

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Інна НЕФЬОДОВА**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

тема «Електромеханічна система частотного векторного керування рухом
асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БЗ-Е21
(шифр групи)

Костянтин ГЛАДИШЕВ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доц. Борис КОБИЛЯНСЬКИЙ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент роботи

д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Консультант

_____ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) _____
(підпис)

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.	9
2	РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	30
3	РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	39
4	РОЗРАХУНОК ПРИВОДУ	44
5	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	52
6	МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	50
	Висновки	70
	Список використаних джерел	72
	Додатки	75

					ЕМКС 411002 000 ПЗ						
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Гладишев К.М.			Електромеханічна система частотного векторного керування рухом асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.	Літ.	Арк.	Аркушів			
Перевір.		Кобилянський						6			
Т. контр.						БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БЗ-Е21					
Н. Контр.		Кобилянський									
Затверд.		Кузнецов Б.І.									

ВСТУП

У сучасному етапі розвитку технічних засобів та технологічних процесів спостерігається стійка тенденція до зростання вимог щодо точності, стабільності та плавності керування виконавчими механізмами, особливо у режимах низькошвидкісного функціонування. Ці аспекти стають критичними при створенні високотехнологічних виробничих систем нового покоління, де від точності позиціонування та якості регулювання руху безпосередньо залежить успішність виконання технологічних операцій та загальна ефективність виробничого циклу [1].

Одним із фундаментальних обмежень у досягненні високої точності керування електромеханічними системами є недосконалість механічних передавальних ланцюгів, що з'єднують виконавчий електричний двигун з робочим органом. У процесі підвищення смуги пропускання системи керування особливо актуальним стає вплив власних частот механічних коливань трансмісійного ланцюга, які можуть суттєво змінити динаміку системи та призвести до погіршення її стабільності. Ці коливання виникають унаслідок пружних зв'язків між елементами трансмісії – валами двигуна, редуктора та робочого механізму – що унеможливорює застосування спрощеної одномасової моделі та потребує побудови більш складних динамічних моделей з двома, трьома або навіть більшим числом масових елементів.

Крім того, додаткову складність у процес регулювання вносить наявність нелінійних механічних властивостей, зокрема залежність сили тертя від швидкості відносного переміщення контактуючих елементів. Подібна нелінійність найяскравіше виявляється у режимах повзучого руху, що характерні для широкого спектру електромеханічних систем, і може як входити до норми робочих режимів (у деяких видах механізмів), так і розглядатися як аварійна ситуація. Найбільш несприятливими є випадки, коли пружні властивості системи поєднуються з роботою в діапазоні нестійкої зовнішньої характеристики тертя

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(падаюча ділянка), що здатне призвести до розвитку незатухаючих автоколивань або навіть розходження коливальних процесів [1].

У відповідь на виклики, що постають перед розробниками високоточних систем електромеханічного керування, в останні десятиліття значного поширення набули електроприводи змінного струму на базі асинхронних двигунів, а також системи з двигунами постійного струму. В електроприводах змінного струму регулювання виконується переважно шляхом зміни частоти напруги живлення за допомогою частотних перетворювачів, що забезпечує можливість адаптації параметрів руху в режимі реального часу.

Для досягнення оптимальної динамічної реакції системи та підвищення енергоефективності, особливо в умовах високих вимог до якості регулювання, все більшого значення набувають методи векторного (орієнтованого на поле) керування. Ці алгоритми, на відміну від традиційного скалярного частотного керування, дозволяють реалізувати амплітудно-фазове регулювання компонентів струму у статорі асинхронного двигуна, що значно розширює можливості керування моментом та швидкістю двигуна із короткозамкненим ротором. Векторне керування, таким чином, забезпечує не лише підвищену точність регулювання, а й мінімізує енергетичні втрати, що є критично важливим у контексті енергозбереження та ресурсоефективності сучасних виробничих систем [2].

У межах цього дипломного проєкту було здійснено розроблення системи частотного векторного керування для електромеханічного комплексу, в якому реалізується керування асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором. Актуальність теми обумовлена необхідністю усунення коливань у роботі системи та забезпечення стабільної продуктивності, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції. Враховуючи наведені чинники, запропоновані технічні рішення мають потенціал для практичного застосування у широкому спектрі галузей, де пред'являються підвищені вимоги до прецизійного електромеханічного регулювання [3].

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Один із базових методів переробки термопластичних матеріалів, являє собою безперервний технологічний процес, у якому відбувається формування виробів шляхом продавлювання в'язкопластичного або розплавленого полімерного матеріалу через профільюючий формоутворювальний елемент – фільтеру, екструзійну головку чи інший калібрувальний канал. Сутність даного процесу полягає у перетворенні вхідної сировини, що перебуває у високо-в'язкому або напіврідкому агрегатному стані, у готові вироби з попередньо визначеною геометрією поперечного перерізу [3].

Завдяки властивості полімерних матеріалів набувати пластичності під дією температури та тиску, екструзійна технологія дозволяє з високою точністю відтворювати складні контури виробів, що особливо важливо у виробництві профілів, труб, плівок, ізоляційних покриттів тощо. Зазвичай вихідний матеріал характеризується підвищеним коефіцієнтом внутрішнього тертя та значною в'язкістю, що вимагає стабільного режиму термомеханічного оброблення, а також ретельного контролю параметрів подачі, температури нагріву, тиску продавлювання та швидкості витікання через екструзійний канал.

Таким чином, екструзія виступає не лише способом формоутворення, а й складним фізико-технічним процесом, у якому переплітаються гідродинамічні, теплофізичні та механічні явища, а якість кінцевого продукту значною мірою залежить від точності підтримання процесних параметрів на всіх етапах проходження матеріалу крізь технологічну систему [3].

Процес видавлювання, більш відомий у технічній літературі як екструзія, можна охарактеризувати як складний багатофакторний фізико-хімічний та термомеханічний процес, що реалізується під дією комплексу чинників, зокрема механічного тиску, підвищеної температури, а також вологісного режиму середовища. У ході екструзійної обробки початкова сировина зазнає інтенсивного нагрівання, яке здійснюється як за рахунок зовнішніх джерел тепла,

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

так і шляхом виділення енергії в результаті внутрішнього тертя та пластичної деформації матеріалу під дією зусиль продавлювання.

Функціональними параметрами, що визначають ефективність і кінцеву якість екструзійного процесу, виступають змінні характеристики сировинного матеріалу – зокрема його хімічний склад, температура, тиск, а також інтенсивність впливу у зоні переробки. Врахування та точне регулювання цих параметрів є критично важливими для забезпечення стабільності технологічного режиму та відтворюваності характеристик кінцевої продукції.

Залежно від температурного режиму та технологічних цілей, екструзію класифікують на метод формування, або термомеханічну обробку, а також гарячу, яка передбачає значне попереднє нагрівання матеріалу. Зокрема, метод гарячої екструзії дозволяє ефективно обробляти полімерні матеріали з високою в'язкістю, забезпечуючи рівномірність структури та стабільність геометричних параметрів виробу [4].

Як і лиття під тиском, екструзія належить до числа найбільш поширених і універсальних методів переробки полімерів, що активно застосовується в різних галузях промисловості. Практично всі типи полімерних матеріалів, включаючи термопласти, можуть піддаватися екструзійній обробці, завдяки чому технологія набула широкого розповсюдження як у галузі полімерного виробництва, так і в харчовій, фармацевтичній, будівельній та електротехнічній промисловості.

Зокрема, у харчовій промисловості екструзія є базовою технологією для виготовлення макаронних виробів. У сфері полімерної переробки метод широко застосовується для отримання трубопровідних складових, плівкових покриттів, захисних оболонок для кабелів, елементів оптичних пристроїв, виробів з гуми технічного призначення, а також феритових компонентів і інших спеціалізованих деталей [3].

Особливе значення екструзійні технології набули у виробництві теплоізоляційних матеріалів, зокрема екструзійного пінополістиролу (XPS). Завдяки своїм високим теплоізоляційним властивостям, низькому

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водопоглинанню та стабільності розмірів, цей матеріал широко використовується в будівництві: ізоляції фундаментів будівель, захисту залізничних колій від вологи та агресивних впливів, а також для гідроізоляції бетонних конструкцій різного призначення, а також у дорожньому будівництві. Використання XPS дозволяє істотно знизити ризики деформації ґрунтових основ, пов'язані з промерзанням і сезонними коливаннями температури, що позитивно позначається на довговічності об'єктів інфраструктури.

Для глибшого розуміння термомеханічних аспектів поведінки полімерних матеріалів у процесі екструзійної обробки доцільно зосередити увагу на аналізі функціонування одношнекового екструдера при переробці сировини. Цей тип технологічного обладнання, завдяки своїй конструктивній лаконічності, високому ступеню надійності та стабільності параметрів роботи, є одним із найпоширеніших у сучасній полімерній промисловості [4].

Сутність технологічного процесу полягає у якому тверда гранульована сировина плавно переходить у однорідний розплав полімеру, придатний до подальшого формування виробів. Це досягається за рахунок дії механізмів, серед яких ключову роль відіграють нагрівання циліндра, а також розвиток тиску у каналі. У результаті відбувається транспортування, нагрівання, плавлення, дегазація, компресія та гомогенізація полімерного матеріалу до стану, що відповідає умовам формування виробу на виході з фільери.

Конструкція одношнекового екструдера передбачає поділ матеріального циліндра на три зони, кожна з яких виконує специфічні технологічні завдання [3]:

1. Зона завантаження (зона подачі) — є початковою частиною екструдера, де відбувається надходження полімерних гранул із бункера в простір між шнеком і циліндром. На цьому етапі матеріал піддається лише незначному механічному ущільненню без активного нагрівання, оскільки для запобігання злежуванню а також злипанню температура підтримується нижчою за температуру розм'якшення полімеру.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Зона компресії (зона пластифікації або ущільнення) — розташована в середній частині екструдера, і саме в ній відбувається інтенсивне теплофізичне впливання на матеріал полягає у нагріванні, що супроводжується механічним зсувом. Під дією підвищеної температури та деформації полімер плавно переходить у високолегкий в'язкоподібний стан. У цій фазі відбувається його розплавлення, зменшення об'єму повітряних бульбашок та початкове вирівнювання структури розплавленого матеріалу, що сприяє формуванню однорідної маси.. Конструктивно ця зона характеризується зменшенням глибини каналу шнека, що сприяє підвищенню тиску та інтенсифікації тепловіддачі.

3. Зона дозування (зона гомогенізації) — заключна ділянка робочої частини екструдера, призначена для заключний етап полягає у досягненні рівномірного розподілу температури та стабілізації реологічних властивостей полімерного розплаву. Це забезпечує однорідність матеріалу та його оптимальні характеристики для подальшої обробки або формування. У цій зоні полімерний матеріал доводиться до оптимального рівня в'язкості та тиску перед подачею у формуючий вузол – фільтру. Стабільність параметрів у цій зоні критично важлива для забезпечення рівномірності товщини, щільності та структурної однорідності кінцевого виробу.

Таким чином, виконує унікальні й взаємодоповнюючі функції, і лише за умови їх оптимальної взаємодії можливо досягти продукції. Навіть незначні відхилення у температурному режимі, швидкості обертання шнека або гідравлічному опорі каналу можуть призвести до порушень, таких як формування дефектних зон, неоднорідна текстура, наявність мікропухирців або інші небажані відхилення у морфології виробу.

Одним із ефективних шляхів істотного підвищення продуктивності екструзійного обладнання є використання спец-х механізмів коли матеріал подається з бункерного живильника безпосередньо у зону завантаження матеріального циліндра. Застосування таких пристроїв дозволяє збільшити швидкість, зменшити ймовірність утворення повітряних пустот, а також

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечити стабільність в умовах високопродуктивної переробки. Це, в свою чергу, сприяє не лише зростанню об'ємної продуктивності екструдера, але й покращенню усіх необхідних хар-к у подальших зонах шнека, що є критично важливим для якості кінцевих виробів [3].

У процесі тривалої безперервної експлуатації екструзійного обладнання може виникнути перегрівання у зоні взаємодії бункера з матеріальним циліндром, особливо в області під воронкою завантажувального пристрою. Такий температурний дисбаланс, як правило, обумовлений недостатньою ефективністю тепловідведення в цій частині системи. Унаслідок цього гранульована сировина, що перебуває у верхній зоні циліндра, може змінювати свою форму, утворюючи закупорки, які перешкоджають нормальній роботі приладу. Такий ефект призводить до зниження продуктивності машини та, у крайніх випадках, до повного припинення екструзійного процесу.

Одним із фундаментальних аспектів, що визначає ефективність та стабільність функціонування процесу екструзійної переробки полімерних матеріалів, є ретельний контроль і оптимізація основних технологічних параметрів екструзійної системи. До числа таких параметрів, що мають критичне значення для формування якісного та стабільного розплаву, відносять температурний розподіл уздовж робочих зон матеріального циліндра, гідродинамічний тиск розплавленої полімерної маси у відповідних технологічних секціях агрегату, температурні умови функціонування екструзійної головки, а також режим охолодження сформованого профілю на виході з фільтри [5].

Кожен із перелічених факторів суттєво впливає на динаміку теплообміну, структурно-реологічну однорідність полімерного розплаву, його в'язкісно-температурну стабільність, а отже — на точність геометричних параметрів та якість поверхні готового виробу. Навіть незначні відхилення в одному з параметрів можуть викликати локальні дефекти, варіації товщини або втрату оптичних і механічних властивостей виробу.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поряд з цим, вагоме значення має конструктивно-технологічна конфігурація шнекового вузла екструдера, зокрема його геометричні характеристики та кінематичні режими роботи. До основних параметрів гвинтового шнека належать зовнішній діаметр, загальна довжина, кут нахилу витків, співвідношення довжини до діаметра (L/D), форма і глибина каналу транспортування, а також зональна структура – зокрема конфігурація зон подачі, компресії та дозування. Частота обертання шнека визначає не лише швидкість переміщення полімерної маси, а й інтенсивність тертя, зсуву та дисипації теплової енергії в об'ємі розплаву [4].

