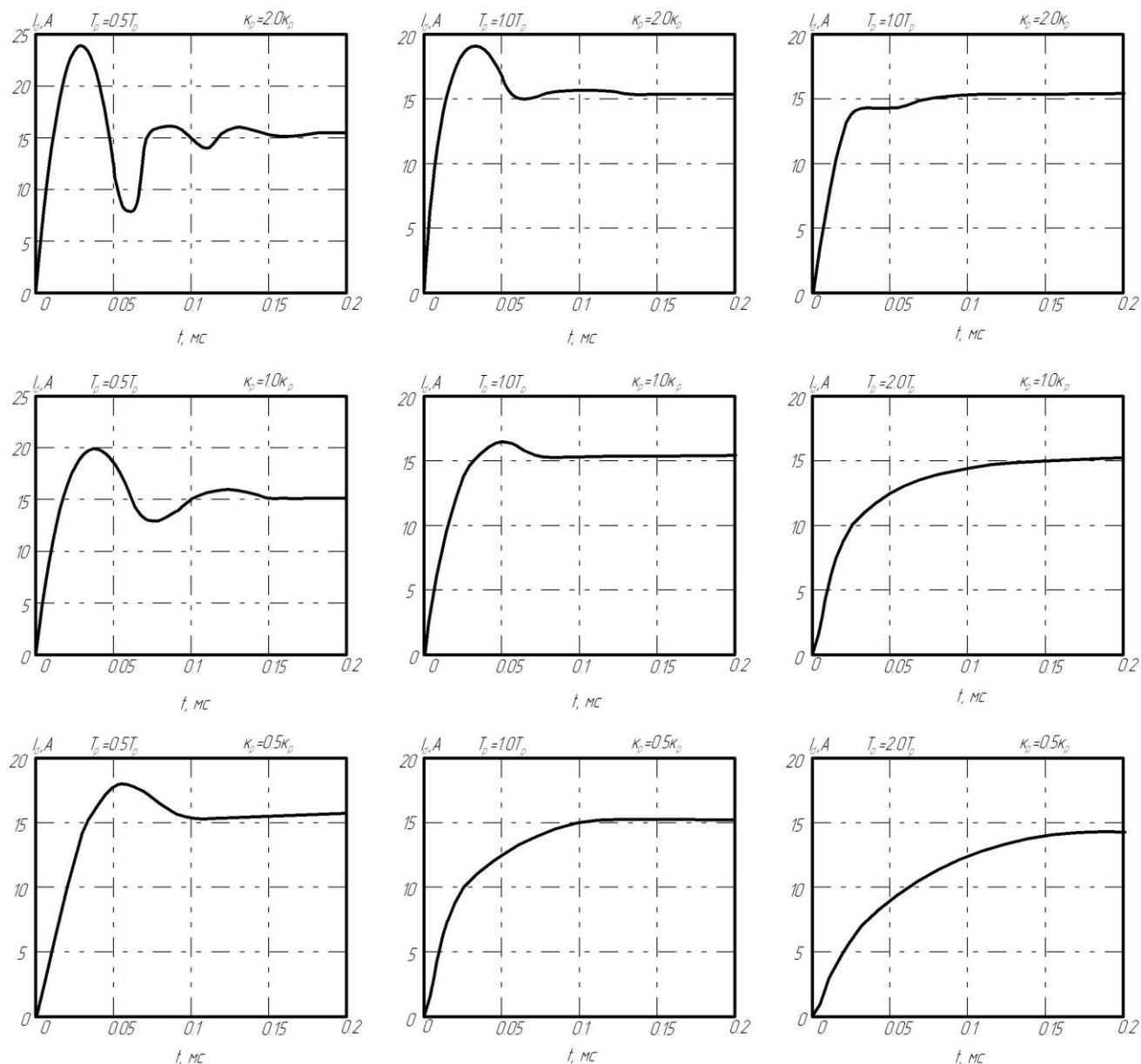


Рисунок 4.10 – Дослідження настройки контуру струму

Дослідження контуру струму

На рис.4.11 продемонстровані перехідні процеси, що відбуваються в контурі регулювання струму. З аналізу графічних залежностей випливає, що процеси мають аперіодичний характер. Струм досягає заданого максимального значення з певним перерегулюванням, яке становить близько 4,3%. Варто зазначити, що під час реверсування абсолютне значення перерегулювання зростає приблизно вдвічі у порівнянні з пусковим режимом. Це пояснюється тим, що величина завдання струму при пуску

змінюється від нульового значення до рівня $I_{уст}$, тоді як при реверсі відбувається перехід від значення $I_{ст}$ до $-I_{уст}$. Таким чином, амплітуда фактичного завдання для струму під час реверсу сягає $2I_{ст}$, що є удвічі більшим порівняно з процесом пуску.

