

**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 «Цифрова електромеханічна система керування режимами роботи  
електроприводів»

**Виконав(ла)**

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

Олександр БАРАУСОВ  
(ім'я, прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Керівник роботи**

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Рецензент роботи**

к.т.н., доц. Валерій КОЛОМІЄЦЬ  
(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.                           | 10 |
| 2 | РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ                       | 24 |
| 3 | РОЗРАХУНОК АД                                | 32 |
| 4 | НЕПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ КУТОВОЮ ШВИДКІСТЮ | 45 |
|   | Висновки                                     | 58 |
|   | Список використаних джерел                   | 60 |
|   | Додатки                                      | 63 |

|                  |                       |                 |               |             |  |  |             |                |
|------------------|-----------------------|-----------------|---------------|-------------|--|--|-------------|----------------|
|                  |                       |                 |               |             | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b>  |  |             |                |
| <i>Змін.</i>     | <i>Арк.</i>           | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |  |  |             |                |
| <i>Розроб.</i>   | <i>Бараусов О.В.</i>  |                 |               |             | <i>Цифрова електромеханічна система керування режимами роботи електроприводів.</i> | <i>Літ.</i>                                    | <i>Арк.</i> | <i>Аркушіє</i> |
| <i>Перевір.</i>  | <i>Кузнецов Б.І.</i>  |                 |               |             |  | 6  |             |                |
| <i>Т. контр.</i> |                       |                 |               |             |  | <i>БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна<br/>БД-Е21</i> |             |                |
| <i>Н. Контр.</i> | <i>Кузнецов Б.І.</i>  |                 |               |             |  |  |             |                |
| <i>Затверд.</i>  | <i>Коломієць В.В.</i> |                 |               |             |  |  |             |                |

## ВСТУП

Однією з найважливіших тенденцій, що визначають сучасний вектор розвитку науки та інженерії, є не лише вдосконалення вже існуючих технологічних рішень, а й активне формування нових поколінь технічних засобів, здатних виконувати функції вимірювання, регулювання та автоматизованого керування фізичними процесами в широкому спектрі застосувань. У цьому контексті особливе місце займають електромеханічні комплекси, які використовують принцип векторного керування для приводу асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором.

Ці системи вирізняються здатністю точно й ефективно трансформувати змінні електричного струму у такі форми сигналів, що придатні як для точного технічного контролю, так і для подальшої цифрової обробки, аналізу або регуляції в рамках складних автоматизованих систем. Завдяки своїй універсальності й надійності, подібні системи стали ключовим компонентом у технологіях, де необхідна висока точність позиціонування, стабільність робочих характеристик та адаптивність до змінних зовнішніх умов [1].

На сучасному етапі розвитку промисловості та науки простежується тенденція до масштабного впровадження інформаційно-вимірювальних приладів і систем нового покоління, що мають бути здатними функціонувати у взаємодії з інтелектуальними автоматизованими платформами управління. Особливої актуальності набувають векторно-керовані електроприводи, що забезпечують одночасний контроль над магнітним потокозчепленням і електромагнітним моментом, створюючи тим самим гнучку, динамічно стійку та керовану систему приводу.

Попит на подібні технології зростає внаслідок підвищених вимог до прецизійності регулювання, швидкодії, енергоефективності й компактності обладнання, що застосовується як у високоточних лабораторних умовах, так і у великомасштабних виробничих комплексах, де інтеграція цифрових технологій

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 7    |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

керування є критично необхідною. У багатьох сучасних галузях - від мехатроніки до біомедичних систем - реалізація електроприводів на базі асинхронних двигунів з векторним керуванням є ключовою умовою досягнення високих стандартів автоматизації.

У сучасній інженерній практиці надзвичайно важливим завданням є розширення сфери застосування та нарощування виробництва електромеханічних систем, що реалізують векторне керування приводами. Такі системи не обмежуються лише промисловими або енергетичними установками - вони знаходять широке застосування в екологічному моніторингу, біомедичних приладах, автоматизованих комплексах наукових досліджень, у тому числі в лабораторному обладнанні високої точності, де особливо важливим є стабільне регулювання динамічних параметрів та точне позиціонування виконавчих органів [2].

В умовах, коли вимірювання електричних і фізичних величин, таких як струм, напруга, температура, частота, тиск або швидкість, часто здійснюється в складних або нестабільних експлуатаційних середовищах, виникає потреба у використанні високонадійних, термостійких та інерційно нечутливих систем керування. У цьому контексті саме електромеханічні комплекси з векторним керуванням асинхронними електродвигунами, особливо реалізовані за схемою непрямого векторного керування, забезпечують оптимальне поєднання точності, адаптивності та енергоефективності для динамічно змінних умов роботи.

Зі стрімким розвитком високотехнологічних галузей, таких як аерокосмічна інженерія, біотехнологічне виробництво, наноматеріали, мікросистемна техніка та роботизовані системи, зростає і потреба у принципово нових підходах до вимірювань та керування складними об'єктами, що передбачають високу чутливість, точність і швидкодію. У таких сферах традиційні методи регулювання та контролю вже не відповідають вимогам часу, а тому векторно-керовані асинхронні приводи стають необхідним елементом новітніх інформаційно-керуючих платформ.

|              |             |                 |               |             |                           |      |
|--------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|              |             |                 |               |             | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|              |             |                 |               |             |                           | 8    |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

Крім того, застосування таких електроприводів активно впроваджується у дослідженнях, спрямованих на вивчення біофізичних процесів живих систем, створення інтелектуальних медичних технологій, захист довкілля, а також підвищення промислової та екологічної безпеки. У всіх згаданих випадках векторне керування дає змогу реалізовувати точні, гнучкі та масштабовані рішення, що враховують сучасні вимоги до автоматизації й технічної складності об'єктів [1].

|              |             |                 |               |             |                           |      |
|--------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|              |             |                 |               |             | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           | 9    |

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Пресове обладнання належить до класу машин, призначених для формоутворення матеріалів, що характеризуються пластичними властивостями. Суть роботи таких установок полягає у наданні заготовці певного профілю шляхом її продавлювання крізь спеціально сформований профілювальний елемент - пресову головку. Принцип дії цього обладнання базується на технології екструзії, яка передбачає перетворення механічної енергії обертання робочого органу в тиск і тепло, необхідні для обробки сировини.

У конструкції одночерв'ячного преса основними функціональними елементами виступають циліндричний корпус і черв'як, що виконує обертовий рух усередині нерухомого циліндра. Ключовий технологічний процес, характерний для даного типу обладнання - поступальне транспортування сировини вздовж осі шнека, під час якого одночасно відбувається низка взаємопов'язаних фізичних, термічних та хімічних явищ [2].

Під час переміщення матеріалу у внутрішньому каналі циліндра, внаслідок тертя, деформації та додаткового зовнішнього підігріву корпусу, вивільняється тепло, що сприяє плавленню або розм'якшенню полімерної сировини. Одночасно відбувається [2]:

- створення високого внутрішнього тиску, необхідного для ущільнення, з'єднання та стабілізації частинок;
- гомогенізація сипких або гранульованих матеріалів, що сприяє формуванню суцільної маси;
- ініціювання хімічних реакцій та фазових перетворень (наприклад, плавлення, полімеризації, дегазації);
- вилучення летких домішок або компонентів у вигляді пари, газу чи надлишкової вологи.

Завдяки інтеграції в єдиному технологічному процесі механічного транспортування, термічної обробки, ущільнення, активації фізико-хімічних

|       |      |          |        |      |                    |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|       |      |          |        |      | ЕМКС 124001 000 ПЗ | Арк. |
|       |      |          |        |      |                    | 10   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

перетворень і остаточного формоутворення матеріалу, черв'ячні преси проявляють високий ступінь універсальності та адаптивності до змінних умов виробництва. Така багатофункціональність робить їх незамінними у сучасних технологічних лініях, що забезпечують перероблення полімерів та пластмас різного походження і складу [2].

Ці агрегати ефективно використовуються в численних галузях промисловості, де ключовим фактором є точність дозування, стабільність технологічних параметрів і можливість безперервної обробки сировини. Зокрема, пресові машини шнекового типу стали основою процесів виготовлення синтетичних матеріалів, таких як [3]:

- пакувальні плівки і стрічки;
- технічні профілі для будівництва й машинобудування;
- труби, оболонки кабелів, електроізоляційні покриття;
- композити на основі термопластичних полімерів;
- побутові вироби з пластмас.

Крім того, конструктивна простота, енергоефективність і можливість глибокої автоматизації процесів роблять такі преси перспективним обладнанням для модернізації й оптимізації виробництва в умовах сучасної індустрії

Конструкція преса включає в себе сукупність функціональних вузлів та механізмів, що забезпечують ефективне виконання процесу формування пластичних матеріалів. Основними елементами такої установки є [4]:

- металевий корпус, оснащений системами нагріву, які підтримують необхідну температуру в зоні обробки матеріалу;
- робочий орган (зазвичай шнек або черв'як), що розміщений усередині корпусу та виконує транспортування, ущільнення і плавлення сировини;
- завантажувальний вузол, через який здійснюється подача сировини у зону пресування;

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 11   |

- привідний механізм, що забезпечує обертання шнека (часто реалізований на основі електродвигуна з редуктором);
- система автоматичного або напівавтоматичного регулювання температурного режиму, яка підтримує стабільні умови у зоні обробки матеріалу;
- контрольно-вимірювальні та регулювальні пристрої, призначені для моніторингу параметрів процесу, зокрема тиску, температури, частоти обертання тощо.

Сучасне обладнання характеризується високим рівнем та може бути класифіковане за різними критеріями, зокрема [2]:

- типом робочих органів (одношнекові, двошнекові, багатошнекові);
- кількістю гвинтів і характером їх взаємодії (паралельні, конічні, співобертові або зустрічнообертові);
- геометрією шнека (змінний або сталий крок, глибина каналу, профіль різьби);
- функціональним призначенням преса (первинна переробка, гранулювання, компаундування, виготовлення профілів);
- режимом експлуатації (перервний або безперервний);
- термодинамічними умовами процесу (холодна або гаряча екструзія, вакуумна дегазація тощо);
- співвідношенням довжини до діаметра шнека ( $L/D$ ), що є визначальним параметром для прогнозування якісних характеристик переробки матеріалу.

Завдяки такій варіативності конструкційних і функціональних параметрів, екструзійні преси можуть бути адаптовані до широкого спектру технологічних завдань, що забезпечує їх масове впровадження у виробництво полімерної продукції, харчовій, хімічній та фармацевтичній галузях.

У процесах пресування матеріалів температурний режим є одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливає на властивості кінцевого

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 12   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

продукту, а також на ефективність самого процесу. Залежно від температурних умов обробки сировини, прийнято виділяти три основні типи [4]:

- Холодний прес – здійснюється без підведення зовнішнього тепла. Формування виробу відбувається внаслідок високого механічного тиску, який викликає пластичну деформацію оброблюваного матеріалу. Такий підхід характерний для металевих заготовок або термочутливих полімерних сполук, які не потребують попереднього розігріву.

- Теплий прес – передбачає попереднє підігрівання сировини до визначеної температури перед подачею в зону шнека. Такий режим зменшує опір матеріалу при обробці, полегшує його формування та забезпечує рівномірність подальшого тверднення.

- Гарячий прес – найпоширеніший варіант у промисловому застосуванні, особливо при переробці термопластичних полімерів. У цьому режимі відбувається інтенсивне нагрівання сировини безпосередньо в зоні робочих органів преса (зокрема у каналі) за рахунок поєднання зовнішнього підігріву й внутрішнього тепловиділення від механічної дії шнека.