Ці характеристики є ключовими при проєктуванні екструдерів для забезпечення високої продуктивності, якісної дегазації, рівномірного прогріву і гомогенізації полімерної маси. Системна взаємодія конструктивних і технологічних чинників обумовлює стабільність процесу, дозволяє мінімізувати енергетичні витрати й забезпечує відтворювану якість продукції при переході від лабораторного до промислового масштабу. З практичної точки зору, саме ці параметри визначають адаптивність екструзійної лінії до переробки полімерів із різними термореологічними властивостями, а також її здатність функціонувати в умовах змінного навантаження та температурного середовища.

У контексті сучасної хімічної промисловості екструзійна технологія посідає одне з провідних місць серед методів переробки матеріалів, завдяки своїй багатофункціональності, надійності та здатності забезпечувати стабільну якість продукції. Суть цього процесу полягає у поетапному перетворенні твердого матеріалу в пластичну масу шляхом контрольованого теплового впливу. Перш за все, сировина піддається нагріванню до заданої температури, після чого відбувається її пластифікація — перехід у стан з підвищеною текучістю. Наступним етапом є гомогенізація, під час якої склад речовини вирівнюється по всій масі, що запобігає виникненню дефектів у готовому виробі. Завершується процес формуванням необхідної геометрії за допомогою продавлювання

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розм'якшеного матеріалу через спеціальний формувальний елемент — екструзійну головку [3].

Важливим аспектом, що вирізняє екструзію серед інших методів, є незмінність хімічного складу матеріалу під час обробки. Інакше кажучи, хімічна структура вихідної сировини зберігається в остаточному виробі без перетворень чи реакцій. Така стабільність дозволяє значно спростити технічне обслуговування обладнання та уникнути необхідності постійних налаштувань при зміні партії сировини, що позитивно позначається як на економічних показниках виробництва, так і на повторюваності якості продукції.

Завдяки широким можливостям екструзії хімічна промисловість отримала доступ до виготовлення численних виробів з термопластичних матеріалів. Серед них — трубна продукція різного діаметру для інженерних мереж, листи і плівки для пакувальної, будівельної та сільськогосподарської галузей, захисні покриття кабельної продукції, елементи для телекомунікаційних та оптичних систем. Окремої уваги заслуговують вироби зі складними перерізами, які виготовляються з використанням багатокомпонентних полімерних сумішей [5].

Підсумовуючи, слід зазначити, що екструзійна технологія виступає критично важливою складовою процесів переробки в хімічній промисловості, оскільки забезпечує високу швидкість виробництва, контроль якості на кожному етапі, а також економічну ефективність при виготовленні широкого спектру полімерних виробів. Її гнучкість і надійність роблять її незамінною для підприємств, орієнтованих на стабільний випуск продукції з прогнозованими експлуатаційними характеристиками.

Це є центральним елементом технологічного комплексу, призначеного для формування виробів із термопластичних матеріалів шляхом продавлювання їх крізь спеціальну формуючу головку. Такий агрегат забезпечує безперервний виробничий процес, у ході якого сировина піддається низці термомеханічних перетворень, що призводять до надання їй необхідної геометрії та фізико-механічних характеристик [3].

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструктивно екструдер складається з декількох ключових підсистем, які спільно забезпечують стабільну та ефективну роботу обладнання. Кожен функціональний модуль виконує свою специфічну задачу в ланцюжку обробки [5]:

1. Шнековий механізм — є основним робочим органом екструдера. Він може мати один або два шнеки, розміщені у термостабілізованому циліндрі, які здійснюють транспортування, розплавлення та змішування матеріалу. Система забезпечена нагрівальними елементами (ТЕНами), термодатчиками (термопарами), кожухами для термоізоляції та вентиляційною або рідинною системою охолодження, що дозволяє точно підтримувати оптимальний температурний режим у різних зонах обробки.

2. Редуктор із підшипниковим вузлом — виконує функцію передавання обертового моменту від приводу до шнека з відповідним зниженням частоти обертання. Конструктивна точність і міцність редуктора забезпечують його роботу у важких умовах з високим крутним моментом.

3. Асинхронний електродвигун — виконує роль приводу для шнекового вузла, забезпечуючи стабільне обертання незалежно від зміни навантаження. Завдяки високому ККД, надійності та тривалому ресурсу експлуатації, асинхронні двигуни широко використовуються в екструзійних установках.

4. Система управління — включає електронний або цифровий пульт контролю, який дає змогу оператору задавати і відслідковувати робочі параметри: температуру по зонах, швидкість шнека, тиск у зоні подачі, витрату електроенергії тощо. Сучасні екструдери часто мають автоматизовані системи керування з графічними інтерфейсами, дистанційним моніторингом і можливістю збереження технологічних карт.

5. Опорна конструкція (рама) — виконує несучу функцію, забезпечуючи стійкість усієї установки та ефективне гасіння вібрацій під час її роботи. Міцна металева станина унеможливорює деформації агрегата під час тривалих навантажень.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Екструдери є невід’ємною частиною екструзійних виробничих ліній, які орієнтовані на масове виготовлення виробів із полімерів. Серед продукції, яку виготовляють за допомогою екструзії, — гнучкі та жорсткі труби, плівкові матеріали, панелі, профілі різної складності, захисні покриття кабельної продукції та інші елементи, що активно використовуються у будівельній галузі, приладобудуванні, телекомунікаціях і сфері споживчої упаковки [3].

У сучасному виробничому середовищі активно впроваджуються різноманітні типи екструзійних установок, що відрізняються як за конструкційними характеристиками, так і за технологічним призначенням. Класифікація екструдерів здійснюється відповідно до специфіки оброблюваних матеріалів і форми готової продукції. Зокрема, широкого поширення набули багатошнекові установки — як з паралельним, так і з конічним розташуванням шнеків. Вони демонструють підвищену ефективність при обробці композиційних сумішей завдяки інтенсивнішому змішуванню компонентів і кращій дегазації [4].

Видувні екструдери, у свою чергу, орієнтовані на виробництво тонкостінних порожнистих виробів, серед яких домінують пластикові контейнери, пляшки та резервуари. Для виготовлення гнучких пакувальних матеріалів використовуються плівкові лінії, які забезпечують високоточне формування плівок шляхом витягування розплаву через кільцеву щілину з подальшим охолодженням. Особливу нішу займають трубні, які дозволяють виробляти труби з чітко заданими геометричними параметрами, термостійкістю та механічною міцністю, що критично важливо для будівництва, водопостачання та інженерних комунікацій.

Серед широкого спектру обладнання, призначеного для процесу екструзії, найбільш розповсюдженими і водночас універсальними пристроями є одношнекові екструдери. Вони займають ключове місце як у базових, так і у високотехнологічних екструзійних лініях, забезпечуючи надійну основу для виробництва різноманітної продукції з термопластичних матеріалів. Завдяки своїй конструкції, ці агрегати успішно застосовуються для створення полімерних

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плівок, листових заготовок, трубопровідних виробів, а також профільних елементів з різними геометричними формами. Таким чином, одношнекові екструдери забезпечують гнучкість і ефективність у виробничих процесах, що робить їх незамінними у багатьох промислових секторах [5].

Одним із найважливіших напрямів удосконалення конструкції одношнекових екструдерів є використання бар'єрних шнеків, які завдяки особливій формі та геометрії шнека сприяють ефективнішому розділенню твердих частинок сировини від розплавленої фази полімеру. Такий дизайн забезпечує більш ефективний теплообмін між внутрішніми стінками циліндра та полімерною масою, що суттєво підвищує продуктивність обладнання. Внаслідок цього покращується якість кінцевого продукту, а також збільшується стабільність технологічного процесу, навіть при інтенсивних режимах роботи [5].

Крім того, оптимізація завантажувальної зони шнека, включаючи застосування спеціальних видів нарізки — як прямолінійної, так і спіралеподібної — дозволяє значно покращити подачу сировини в екструдер. Це зменшує опір матеріалу під час просування, знижує ризик утворення забруднень і засмічень у механізмі, що в цілому підвищує надійність та стабільність роботи агрегату. Важливим аспектом енергозбереження в даному контексті є впровадження водяної системи охолодження у зоні завантаження, яка підтримує оптимальний температурний режим, що сприяє рівномірній пластифікації матеріалу навіть за умов значних навантажень.

Завдяки комплексному впровадженню зазначених технічних рішень, одношнекові екструдери демонструють не лише високу продуктивність, але й суттєве зниження питомих витрат енергії, а також довготривалу експлуатаційну надійність. Це робить їх незамінним інструментом у серійному виробництві різноманітних виробів із полімерних матеріалів, охоплюючи широкий спектр промислових галузей — від пакувальної індустрії до будівельної сфери [3].

Двошнекові екструзійні машини традиційно поділяються на дві основні категорії — конічні та паралельні пристрої, кожна з яких відзначається

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

унікальними конструктивними особливостями та призначена для специфічних виробничих задач. Конічні двошнекові екструдери здебільшого застосовуються для переробки полівінілхлориду (ПВХ), який надходить у вигляді гранул або порошкоподібної сировини. Ці агрегати спеціально оптимізовані для виготовлення профільних виробів з ПВХ, де ключовою їх перевагою є здатність створювати високий робочий тиск. Це забезпечує ефективне і глибоке змішування та однорідне розплавлення полімерної маси навіть при відносно коротких циклах виробництва [5].

Особливістю конічних моделей двошнекових екструдерів, що працюють з ПВХ, є зустрічне обертання шнеків. Такий принцип роботи дозволяє максимально ефективно подавати матеріал у внутрішню порожнину циліндра, одночасно зменшуючи рівень внутрішнього тертя. В результаті цього полімерна суміш не перегрівається, що запобігає деградації матеріалу та підтримує стабільність процесу. Температура всередині циліндра ретельно регулюється за допомогою спеціалізованих систем контролю, що дає змогу підтримувати оптимальні параметри термообробки, необхідні для якісного формування продукції. Для автоматизації процесу подачі сировини у такі екструдери використовують спеціальні шнекові завантажувачі, які підвищують загальну продуктивність лінії і роблять технологічний процес більш безперервним. Крім того, виробниче обладнання може бути доповнене різноманітними системами керування, сушильними бункерами та іншими елементами, які підбираються відповідно до вимог конкретного виробництва [5].

Паралельні двошнекові екструдери відрізняються своїм призначенням — вони ефективні там, де потрібно змішувати кілька різновидів полімерів або композитних матеріалів. У конструкції цих машин передбачена система охолодження за допомогою рідини, що дає можливість точно і стабільно регулювати температуру розплаву, враховуючи особливості конкретної сировини. Використання комплектних шнеків, а також спеціалізованих елементів для розподілу і змішування матеріалу, надає цьому виду обладнання гнучкість у

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

налаштуванні під різні рецептури полімерних сумішей. Завдяки цьому паралельні екструдери широко застосовуються у виробництві складних композиційних матеріалів [6].

Що стосується поршневих (або безшнекових) екструдерів, їх використання обмежене і здебільшого пов'язане з матеріалами, які потребують особливих умов переробки. Ці машини характеризуються низькою ефективністю у пластифікації та обмеженим рівнем тиску, тому зазвичай застосовуються для обробки політетрафторетилену (ПТФЕ) — матеріалу, що має специфічні фізико-хімічні властивості. Поршневі екструдери відзначаються складною конструкцією, значними виробничими вимогами щодо площі і високими експлуатаційними витратами, що суттєво зменшує їх поширення у серійному виробництві.

Принцип функціонування екструдера можна уявити як послідовність кількох фундаментальних операцій. На першому етапі полімерна сировина подається у приймальний відсік машини, де вона заповнює проміжки між витками шнека — так звані пазухи. Поступово, у міру надходження нових порцій матеріалу, раніше завантажена сировина ущільнюється, що сприяє більш організованому та компактному руху матеріалу. Наступним кроком є обертання шнека, що спрямовує полімер у бік зони пластифікації, де під дією температури і механічного впливу сировина плавиться і переходить у пластичний стан. У цей момент відбувається інтенсивне перемішування розплаву, що забезпечує однорідність матеріалу і підготовку до подальшого формування [5].

Прогресуючи вздовж робочої камери, ущільнений полімер утворює щільну пробку, яка ковзає вздовж шнека, спричиняючи зростання робочого тиску всередині екструзійної системи. Цей тиск необхідний для подолання опору фільтрувальних сіток, що виконують роль бар'єра для сторонніх частинок, а також для проштовхування розплавленого матеріалу через формуючий пристрій, який надає виробу остаточну форму і розміри. На виході полімер повністю однорідний і витискається через формувальну голівку, забезпечуючи стабільність профілю готового продукту.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні екструзійні пристрої можуть працювати за різними технологічними схемами — від сухої або холодної екструзії до процесів, що передбачають теплову чи гарячу обробку матеріалу. Точний механізм роботи екструдера залежить від обраної технології та специфіки сировини, що обробляється [3].

Варіації конструкції екструдерів проявляються у різних технічних рішеннях: кількість і конфігурація робочих камер, типи приводів, системи подачі сировини, а також наявність і функціональність допоміжних модулів, що значно розширюють технологічні можливості обладнання. Ці параметри суттєво впливають на ефективність, якість обробки матеріалу та адаптивність установки до різноманітних виробничих завдань у промисловості.

Основна робоча частина подібного обладнання формується з набору шнеків, які послідовно встановлені в корпусі та розділені спеціальними підпірними шайбами. Для надійної фіксації кожен шнек разом із шайбою закріплюються на шпильці за допомогою болта, оснащеного конусною головкою. Внутрішня поверхня корпусу робочої зони обладнана поздовжніми канавками, що служать для запобігання обертальному руху сировини під час її транспортування вздовж шнека. На виході корпусу розміщена конусна гайка із спеціальним отвором, за допомогою регулювання зазору між конічними деталями болта і гайки можливо ефективно контролювати температуру полімерного матеріалу під час його обробки [5].