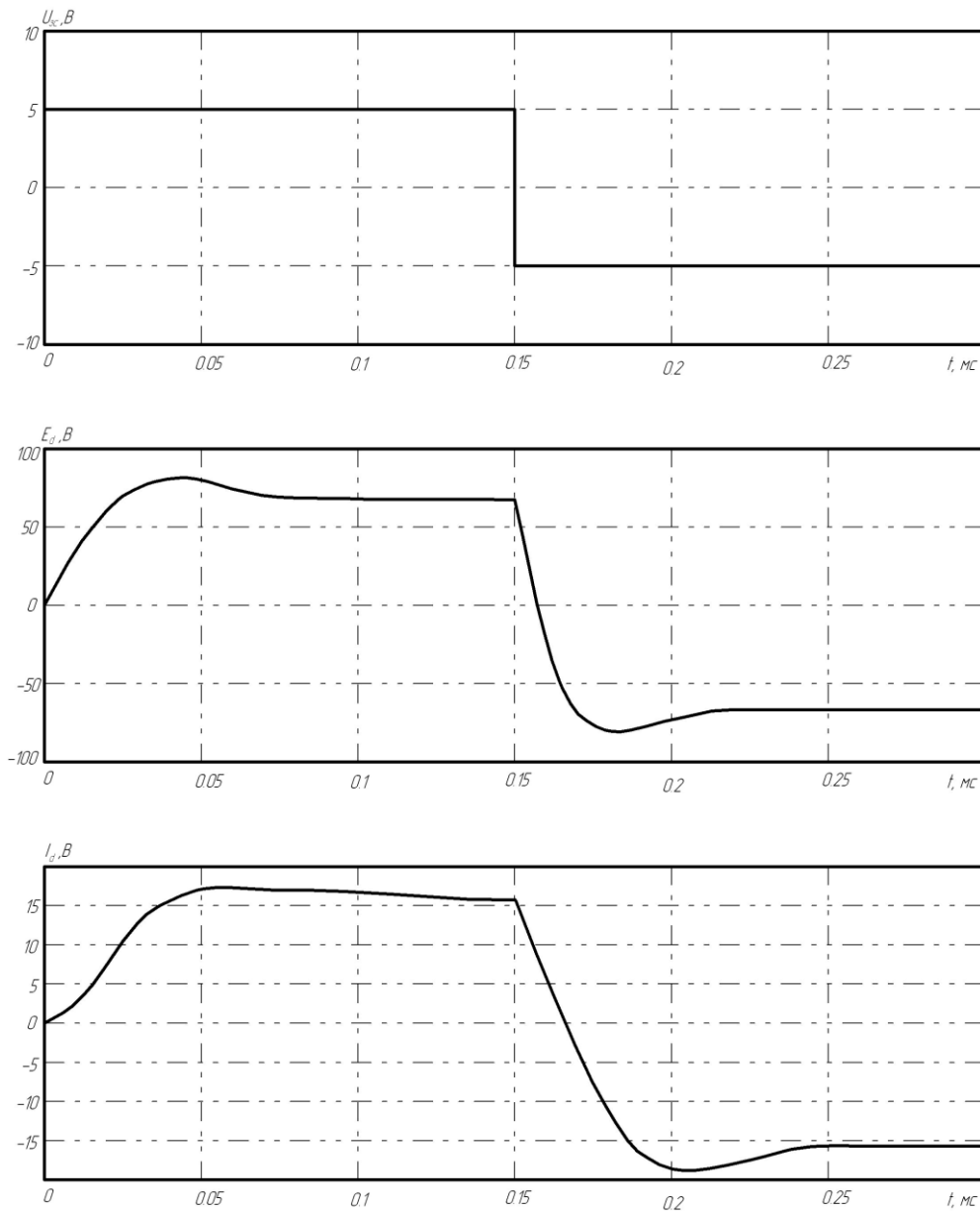


Рисунок 4.11 – Дослідження контуру струму

4.4.2. Розрахунок контуру швидкості

Статичний струм $I_{ст} = 0,91I_n = 0,9 \cdot 15,461 = 13,915(\text{А})$ (4.26)