Під час гарячого пресу температура формованого матеріалу зазвичай коливається в діапазоні від 125 до 350 °С, залежно від виду полімеру. Після виходу з головки, матеріал все ще залишається пластичним і потребує швидкого охолодження, щоб забезпечити стабільність заданої форми та геометричних розмірів виробу [2].

Для цього використовуються різні методи охолодження [3]:

- примусове обдування холодним повітрям;
- зрошення водою або
- повне занурення екструдата у ванну з охолоджувальною рідиною (часто - холодна проточна вода, через яку проходить конвеєрна стрічка з виробом).

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 13   |

Ці етапи є невід'ємною частиною технологічного процесу, оскільки забезпечують остаточне твердження та стабілізацію виробу, що дозволяє уникнути деформацій та дефектів поверхні.

У сучасному пресовому обладнанні для переробки полімерних матеріалів найбільш широке застосування отримали установки з обертовими робочими елементами, зокрема - конструкції, де основну функцію формування та транспортування виконує шнек (черв'як). Такі машини вважаються найуніверсальнішим типом екструдерів, оскільки поєднують у собі простоту конструкції, високу продуктивність та задовільні змішувальні властивості [2].

Обертові черв'ячні робочі органи створюють умови для ефективного перемішування, ущільнення та гомогенізації полімерної маси. При цьому відбувається не лише механічне транспортування сировини вздовж осі шнека, а й активне теплоутворення внаслідок тертя, що є особливо важливим у процесах гарячої екструзії.

У залежності від функціонального призначення, геометричних характеристик та специфіки обробки матеріалу, черв'яки (шнеки) поділяють за такими ознаками [4]:

1. За числом витків гвинтової лінії:

- Однозахідні - мають один гвинтовий виток, найчастіше використовуються в універсальних пресах;
- Багатозахідні - забезпечують підвищену продуктивність, краще ущільнення і змішування сировини.

2. За формою і профілем гвинтової нарізки:

- Прямокутний профіль - застосовується при транспортуванні гранульованих та сипучих полімерів;
- Трикутний або трапецієподібний профіль - забезпечує кращу герметизацію і тиск на матеріал.

3. За геометрією каналу шнека (по довжині):

- Шнеки зі сталою глибиною каналу;

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 14   |

- Шнеки зі змінною глибиною (звужуваною або розширюваною) - підвищують ступінь ущільнення та якість гомогенізації.

4. За числом і взаємодією валів:

- Одночерв'ячні (одношнекові) - прості в обслуговуванні, надійні, підходять для більшості стандартних завдань;

- Двочерв'ячні (двошнекові) - з підвищеним змішувальним ефектом, можуть бути співобертовими або зустрічнообертовими.

5. За напрямом обертання і розміщення:

- Коаксіальні (обертання по осі);

- Похилі - коли вісь шнека розміщена під кутом до горизонталі (для спеціальних видів продукції або дозування).

Завдяки такій класифікації інженери-технологи мають змогу підібрати оптимальну конструкцію робочого органу, виходячи з вимог до якості екструдата, типу полімеру, режимів обробки та умов експлуатації обладнання [2].

Інжекційний механізм подачі, що часто позначається як інжекторний вузол або пристрій дозованого введення, являє собою спеціалізований компонент у складі автоматизованого технологічного обладнання, призначений для введення рідких, пастоподібних або дисперсних сумішей у заготовку чи формовий простір виробу. Основним функціональним елементом такої системи є штоковий привод, який забезпечує поступальне переміщення і тиск на робоче середовище, що у свою чергу гарантує дозовану подачу матеріалу через інжекційну головку або сопло [4].

На практиці подібні пристрої активно застосовуються у промисловому виробництві, де необхідне точне дозування та рівномірний розподіл рідких або напівв'язких компонентів у процесі формування кінцевого продукту. Сфера застосування включає [5]:

- виготовлення будівельних сумішей із заданими властивостями (герметики, клеї, композиційні заповнювачі);

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 15   |

- переробку полімерних матеріалів, зокрема у процесах лиття під тиском або екструзії;
- виробництво металевих профілів зі складною внутрішньою структурою;
- харчову промисловість, де йдеться про порційне наповнення форм або контейнерів рідинами, пюре, кремами тощо.

Принцип дії інжекторного механізму полягає в плавному протискуванні пластифікованої маси через калібрований отвір головки преса або інжектора, що дозволяє формувати виріб із заданими геометричними характеристиками. Програмоване керування подачею, зокрема за допомогою ПЛК або цифрових систем управління, дає змогу точно регулювати обсяг, тиск та швидкість подачі, що критично важливо для забезпечення однорідності та якості готової продукції [3].

Завдяки високій точності дозування, адаптивності до різних типів матеріалів і можливості інтеграції в автоматизовані лінії, інжекційні пристрої на основі штокових механізмів стали незамінними у багатьох галузях сучасної промисловості.

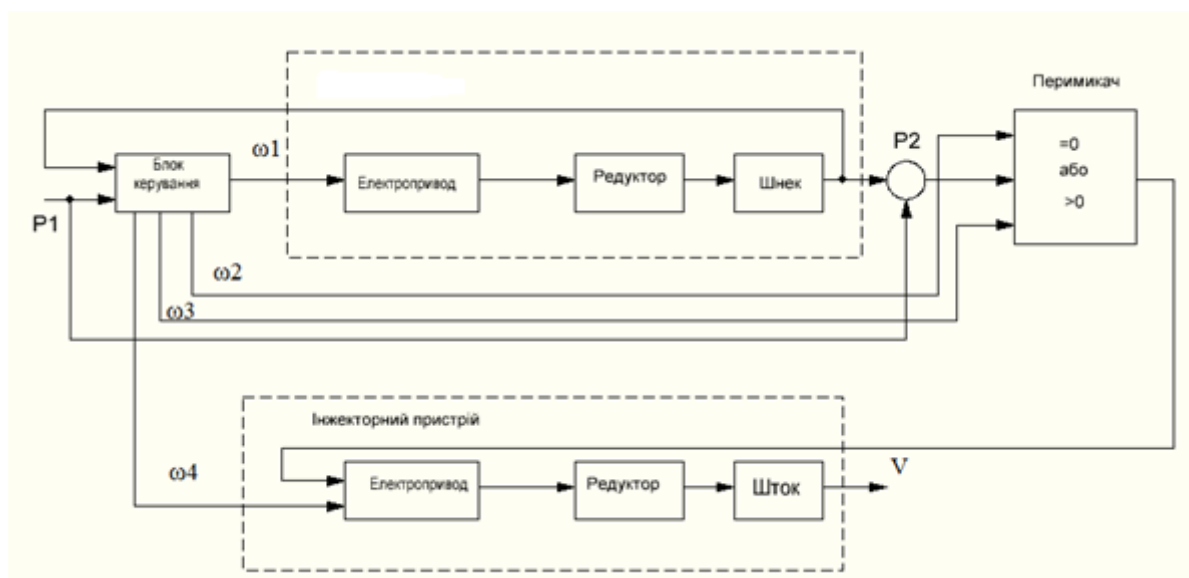


Рисунок 1.3 - Функціональна схема

Одним із ключових завдань даного технологічного процесу є розроблення системи автоматизованого керування рухом штока інжекційного пристрою, яка повинна забезпечувати високоточне дозування полімерної маси та її контрольоване введення в головний формувальний прес. Автоматична система повинна не лише підтримувати задану швидкість подачі, але й забезпечувати стабільність об'єму кожної порції, незалежно від варіацій властивостей матеріалу або режиму роботи преса [4].

Згідно з вимогами технологічного регламенту, інжекторний модуль функціонує у тісній взаємодії з пресом №2, формуючи цикл скоординованої роботи, де відпрацювання кожного етапу повинно бути чітко синхронізоване. Зокрема, цикл включає дві основні фази [6]:

1. Формування порції полімерного матеріалу у робочій камері інжектора (внутрішньому циліндрі), шляхом зворотно-поступального переміщення штока, який ущільнює та нагнітає матеріал;

2. Прецизійне введення сформованої порції полімеру у внутрішній канал преса №1 — на цьому етапі важливо дотримуватися як об'єму, так і швидкості введення, щоб уникнути порушень геометрії формування кінцевого виробу.

Циклічний режим роботи вимагає, щоб система автоматичного керування забезпечувала [6]:

- Точне позиціонування штока у кінцевих точках ходу;
- Програмовану швидкість переміщення в залежності від в'язкості полімеру;
- Зворотній зв'язок за тиском і положенням (через датчики тиску, лінійного переміщення або енкодери);
- Взаємодію з логікою керування пресом №2, для реалізації координованих пускових імпульсів.

Запропонована система повинна працювати у напівавтоматичному або повністю автоматизованому режимі, з можливістю оперативного налаштування

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 17   |

параметрів циклу (доза, тиск, швидкість) через панель керування або ПЛК-інтерфейс. Це дає змогу адаптувати технологічний процес до різних рецептур, типів полімерів або характеристик форми преса.

У відповідності до вимог технологічного процесу, система автоматизованого керування повинна забезпечити адаптивне формування сигналів завдання швидкості обертання електродвигуна преса №2, яке враховує поточні значення тиску полімерного розплаву в робочих зонах обох пресових установок. Це необхідно для забезпечення стабільного заповнення інжектора та точного введення дозованої порції матеріалу в головний канал преса №1 [5].

Як основа для реалізації управління обрано векторно-керований асинхронний електропривід, що функціонує на основі стандартного алгоритму непрямого векторного керування із відповідним налаштуванням контурів струму та швидкості. Такий підхід дозволяє забезпечити високоточне динамічне регулювання швидкості та моменту, а також забезпечує локальну експоненціальну стійкість системи керування [6].

- Сигнал  $\omega_1$  задає необхідну кутову швидкість обертання в режимі підготовки інжекції, тобто в момент наповнення інжекторного циліндра полімером з преса №2. Його значення визначається, виходячи з умов оптимального заповнення циліндра інжектора при допустимих значеннях тиску.

- Сигнали  $\omega_2$  та  $\omega_3$  формуються на основі аналізу градієнта тиску між пресами - різниці показань тензометричних або п'єзорезистивних датчиків  $P_1$  (у пресі №2) та  $P_2$  (у пресі №1). Ці сигнали регулюють рух штоку інжекційного пристрою в залежності від динаміки тиску у системі.

- Сигнал  $\omega_4$  активується на етапі введення сформованої порції полімеру у канал преса №1. Він забезпечує рух штока у зворотному напрямку зі сталою лінійною швидкістю  $V = 0,068$  м/с, яка була обґрунтована як оптимальна для забезпечення стабільної інжекції матеріалу без порушення рівня ущільнення чи гідродинамічного тиску.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 18   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Для реалізації кінематичного зв'язку між кутовим переміщенням електропривода та лінійним рухом штока інжекційного механізму використовується гвинтово-гаєчний механізм (передача типу "гвинт-гайка"). Така передача перетворює кутову швидкість обертання двигуна у лінійне переміщення подаючого органу, забезпечуючи високу точність подачі завдяки самофіксації механізму та передбачуваній кінематиці [2].

Згідно з параметрами приводу та передавального механізму, лінійна швидкість переміщення штока становить 0,068 м/с, що відповідає вимогам до глибини введення розплаву в канал головного преса, а також виключає гідроудар або нерівномірність тиску в зоні інжекції [4].

Преси належать до категорії промислових механізмів, що працюють у тривалому сталому режимі з постійним навантаженням, яке не зазнає суттєвих змін у процесі експлуатації. За відсутності необхідності в точному електронному регулюванні швидкості, для приводу пресів невеликої потужності доцільно застосовувати асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, що підключаються безпосередньо до трифазної мережі змінного струму напругою 380 В [4].