Серед усіх типів екструзійного обладнання найбільш поширеними та універсальними в промисловості вважаються шнекові екструдери. Основне призначення шнека полягає в захопленні сировини і транспортуванні її від зони завантаження до кінця екструзійного корпусу. У процесі такого переміщення матеріал проходить кілька стадій: на початковому етапі він ущільнюється, потім нагрівається, переходить у пластичний стан і, нарешті, досягає рівня повної гомогенізації. Конструктивно такі машини можуть бути як зі стаціонарним корпусом, так і оснащені системою його обертання. Крім того, шнек може бути

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміщений як горизонтально, так і вертикально, що залежить від специфіки технологічного процесу.

Для покращення якості змішування і підвищення інтенсивності обробки полімерного матеріалу, на робочій поверхні шнека монтують спеціальні допоміжні елементи — зубці, диски, кулачки, шліци та інші пристосування. Вони сприяють ефективнішому подрібненню, більш рівномірному змішуванню і прискореному транспортуванню сировини всередині робочої камери екструдера.

Двошнекові екструзійні пристрої з системою самоочищення відзначаються швидким запуском обертових валів і здатністю працювати на підвищених частотах обертання, що значно підвищує їх продуктивність. Завдяки особливій конструкції шнеків, яка виключає застій полімерної сировини в робочих камерах, ці агрегати забезпечують плавний і безперервний рух матеріалу, завдяки чому рідко спостерігається різке підвищення тиску в процесі екструзії. Це особливо важливо у виробництві тонкостінних труб і плівок, де стабільність тиску впливає на якість готової продукції [3].

Навпаки, одношнекові екструдери мають тенденцію до накопичення матеріалу у вигинах шнека, що часто викликає коливання робочого тиску та створює додаткові труднощі при подачі сировини. Такий феномен проявляється, наприклад, при виробництві щільних профільних виробів, де відсутність плавного руху матеріалу може призводити до дефектів готових деталей або зниження стабільності технологічного процесу. Накопичення полімерної маси у шнеку викликає локальні підвищення опору, що змушує обладнання працювати з додатковими навантаженнями, інколи потребуючи зупинки для очищення [6].

Отже, двошнекові установки із самоочищенням є переважними у випадках, коли важлива безперервність і стабільність виробничого циклу, особливо у галузях з високими вимогами до якості та однорідності кінцевого продукту.

Екструзійний процес включає послідовне нагрівання і транспортування полімерного матеріалу за допомогою обертового шнека, який розміщений всередині циліндричного корпусу машини. Цей корпус поділяється на кілька

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціональних зон: ділянку подачі сировини, зону її плавлення (пластифікації) та ділянку дозування, де готовий матеріал видається у потрібній формі.

На початковому етапі роботи — в зоні подачі — гранульований або порошкоподібний полімер потрапляє у простір між витками шнека. Тут сировина ущільнюється, що забезпечує рівномірний і безперебійний рух матеріалу далі по екструдері. Цей етап важливий для стабільної роботи обладнання і запобігає утворенню повітряних прошарків.

Наступна стадія — зона пластифікації — полягає у поступовому розігріванні полімеру до стану, коли він переходить із твердого агрегату в в'язкотекучий розплав. Нагрівання відбувається переважно за рахунок тертя і контакту матеріалу з внутрішньою стінкою циліндра. У цій зоні сировина не тільки плавиться, але й активно перемішується, що сприяє однорідності розплаву та підвищенню якості кінцевого продукту. Між зоною подачі і зоною пластифікації формується ущільнена ділянка — так звана «пробка», яка рухається разом із шнеком. В цій області спостерігається різке збільшення тиску, що необхідне для подолання опору в системі і подальшого просування полімерної маси до виходу [3].

Отже, сировина на початковому етапі перебуває у твердому стані, а далі вона переходить у розплавлений, пластичний стан, готовий до формування у задану конфігурацію на виході екструдера.

Умовний поділ циліндра екструдера на функціональні ділянки відображає різні ролі, які виконують окремі сегменти шнека під час роботи. Водночас циліндр оснащується системами нагрівання, межі яких можуть не збігатися з межами зон, встановлених за шнеком. Такий підхід забезпечує більш точне та гнучке регулювання температури в різних частинах камери, що сприяє оптимізації процесу обробки матеріалу та підвищенню якості кінцевого продукту [3].

Серед ключових переваг екструзійного обладнання вирізняються висока продуктивність та економічна доцільність експлуатації, що зумовлює його

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

широке впровадження у промислових процесах. Такі машини характеризуються інтуїтивно зрозумілим управлінням, швидким налаштуванням і незначною складністю при введенні в експлуатацію, що зменшує час простоїв і пришвидшує старт виробництва.

Механічна конструкція екструдерів відзначається підвищеною стійкістю до зношування, що сприяє тривалому терміну служби без необхідності в частому технічному обслуговуванні. До того ж, витрати на експлуатацію залишаються помірними, що дозволяє ефективно контролювати виробничий бюджет [4].

Запуск екструдера зазвичай не потребує великої кількості обслуговуючого персоналу — достатньо обмеженої кількості кваліфікованих працівників, що дозволяє скоротити кадрові витрати. Завдяки модульному принципу побудови і різним конфігураціям, обладнання може бути адаптоване до виготовлення найрізноманітнішої продукції — від трубопровідних систем і плівкових матеріалів до компонентів для машинобудування чи побутового вжитку [3].

Наприклад, у компаніях, що спеціалізуються на випуску будівельних термопрофілів, застосування сучасного екструзійного устаткування дає можливість виготовляти високоякісні вироби з мінімальними витратами на енергію, сировину та обслуговування, забезпечуючи при цьому стабільність розмірів і міцність готової продукції.

Ці техніко-економічні характеристики роблять екструдери універсальним інструментом для багатьох галузей, включаючи хімічну, харчову, полімерну промисловість, а також виробництво будівельних і пакувальних матеріалів.

Сучасні екструзійні системи з функцією дегазації відіграють важливу роль у видаленні небажаних летких компонентів із розігрітої полімерної маси. Основна мета цього процесу — усунення залишкових мономерів, низькомолекулярних домішок або розчинників, які можуть негативно впливати на стабільність та якість кінцевого продукту. Такий тип обробки особливо актуальний у виробництві термопластичних композицій, де хімічна чистота матеріалу має принципове значення [7].

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У конструкційному плані дегазаційний екструдер зазвичай організований таким чином, що завантаження сировини здійснюється з боку приводу гвинтового механізму. Матеріал поступово транспортується по довжині робочої камери, при цьому в одній із її зон створюються умови для активного вивільнення газів. Це досягається або відкриттям відповідного отвору до атмосфери, або шляхом підключення вакуумної системи, яка знижує тиск у заданій ділянці каналу.

Ключову роль у підвищенні ефективності дегазації відіграє профілювання шнека — особливо в зоні, де знижується тиск. Збільшення глибини гвинтової канавки надає об'єму для розширення розплаву, що сприяє інтенсивнішому випаровуванню летких домішок і покращеному газовідведенню.

Яскравим прикладом є виготовлення полімерів технічного призначення, наприклад, ПЕТ-гранулятів або компаундів на основі поліаміду, які у своєму складі не повинні містити залишкових летких фракцій. У таких випадках дегазаційна обробка дозволяє отримати стабільний за характеристиками продукт, придатний для відповідальних сфер, включаючи медичне та харчове виробництво [7].

У процесі довготривалої експлуатації екструзійного обладнання необхідно враховувати, що електричні двигуни, особливо при роботі в умовах підвищених навантажень, мають схильність до накопичення забруднень. Це явище особливо виражене під час переробки матеріалів, зокрема пластифікованого ПВХ, що має властивість утворювати липкий осад. Такий наліт може серйозно порушити теплообмін між компонентами двигуна, спричинити його перегрів і, як наслідок, знизити енергоефективність або навіть призвести до електричної пробіи.

Під час огляду та технічного контролю електродвигуна важливо ретельно перевірити внутрішній простір корпусу на предмет накопичення пилу, липких залишків чи інших забруднюючих речовин. Якщо модель двигуна не обладнана примусовим повітряним охолодженням, а має закриту конструкцію, ризик утворення критичних відкладень значно зростає [5].

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадках, коли передача крутного моменту до шнека здійснюється за допомогою ремінної системи, особливу увагу слід приділяти стану приводного ремня. Правильне регулювання натягу ремня є ключовим фактором стабільної роботи — оптимальним вважається прогин у межах приблизно 12 мм (0,5 дюйма). Регулярний візуальний контроль ременів повинен включати перевірку на предмет появи мікротріщин, зношення або часткового руйнування поверхні.

При виявленні дефектів необхідно своєчасно здійснювати заміну всього комплекту ременів, щоб уникнути дисбалансу в роботі системи. Установка лише одного нового елемента в старий комплект може призвести до нерівномірного навантаження на привід. Також варто враховувати, що нові ремені потребують додаткового регулювання після початкового періоду експлуатації — зазвичай це перші 3–4 тижні роботи. Це дозволяє компенсувати природне подовження ременів під навантаженням і гарантує їхню стабільну роботу в подальшому [3].

Однією з ключових вимог до приводу екструзійного обладнання є здатність забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості обертання шнека без істотного зменшення крутного моменту. Така характеристика має критичне значення у зв'язку з необхідністю адаптації режимів обробки до властивостей конкретного полімерного матеріалу. Наприклад, термочутливі полімери потребують роботи на знижених обертах, тоді як більш термостійкі компаунди можуть перероблятися при вищих швидкостях, що підвищує продуктивність процесу [7].

У сучасному промисловому застосуванні використовуються декілька основних типів приводів, які інтегруються в конструкцію екструдера [3]:

- Асинхронні двигуни змінного струму, що працюють у поєднанні з частотними перетворювачами. Такі системи дозволяють здійснювати як ступінчасте, так і плавне регулювання частоти обертання, забезпечуючи гнучкість керування та високу енергоефективність.
- Двигуни постійного струму застосовуються у випадках, коли потрібна стабільна характеристика крутного моменту при зміні швидкості

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертання. Вони є оптимальними для технологій, що потребують високої точності дозування та сталість навантаження, зокрема при роботі з високов'язкими або термочутливими полімерними композиціями.

- Гідравлічні системи приводу зазвичай використовуються в екструдерах великої потужності або спеціального призначення. Вони здатні забезпечувати значний крутний момент навіть при низьких обертах, однак мають меншу енергоефективність порівняно з електроприводами та потребують складнішого технічного обслуговування.

Як приклад практичного використання можна навести виробництво виробів із поліетилену високої щільності (HDPE), де ефективно застосовуються електроприводи з інверторним керуванням. Таке рішення дозволяє точно налаштовувати швидкість обертання шнека в межах 10–120 обертів на хвилину, забезпечуючи стабільний тепловий режим і відповідність реологічних властивостей розплаву технологічним вимогам [3].

У конструкції панелі управління екструдера, як правило, передбачено встановлення амперметра — вимірювального приладу, що дозволяє оперативно фіксувати силу струму, яку споживає електродвигун у поточному режимі роботи. Хоча цей показник надає уявлення про завантаження приводу, він не дозволяє точно оцінити величину фактичного енергоспоживання. Для таких цілей значно ефективнішим є використання ватметра, однак через складність інтеграції або недостатню поширеність в умовах серійного виробництва цей засіб контролю застосовується рідко.

Більшість сучасних екструдерів додатково оснащуються тахометрами, які слугують для вимірювання та відображення частоти обертання шнека. Це є критично важливим для підтримання технологічного балансу — особливо в умовах переробки матеріалів, чутливих до зміни швидкості зсуву чи температурного режиму [5].

Ключовим етапом як при придбанні, так і при проектуванні екструзійного обладнання є узгодження між конструктивними параметрами шнека (зокрема

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

його діаметром), максимально допустимою швидкістю обертання та номінальною потужністю приводу. Помилкове рішення, наприклад — встановлення двигуна надмірної потужності при використанні шнека малого діаметра — може призвести до технологічних ризиків: підвищеного тепловиділення, нерівномірної подачі розплаву, надмірного енергоспоживання або навіть механічних пошкоджень привідного вузла [6].

Отже, техніко-економічна обґрунтованість вибору параметрів приводу екструдера повинна базуватись на системному аналізі експлуатаційних вимог, властивостей полімерної сировини та режимів обробки. Такий підхід гарантує стабільну роботу обладнання з високою енергоефективністю та тривалим ресурсом експлуатації.

Висновок

В рамках проведеного комплексного аналітичного дослідження було здійснено всебічне ознайомлення із ключовими принципами та фундаментальними аспектами процесу екструзії, а також детальне вивчення основоположних термінів і понять, що безпосередньо відносяться до даної технології. Особливу увагу у цій бакалаврській роботі було зосереджено на екструзії полімерних матеріалів, що обумовлено унікальними характеристиками та специфічними особливостями цього напрямку, які чітко відрізняють його від технологій обробки інших видів сировини та матеріалів.

З урахуванням зазначеного, проведено ґрунтовний аналіз реологічної поведінки полімерних речовин під час їх проходження через шнекову систему екструдера, що є ключовим фактором, який визначає якість і стабільність виробничого процесу. Було детально досліджено вплив різноманітних технологічних параметрів та зовнішніх чинників на характеристики переробки, що безпосередньо впливають на кінцеві властивості отриманих виробів.