Таблиця 4.3

Параметри структурної схеми електропривода	
Електромагнітна постійна часу ланцюга ТП-Д, с	0,0114
Некомпенсована постійна часу якінного ланцюга, с	0,0095
Електромеханічна постійна часу, с	0,232
Опір ланцюга ТП-Д, Ом	4,307
Коефіцієнт ЕРС і моменту ДПС	1,544
Коефіцієнт передачі вентильного перетворювача	93,362
Коефіцієнт передачі датчика струму якоря	0,323
Коефіцієнт передачі датчика швидкості	0,07

Таблиця 4.4

Параметри навантажувальної діаграми		
Тривалість ділянки, с	Сигнал завдання на струм, В	Статичний струм, А
0,5	10	0
0,5	10	13,915
1,5	-5	13,915
0,5	-5	0
1,0	0	0

На рис.4.12 представлені осцилограми, що демонструють динаміку сигналів завдання для регулятора швидкості, статичного струму, а також графіки, що відображають зміну вихідної напруги та швидкості обертання електродвигуна у часовій області.

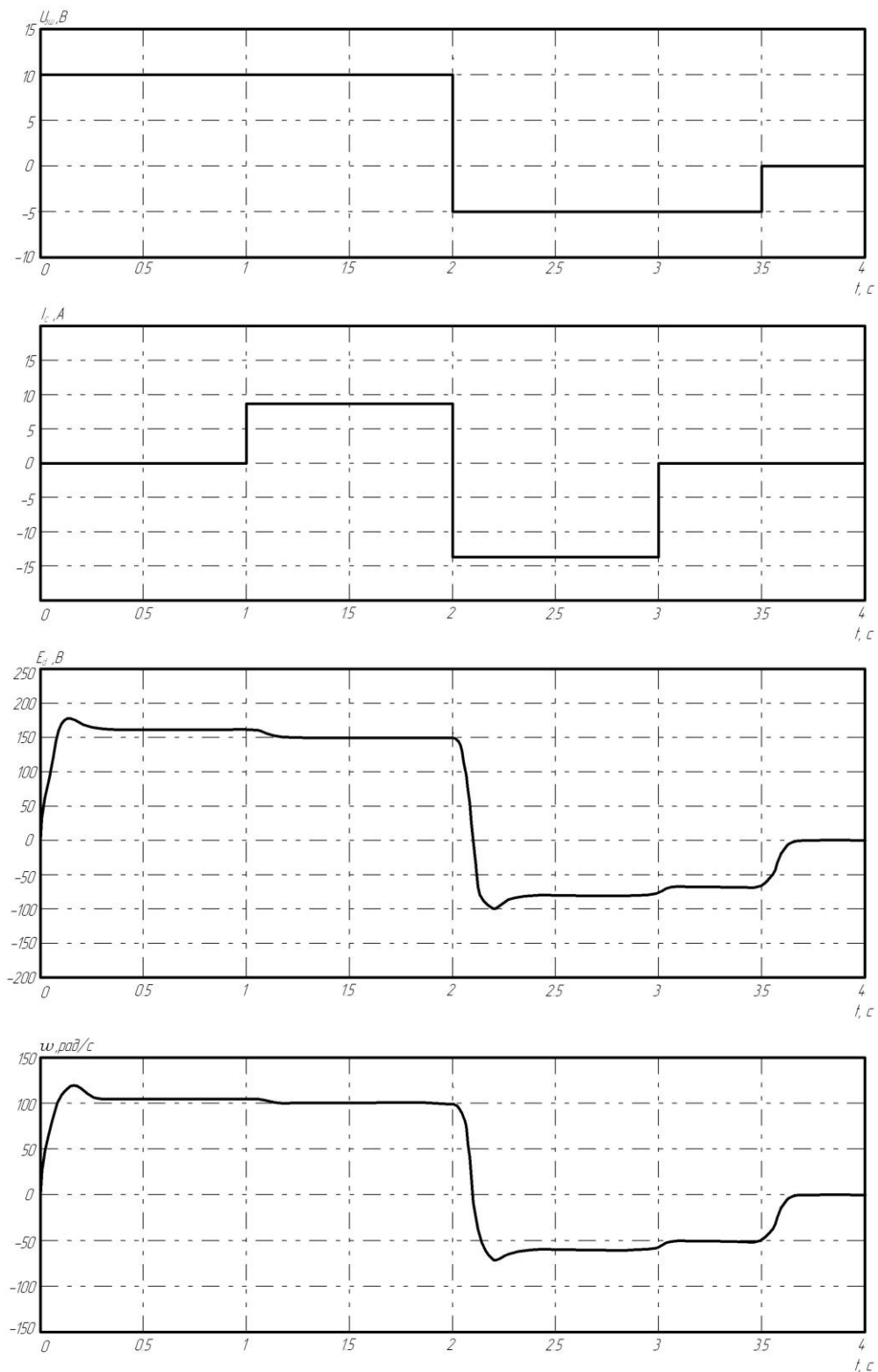


Рисунок 4.12 – Дослідження контуру швидкості

Під час розгону електродвигуна в режимі холостого ходу через обмотку якоря проходить значний динамічний струм, що забезпечує прискорення обертання ротора. Зі збільшенням швидкості та виходом двигуна на сталий режим обертання, величина струму в якорі поступово знижується майже до

нуля, оскільки навантаження ще не прикладене, а статичний струм залишається відсутнім. При підключенні навантажувального моменту через обмотку якоря починає проходити статичний струм, що викликає зниження швидкості двигуна на певну величину $\Delta\Omega$, яка відповідає падінню швидкості під дією конкретного навантаження. Цей процес демонструє статичний характер системи в умовах зовнішніх збурень. У режимі реверсування струм у двигуні різко зростає через стрибок динамічного струму та водночас змінює свій напрямок. Після завершення перехідного процесу реверсу струм зменшується до величини, що відповідає статичному значенню. У випадку зняття навантаження струм у якорі знижується до нуля, а швидкість обертання ротора зростає на величину $\Delta\Omega$, яка раніше спостерігалася при прикладенні навантаження. Далі відбувається процес гальмування двигуна в режимі холостого ходу. У цей період швидкість обертання поступово зменшується до нуля. При цьому в обмотці якоря виникає динамічний струм, який забезпечує перехідний процес гальмування та уповільнення ротора до повної зупинки.