Передача обертального моменту від двигуна до виконавчого органу - штока інжекторного пристрою - реалізується через черв'ячний редуктор, що працює за схемою "гвинт-гайка". Така конструкція забезпечує перетворення кутової швидкості в поступальний рух, зберігаючи при цьому високу точність позиціонування та стабільність руху.

При виборі електродвигуна для пресової установки враховуються кілька важливих критеріїв [7]:

#### 1. Забезпечення плавного пуску

Електропривод повинен забезпечувати м'який старт, без стрибків навантаження. Це дозволяє запобігти виникненню надмірних імпульсів тиску в гідромеханічній системі, які могли б перевищити допустимі значення та призвести до деформацій, збоїв або передчасного зносу механічних компонентів.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 19   |

## 2. Можливість швидкого переналаштування

Конструкція приводу має передбачати модульність і блочну архітектуру, що суттєво спрощує як налаштування робочих режимів, так і обслуговування устаткування. У разі потреби це дозволяє оперативно змінювати функціональну логіку або замінювати вийшовші з ладу модулі без порушення цілісності системи.

## 3. Високий рівень експлуатаційної надійності

Обраний електропривод має відповідати підвищеним вимогам до надійності, адже від його стабільної роботи залежить безпечне функціонування лінії. Системи керування повинні мати захист від перевантажень, короткого замикання, перегріву та інших аварійних ситуацій, що забезпечить довготривалу безперебійну експлуатацію.

Урахування зазначених критеріїв є необхідною умовою для оптимального вибору електромеханічного приводу, що відповідатиме технічним характеристикам, експлуатаційним умовам та вимогам технологічного процесу [2].

Процес керування подачею полімерного матеріалу до головного преса реалізується за допомогою регулювання частоти обертання електродвигуна, який приводить у рух шток інжекторного пристрою. Управління здійснюється поетапно: на початковому етапі полімер повільно нагнітається у циліндр інжектора, після чого відбувається перехід до фази швидкої інжекції, що забезпечує динамічну подачу розплаву у головну пресову зону [5].

Для ефективного функціонування такої системи необхідно врахувати комплекс технічних і експлуатаційних вимог, що висуваються до електромеханічного приводу привідної частини інжектора.

Основні технічні вимоги до електромеханічної системи керування [6]:

### 1. Мінімальне енергоспоживання

Система повинна забезпечувати раціональне використання електроенергії, з урахуванням динамічних режимів і змін навантаження, шляхом оптимізації траєкторій прискорення та гальмування штока.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 20   |

## 2. Стабілізація тиску в робочих зонах

Керування повинно забезпечувати постійний контроль та утримання заданих рівнів тиску у циліндрі інжектора та пресових каналах, що є критично важливим для однорідного заповнення форми.

## 3. Підтримання стабільної лінійної швидкості переміщення

Необхідно забезпечити точне регулювання швидкості лінійного руху штока, особливо у фазі інжекції, де від цього залежить рівномірність подачі розплаву.

## 4. Запобігання неконтрольованому переміщенню матеріалу

Система має бути оснащена механізмами і програмною логікою, що виключають випадкову або неконтрольовану подачу порцій полімеру, яка може спричинити дефекти виробу або аварійні ситуації.

## 5. Висока точність дозування

Всі цикли інжекції повинні чітко відповідати об'єму заданої порції полімерного матеріалу, що забезпечує сталість геометричних параметрів кінцевого виробу.

Вимоги до показників якості керування [7]:

- Діапазон регулювання швидкості обертання приводу:

В межах від 0 до 143 рад/с, що охоплює як повільні, так і швидкі етапи технологічного циклу.

- Максимально допустиме перевищення (перерегулювання):

Не більше 3%, що гарантує відсутність надлишкового розгону чи коливань при досягненні заданої швидкості.

- Гранична величина статичної похибки регулювання швидкості:

Не повинна перевищувати 3%, що свідчить про високу точність стабілізації заданих параметрів в усталеному режимі.

- Об'єм однієї порції полімеру:

Повинен бути чітко витриманий на рівні 600 мм<sup>3</sup>, з допустимим відхиленням не більше  $\pm 2\%$ .

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 21   |

У цьому розділі представлено огляд конструкційного виконання пресів, їх технологічної класифікації, а також аналіз призначення і принципів функціонування у контексті сучасних автоматизованих систем виробництва. Окрему увагу приділено технічним вимогам до електроприводів та систем керування, що забезпечують ефективну і стабільну роботу інжекторного пристрою як складової частини автоматизованої електромеханічної системи - зокрема насосної станції для подачі полімерних сумішей [4].

Пресовий механізм є однією з ключових машин, призначених для оброблення пластичних і термопластичних матеріалів методом продавлювання через головку, тобто формування матеріалу здійснюється в результаті його протискування під тиском через відповідний формувальний інструмент. Основою цього методу є екструзія - процес, який поєднує механічний тиск, тепло та контрольовану швидкість подачі.

Для забезпечення ефективної, безпечної та економічно доцільної роботи інжекторного пристрою, в процесі проектування електромеханічної системи необхідно дотримуватись таких основоположних вимог [6]:

#### 1. Енергоефективність системи

Повинна бути гарантована мінімізація енергоспоживання при збереженні точності керування та динамічної стабільності приводу.

#### 2. Стабілізація тиску у робочих зонах

Керуюча система зобов'язана підтримувати сталі значення тиску в робочій камері інжекторного пристрою, а також у каналах основного преса, що впливає на якість подачі та формування полімерної маси.

#### 3. Контроль лінійної швидкості штока

Швидкість переміщення штока повинна відповідати встановленим техпроцесом параметрам, що забезпечить узгодженість подачі матеріалу в задані часові межі.

#### 4. Запобігання випадковим переміщенням порцій полімеру

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 22   |

Система керування повинна бути оснащена механізмами блокування і зворотного контролю, які унеможливають неконтрольоване просування або зворотне переміщення матеріалу.

5. Уникнення аварійних або неефективних режимів

Електромеханічна система має включати засоби діагностики, моніторингу та захисту, які попереджають виникнення перевантажень, перегрівів та інших небезпечних режимів, що можуть призвести до збоїв у роботі інжектора.

6. Висока точність дозування матеріалу

Подані об'єми полімеру повинні відповідати заданим дозам з мінімальними допустимими похибками, що має вирішальне значення для формування якісної продукції.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 23   |

## 2 РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ

У сучасних галузях високотехнологічного виробництва - таких як авіаційне та космічне конструювання, суднобудування, автомобілебудування - широке застосування знаходять профільні та протяжні елементи складної геометрії, які формують несучу або обшивальну основу конструкцій [2]. Оскільки ці компоненти зазнають значних динамічних і статичних навантажень протягом експлуатації, забезпечення надійного контролю їх технічного стану, зокрема виявлення критичних змін у напружено-деформованому стані, є вкрай важливою умовою безпечного функціонування технічних систем загалом [4].

Переважає більшість таких конструкцій виготовляється методом екструзії (витискування матеріалу), що дозволяє одержувати заготовки або готові деталі з різноманітним перерізом. Метод вирізняється високою продуктивністю, економічністю та технологічною варіативністю, що дає змогу отримати вироби зі складною конфігурацією поперечного профілю без необхідності механічної обробки після виготовлення. Саме це робить екструзію особливо актуальною при створенні високоточних і функціонально навантажених компонентів, які широко застосовуються в машинобудуванні, енергетиці, побутовій техніці та інженерних системах [2].

В умовах стрімкого розвитку інформаційно-вимірювальних технологій та цифрової автоматизації виробництва особливої актуальності набуває задача точного й динамічно контрольованого подавання матеріалу під час процесів пресування, лиття під тиском та екструзії. З огляду на це, сучасні дослідження фокусуються на розробці інтелектуальних систем управління подачею полімерів, композиційних матеріалів, а також металевих сплавів, що базуються на застосуванні адаптивних електромеханічних приводів із замкненими контурами зворотного зв'язку.

Ці системи мають забезпечувати високоточне регулювання витрати матеріалу, тиску, температури та швидкості подачі, що є критично важливим для

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 24   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

формування однорідної, структурно стабільної та технологічно завершеної продукції. У свою чергу, впровадження керованих інжекторних пристроїв, що інтегруються з основними технологічними вузлами, дозволяє реалізовувати складні сценарії введення сировини у виробничий потік на основі алгоритмів з використанням сенсорних даних, регуляторів ПІ типу та моделей на основі цифрової ідентифікації параметрів потоку [3].

У підсумку, оптимізація процесів подачі матеріалу в формувальні зони обладнання та розробка нових підходів до їх автоматизованого керування відкривають нові можливості для підвищення ефективності технологій виготовлення профільних виробів і підвищення загальної якості кінцевої продукції.

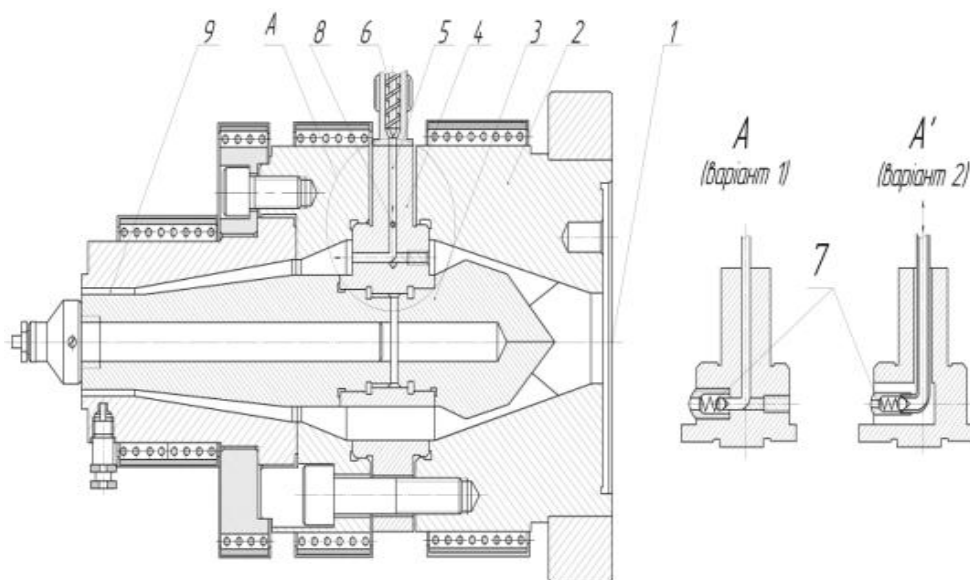


Рисунок 2. 1 - Головка для виготовлення труб

На графічному зображенні представлено вдосконалений варіант конструкції трубчастої пресової головки, яка призначена для цілеспрямованого введення функціонального матеріалу у стінку формованої полімерної труби безпосередньо в процесі її виготовлення методом пресового формування [4].

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 25   |

Конструктивна особливість цієї модифікованої системи полягає в тому, що елемент фіксації (тримач), позначений як позиція 4, виконано у формі опорних ніжок. Ці ніжки інтегрують в собі принаймні один впускний канал (позиція 5). Цей канал має двостороннє функціональне з'єднання: на вхідному боці - з окремим джерелом додаткової подачі полімерного матеріалу (позиція 6), а на виході - із зворотним клапаном (позиція 7), який унеможливорює зворотний рух матеріалу та забезпечує цілеспрямовану інжекцію [3].

Додатковий пристрій живлення, що функціонує незалежно від основної подачі, дозволяє дозовано вводити суміш основного полімеру та інтегрованих інтелектуальних сенсорних елементів (позначених як 8) у визначену частину товщини формувального каналу (позиція 9). Такий підхід забезпечує контрольовану локалізацію датчиків всередині виробу відповідно до функціонального призначення.