Окрему увагу приділено технічним характеристикам та вимогам до електроприводів (ЕП), що забезпечують безперебійну та ефективну роботу

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екструзійного обладнання. Також було проаналізовано ключові аспекти, пов'язані з технічним обслуговуванням, експлуатаційною надійністю і довговічністю екструдерів, що має велике значення для підвищення продуктивності та зменшення ймовірності виникнення технічних несправностей у виробничому циклі.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Проектування та виконання розрахунків формуючої голки необхідно здійснювати з урахуванням конкретних умов та особливостей заданого технологічного процесу. Для цього на початковому етапі було ретельно визначено відповідний механізм, що забезпечує функціонування формуючої голки, а також обрано оптимальний матеріал з урахуванням його фізико-механічних характеристик та сумісності з оброблюваною сировиною. Крім того, важливо врахувати кінцеві параметри та вимоги до готового виробу, що формується в процесі екструзії, щоб забезпечити високу якість продукції та відповідність встановленим стандартам [7].

У типовій конструкції екструзійної головки виділяють чотири послідовні сегменти, через які проходить розплавлений матеріал у напрямку свого переміщення. Початковою секцією є циліндрична ділянка, яка відповідає за стабілізацію і вирівнювання потоку матеріалу. Наступним елементом конструкції виступає конічна ділянка, де поступово відбувається зміна геометричних параметрів потоку, що готує розплав до подальшої трансформації. Третій сегмент представлений звужувальною частиною, в якій поперечний переріз плавно змінюється від первинного круглого або близького до нього профілю до конфігурації, що повністю відповідає формі кінцевого виробу на виході з головки. Завершальним елементом є призматична формувальна секція, яка має незмінний поперечний переріз і виконує функцію остаточного формоутворення екструдованого матеріалу.

Для забезпечення якісного формування, подача розплаву до формувального каналу повинна відбуватися максимально рівномірно і плавно, без різких змін напрямку руху чи поперечного перерізу каналу. Канали, через які розплав переміщується від попередніх ділянок до формувальної частини головки,

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

називаються підвідними каналами. Ці канали характеризуються поступовою зміною поперечного перерізу в напрямку руху матеріалу, що дає змогу ефективно трансформувати просту початкову форму потоку — яка може бути круглою, овальною або прямокутною — у складний і специфічний профіль, необхідний для формування кінцевого виробу у зоні стику з формуючою частиною головки [6].

Геометричні параметри та розміри підвідних каналів мають надзвичайно важливе значення у визначенні кінцевої якості екструдованої заготовки. Від їх правильної форми залежить рівномірність розподілу розплавленого матеріалу в потоці, що, у свою чергу, безпосередньо впливає на запобігання виникненню дефектів та нерівностей у готовому виробі. Тобто, оптимально спроектовані підвідні канали забезпечують не лише стабільність технологічного процесу, але й високу якість продукції.

Щодо поверхні робочих каналів головки, окрім самої формувальної зони, вона може мати як гладке покриття, так і бути оснащена гвинтовою нарізкою. Впровадження останньої технічної особливості сприяє значному покращенню гомогенізації розплаву, забезпечуючи більш однорідний розподіл температури і складу матеріалу. Така поверхня сприяє більш ефективному змішуванню компонентів розплаву, що позитивно позначається на стабільності процесу і властивостях кінцевого виробу [5].

Для забезпечення стабільності технологічного процесу та досягнення високої якості кінцевої продукції критично важливо, щоб заключний відрізок шляху руху розплавленого матеріалу проходив через ділянку каналу з постійним поперечним перерізом протягом певного проміжку часу. Така конструктивна особливість дозволяє здійснити вирівнювання швидкісних параметрів потоку розплаву, що сприяє усуненню нерівномірностей і локальних зон прискорення або уповільнення руху. Крім того, на цьому етапі відбувається активізація релаксаційних процесів у матеріалі, що дозволяє зменшити внутрішні напруження та коливання тиску, які можуть викликати пульсації або інші

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нестабільності у потоці. Все це разом позитивно впливає на однорідність структури екструдованої заготовки, підвищуючи її фізико-механічні властивості та якість готового виробу.

У процесі проєктування каналу екструзійної головки для здійснення точних розрахунків широко застосовуються математичні моделі, які описують динаміку руху як ньютонівських, так і неньютонівських рідин, що проходять через канали з різноманітними геометричними характеристиками поперечного перерізу. Вибір конкретної математичної моделі або рівняння течії ґрунтується на цільових завданнях розрахунку, доступності та надійності даних про реологічні властивості перероблюваного матеріалу, а також на межах застосовності відповідної моделі, що забезпечує коректність і точність отриманих результатів [7].

Для визначення перепаду тиску в каналі використовуються класичні гідравлічні формули, що відображають поведінку в'язких рідин у русі через обмежені простори. Ці формули дають змогу врахувати вплив в'язкості робочого матеріалу, специфіку геометрії каналу та швидкісні характеристики руху розплаву. Такий підхід дозволяє максимально точно оцінити гідродинамічні умови в екструзійному процесі, що є критично важливим для оптимізації роботи обладнання та підвищення якості кінцевої продукції [7].

$$K = \left[\sum \frac{1}{k_i} \right]^{-1},$$

$$k_1 = \frac{\pi \cdot D^4}{128 \cdot L},$$

$$k_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot D^3 \cdot d^3}{128 \cdot L \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2)},$$

$$k_2 = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 8^3 \cdot 3,68^3}{128 \cdot 10 \cdot (8^2 + 8 \cdot 3,68 + 3,68^2)} = 1,76, \text{ см}^3.$$

$$k_3 = \frac{B \cdot H^2 \cdot h^2}{6 \cdot L \cdot (H + h)},$$

$$k_3 = \frac{2,8 \cdot 3,68^2 \cdot 1,09^2}{6 \cdot 6 \cdot (3,68 + 1,09)} = 0,26, \text{ см}^3.$$

$$k_4 = \frac{F^2}{L} \cdot f,$$

$$k_4 = \frac{0,91^2}{4} \cdot 0,95 = 0,20, \text{ см}^3.$$

$$\frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4}} = \frac{1}{\frac{1}{50,26} + \frac{1}{1,76} + \frac{1}{0,26} + \frac{1}{0,20}} = 0,11, \text{ см}^3.$$

$$w = \frac{1}{K} = \frac{1}{0,11} = 9,09, \text{ см}^3.$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Шнек, який також називають черв'яком, виступає ключовим функціональним елементом екструдера, що виконує низку критично важливих операцій у процесі переробки полімерного матеріалу. Його основне призначення полягає у забезпеченні ефективного транспортування сировини вздовж робочої зони, її поступовому нагріванні за рахунок тертя і зовнішнього теплопідводу, інтенсивному перемішуванні та переході матеріалу в пластичний, розплавлений стан. Після досягнення необхідного ступеня пластифікації, шнек створює тиск, необхідний для подачі однорідного розплаву в екструзійну головку, де відбувається остаточне формування виробу [8].

У процесі функціонування шнек виконує завдання прийому вихідної сировини — у вигляді полімерних гранул або порошкоподібного матеріалу — через завантажувальний отвір екструдера. Далі, у межах його робочої зони, відбувається інтенсивна механічна і термічна обробка матеріалу, під час якої сировина поступово переходить у стан високов'язкого розплаву. Цей процес супроводжується перемішуванням і пластифікацією, що забезпечує утворення однорідної, гомогенної маси. У такому вигляді матеріал з рівномірним тиском транспортується до формувальної головки, де набуває остаточної форми виробу.

Одним із важливих технологічних ефектів, який виникає під час ущільнення матеріалу в зоні компресії шнека, є ефективне видалення повітря, яке потрапляє у систему разом із твердими частинками сировини. Внаслідок ущільнення зменшується питомий об'єм матеріалу, що потребує відповідної конструктивної адаптації каналу шнека. З цією метою його геометрія виконується змінною: передбачають поступове зменшення об'єму витків — або за рахунок зменшення кроку нарізки, або завдяки зменшенню глибини шнекового каналу. Така конструкція дозволяє компенсувати втрату об'єму та забезпечити стабільний і безперервний процес подачі розплаву з заданими параметрами [9].

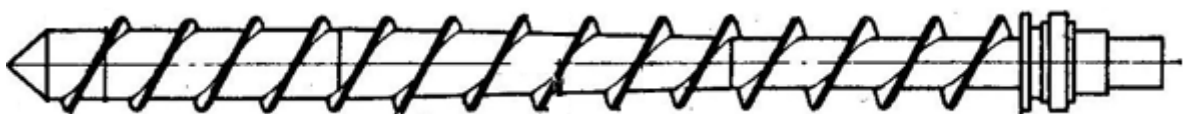


Рисунок 2.1 – Шнек

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} (1 - i^4) ,$$

$$i = \frac{d_0}{D} ,$$

$$i = \frac{0,066}{0,08} = 0,825;$$

$$I = \frac{3,14 \cdot 0,08^4}{64} (1 - 0,825^4) = 1,08 \cdot 10^{-6}.$$

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} (1 - i^2);$$

$$R_i = \sqrt{\frac{1,61 \cdot 10^{-3}}{1,08 \cdot 10^{-6}}} = 38,51 ,м;$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1,2}{38,51} = 0,06 \leq 50.$$

$$Q = \alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n - \beta \cdot F_{\beta} \cdot \frac{P_{\max}}{\mu_{cp}} = 0 ,$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						35
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{max}} = \frac{\alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n \cdot \mu_{\text{cp}}}{\beta \cdot F_{\beta}}.$$

$$Q = \alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n - \beta \cdot F_{\beta} \cdot \frac{\Delta P}{\mu_{\text{cp}}},$$

$$\mu_{\text{cp}} = \frac{\beta \cdot F_{\beta} \cdot \Delta P}{\alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n - Q};$$

$$\mu_{\text{cp}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 221514,77}{5,82 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,5 - 2,87 \cdot 10^{-6}} = 6922,34, \text{ кг} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2},$$

$$P_{\text{max}} = \frac{5,82 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 6922,34}{1,25 \cdot 10^{-9} \cdot 1} = 1,61 \cdot 10^7, \text{ кг/м}^2.$$

$$S_{\text{oc}} = P_{\text{max}} \cdot F,$$

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4},$$

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,08^2}{4} = 5,03 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2.$$

$$S_{\text{oc}} = 1,61 \cdot 10^7 \cdot 5,03 \cdot 10^{-3} = 8,09 \cdot 10^4, \text{ Н}.$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						36
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{з max}} = \frac{\rho \cdot g \cdot F \cdot L^2}{2},$$

$$M_{\text{з max}} = \frac{2800 \cdot 9,8 \cdot 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot 1200^2}{2} = 9,94 \cdot 10^7 [H \cdot m].$$

$$W_{\text{н.о.}} = \frac{\pi \cdot D^3}{32} (1 - i^4); \quad \frac{3,14 \cdot 0,08^3}{32}$$

$$f_{\text{max}} = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot J},$$

Висновок

У даному розділі, після формулювання основної технологічної мети — а саме реалізації процесу виготовлення поручня із полівінілхлориду (ПВХ) методом екструзії — було виконано всебічне проєктування та технічне обґрунтування конструктивних елементів екструзійного вузла. Зокрема, було здійснено розрахунок геометричних параметрів шнека, профілю його каналу, а також детальний аналіз і моделювання формуючої головки, що відповідає за фінальне надання виробу необхідної форми.

Зазначені розрахунки є не просто складовою проєктного процесу, а критично важливим етапом, який забезпечує точність і узгодженість усіх подальших інженерних рішень. Без попередньої аналітичної оцінки й оптимізації основних конструктивних параметрів неможливо достовірно визначити ключові експлуатаційні показники екструзійної системи — зокрема її продуктивність, рівень енергоспоживання та відповідність динамічних характеристик можливостям електроприводу. Таким чином, проведені розрахунки виступають

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фундаментальною базою для наступних етапів технічного проєктування та інтеграції системи в реальний виробничий цикл.

Зокрема, без попереднього визначення геометричних параметрів формувального вузла та аналізу його гідродинамічних характеристик неможливо здійснити коректну оцінку ключових параметрів функціонування екструзійної лінії. Саме ці розрахунки дозволяють встановити оптимальну швидкість транспортування розплаву, забезпечити рівномірність заповнення формуючого каналу, а також мінімізувати ризики виникнення деформацій або дефектів на виході з головки.

Крім того, зазначені аналітичні етапи безпосередньо впливають на визначення навантаження, що прикладається до електромеханічного приводу. Це, у свою чергу, є визначальним чинником під час вибору типу та номінальної потужності електроприводу, що має забезпечити стабільну й енергоефективну роботу екструзійного обладнання. Без урахування цих взаємозв'язків неможливо досягти високої технічної точності, оптимального енергоспоживання та довготривалої надійності всієї виробничої системи.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Однією з найважливіших складових, що визначає ефективність і стабільність роботи екструзійної установки, є конструктивне виконання дозуючої секції шнека. Саме ця ділянка виконує функції остаточного ущільнення, стабілізації потоку та забезпечення рівномірної подачі полімерного розплаву до формуючої частини головки під необхідним тиском. Продуктивність цієї зони тісно пов'язана з геометричними параметрами шнека, серед яких визначальне значення мають глибина та ширина гвинтової канавки, крок нарізки, а також співвідношення довжини шнека до його діаметра (L/D) [9].

Водночас, оцінка продуктивності всього екструдера не може обмежуватись лише аналізом шнекової частини. Значний вплив на кінцеву ефективність процесу екструзії справляє також конфігурація формуючої головки. Саме вона визначає величину гідродинамічного опору системи, що, в свою чергу, впливає на тиск у дозуючій зоні, рівномірність течії розплаву та якість кінцевого виробу. Невідповідність конструкції головки параметрам шнека може спричинити дестабілізацію потоку, виникнення зворотних течій і пульсацій, що призводить до зниження продуктивності та погіршення геометричної точності профілю [7].

Таким чином, ефективність роботи екструдера формується в результаті комплексної взаємодії дозуючої зони шнека та формувального вузла. Їх узгоджене функціонування є критичним для досягнення високої якості продукції, оптимального рівня енергоспоживання та надійності виробничого процесу в цілому.