ВИСНОВКИ

У процесі підготовки випускної кваліфікаційної роботи було здійснено комплексну реконструкцію та глибоке вивчення виробничої лінії, призначеної для випуску поліетиленових труб. Задля досягнення оптимальних технічних параметрів і забезпечення стабільної роботи устаткування впроваджено низку технічних і організаційних заходів.

Так, у керувальній підсистемі приводів барабанів застосовано регулювання двигуна постійного струму за методикою ТПЧ-ДПС, що надало можливість більш точно контролювати динамічні характеристики приводу. Для реалізації цього підходу було підібрано та розраховано відповідне джерело живлення, враховуючи параметри силової частини системи електропривода, а також проведено скрупульозний добір і розрахунок захисних компонентів.

Окрім цього, сформовано характеристики перетворювача, оптимізовано контури автоматичного регулювання, визначено швидкісні властивості системи як у замкнених, так і в розімкнених режимах функціонування. Ефективність прийнятих технічних рішень попередньо перевірено за допомогою цифрового моделювання, що дозволило виявити та усунути потенційні недоліки ще до практичної реалізації. В результаті розроблено передову імпульсно-фазну систему управління, спрямовану на підвищення стабільності та продуктивності виробничого процесу.

Для оперативного візуального контролю зміни частоти обертання барабанного механізму було використано індикатор, який наочно демонструє динаміку, не потребуючи високоточного вимірювання. Додатково впроваджено вимірювальний прилад для фіксування споживаного електродвигуном струму, що дозволяє ефективно стежити за навантаженням і вчасно виявляти можливі відхилення.

Задля сталого підтримання температурних режимів у зонах нагрівання преса впроваджено багатоканальний терморегулятор «микроТЕРМ» серії c137.11.01, який забезпечує стабільність термічних параметрів та унеможливорює негативні впливи температурних коливань на якість продукції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Додаток А. Охорона праці