Позиціонування сенсорних елементів у товщі сформованої стінки труби залежить від кількох параметрів [4]:

- геометричних характеристик вихідної секції формуючого каналу,
- часово-просторових інтервалів введення суміші (регульованих пристроєм додаткової подачі),
- а також гідродинаміки взаємодії основного й допоміжного потоків розплаву полімеру в зоні їхньої взаємної течії.

Завдяки такій конструкції стає можливим інтегрувати розумні датчики безпосередньо в матеріал виробу на етапі його формування, що значно спрощує процес виробництва "розумних" полімерних труб із вбудованими функціями діагностики, контролю температури, тиску або деформацій під час експлуатації [2].

Втім, у процесі функціонування пресу, виникає суттєва інженерна складність, пов'язана з необхідністю ефективного введення додаткового матеріалу в основний потік полімерного розплаву, який за своєю фізико-механічною природою належить до високов'язких середовищ. У такому випадку,

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 26   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

гідродинамічний опір потоку у формувальному каналі значно зростає, і зусиль, які створює черв'як малого діаметру або укороченої геометрії, стає недостатньо для стабільної інжекції вторинного матеріалу.

З огляду на це, постає необхідність впровадження альтернативних та ефективніших способів подачі полімерної суміші до зони змішування, зокрема шляхом використання конструктивно адаптованих інжекторних пристроїв, здатних створювати підвищений тиск або забезпечувати гідравлічне подолання опору основного потоку [5].

На підставі аналітичного аналізу різних варіантів оснащення прес головки допоміжними модулями, які вводять додаткові компоненти в задану координату формувального каналу, запропоновано модернізовану конструкцію інжекційного розподільного вузла, що реалізує програмований контроль концентрації, об'єму і частоти дозування матеріалу.

Запропоноване технічне рішення дозволяє не лише здійснювати точне позиціонування суміші в тілі полімерного виробу, але й забезпечує умови для багатокomпонентного формування профілю виробу в реальному часі, з можливістю гнучкого налаштування подачі інгредієнтів залежно від умов технологічного процесу або зміни параметрів навколишнього середовища (температури, в'язкості, тиску) [4].

Таким чином, використання удосконалених інжекційних вузлів у складі формуючої головки відкриває перспективи для виготовлення функціонально складних, технологічно точних і структурно градієнтних полімерних виробів, які раніше було неможливо реалізувати.

|       |      |          |        |      |                    |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|       |      |          |        |      | ЕМКС 124001 000 ПЗ | Арк. |
|       |      |          |        |      |                    | 27   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

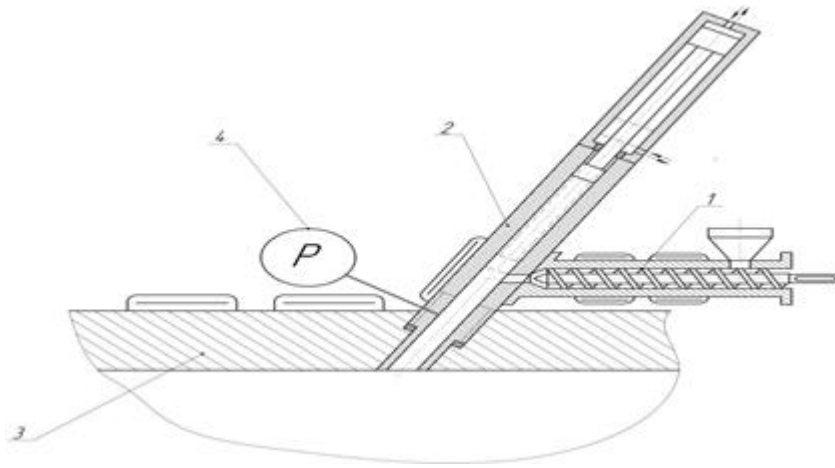


Рисунок 2.2- Схема пристрою

У відповідності до технологічної схеми, під час етапу наповнення інжекційного каналу, черв'ячний пластикатор (поз. 1) виконує функцію стабілізації тиску розплаву. Цей тиск на вході підтримується на рівні, еквівалентному тиску у вихідній ділянці формувального каналу, що забезпечує безперервність руху потоку та збереження гомогенності суміші.

Після завершення стадії підготовки суміші та досягнення тиску рівноваги, в дію вступає інжекційний плунжер (поз. 2), який ініціює процес дозованого введення попередньо підготовленої полімерної композиції, включаючи вмонтовані інтелектуальні датчики, у напрямку до формуючої зони. Швидкість цього переміщення задається кінематичною характеристикою плунжера, яка є критично важливою для досягнення точності введення дозованої порції.

У конструкції пластикатора реалізовано систему регулювання температурного режиму, що представлена сукупністю нагрівальних елементів і вентиляційних пристроїв. Ця система має забезпечувати постійну температуру розплаву в робочому об'ємі каналу, однак в умовах переривчастого або періодичного обертання черв'яка, стабільність температурного режиму суттєво ускладнюється. Це пов'язано з тим, що при кожному циклі обертання відбувається додатковий нагрів за рахунок внутрішнього тертя, тобто дисипації механічної енергії в масі полімеру.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 28   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Значну роль у цьому процесі відіграє енергетичний внесок дисипаційної складової, яка генерується внаслідок сил в'язкого тертя та зсуву між шарами полімеру. Для кількісної оцінки цього тепловиділення використовується аналітична формула питомої тепловиділеної потужності, яка залежить від кутової швидкості обертання шнека, в'язкісних характеристик полімерного розплаву [2]

$$q = \tau \cdot g \quad (2.1)$$

$$g = \frac{\pi D n}{h_2} \quad (2.2)$$

Аналіз динаміки інжекційного процесу показує, що величина глибини проникнення полімерної маси в структуру формувального каналу безпосередньо залежить від заданої лінійної швидкості руху інжекторного штоку. На підставі чисельного експерименту, виконаного в середовищі моделювання, були отримані залежності глибини занурення матеріалу (в міліметрах) від зміни швидкості інжекційного введення (в метрах на секунду). Відповідні результати представлені у вигляді графічної залежності, що демонструє нелінійний характер приросту глибини занурення при зростанні швидкості подачі розплавленої маси.

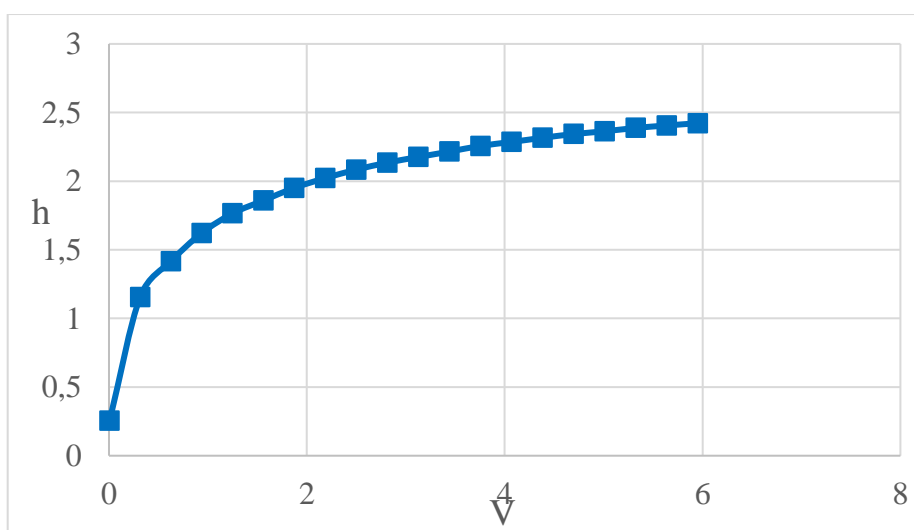


Рисунок 2. 3 - Залежність глибини від швидкості

Процедура чисельного моделювання процесу інжекції проводилась із урахуванням наступних вхідних параметрів: середня швидкість потоку полімерної маси в основному формувальному каналі становила приблизно 0,02 метра за секунду, а геометричні характеристики поперечного перерізу каналу щілинного типу задавалися висотою 5 мм. Зазначене значення товщини є критичним для забезпечення рівномірного протікання матеріалу в зоні формування.

У конструкції інжекційного блоку для приводу поступального руху штоку передбачено використання електропривода асинхронного типу, який характеризується номінальною кутовою швидкістю обертання 143 рад/с. З метою перетворення обертального руху валу електродвигуна на поступальний рух штоку, у системі реалізовано механізм гвинтової передачі типу "гвинт-гайка", що виконує функцію силової кінематичної ланки.

Оскільки у процесі інжекції навантаження на гвинтову пару змінюється за напрямком (тобто присутні як осьові зусилля на стиск, так і на розтяг), було доцільним використанням різьбового з'єднання з трапецеїдальним профілем, що забезпечує підвищену міцність, зносостійкість та стійкість до реверсивних навантажень [4].

У межах даного розділу було розглянуто оновлену конструкцію трубчастої пресової головки, яка призначена для введення матеріалу безпосередньо у стінку полімерної труби в процесі її формування методом пресування. Описано принцип дії запропонованого модифікованого інжекційного пристрою, що забезпечує дозоване та локалізоване подавання композитної суміші у задану ділянку формувального каналу, що суттєво покращує керованість структурою готового виробу.

Особливу увагу в дослідженні приділено механізму приводу інжекційного вузла. Як виконавчий орган, що забезпечує рух подаючого штоку інжектора, було обґрунтовано вибір електромеханічної системи на базі асинхронного

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 30   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

електродвигуна, який відзначається високою надійністю, стабільністю роботи у тривалому режимі та добрим співвідношенням “вартість/ефективність”.

Для перетворення обертального моменту двигуна в лінійний поступальний рух штока, використовується кінематичний перетворювач типу “гвинт-гайка”, що забезпечує високу точність позиціонування та можливість реалізації двостороннього (реверсивного) руху з високим передавальним зусиллям. Конструктивно реалізована пара гвинт-гайка має трапецеїдальну різьбу, яка ідеально підходить для силових передавальних вузлів, що працюють у складних режимах, зокрема – при змінному напрямі прикладеного зусилля.

Завдяки інтеграції інжекційного механізму з електроприводом і гвинтовою передачею забезпечується точне дозування об’єму матеріалу, контроль параметрів переміщення штока та висока адаптивність системи до змін технологічного навантаження під час процесу пресування.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 31   |

### 3 РОЗРАХУНОК АД

Процес визначення необхідної потужності приводу, який забезпечує поступальний рух штока в інжекційному пристрої, базується на розрахунку величини крутного моменту, що необхідний для подолання опору при інжекції матеріалу. Цей момент безпосередньо залежить від ряду конструктивних і технологічних параметрів, зокрема - діаметра гвинта, кроку різьби, типу передачі, а також величини тиску розплавленого полімеру, що діє на торцеву поверхню штока в момент подачі матеріалу у формуючий канал [5].

Таким чином, вихідними даними для обчислення крутного моменту є [6]:

- внутрішній тиск у робочій камері інжектора (створений як опором основного потоку полімеру, так і протитиском формувального каналу),
- діаметр робочої частини штока,
- механічні характеристики гвинтової передачі (коефіцієнт тертя, передаточне число, механічний ККД),
- конструкційні особливості інжекційного пристрою.

Розрахунок дозволяє обґрунтовано підібрати електродвигун, який здатен ефективно функціонувати в умовах циклічного навантаження та забезпечити необхідну динаміку інжекційного процесу при збереженні енергоефективності та механічної надійності системи.