У межах гідродинамічного аналізу, що використовується для дослідження процесів взаємодії полімерного розплаву з конструктивними елементами екструзійного обладнання, зокрема у дозуючій секції шнека, прийнято умовно

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виділяти три характерні складові потоку, які разом формують загальну картину переміщення матеріалу [8]:

- Основний або поступальний потік (вимушений рух) — являє собою транспортування розплавленої маси вздовж осі шнека в міжвитковому просторі. Цей тип руху є прямим наслідком обертання шнека всередині стаціонарного циліндра, що створює направлену силу, здатну переміщувати матеріал до зони формування;
- Зворотний потік (зумовлений перепадом тиску) — виникає внаслідок наявності різниці тиску між різними ділянками шнека. Цей компонент характеризується частковим переміщенням полімеру у протилежному напрямку — від дозуючої секції до зони подачі. Такий рух частково компенсує основний потік і може знижувати загальну ефективність подачі;
- Периферійний потік витoku (за зазором між шнеком і циліндром) — спостерігається внаслідок існування технологічного зазору між вершинами витків шнека та внутрішньою поверхнею циліндричної камери. Через цей зазор частина розплаву повертається назад до зони завантаження, створюючи додатковий опір основному транспортувальному потоку.

Варто зауважити, що поділ потоку на вказані три компоненти є умовним і використовується переважно для аналітичного моделювання. У реальних умовах ці потоки тісно взаємодіють і утворюють складну картину руху матеріалу, яка залежить від геометрії шнека, реологічних властивостей розплаву та конструктивного опору формуючої головки.

Слід наголосити, що розмежування потоку розплаву на три окремі компоненти має аналітичний, а не строго фізичний характер і використовується здебільшого як концептуальна модель для зручності розрахунків та інженерного аналізу. У практичних умовах зворотний потік, як правило, не існує у вигляді вираженої самостійної течії. Замість цього, спостерігається певне зниження

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтенсивності основного (вимушеного) потоку, що зумовлюється опором, який створює формуючий вузол екструдера або інші елементи системи транспортування розплаву. Таким чином, зворотний потік радше є наслідком зменшення ефективності основного потоку, ніж окремим фізичним явищем [10].

Ця схема поділу є ефективним інструментом для первинного опису гідродинаміки шнекового каналу, однак її застосування при побудові точних математичних моделей потребує критичного підходу. Зокрема, для адекватного опису реального процесу екструзії необхідно враховувати комплексну взаємодію всіх трьох складових, враховуючи реологічні характеристики розплаву, геометрію шнека, зазори між рухомими частинами, а також опір з боку формуючої головки [7].

$$Q = \frac{\alpha \cdot K \cdot n}{K + \beta + \gamma},$$

$$\alpha = \frac{\pi \cdot D_{\text{ш}} \cdot h \cdot (t - i \cdot \delta) \cdot \cos^2 \alpha_{\text{ш}}}{2};$$

$$\alpha = \frac{3,14 \cdot 0,08 \cdot 0,007 \cdot (0,08 - 1 \cdot 0,007) \cdot \cos^2 17,7}{2} = 5,82 \cdot 10^{-6} \text{ ,м}^3;$$

$$\beta = \frac{h^3 \cdot (t - i \cdot \delta) \cdot \sin 2\alpha_{\text{ш}}}{24 \cdot L_3};$$

$$\beta = \frac{0,007^3 \cdot (0,08 - 1 \cdot 0,007) \cdot \sin(2 \cdot 17,7)}{24 \cdot 0,48} = 1,25 \cdot 10^{-9} \text{ ,м}^3;$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						41
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot z^3 \cdot \tan \alpha_q \cdot \sin \alpha_q}{10 \cdot L_3 \cdot \delta},$$

$$\gamma = \frac{3,14^2 \cdot 0,08^2 \cdot 0,001^3 \cdot \tan 17,7 \cdot \sin 17,7}{10 \cdot 0,48 \cdot 0,007} = 1,82 \cdot 10^{-10}, M^3;$$

$$Q = \frac{5,82 \cdot 10^{-6} \cdot 1,10 \cdot 10^{-7} \cdot 0,5}{1,10 \cdot 10^{-7} + 1,25 \cdot 10^{-9} + 1,82 \cdot 10^{-10}} = 2,87 \cdot 10^{-6}, \frac{M^3}{c}.$$

$$Q' = Q \cdot \rho \cdot 3600;$$

$$Q' = 2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 1380 \cdot 3600 = 14,26, \frac{кг}{год}.$$

$$Q'' = \frac{Q'}{m};$$

$$Q'' = \frac{14,26}{0,126} = 113,16, n.m./год.$$

Висновок

У рамках даного розділу, спираючись на результати попередніх розрахункових процедур, було проведено визначення номінальної продуктивності екструзійного обладнання. Цей параметр виступає одним із критично важливих у контексті техніко-економічного аналізу системи, оскільки

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

служить вихідною величиною для подальших інженерних розрахунків. Зокрема, обґрунтоване визначення продуктивності екструдера є необхідною передумовою для коректного вибору електроприводу, з урахуванням його навантажувальної здатності, частотних режимів роботи та енергоефективності в умовах безперервного виробничого циклу.

Зокрема, наявність достовірних даних щодо реальної продуктивності установки виступає визначальним чинником для здійснення коректного інженерного розрахунку потужності привідного електродвигуна. Останній є невід’ємною ланкою в структурі екструзійного комплексу, оскільки забезпечує привід обертових елементів, стабілізовану подачу матеріалу та підтримання необхідних режимів переробки згідно з технологічними параметрами виробництва. Без такого аналітичного обґрунтування неможливо гарантувати ані ефективність, ані надійність функціонування всієї системи у тривалому експлуатаційному циклі.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						43
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРАХУНОК ПРИВОДУ

В зоні завантаження екструзійного приводу значна частина споживаної потужності спрямовується на подолання сил тертя, що виникають під час переміщення так званої матеріальної пробки. Проте, ці витрати енергії є відносно незначними — приблизно складають лише близько десяти відсотків від загальної сумарної потужності всієї екструзійної системи. Через це в більшості випадків можна вважати їх мінімальними та не брати до уваги при складанні загального енергетичного балансу установки.

Однак існують певні виключення з цього правила, особливо це стосується черв'ячних екструдерів. Конструктивні особливості таких машин включають наявність поздовжніх канавок, які розташовані на внутрішній поверхні циліндра в зоні подачі сировини. Наявність цих канавок суттєво змінює умови руху матеріалу всередині робочої зони. В результаті, опір переміщенню гранульованої пробки в таких екструдерних системах зростає в 2–5 разів у порівнянні з пристроями, де внутрішня поверхня циліндра є гладкою і рівною. Це призводить до суттєвого збільшення енергетичних витрат на подолання тертя і руху матеріалу саме в зоні завантаження, що має враховуватися при оцінці ефективності роботи цих екструзійних агрегатів [7].

У зоні плавлення екструзійного процесу основна частина енергетичних витрат приводиться на подолання опору руху матеріальної пробки, що переміщується в межах тонкого шару розплавленого полімеру, який утворюється безпосередньо біля внутрішніх стінок циліндра. Одночасно відбувається подолання сил тертя, що виникають між поверхнею пробки та робочими поверхнями механізму [11].

Варто підкреслити, що по мірі проходження матеріалу через цю зону відбуваються значні трансформації у його фізико-хімічних характеристиках. Зокрема, розмір гранульованої пробки поступово зменшується, що пов'язано з утворенням на її зовнішній поверхні тонкого шару розплавленого полімера. Цей

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						44
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процес є динамічним і супроводжується комплексними змінами теплофізичних параметрів і реологічних властивостей полімерної маси.

Саме через такі складні та неоднорідні фізико-хімічні перетворення, що відбуваються в зоні плавлення, створюється значна складність у точному аналітичному моделюванні цього етапу екструзії. Врахування всіх нюансів теплообміну, в'язкості, температурних градієнтів та інших параметрів вимагає використання комплексних підходів, що поєднують експериментальні дані з чисельними методами моделювання [11].

Потужність, яка споживається приводом у зоні дозування матеріалу, формується сумарно з декількох складових, що відображають різні фізичні процеси, які відбуваються під час просування сировини через гвинтовий канал черв'яка. По-перше, це енергія, що витрачається на примусове проштовхування полімерної маси по спіральному каналу гвинта, яку позначимо як N_1 . По-друге, у зазорі між вершиною витка нарізки гвинта і внутрішньою поверхнею циліндра відбувається процес зрізування матеріалу, що вимагає певних витрат потужності, яку позначають як N_2 . І нарешті, третім складником є енергія, що потрібна для створення циркуляційних потоків полімеру у витках нарізки черв'яка, що позначається як N_3 [10].

Отже, сумарна потужність, споживана приводом у зоні дозування при незмінних геометричних параметрах гвинтової нарізки, визначається як сума цих трьох складових.

Кожен із цих процесів має свій вплив на загальний енергетичний баланс установки та на ефективність роботи екструдера, тому їхнє детальне розуміння є ключовим для оптимізації конструкції гвинта та режимів роботи обладнання [12].

$$N_1 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot L_3}{h}$$

$$\cdot \mu_1 + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \tan \alpha_{\text{ч}}}{2} \cdot \Delta p_{\text{г}} ;$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_2 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot L_3}{z \cdot t} \cdot \mu_2.$$

$$N = N_1 + N_2;$$

$$N = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot L_3}{h} \cdot \mu_1 + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \tan \alpha_q}{2} \cdot \Delta p_r + \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot L_3}{z \cdot t} \cdot \mu_2;$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{3,14^3 \cdot 0,08^3 \cdot 0,5^2 \cdot 0,48}{0,007} \cdot \mu_1 + \frac{3,14^2 \cdot 0,08^2 \cdot 0,5 \cdot 0,007 \cdot \tan 17,7}{2} \cdot \Delta p_r \\ &\quad + \frac{3,14^3 \cdot 0,08^3 \cdot 0,5^2 \cdot 0,48}{0,001 \cdot 0,08} \cdot \mu_2 = \\ &= 0,272 \cdot \mu_1 + 3,528 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_r + 23,811 \cdot \mu_2. \end{aligned}$$

$$S_1 = \frac{\pi^2 \cdot (D_q - h) \cdot (D_q - 2 \cdot h) \cdot n}{h \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot (D_q - 2 \cdot h)^2 + t^2}},$$

$$S_1 = \frac{3,14^2 \cdot (0,08 - 0,007) \cdot (0,08 - 2 \cdot 0,007) \cdot 0,5}{0,007 \cdot \sqrt{3,14^2 \cdot (0,08 - 2 \cdot 0,007)^2 + 0,08^2}} = 152,83, c^{-1}.$$

$$S_2 = \frac{\pi^2 \cdot D_q^2 \cdot n}{h \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot D_q^2 + t^2}};$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						46
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_2 = \frac{3,14^2 \cdot 0,08^2 \cdot 0,5}{0,007 \cdot \sqrt{3,14^2 \cdot 0,08^2 + 0,007^2}} = 17,94, c^{-1}.$$

$$\mu_1 = 1050, M^2/c;$$

$$\mu_2 = 300, M^2/c.$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^4 \Delta P_i,$$

$$\epsilon'_1 = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot D^3}$$

$$S'_1 = \frac{32 \cdot 2,87 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,08^3} = 0,057, c^{-1}.$$

$$\Delta P_1 = \frac{2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 5,0 \cdot 10^4}{5,03 \cdot 10^{-5}} = 2852,88, \kappa z \cdot c/M^2.$$

$$\epsilon'_2 = \frac{256 \cdot Q}{\pi \cdot (D + d)^3}$$

$$S'_2 = \frac{256 \cdot 2,87 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot (0,08 + 0,0368)^3} = 0,147, c^{-1}.$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						47
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\mu_2' = 4,0 \cdot 10^4, c^{-1}.$$

$$\Delta P_2 = \frac{2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 4,0 \cdot 10^4}{1,76 \cdot 10^{-6}} = 65227,27, \kappa\mathcal{Z} \cdot \frac{c}{M^2}.$$

$$s_3' = \frac{11,16 \cdot Q}{B \cdot (H + h)^2}.$$

$$S_3' = \frac{11,16 \cdot 2,87 \cdot 10^{-6}}{0,028 \cdot (0,0368 + 0,0109)^2} = 0,503, c^{-1};$$

$$\mu_3' = 1,0 \cdot 10^4, M^2/c;$$

$$\Delta P_3 = \frac{2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^4}{2,6 \cdot 10^{-7}} = 110384,62, \frac{\kappa\mathcal{Z} \cdot c}{M^2}.$$

$$S_4' = \frac{Q}{F \cdot a} \cdot \frac{1}{f},$$

$$S_4' = \frac{2,87 \cdot 10^{-6}}{9,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,002} \cdot \frac{1}{0,95} = 16,6, c^{-1};$$

$$\mu_4' = 3,0 \cdot 10^3, M^2/c;$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						48
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_4 = \frac{2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 3,0 \cdot 10^3}{2,0 \cdot 10^{-7}} = 43050,00, \text{кз} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}.$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4;$$

$$\Delta P = 2852,88 + 65227,27 + 110384,62 + 43050,00 = 221514,77, \text{кз} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}$$

$$N = 0,272 \cdot 1050 + 3,528 \cdot 10^{-5} \cdot 221514,77 + 23,811 \cdot 300 = 7436,71, \text{Вт}.$$

$$N_{\text{д}} = \frac{N}{\eta};$$

$$N_{\text{д}} = \frac{7436,71}{0,8} = 9295,89, \text{Вт}.$$

$$P_{\text{max}} = \frac{\alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n \cdot \mu_{\text{ср}}}{\beta \cdot F_{\beta}},$$

$$Q = \alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n - \beta \cdot F_{\beta} \cdot \frac{\Delta P}{\mu_{\text{ср}}},$$

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{\beta \cdot F_{\beta} \cdot \Delta P}{\alpha \cdot F_{\alpha} \cdot n - Q};$$

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\mu_{cp} = \frac{1,25 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 2,172}{5,82 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,5 - 2,87 \cdot 10^{-6}} = 69340,7, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$P_{max} = \frac{5,82 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 6934,7}{1,25 \cdot 10^{-9}} = 158,3, \text{ МПа}.$$

$$u = \frac{n_{\text{дв}}}{n},$$

$$u = \frac{750}{30} = 25.$$

У межах цього розділу було здійснено детальний енергетичний та силовий розрахунок ключових параметрів технологічного об'єкта, що становить собою екструзійну установку, з урахуванням особливостей її навантаження, режиму роботи, а також вимог до стабільності та надійності функціонування. На основі результатів аналітичного моделювання та розрахункових даних було проведено обґрунтований вибір електромеханічного приводу, який здатен забезпечити ефективну та безперебійну роботу екструдера в заданих умовах експлуатації [11].

Висновок

У результаті проведеного техніко-енергетичного аналізу, як оптимальний варіант було обрано трифазний асинхронний електродвигун серії 4A160M8У3. Цей двигун, що має номінальну потужність 11 кВт, відповідає вимогам системи

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						50
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за показниками енергоспоживання, крутного моменту, частоти обертання, а також має достатній експлуатаційний ресурс і стійкість до перевантажень. Його конструктивні та електротехнічні характеристики дозволяють забезпечити надійну передачу обертового моменту на робочі органи екструдера, зберігаючи при цьому високий коефіцієнт корисної дії впродовж тривалого періоду роботи.

Таким чином, вибір даної моделі електродвигуна підтверджено як з точки зору відповідності параметрам навантаження, так і з позиції енергетичної ефективності приводу у складі екструзійного комплексу.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						51
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У конструкції електричних машин ключову роль у формуванні електромагнітних процесів відіграють магнітні поля, що виникають у повітряному зазорі між ротором і статором. Ці поля утворюються, головним чином, під дією струмів, які проходять у провідниках, розташованих уздовж осі машини, тобто в активних частинах обмоток. Водночас струми, що протікають у лобових частинах обмотки, чинять порівняно менший вплив на загальний магнітний стан машини, оскільки створюють переважно потоки розсіювання, які не беруть активної участі у процесі перетворення енергії, а лише знижують ефективність її використання [13].

У більшості інженерних задач і практичних випадків при аналізі електромагнітного стану машини можна скористатися припущенням, згідно з яким силові лінії магнітного поля в повітряному зазорі розташовані перпендикулярно до циліндричних поверхонь ротора й статора. Це припущення дозволяє значно спростити математичне моделювання, зберігаючи при цьому достатню точність результатів для розрахунків у типових режимах роботи.

Характеристики та тип електричної машини безпосередньо залежать від розподілу струмів у повітряному зазорі, а також від того, як ці струми змінюються в часі. Такий розподіл визначається передусім конструкцією обмоток: їхнім типом, способом укладання, числом фаз і полюсів. Динаміка змін струмів, у свою чергу, обумовлена параметрами електричної напруги, що подається на обмотки — її формою, частотою, фазовим зсувом і рівнем [14].

Таким чином, для повноцінного розуміння і ефективного керування роботою електричних машин необхідно враховувати як просторовий розподіл струмів у магнітному полі повітряного зазору, так і їхній часовий характер, що

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						52
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формується під впливом зовнішніх джерел живлення. Саме взаємодія цих чинників визначає електромеханічні властивості машини та ефективність її роботи в складі електротехнічних систем.

У багатополюсних електричних машинах, зокрема в асинхронних та синхронних електродвигунах, усі електромагнітні явища мають періодичний характер і повторюються з певною регулярністю — зокрема через кожен пару полюсів. Це означає, що фізичні процеси, які відбуваються в одному полюсному інтервалі, аналогічні тим, що виникають у наступних, тільки зі зміщенням у просторі на кут, відповідний кроку полюсів. Така симетрія структури й процесів у машині дозволяє значно спростити математичне та аналітичне моделювання її роботи [11].

У зв'язку з цим, при теоретичному аналізі та вивченні електромагнітних властивостей ідеалізованих моделей електричних машин, часто застосовується підхід, за якого вся система розглядається у вигляді еквівалентної двополюсної машини. Такий спрощений підхід не лише знижує обчислювальну складність, але й дозволяє зберігати високий рівень точності при описі основних електромагнітних процесів, оскільки всі багатополюсні машини можна математично звести до базового випадку з двома полюсами.

Таким чином, при побудові моделей для аналізу, синтезу або оптимізації електричних машин доцільно обмежитися розглядом двополюсної конфігурації, яка є універсальним та узагальненим прикладом для подальшого масштабування на будь-яку кількість полюсів.

Використання динамічної математичної моделі асинхронного електродвигуна відкриває можливість детального аналізу зміни основних електромагнітних і механічних параметрів машини в процесі її функціонування. Така модель дозволяє відстежувати у часовій області динаміку змін струмів у фазах обмоток статора та ротора, еволюцію потокозчеплення, а також формування електромагнітного моменту та зміну кутової швидкості обертання ротора в різних експлуатаційних режимах [15].

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						53
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки такій моделі можна досліджувати поведінку двигуна під час пуску, гальмування, при зміні навантаження або в аварійних ситуаціях, що є вкрай важливим для точного проектування систем електроприводу та розробки алгоритмів керування. Більш того, динамічна модель слугує базою для комп'ютерного моделювання, що дозволяє імітувати реальні умови експлуатації двигуна без необхідності проведення дорогих експериментів на фізичних стендах [11].

Таким чином, застосування динамічного моделювання є незамінним інструментом для аналізу перехідних процесів в асинхронних машинах, оцінки їхньої стійкості, ефективності та адаптації до змін зовнішніх умов [15].

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \mu(\psi_a \dot{i}_b - \psi_b \dot{i}_a) - \frac{M_c}{J} - \nu\omega; \\ \dot{\psi}_a &= -\alpha\psi_a - \omega\psi_b + \alpha L_m \dot{i}_a; \\ \dot{\psi}_b &= -\alpha\psi_b + \omega\psi_a + \alpha L_m \dot{i}_b; \\ \dot{i}_a &= -\frac{R_1}{\sigma} \dot{i}_a + \alpha\beta\psi_a + \beta\omega\psi_b - \alpha\beta L_m \dot{i}_a + \frac{1}{\sigma} u_a; \\ \dot{i}_b &= -\frac{R_1}{\sigma} \dot{i}_b + \alpha\beta\psi_b - \beta\omega\psi_a - \alpha\beta L_m \dot{i}_b + \frac{1}{\sigma} u_b; \\ \dot{\omega} &= \mu(\psi_d \dot{i}_q - \psi_q \dot{i}_d) - \frac{M_c}{J} - \nu\omega; \\ \dot{i}_d &= -\gamma \dot{i}_d + \omega \dot{i}_q + \alpha\beta\psi_d + \beta\omega\psi_q + \frac{1}{\sigma} u_d; \\ \dot{i}_q &= -\gamma \dot{i}_q - \omega \dot{i}_d + \alpha\beta\psi_q - \beta\omega\psi_d + \frac{1}{\sigma} u_q; \\ \dot{\psi}_d &= -\alpha\psi_d + (\omega_0 - \omega)\psi_q + \alpha L_m \dot{i}_d; \\ \dot{\psi}_q &= -\alpha\psi_q - (\omega_0 - \omega)\psi_d + \alpha L_m \dot{i}_q; \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0.\end{aligned}$$

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

$$w_{xx} = \frac{w_{0n}}{p_n} = \frac{314}{4} = 78,5, \text{pad} / \text{c}.$$

$$w_n = w_{xx}(1 - s_n) = 78,5 \times (1 - 0,025) = 76,54, \text{pad} / \text{c}.$$

$$M_n = \frac{P_n}{w_n} = \frac{11000}{76,54} = 143,7, H \times M.$$

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220, B;$$

$$I_n = \frac{P_n}{3 \times U_{1n} \times \cos \varphi} = \frac{11000}{3 \times 200 \times 0,87 \times 0,75} = 28,1, A.$$

$$y_{lx} = \frac{\sqrt{2} U_n}{w_{0n}} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{314} = 0,99, B\bar{6}.$$

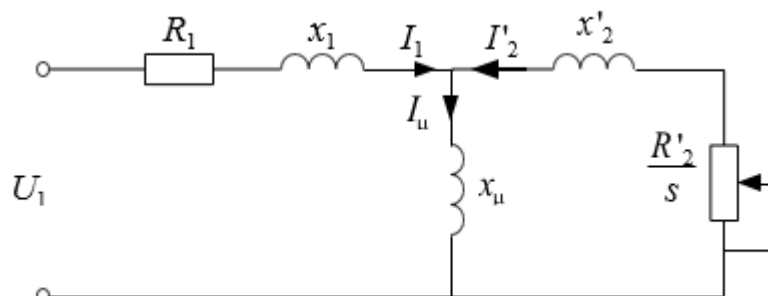


Рисунок 5.1 – Т-подібна схема АД.

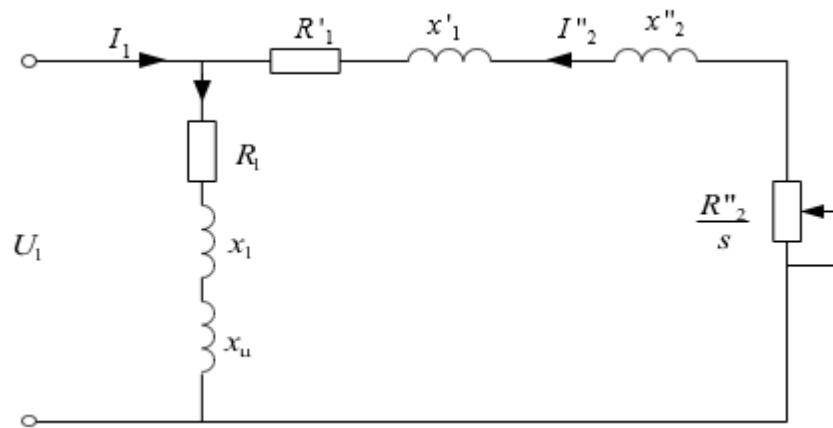


Рисунок 5.2 – Г-подібна схема АД.

$$c_1 = \frac{X_m + \sqrt{X_m^2 + 4X_1'X_m}}{2X_m} = \frac{3,2 + \sqrt{3,2^2 + 4 \times 0,082 \times 3,2}}{2 \times 3,2} = 3,73;$$

$$R_1' = \frac{R_1'}{c_1} = \frac{0,034}{3,73} = 0,01 \text{ ,Ом.}$$

$$X_1' = \frac{X_1'}{c_1} = \frac{0,082}{3,73} = 0,022 \text{ ,Ом.}$$

$$R_1 = R_1' \times \frac{U_n}{I_n} = 0,01 \times \frac{220}{28,1} = 0,078 \text{ ,Ом.}$$

$$X_1 = X_1' \times \frac{U_n}{I_n} = 0,022 \times \frac{220}{28,1} = 0,172 \text{ ,Ом.}$$

$$R_2^{\phi} = R_2 \times \frac{U_n}{I_n} = 0,002 \times \frac{220}{28,1} = 0,0157 \text{ ,OM.}$$

$$X_m = X_m \times \frac{U_n}{I_n} = 3,2 \times \frac{220}{28,1} = 25,05 \text{ ,OM.}$$

$$L_{1s} = \frac{X_1^{\phi}}{w_{0n}} = \frac{0,1 / \angle}{314} = 0,00055 \text{ ,Гн.}$$

$$L_{2s} = \frac{X_2^{\phi}}{w_{0n}} = \frac{0,117}{314} = 0,00037 \text{ ,Гн.}$$

$$L_m = \frac{X_m}{w_{0n}} = \frac{25,05}{314} = 0,08 \text{ ,Гн.}$$

$$X_k = X_1 + X_2^{\phi} = 0,172 + 0,117 = 0,289 \text{ ,OM.}$$

$$s_k = \frac{R_2^{\phi}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{0,0157}{\sqrt{0,078^2 + 0,289^2}} = 0,052.$$

$$a_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,078}{0,081} = 0,96 \text{ ,с}^{-1};$$

$$a = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0,0157}{0,804} = 0,$$

$$b = \frac{L_m}{L_2 \times s} = \frac{0,08}{0,804 \times 0,076} = 1,31, \text{ГН}^{-1};$$

$$g = \frac{R_1}{s} + a \times b \times L = \frac{0,078}{0,076} + 0,02 \times 1,31 \times 0,08 = 1,03, \text{с}^{-1};$$

$$m = \frac{3 \times p_n \times L_m}{2 \times L_2 \times J} = \frac{3 \times 4 \times 0,08}{2 \times 0,804 \times 0,18} = 3,32, \text{в.о}$$

Процес екструзії являє собою високотехнологічну безперервну операцію, що належить до сучасних методів перероблення як первинної, так і вторинної сировини з метою отримання напівфабрикатів або кінцевої продукції з заданими геометричними параметрами. Цей метод базується на термомеханічному впливі на матеріал, у результаті якого відбувається його глибока трансформація — від початкової сировини до формованого виробу [16].

Центральним елементом усієї екструзійної лінії виступає спеціалізоване обладнання — екструдер. Цей агрегат виконує цілу низку важливих функцій, серед яких транспортування матеріалу, його поступовий нагрів, перехід у пластичний стан, а також формування остаточного профілю за допомогою відповідної оснастки. Екструдер є складною технічною системою, що забезпечує точне регулювання технологічних параметрів, необхідних для стабільної якості кінцевої продукції.