Конструктивна будова штока інжекторного механізму є ключовим елементом інжекційної системи, що відповідає за точне, дозоване подавання полімерного матеріалу в формувальний канал. У модернізованій версії пристрою шток виконує роль рухомого виконавчого органу, який тісно взаємодіє із силовим приводом через гвинтову (або черв'ячну) передачу, забезпечуючи перетворення обертового руху привідного вала в поступальний рух [7].

Конструктивно шток виконаний з високоміцного металевого сплаву, що витримує динамічні та теплові навантаження, які виникають під час циклічного пресування розплаву. Поверхня штока може бути додатково оброблена шляхом

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 32   |

нанесення зносостійкого покриття для зниження коефіцієнта тертя та збільшення ресурсу служби.

У корпусній частині інжектора шток переміщується у направляючій втулці з ущільненнями, які забезпечують герметичність та запобігають витіканню розплавленої суміші. Для контролю положення штока та керування його рухом в системі передбачені сенсори зворотного зв'язку (наприклад, індуктивні або оптичні датчики лінійного переміщення).

Інтеграція електромеханічного приводу, що працює в парі з передачею типу "гвинт-гайка", забезпечує можливість високоточного керування лінійною швидкістю штока, що критично важливо для рівномірного дозування полімеру. Така конструкція дозволяє гнучко регулювати об'єм кожної інжекційної порції в залежності від тиску, температури матеріалу та вимог до кінцевого виробу [6].

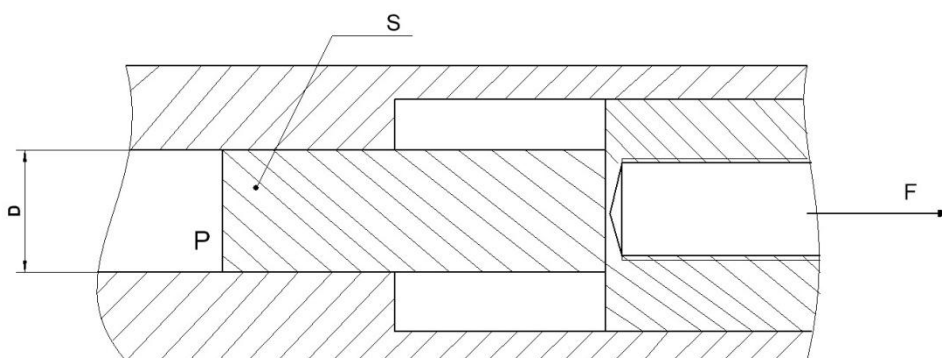


Рисунок 3.1 - Конструкція пристрою

При проектуванні та розрахунку силової частини інжекторного пристрою важливо встановити значення сили, яка необхідна для подолання опору матеріалу в робочій камері пристрою. Основним параметром, що визначає зусилля, яке повинен створювати шток, є тиск розплавленої полімерної суміші в циліндрі інжекційного вузла [7].

Це співвідношення дозволяє визначити площу поперечного перерізу циліндра, на яку діє тиск, і відповідно – силу, що виникає внаслідок цього тиску. Вона є визначальною для подальшого підбору потужності приводного

|       |      |          |        |      |                    |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|       |      |          |        |      | ЕМКС 124001 000 ПЗ | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 33   |

електродвигуна, а також для проєктування гвинтової пари, здатної передати таке зусилля на шток без втрат точності, вібрацій чи проковзування [7].

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.15 \cdot 10^2}{4} = 78.5(\text{мм}^2) = 78.5 \cdot 10^{-6}(\text{м}) \quad (3.1)$$

$$F = P \cdot S = 20 \cdot 10^6 \cdot 78.5 \cdot 10^{-6} = 1570(\text{Н}) \quad (3.2)$$

$$M = \frac{F \cdot V}{\omega} = \frac{1570 \cdot 0.068}{143} = 0.746(\text{Н} \cdot \text{м}) \quad (3.3)$$

$$P = M \cdot \omega = 0.823 \cdot 143 = 106.76(\text{Вт}) \quad (3.4)$$

Згідно з отриманим значенням розрахованої потужності, для приводу інжекційного штока доцільно обрати асинхронний електродвигун загальнопромислового типу з короткозамкненим ротором, який відповідає вимогам потужності, частоти обертання, пускового моменту та надійності - 4AA56A4Y3i [5].

Створення адекватної математичної моделі асинхронного двигуна вимагає формалізації фізичних процесів, які відбуваються в машині, на основі певних спрощень і допущень. Для забезпечення узгодженості з реальними умовами функціонування та можливості застосування в середовищі MATLAB/Simulink, модель повинна відповідати ряду базових гіпотез [8]:

1. Ненасиченість магнітного кола. Передбачається, що магнітна система двигуна не перебуває в режимі насичення, а отже, її магнітна проникність приймається за нескінченну. Це дозволяє лінеаризувати залежності між потоками та струмами, що значно спрощує аналітичний опис.

2. Ідеалізація втрат. Втрати енергії, обумовлені гістерезисом у феромагнітних матеріалах і вихровими струмами, у даній моделі вважаються

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 34   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

незначними і не враховуються. Такий підхід виправданий у рамках дослідження основних режимів роботи та побудови векторного керування.

3. Постійність індуктивностей розсіювання. Приймається, що індуктивності розсіювання як обмотки статора, так і ротора не залежать від кута обертання ротора. Таким чином, нехтуються просторові гармоніки та вплив конструктивної несиметрії.

Для подальшої реалізації математичної моделі в середовищі Simulink платформи MATLAB, необхідно провести переходи між системами координат. Зокрема, на першому етапі опис моделі виконується в ортогональній стаціонарній системі координат  $a-b$  (двохфазна площина). Надалі, з метою реалізації алгоритмів векторного керування, доцільним є подання моделі у синхронно обертовій системі координат  $d-q$ , яка обертається зі швидкістю, що відповідає синхронній частоті поля [9].

У координатах  $d-q$  (які використовуються у векторному керуванні), рівняння асинхронного двигуна набувають наступного вигляду [9]:

- Електричні рівняння обмоток статора та ротора,
- Математичний опис потокозчеплення,
- Вираз для електромагнітного моменту,
- Рівняння механіки обертального руху.

Цей підхід дозволяє зручно інтегрувати модель в структуру алгоритмів векторного або полевого керування, що передбачають декомпозицію струмів на потокову та моментну складові.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 35   |

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(\mathbf{M} - \mathbf{M}_c), \quad \mathbf{M} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q})$$

$$\dot{\psi}_{1d} = -\alpha_1 \psi_{1d} + \omega_0 \psi_{1q} + \alpha_1 L_m i_{2d} + u_{1d}$$

$$\dot{\psi}_{1q} = -\alpha_1 \psi_{1q} - \omega_0 \psi_{1d} + \alpha_1 L_m i_{2q} + u_{1q} \quad (3.5)$$

$$\dot{i}_{2d} = -\gamma_1 i_{2d} + \omega_2 i_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \psi_{1q} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2d} - \beta_1 u_{1d}$$

$$\dot{i}_{2q} = -\gamma_1 i_{2q} - \omega_2 i_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \psi_{1d} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2q} - \beta_1 u_{1q}$$

$$\bar{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{R}_1 \bar{\mathbf{i}}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + \omega_k \mathbf{J} \bar{\Psi}_1 \quad (3.6)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{R}_2 \bar{\mathbf{i}}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + (\omega_k - \omega) \mathbf{J} \bar{\Psi}_2,$$

$$\mathbf{u}_1 = (u_{1a}, u_{1b})^T$$

$$\mathbf{i}_1 = (i_{1a}, i_{1b})^T \quad (3.7)$$

$$\Psi_1 = (\psi_{1a}, \psi_{1b})^T,$$

$$\mathbf{u}_2 = (u_{2d}, u_{2q})^T$$

$$\mathbf{i}_2 = (i_{2d}, i_{2q})^T \quad (3.8)$$

$$\Psi_2 = (\psi_{2d}, \psi_{2q})^T.$$

$$\bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{\mathbf{i}}_1 + L_m \bar{\mathbf{i}}_2$$

(3.9)

$$\bar{\Psi}_2 = L_m \bar{\mathbf{i}}_1 + L_2 \bar{\mathbf{i}}_2.$$

$$\bar{\mathbf{i}}_2 = L_2^{-1} (\bar{\Psi}_2 - L_m \bar{\mathbf{i}}_1), \quad (3.10)$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 36   |

$$\vec{\Psi}_1 = \frac{L_m}{L_2} \vec{\Psi}_2 + \left( L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1, \quad (3.11)$$

$$\vec{\Psi}_2 = \frac{L_2}{L_m} \vec{\Psi}_1 - \frac{L_2}{L_m} \sigma \vec{i}_1, \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_2 = R_2 \left[ L_2^{-1} \left( \frac{L_2}{L_m} \vec{\Psi}_1 - \frac{L_2}{L_m} \sigma \vec{i}_1 \right) - \frac{L_m}{L_2} \sigma \vec{i}_1 \right] + \\ + \frac{L_2}{L_m} \vec{\Psi}_1 - \frac{L_2}{L_m} \sigma \vec{i}_1 - \omega p_n \mathbf{J} \left( \frac{L_2}{L_m} \vec{\Psi}_1 - \frac{L_2}{L_m} \sigma \vec{i}_1 \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\vec{i}_1 = - \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta + \alpha \right) \mathbf{i}_1 + \omega p_n \mathbf{J} \mathbf{i}_1 + \frac{\alpha}{\sigma} \vec{\Psi}_1 - \omega p_n \mathbf{J} \frac{1}{\sigma} \vec{\Psi}_1 + \frac{1}{\sigma} \vec{u}_1 - \beta \vec{u}_2, \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} M = \frac{3}{2} L_m p_n \left( \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \right) = \frac{3}{2} L_m p_n \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \left( \frac{\Psi_1}{L_m} - \frac{L_1}{L_m} \mathbf{i}_1 \right) = \frac{3}{2} p_n \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \Psi_1 = \\ = \frac{3}{2} p_n \left( \psi_{1a} i_{1b} - \psi_{1b} i_{1a} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\dot{\theta} = \omega;$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} p_n \left( \psi_{1a} i_{1b} - \psi_{1b} i_{1a} \right);$$

$$\dot{\psi}_{1a} = -R_1 i_{1a} + u_{1a};$$

$$\dot{\psi}_{1b} = -R_1 i_{1b} + u_{1b};$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma_2 i_{1a} - \omega p_n i_{1b} + \alpha \sigma^{-1} \psi_{1a} + \omega p_n \sigma^{-1} \psi_{1b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} - \beta u_{2a};$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma_2 i_{1b} + \omega p_n i_{1a} + \alpha \sigma^{-1} \psi_{1b} - \omega p_n \sigma^{-1} \psi_{1a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} - \beta u_{2b},$$

(3.16)

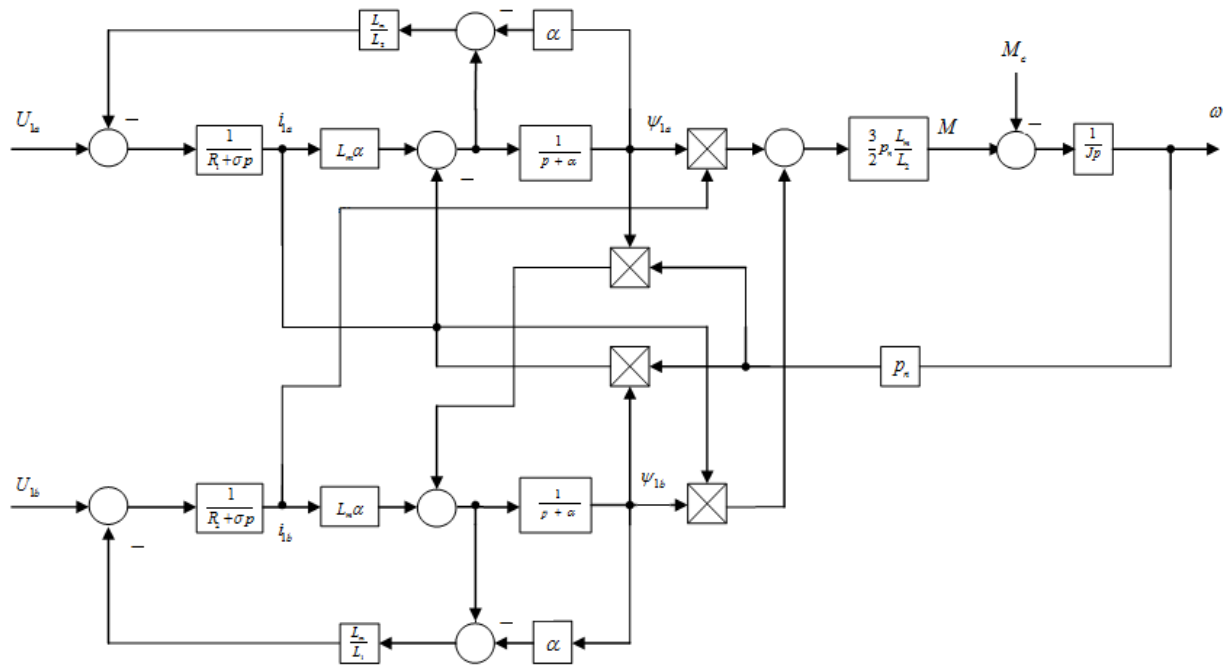


Рисунок 3.2 - Структурна схема

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.} \quad (3.17)$$

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ рад/с.} \quad (3.18)$$

$$S_n = \frac{n - n_u}{n} = \frac{1500 - 1375}{1500} = 0.083 \quad (3.19)$$

$$\omega_n = \omega_{xx} \cdot (1 - S_n) = 157 \cdot (1 - 0.083) = 143.96 \text{ рад/с.} \quad (3.20)$$

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{0.12 \cdot 10^3}{143.96} = 0.834 \text{ Нм.} \quad (3.21)$$

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.2 \cdot 0.835 = 1.835 \text{ Нм.} \quad (3.22)$$

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220. \text{ В.} \quad (3.23)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{0.12 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.66 \cdot 0.63} = 0.437 \text{ А.} \quad (3.24)$$

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В,} \quad (3.25)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 0.437 = 0.618 \text{ А.} \quad (3.26)$$

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0.987 \text{ Вб.} \quad (3.27)$$

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення (також їх називають "π-подібна" та "Т-подібна" еквівалентні схеми електричних машин або ліній) залежить від параметрів обмоток та структури самої схеми, і його мета - зберегти однакові вхідні характеристики: напругу, струм і потужність [10].

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4 \cdot \bar{x}'_1 \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{1.2 + \sqrt{1.2^2 + 4 \cdot 0.087 \cdot 1.2}}{2 \cdot 1.2} = 1.537 \quad (3.28)$$

Для виконання розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором необхідно знати дані холостого ходу та короткого замикання. Т-подібна схема [9].

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 39   |

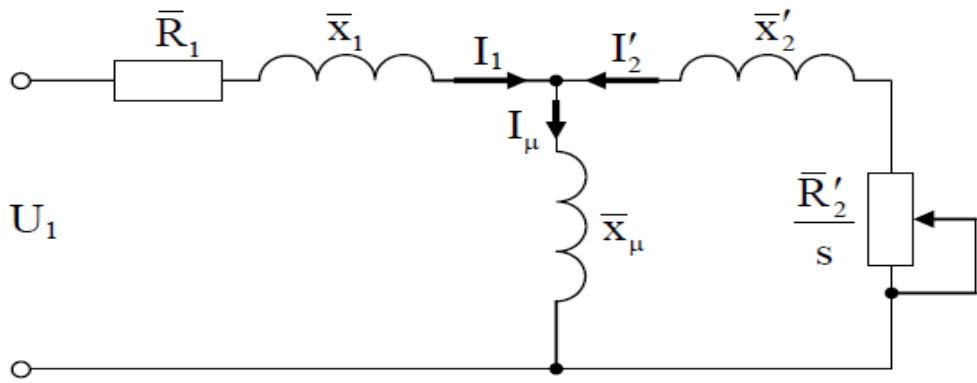


Рисунок 3.3 - Т-подібна схема

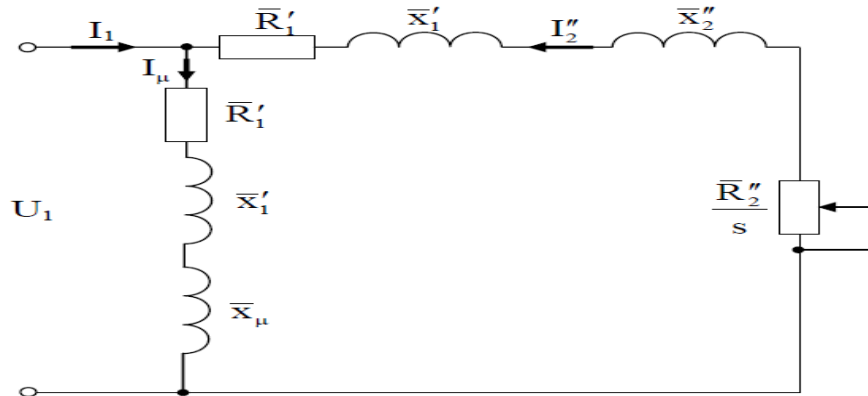


Рисунок 3.4 - Г-подібна схема

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.087}{1.537} = 0.0566, \quad (3.29)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.18}{1.537} = 0.117, \quad (3.30)$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.15}{1.537^2} = 0.0635, \quad (3.31)$$

$$\bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.15}{1.537^2} = 0.0635. \quad (3.32)$$

$$x_1 = \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.0566 \cdot \frac{220}{0.437} = 28.494 \text{ Ом}, \quad (3.33)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.117 \cdot \frac{220}{0.437} = 58.901 \text{ Ом}, \quad (3.34)$$

$$x_2 = \bar{x}'_2 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.0635 \cdot \frac{220}{0.437} = 31.968 \text{ Ом}, \quad (3.35)$$

$$R_2 = \bar{R}'_2 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.0635 \cdot \frac{220}{0.437} = 31.968 \text{ Ом}, \quad (3.36)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 1.2 \cdot \frac{220}{0.437} = 604.119 \text{ Ом}. \quad (3.37)$$

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{604.119}{314} = 1.924 \text{ Гн}. \quad (3.38)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{0n}} = \frac{28.494}{314} = 0.0907 \text{ Гн}, \quad (3.39)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_{0n}} = \frac{31.968}{314} = 0.102 \text{ Гн}. \quad (3.40)$$

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 1.924 + 0.0907 = 2.015 \text{ Гн}, \quad (3.41)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 1.924 + 0.102 = 2.026 \text{ Гн}. \quad (3.42)$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 41   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{31.968}{2.026} = 15.779 \text{ Ом/Гн}, \quad (3.43)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 2.015 \cdot \left(1 - \frac{1.924^2}{2.015 \cdot 2.026}\right) = 0.197 \text{ Гн}, \quad (3.44)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2} = \frac{1.924}{0.197 \cdot 2.026} = 4.821 \text{ 1/Гн}, \quad (3.45)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{58.901}{0.197} + 15.779 \cdot 1.924 \cdot 4.821 = 445.349 \text{ Ом/Гн}, \quad (3.46)$$

$$m = V \cdot \rho = 0.0000722 \cdot 7850 = 0.571, \text{ кг} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot R_1^2 \cdot l_1 + \pi \cdot R_2^2 \cdot l_2 + \pi \cdot R_3^2 \cdot l_3 = \\ &= 3.14 \cdot 0.01^2 \cdot 0.068 + 3.14 \cdot 0.012^2 \cdot 0.068 + 3.14 \cdot 0.008^2 \cdot 0.1 = \\ &= 0.0000722 \cdot (\text{м}^3) \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$J_p = m \cdot \frac{V^2}{\omega_n^2} = 0.571 \cdot \frac{0.068^2}{143^2} = 1.28 \cdot 10^{-7} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.47)$$

У рамках побудови математичної моделі системи електромеханічного керування штоком інжекційного пристрою було прийнято обґрунтоване спрощення - інерційні характеристики штока та передачі типу "гвинт-гайка" вважати незначними. Через малий внесок моментів інерції в динаміку системи, їхній вплив на загальну поведінку механізму можна знехтувати без істотного зниження точності моделювання. Це дозволяє оптимізувати структуру моделі, зменшити обчислювальні витрати та зосередитись на ключових динамічних

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 42   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

складових, зокрема впливах тиску, навантаження та профілю керувальних сигналів [10].

У межах даного розділу була проведена поетапна інженерна розробка системи електропривода для інжекторного вузла, що використовується у складі механізму дозованої подачі полімерних матеріалів. Основною метою цієї частини проекту стало визначення необхідного рівня механічної потужності електродвигуна, виходячи з конкретних експлуатаційних навантажень, які виникають у процесі вприскування високов'язкої розплавленої суміші через інжекційний циліндр.

Початковим етапом аналізу стало обчислення сили дії на шток, з урахуванням значення внутрішнього тиску в інжекційному каналі та діаметра робочого елемента. На основі отриманих значень було розраховано обертальний момент, необхідний для забезпечення руху гвинтової пари в системі "гвинт-гайка", що слугує механізмом трансформації кутового руху ротора у поступальний рух штока [10].

Після виконання силових розрахунків визначено необхідну мінімальну потужність приводу, яка забезпечує надійну роботу інжекторного пристрою в умовах циклічної та тривалої експлуатації. За результатами обчислень встановлено, що оптимальним значенням потужності є 0,12 кВт. Це значення узгоджено із параметрами типової промислової продукції, і як результат було обрано асинхронний електродвигун моделі 4AA56A4Y3, що має відповідні технічні характеристики: енергетичну ефективність, достатній пусковий момент, компактні габарити та сумісність із частотно-регульованими системами керування [11].

Крім того, для забезпечення можливості математичного моделювання роботи електромеханічної системи у середовищі MATLAB/Simulink, було здійснено розрахунок електромагнітних параметрів двигуна за T-подібною схемою заміщення. Такий підхід дозволяє гнучко адаптувати модель до симуляційних сценаріїв, включаючи аналіз динамічних характеристик приводу в

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 43   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

умовах зміни навантажень, стартових імпульсів та стабілізації робочого режиму [10].

Отже, у результаті розрахунково-аналітичного етапу було не лише визначено параметри оптимального електродвигуна, а й сформовано необхідну технічну базу для подальшої інтеграції приводу в систему автоматизованого керування та цифрового моделювання.

|              |             |                 |               |             |                           |      |
|--------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|              |             |                 |               |             | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|              |             |                 |               |             |                           | 44   |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

#### 4 НЕПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ КУТОВОЮ ШВИДКІСТЮ

Для реалізації високоточного керування асинхронним двигуном (АД), особливо у динамічних режимах, використовується метод векторного керування, побудований на основі непрямої орієнтації по вектору потокозчеплення ротора. Даний підхід дає змогу імітувати характеристики, аналогічні до керування синхронною машиною з незалежним збудженням [11].