Основним робочим органом екструдера є обертовий гвинт (також званий черв'яком), який здійснює рух навколо власної осі з точно визначеною частотою. Частота обертання гвинта безпосередньо залежить від технологічного завдання,

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						58
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема — від бажаної продуктивності процесу, в'язкості оброблюваного матеріалу та вимог до кінцевих фізико-механічних характеристик продукції [17].

На початку роботи в бункер (так звану воронку) завантажується підготовлена сировина, що може бути у вигляді гранул, порошку або подрібненої маси. Після подачі в екструдер матеріал потрапляє до зони подачі, де розпочинається його переміщення вздовж довжини гвинтового каналу. Завдяки обертанню гвинта, сировина поступово переміщується вперед, зазнаючи впливу сили тертя, механічного стискання і високотемпературного нагріву. У процесі цього інтенсивного впливу матеріал переходить у в'язко-пластичний стан, що дозволяє надалі надати йому необхідної форми через екструзійну голівку.

Протягом цього переміщення сировина поступово змінює свій фізичний стан: від сипкої або твердої до в'язкоплинної розплавленої маси. У такому вигляді вона надходить до формувальної частини пристрою — екструзійної головки, через яку і відбувається видавлювання матеріалу у вигляді безперервного профілю визначеної форми. Цей профіль надалі може бути підданий додатковому охолодженню, калібруванню чи різанню залежно від вимог технології [17].

У процесі поступального просування уздовж гвинтового каналу екструдера завантажена сировина зазнає послідовних термомеханічних змін, внаслідок чого відбувається її перехід із початкового твердого, гранульованого чи сипкого стану у в'язкоплинну, розплавлену субстанцію. Цей перехід є критичним етапом, адже саме в такому термопластичному вигляді матеріал набуває здатності до формування.

Після досягнення необхідного ступеня пластикації розплавлений матеріал спрямовується до формувального вузла — екструзійної головки, яка виступає кінцевим елементом формуючого тракту. Через спеціально сконструйований профільований канал екструзійної голівки відбувається видавлювання матеріалу, результатом чого є безперервний вихід заздалегідь визначеної геометричної

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						59
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форми. Залежно від конструкції насадки, можна отримати продукцію різного перерізу — трубки, листи, профілі, плівку тощо [18].

Щойно сформований профіль зазвичай є ще гарячим і нестабільним у розмірах, тому наступними етапами технологічного процесу виступають охолодження, стабілізація геометрії (калібрування) та, при потребі, розрізання готового виробу на фрагменти визначеної довжини. Ці операції забезпечують точність, відповідність продукції технічним стандартам та підготовленість її до подальшого використання або пакування.

Передатна функція, що характеризує динаміку роботи екструдера, є формалізованим математичним інструментом, який описує залежність між частотою обертання його основного виконавчого механізму — гвинта (черв'яка) — та швидкістю подачі або витікання переробленого матеріалу з вихідного каналу обладнання. Ця функція дозволяє кількісно оцінити, яким чином зміна частоти обертання впливає на інтенсивність екструзійного потоку, тобто на швидкість руху в'язкоплинної маси через формуючий вузол — екструзійну головку [18].

З позиції інженерного аналізу та автоматизованого управління виробничими процесами, дана залежність є надзвичайно важливою. Вона відіграє вирішальну роль при моделюванні поведінки екструдера у динамічних режимах роботи, оскільки забезпечує основу для розробки алгоритмів стабілізації та оптимізації технологічних параметрів. Завдяки передатній функції можна не лише передбачити реакцію системи на зміну керуючих дій, але й здійснювати точне регулювання продуктивності та якості продукції за рахунок контролю за швидкісними характеристиками обертального руху [15].

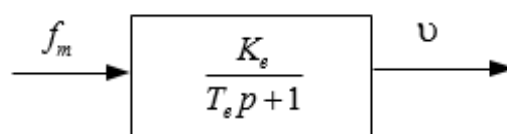


Рисунок 5.3 – Схематичне подання моделі механічної підсистеми екструдера

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						60
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передатна функція представляє собою аналітичну залежність, що описує взаємозв'язок між вхідним технологічним параметром та вихідним показником системи, яким виступає швидкість. Інакше кажучи, ця функція математично відображає, як зміна кутової швидкості виконавчого органа впливає на динаміку подачі розплавленої маси та, відповідно, на рівень продуктивності екструзійного процесу [19].

З позиції теоретичної механіки та системного аналізу, передатна функція виступає фундаментальним компонентом у побудові математичної моделі механічної підсистеми екструдера. Вона забезпечує можливість комплексного дослідження перехідних режимів роботи, що виникають при зміні вхідних впливів, а також дає змогу оцінити динамічну стабільність і якість регулювання системи. Завдяки цій функції здійснюється всебічний аналіз часових та частотних характеристик, що є основою для проектування високоефективних алгоритмів автоматичного управління.

Застосування передатної функції має вирішальне значення при розробці та оптимізації систем керування технологічним процесом екструзії. Вона дозволяє забезпечити не лише підтримку стабільних параметрів виробництва, а й адаптивну реакцію на змінні умови експлуатації, зокрема коливання властивостей сировини або зовнішніх факторів, що впливають на процес. Таким чином, передатна функція сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи екструдера, що є критично важливим для забезпечення високої якості кінцевої продукції [20].

Висновок

У межах даного розділу, на основі аналітичного опису узагальненої електричної машини, здійснено побудову математичної моделі асинхронного двигуна у двох системах координат: стаціонарній (a-b) та обертовій (d-q), яка синхронізована з ротором і дозволяє адекватно описати електромагнітні процеси

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						61
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в машині під час її роботи. Такий підхід забезпечує можливість повного охоплення як статичних, так і динамічних характеристик електропривода.

Окрім того, у розділі представлено структурно-функціональну схему системи векторного керування асинхронним приводом подачі, де розкрито принципи формування керуючих сигналів, способи зворотного зв'язку та механізми перетворення координат, необхідні для реалізації ефективного управління електромеханічною системою в умовах змінних навантажень і технологічних впливів.

Крім того, у межах цього дослідження було обґрунтовано побудову математичної моделі технологічного об'єкта — екструдера, з урахуванням конструктивно-механічних характеристик його виконавчих елементів та специфіки впливу параметрів технологічного процесу. При формуванні моделі враховано нелінійні властивості системи, зв'язані зі зміною фізичного стану оброблюваного матеріалу, опором під час подачі та умовами термомеханічної взаємодії.

На основі заданих початкових даних і технологічних обмежень здійснено аналітичний розрахунок параметрів математичної моделі, зокрема числових коефіцієнтів, що відображають інерційні та динамічні властивості механічної підсистеми екструдера. Отримана модель дозволяє адекватно описати поведінку системи в різних режимах роботи, що є необхідною передумовою для подальшого аналізу, оптимізації та розробки систем автоматизованого керування.

Отримані в ході математичного моделювання результати створюють передумови для реалізації синтезу високоефективної системи векторного керування асинхронним електроприводом, а також для всебічного аналізу його динамічних характеристик у перехідних режимах. Запропонований підхід дозволяє точно оцінити реакцію електромеханічної системи на зміну вхідних впливів, зокрема в умовах змінного навантаження або нестабільного електроживлення.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						62
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

З метою якісного аналізу динамічних характеристик досліджуваної електромеханічної системи було залучено інструменти комп'ютерного моделювання, реалізовані в середовищі програмного комплексу MATLAB, редакції 2009 року. Особлива увага приділялася використанню функціоналу пакета Simulink, який є спеціалізованим модулем для моделювання складних технічних систем на основі блочно-орієнтованого підходу [20].

Цей програмний інструментарій забезпечив можливість побудови детальної імітаційної моделі, яка точно відтворює структуру та принцип дії системи, що досліджується. За допомогою візуального середовища розробки вдалося реалізувати структурно-функціональне відображення всіх ключових підсистем, моделюючи їхню взаємодію в межах єдиного середовища. Кожен блок моделі відповідав певному компоненту фізичної системи, а також виконував функцію математичного опису відповідних процесів — від генерації сигналів до обробки результатів.

Крім того, модель було доповнено допоміжними елементами для налаштування початкових умов, параметризації об'єкта, а також для організації зручного виведення даних у формі графіків, що дозволило ефективно візуалізувати результати чисельного експерименту. Це, у свою чергу, надало змогу оцінити реакцію системи на різні зовнішні впливи, простежити її поведінку в нестационарних режимах та провести валідацію обраної структури моделі [21].

Сформована імітаційна модель являє собою впорядковану сукупність взаємопов'язаних функціональних елементів, які відтворюють логіку та структуру реального технічного об'єкта. Кожен із використаних блоків виконує специфічне завдання, відображаючи окрему складову частину функціональної схеми системи керування. Такий підхід до моделювання забезпечує точну

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						63
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передачу взаємодії між компонентами системи та дозволяє враховувати їхню індивідуальну динаміку.

До складу моделі, окрім основних технолого-структурних вузлів, було включено також допоміжні підсистеми, що виконують критично важливі функції для підтримання коректної роботи моделі. Серед них — модулі ініціалізації параметрів, блоки стабілізації обчислювального процесу, а також засоби графічного представлення результатів симуляційного експерименту. Завдяки цьому модель не лише забезпечує адекватне математичне відтворення об'єкта, а й створює зручне середовище для візуального аналізу динаміки керованої системи за допомогою графіків, осцилограм та інших засобів інтерпретації вихідних даних [22].