Структурна конфігурація цього алгоритму включає наступні основні компоненти [12]:

- Регулятор модуля потокозчеплення: працює в режимі розімкненого контуру. Завдяки цьому модуль вектора потокозчеплення підтримується на заданому рівні без використання зворотного зв'язку. Як правило, значення потоку задається як сталий параметр, що відповідає оптимальним умовам роботи двигуна, або змінюється в залежності від зовнішніх умов керування (наприклад, при обмеженні струму або перевантаженні).
- Перетворення координат у систему  $d-q$ : математична трансформація, що переводить змінні струму, напруги та потокозчеплення зі стаціонарної системи координат ( $a-b-c$  або  $\alpha-\beta$ ) у синхронно обертову систему ( $d-q$ ). Це забезпечує можливість роздільного керування активною і реактивною складовими струму.
- Регулятори струму по  $d$ - і  $q$ - осях: зазвичай реалізуються у вигляді ПІ-контурів (пропорційно-інтегральних), які забезпечують динамічне відпрацювання завдання на струми та пригнічують перехідні відхилення при збуреннях.
- Обчислювач орієнтації за частотою обертання ротора: використовується модель ковзання, яка дозволяє відновити положення вектора потокозчеплення ротора, що є основою для правильної трансформації у векторному керуванні. Це й відрізняє непрямий метод орієнтації від прямого, де використовується датчик потокозчеплення або обертового поля.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 45   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

- Генератор сигналів керування інвертором: формує напруги, які подаються на інвертор живлення АД після зворотного перетворення координат (з  $d-q$  до  $\alpha-\beta$ ) і модуляції (наприклад, за ШІМ-принципом).

Таким чином, алгоритм векторного керування з непрямою орієнтацією є ефективним підходом до керування асинхронними двигунами, що дозволяє забезпечити незалежне регулювання моменту і потокозчеплення, а також точне дотримання динамічних характеристик навіть за складних навантажувальних режимів.

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha Lm} (\alpha \psi^* - \dot{\psi}^*),$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha Lm} (\alpha \dot{\psi}^* - \ddot{\psi}^*), \quad (4.1)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha Lm \frac{i_{1q}^*}{\psi^*} + \phi$$

У рамках системи непрямого векторного керування асинхронним двигуном важливо формалізувати задавальний сигнал, що відповідає модулю вектора потокозчеплення ротора. Цей сигнал, позначений як  $\lambda_r$ , є однією з основних координат для побудови системи керування, оскільки саме на нього орієнтується весь механізм відтворення магнітного поля в синхронній системі координат.

Для забезпечення високої динамічної точності керування важливо враховувати не лише значення  $\lambda_r$ , а й динаміку його зміни в часі, тобто першу та другу часові похідні [12]:

- бажане (референтне) значення модуля потокозчеплення ротора. Це величина, яка визначає оптимальний магнітний стан машини, що підтримується за допомогою регуляторів струму по  $d$ -осі. Її рівень зазвичай підбирається таким чином, щоб забезпечити баланс між електромагнітним моментом і енергоефективністю.

- перша похідна від модулю потокозчеплення, яка характеризує швидкість зміни магнітного потоку ротора. Використовується в розрахунках електрорушійної сили (ЕРС), а також при синтезі компенсаційних елементів у струмових регуляторах.

- друга похідна, що визначає прискорення зміни потокозчеплення. Ця величина має особливе значення під час перехідних процесів, оскільки дозволяє враховувати інерційність електромагнітної системи та вдосконалювати моделі прогнозуючих або адаптивних алгоритмів регулювання.

У загальному випадку, траєкторія зміни модуля потокозчеплення формується відповідно до логіки керування: в зоні пуску - плавне нарощування  $\lambda_r$ , в усталеному режимі - підтримка постійного значення, при гальмуванні або аварійному режимі - його контрольоване зниження. Всі ці етапи супроводжуються відповідними змінами похідних, які враховуються регуляторами струму та моменту [13].

Таким чином, формування та аналіз заданої траєкторії потокозчеплення та її похідних є критичним елементом точного керування електроприводом з векторним керуванням.

$$u_{1q} = \sigma(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d), \quad (4.2)$$

$$\dot{x}_d = k_{il} \tilde{i}_{1d},$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + \nu \omega^*),$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \quad (4.3)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[ -k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + \nu \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*,$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <b>ЕМКС 124001 000 ПЗ</b> | Арк. |
|       |      |          |        |      |                           | 47   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

У системі непрямого векторного керування асинхронним двигуном осьова система координат d-qd, яка обертається синхронно з вектором потокозчеплення ротора, дозволяє розкласти струм статора на дві взаємно перпендикулярні складові. Із них саме струм по q-осі ( $i_{q1}$ ) безпосередньо відповідає за формування електромагнітного моменту машини.

Регулятор струму по q-осі (часто позначається як "моментний регулятор") виконує критично важливу функцію - підтримку заданого значення  $i_q$ , яке відповідає необхідному моменту навантаження. Саме через цю складову реалізується динамічне регулювання швидкості обертання ротора або його положення [14].

$$u_{1q} = \sigma(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{1q} \tilde{i}_q - x_q), \quad (4.4)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q,$$

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Для реалізації ефективного керування асинхронним електродвигуном у змінних режимах роботи широко використовується алгоритм непрямого векторного керування [11]. Його структурна схема включає сукупність функціональних блоків, що забезпечують декомпозицію векторів струму та напруги у спеціально обрану координатну систему, де кожна з осей відповідає окремому фізичному явищу - потокозчепленню та моменту, далі структурна схема непрямого векторного керування [15].

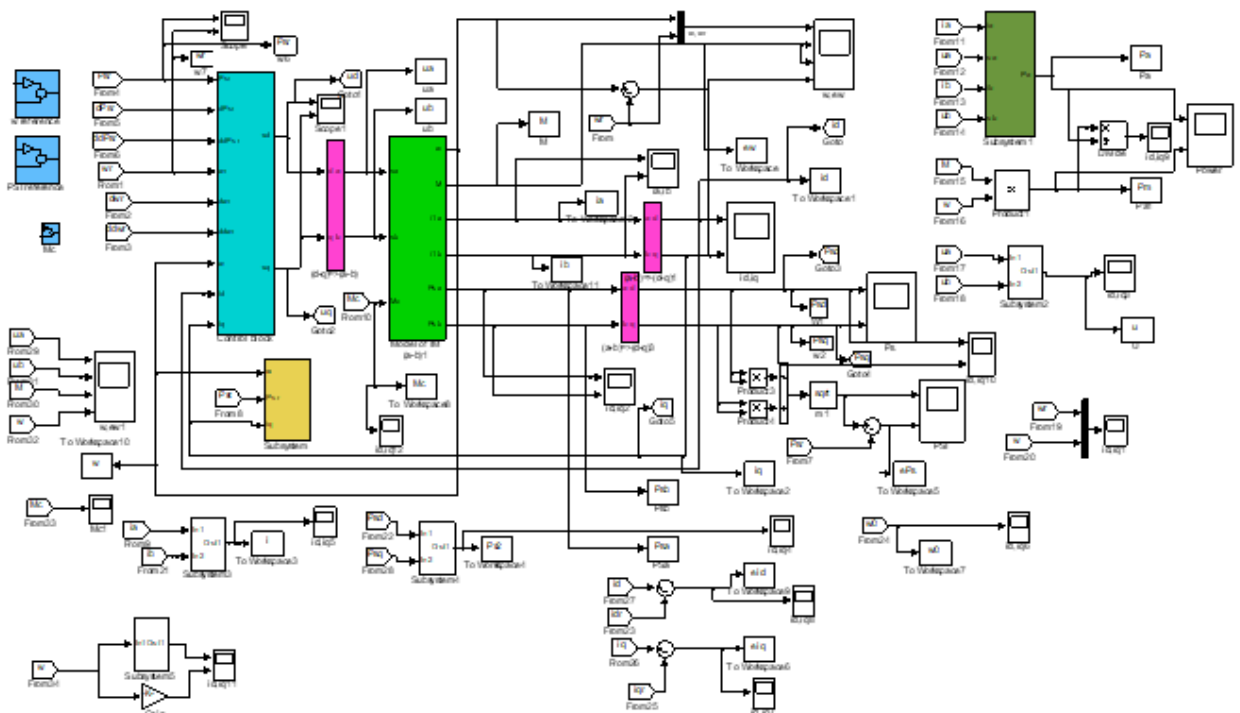


концепцію векторного (польового) керування у непрямій реалізації. У моделі враховані основні фізичні процеси, що відбуваються в контурі керування моментом, струмами та швидкістю обертання ротора.

Модель побудована з використанням блочно-модульного підходу, що дозволяє зручно реалізувати логічну структуру алгоритму, його підсистем, включаючи [15]:

- генератор заданих траєкторій швидкості та потокозчеплення;
- трансформацію координат (Парк-Кларка та зворотну);
- ПІ-регулятори струмів і швидкості;
- модель асинхронного двигуна в системі координат d-qd;
- блок зворотного зв'язку із сенсорною інформацією;
- блок моделювання навантаження та інерції.

Зібрана схема у середовищі Simulink представлена далі і демонструє структурно-функціональний взаємозв'язок між усіма компонентами системи. Такий підхід дозволяє досліджувати як усталені, так і перехідні процеси в умовах зміни навантаження, задання швидкості або порушення в параметрах системи [10].



## Рисунок 4.2 - Математична модель

У рамках дослідження поведінки регульованого електропривода в контексті непрямого векторного керування, була побудована спрощена математична модель, яка умовно відтворює роботу реальної електромеханічної системи. Основна мета створення цієї моделі - аналіз динамічних характеристик приводу та перевірка ефективності обраного алгоритму керування, а не повна імітація автоматизованої системи керування у виробничих умовах [11].

Слід підкреслити, що з метою спрощення моделювання, у створену структуру не було інтегровано повного набору функціональних блоків, що відповідають за автоматичну зміну станів системи, зокрема - автоматизоване вмикання та вимикання приводного електродвигуна інжекторного пристрою. Усі відповідні дії в моделі, які відповідають переходу між технологічними режимами, виконуються вручну шляхом зміни відповідних вхідних сигналів або параметрів симуляції у визначені моменти часу [16].

Цей підхід дозволяє сконцентрувати увагу саме на процесах, що відбуваються у приводі: регулюванні струму, моменту, швидкості, формуванні потокозчеплення, роботі ПІ-регуляторів, відпрацюванні завдань та реакції системи на зовнішні зміни. Завдяки цьому можна дослідити точність, швидкодію та стійкість системи за різних умов навантаження.

Графіки, що демонструють результат функціонування системи електроприводу на базі непрямого векторного керування, наведено далі. Вони наочно ілюструють відпрацювання заданих траєкторій, реакцію системи на зміни вхідних параметрів, перехідні процеси та поведінку основних змінних у часі. Такі графіки є невід'ємною частиною аналізу та слугують основою для подальшої оптимізації алгоритмів керування [17].

Функціонування приводу електродвигуна в автоматизованій системі відбувається відповідно до наперед заданої часової логіки. На першому етапі, у

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 51   |

проміжку від початку моделювання ( $t = 0$  с) до моменту часу  $t = 0.2$  с, відбувається збудження асинхронного двигуна. У цей період система формує необхідне електромагнітне поле в обмотках для подальшого ефективного керування. Це важлива умова стабільного пуску без перевантажень, коливань або виникнення нестійких режимів.

Наступний етап включає розгін двигуна у прямому напрямку. З моменту часу  $t = 0.5$  с розпочинається збільшення кутової швидкості до значення 35.75 рад/с, що триває до  $t = 4.5$  с. Цей відрізок є критичним з точки зору оцінки динаміки системи, зокрема — її інерційності та здатності регуляторів ефективно стабілізувати перехідні процеси.

Після завершення фази прямого розгону, на моменті  $t = 4.5$  с, система переходить до режиму реверсу. Електропривод змінює напрямок обертання ротора та починає розгін у зворотному напрямку — до номінального значення кутової швидкості -143 рад/с. Цей етап триває до часу  $t = 5.5$  с.