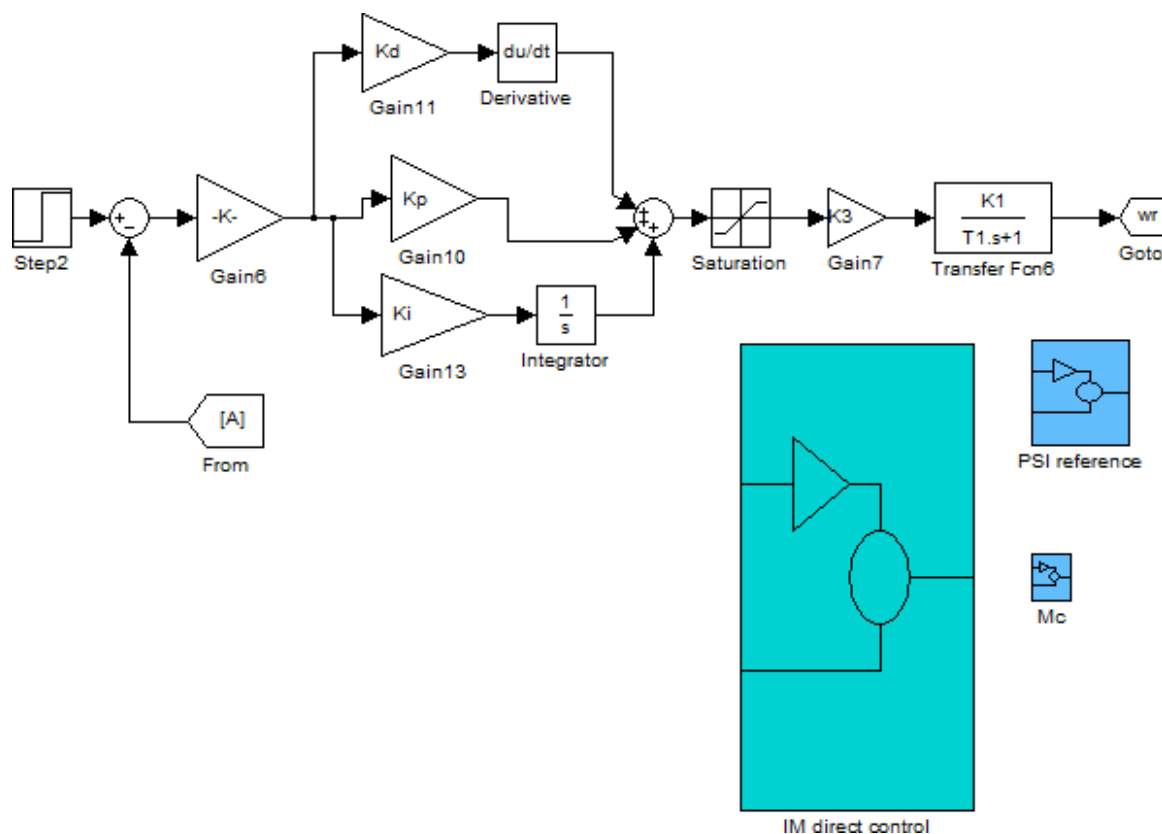


Рисунок 7.1 – Модель установки

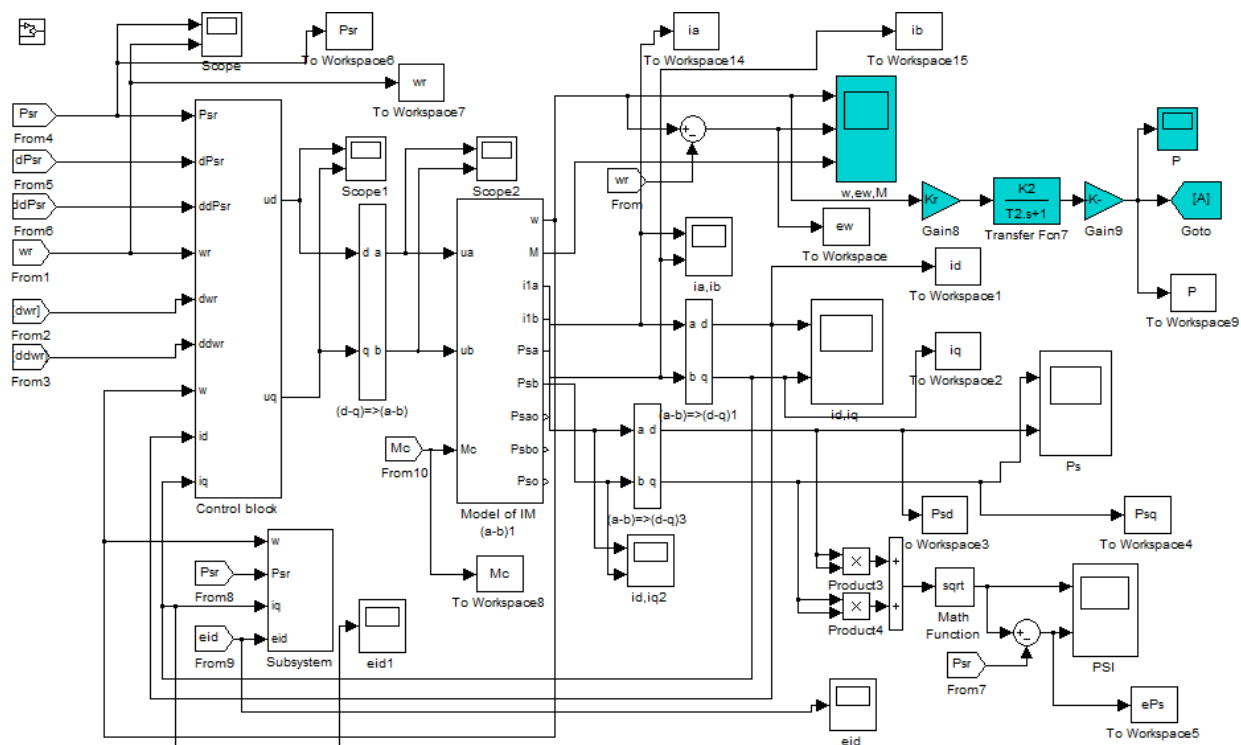


Рисунок 7.2 – Модель установки

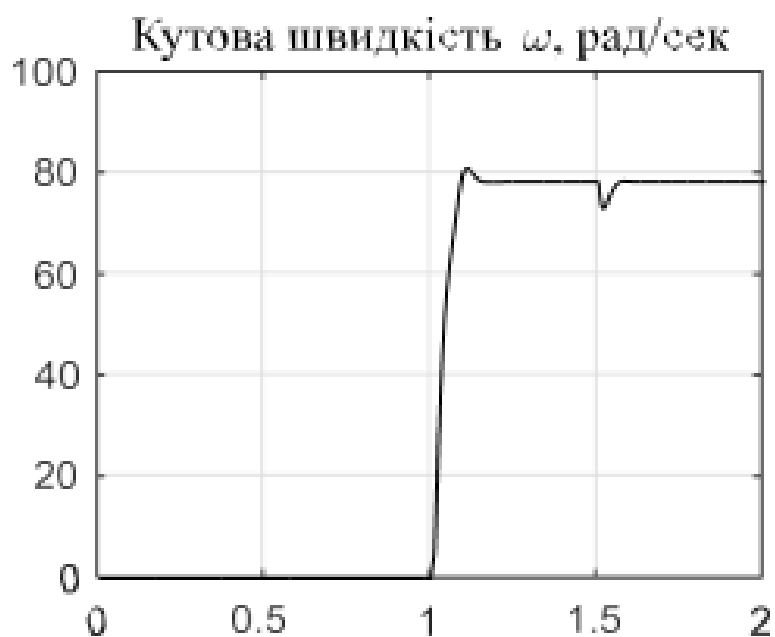


Рисунок 7.3 – Ілюстрація динамічної реакції системи керування у перехідних режимах

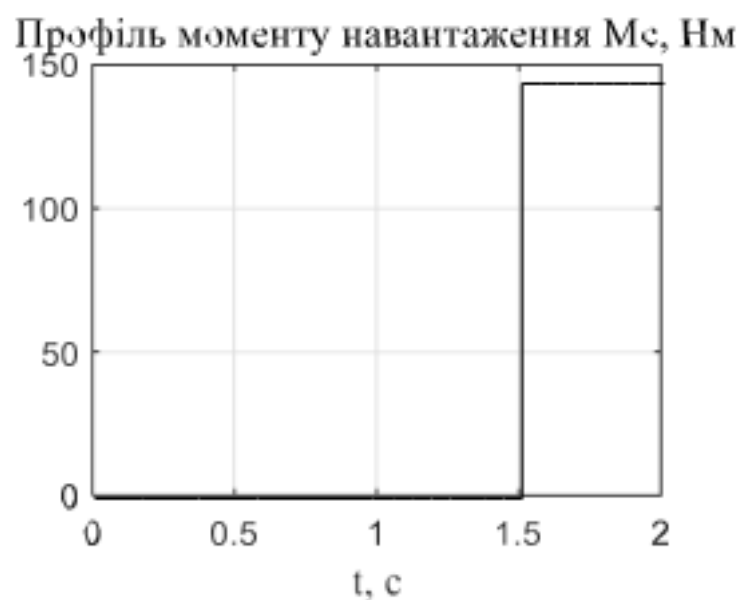


Рисунок 7.4 – Ілюстрація динамічної реакції системи керування у перехідних режимах

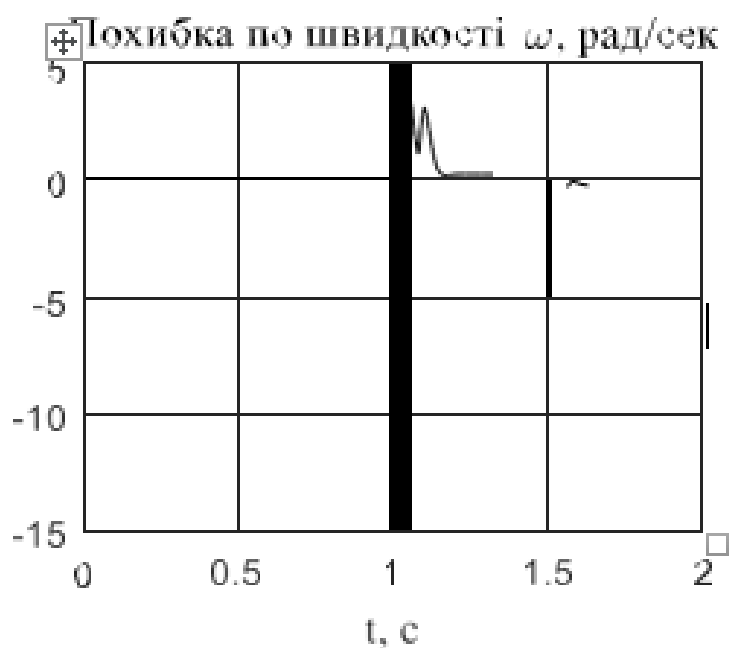


Рисунок 7.4 – Ілюстрація динамічної реакції системи керування у перехідних режимах

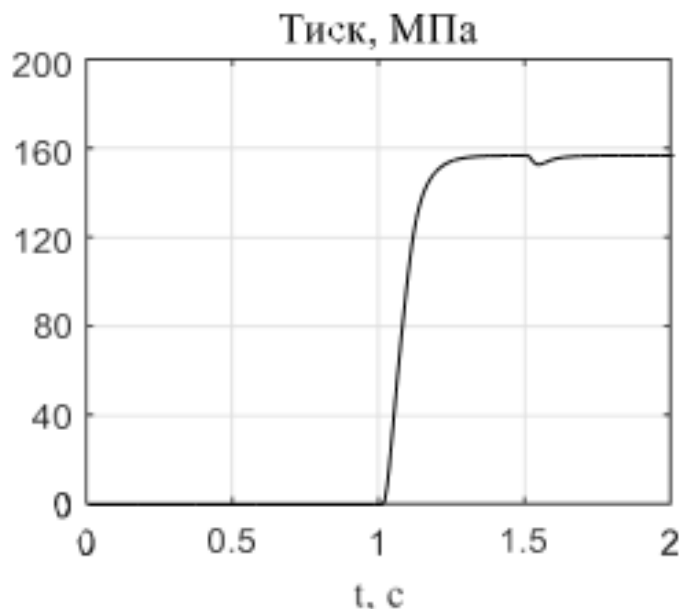


Рисунок 7.5 – Ілюстрація динамічної реакції системи керування у перехідних режимах

На основі аналізу представлених діаграм можна констатувати, що в момент часу, який відповідає 1 секунді, асинхронний двигун включається у режим роботи без прикладеного навантаження. Внаслідок цього кутова швидкість ротора зростає до значення 78,5 рад/с за відносно короткий проміжок часу — приблизно 0,15 секунди. Через 1,5 секунди після початку роботи на вал двигуна впливає додатковий навантажувальний момент величиною 143,72 Н·м, що викликає тимчасове зниження швидкості обертання приблизно на 5 рад/с. Однак, завдяки злагодженій роботі системи векторного керування, швидкість швидко стабілізується і повертається до попереднього рівня 78,5 рад/с упродовж короткого інтервалу часу — всього за 0,07 секунди, що фіксується у 1,57 секунди експериментального циклу [20].

Розроблена система автоматичного керування екструзійним обладнанням спрямована на досягнення стабільного та безперервного функціонування виробничого процесу, де основним критерієм ефективності є підтримання сталого рівня тиску у вихідній зоні формувальної головки. Цей параметр є визначальним для забезпечення високої якості кінцевого продукту та збереження

технологічних стандартів. Аналіз отриманих експериментальних даних, зокрема графіку тиску, демонструє, що протягом роботи системи значення тиску зберігається близьким до критично важливого технологічного показника — приблизно 156,9 мегапаскаля (МПа). Одночасно спостерігається стабільність кутової швидкості електродвигуна, що обертається із сталим значенням 78,5 рад/с, що є ключовим чинником для коректної роботи екструзійного вузла.

При переході до режиму навантаження, коли на вал двигуна накладається момент опору, реєструється короткочасне зниження тиску приблизно на 4,5 МПа, яке триває близько 0,07 секунди. Такий спад є природною реакцією системи на зміну навантажувальних умов. Проте завдяки високому рівню адаптивності і точності реалізації алгоритмів векторного керування, система оперативно відновлює тиск до вихідного технологічно необхідного рівня. Цей факт підтверджує ефективність запропонованої системи керування, яка не лише підтримує оптимальні параметри процесу в стабільних умовах, але й швидко адаптується до зовнішніх впливів, забезпечуючи безперервність і якість виробництва [23].

Висновок

У процесі верифікації правильності проведених розрахункових процедур та для забезпечення надійності результатів було здійснено розробку комплексної математичної моделі системи керування екструзійною установкою у програмному середовищі MATLAB 2009. Ця модель інтегрує основні фізичні та керуючі параметри технологічного процесу, що дозволяє детально і всебічно відтворити динамічну поведінку системи в різних режимах роботи. Завдяки побудованій моделі проведено глибокий аналіз перехідних процесів, що виникають у системі при зміні зовнішніх і внутрішніх умов, що дає змогу оцінити ефективність функціонування системи керування в режимах як запуску, так і стійкої експлуатації.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На підставі отриманих графічних результатів моделювання, які відображають перехідні характеристики системи, можна впевнено констатувати, що розроблена система управління демонструє високий рівень стабілізації продуктивності екструзійного обладнання. Це забезпечує не лише підтримання сталих параметрів технологічного процесу, а й сприяє покращенню якості кінцевої продукції, що є ключовим фактором для промислової експлуатації даної установки. Таким чином, застосування розробленої моделі є важливим кроком у напрямку автоматизації та оптимізації роботи екструзійного виробництва.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						69
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час реалізації роботи була створена комплексна система автоматичного керування (САК), призначена для забезпечення максимальної ефективності та стабільності процесу екструзії. Центральним елементом цієї системи є асинхронний електропривод екструдера, який оснащено сучасною технологією векторного управління швидкістю. Завдяки такому підходу стало можливим точне та оперативне регулювання режимів роботи обладнання, що сприяє підвищенню продуктивності та якості виробничого процесу.

У рамках роботи було виконано розробку та синтез типового варіанту системи автоматичного керування, спрямованої на забезпечення стабільного підтримання швидкості виходу екструзійного продукту. Дана система автоматичного керування побудована як одноконтурна схема із зворотним зв'язком, в якій ключовим регульованим параметром виступає тиск на виході екструдера. Запропонована структура дозволяє досягти високої точності регулювання процесу, що забезпечує надійність, стабільність і ефективність функціонування екструзійного обладнання в реальних виробничих умовах.

Було проведено детальний розрахунок потужності електродвигуна екструдера, спираючись на визначену продуктивність технологічного процесу. Враховуючи тип електричного струму, а також отримані значення крутного моменту і частоти обертання валу, було здійснено вибір основних силових компонентів системи. До складу обладнання увійшов асинхронний двигун моделі 4A16110M811Y3 з номінальною потужністю 11 кВт. Крім того, було спроектовано та розраховано силову та керуючу частини частотного перетворювача (ПЧ), адаптовані до заданої потужності двигуна, що забезпечує ефективне керування режимами роботи екструдера.

Для підтвердження коректності проведених теоретичних розрахунків у середовищі MATLAB версії 9 було розроблено комплексну математичну

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						70
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модель системи керування екструзійною установкою. На основі цієї моделі проведено всебічний аналіз динамічних режимів роботи системи. Отримані результати демонструють, що запропоновані параметри налаштування регуляторів ефективно забезпечують стабільне та точне управління продуктивністю екструзійного обладнання, що свідчить про високу якість розробленої системи керування.

Спираючись на наведений аналіз та результати, можна з повною впевненістю заявити, що всі завдання, визначені у рамках дипломного проекту, були успішно виконані у повному обсязі. Розроблена система автоматичного керування (САК), інтегрована з векторним керуванням асинхронним електроприводом для регулювання продуктивності екструзійного обладнання, цілком відповідає сучасним вимогам щодо точності перехідних процесів і швидкості реакції системи. Отже, створені технічні рішення мають необхідні експлуатаційні характеристики, що забезпечує їх ефективне використання у виробничих умовах та подальшу практичну реалізацію.

					ЕМКС 411002 000 ПЗ	Арк.
						71
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		