З 5.5 с до 6.0 с система переводиться в режим зупинки, тобто електродвигун вимикається, і приводний механізм перебуває в стані очікування. Після завершення цього інтервалу відбувається повторення описаного циклу роботи, що є характерною рисою циклічного технологічного процесу.

Особливу увагу слід звернути на те, що навантаження від інжекторного пристрою зберігається протягом усього циклу, починаючи з моменту збудження. Це зумовлено тим, що у робочому циліндрі інжектора підтримується постійний тиск розплавленої полімерної суміші. Такий тиск формує стабільний момент навантаження, який уже на початкових етапах моделювання досягає значення 0.834 Н·м, що враховується при моделюванні регулювання моменту і налаштуванні параметрів ПІ-регуляторів у контурі струму.

Таким чином, описаний алгоритм забезпечує періодичне заповнення та інжекцію полімеру з дотриманням встановлених технічних параметрів та з урахуванням динаміки процесів у системі електропривода [18].

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 52   |

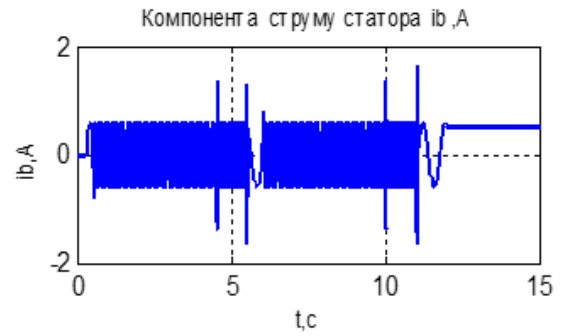
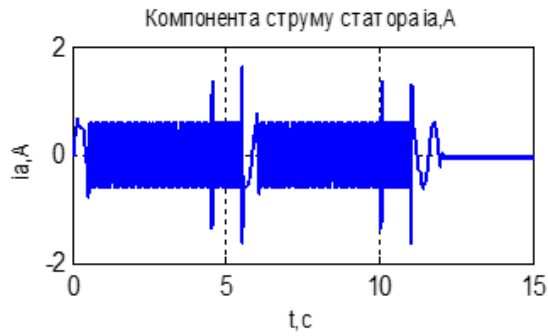
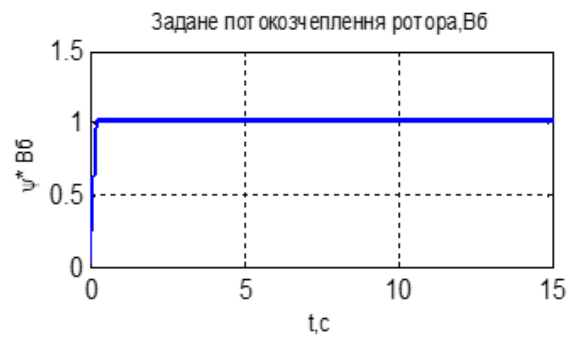
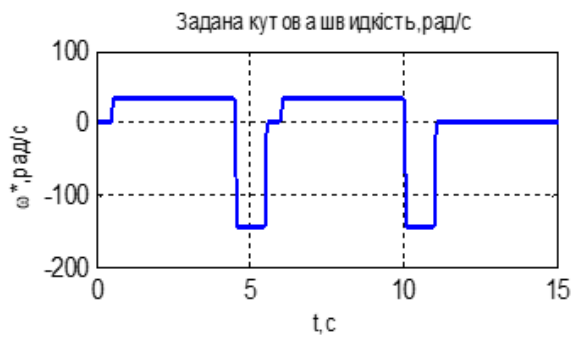
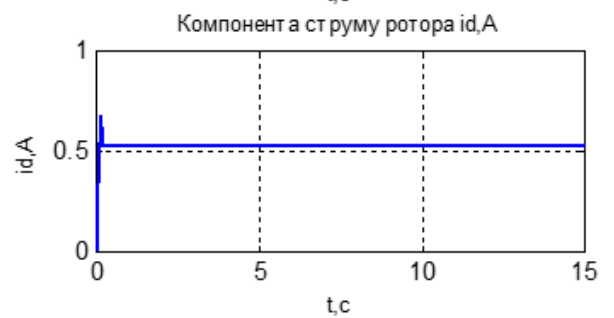
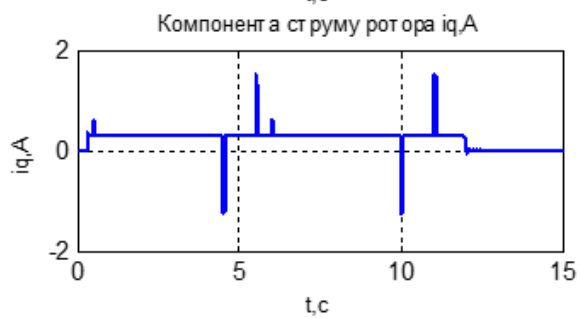
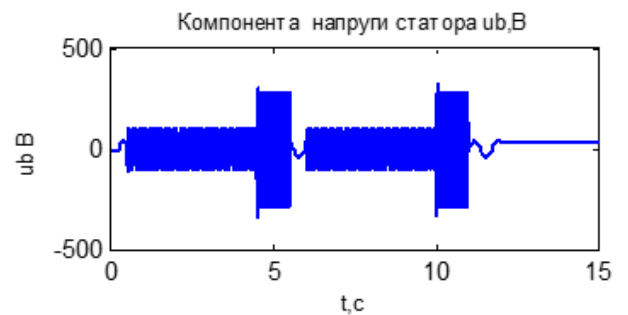
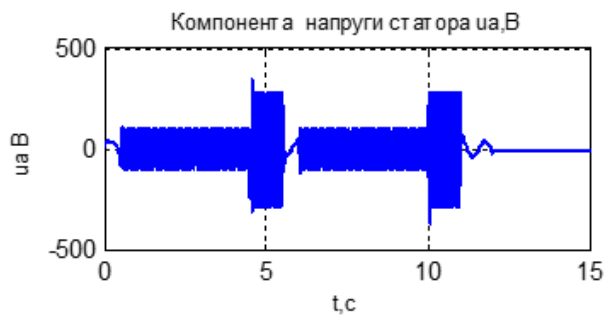


Рисунок 4.3 - Динамічні характеристики електромеханічної системи



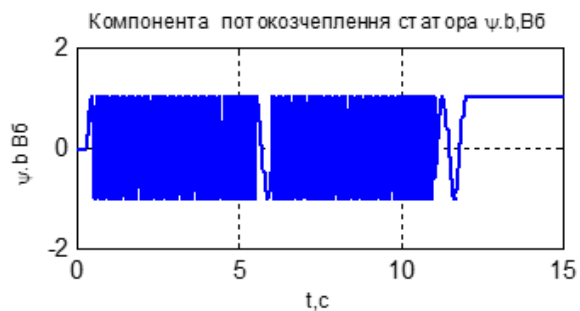
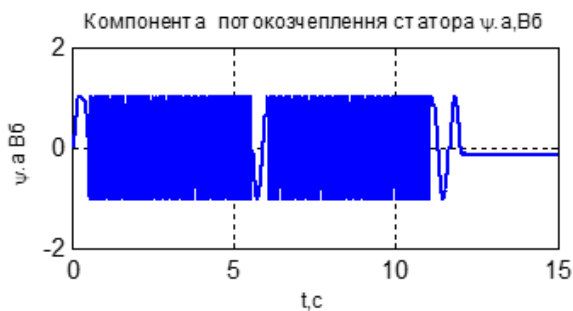
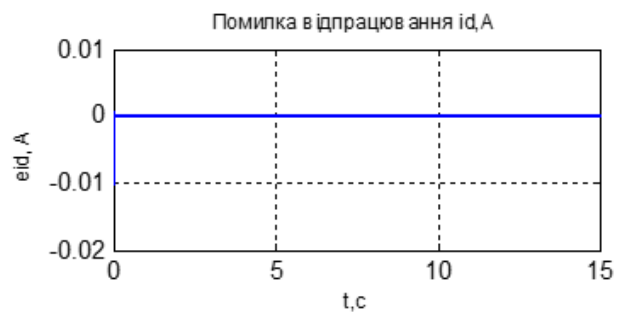
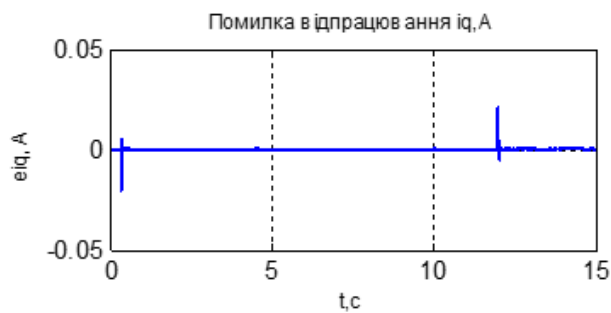
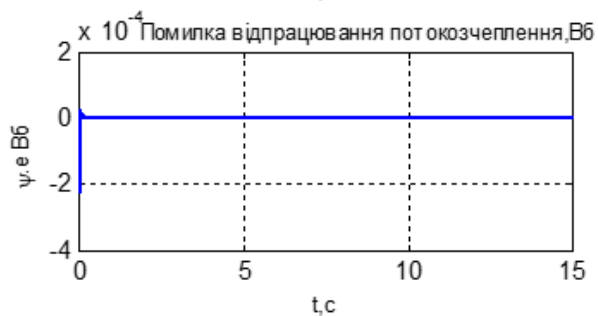
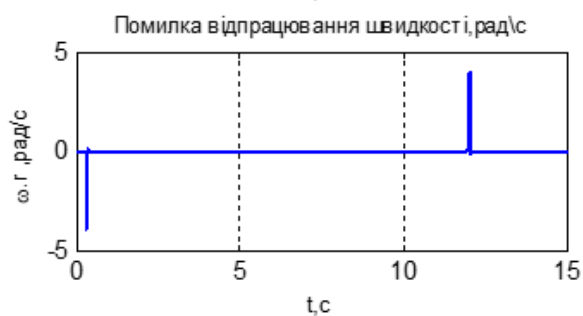
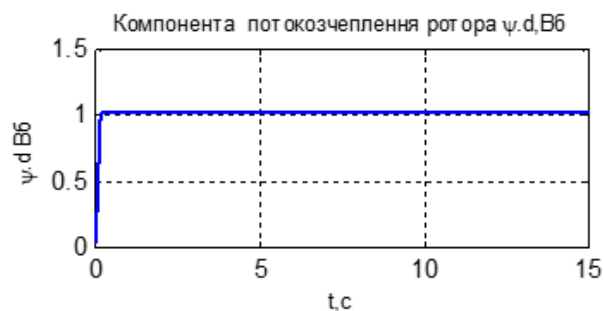
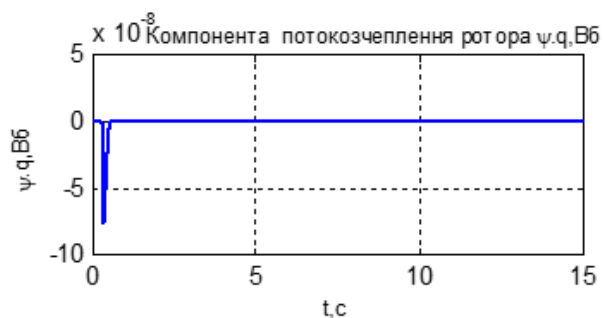


Рисунок 4.4 - Динамічні характеристики електромеханічної системи



|       |      |          |        |      |
|-------|------|----------|--------|------|
|       |      |          |        |      |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ЕМКС 124001 000 ПЗ

Арк.

54

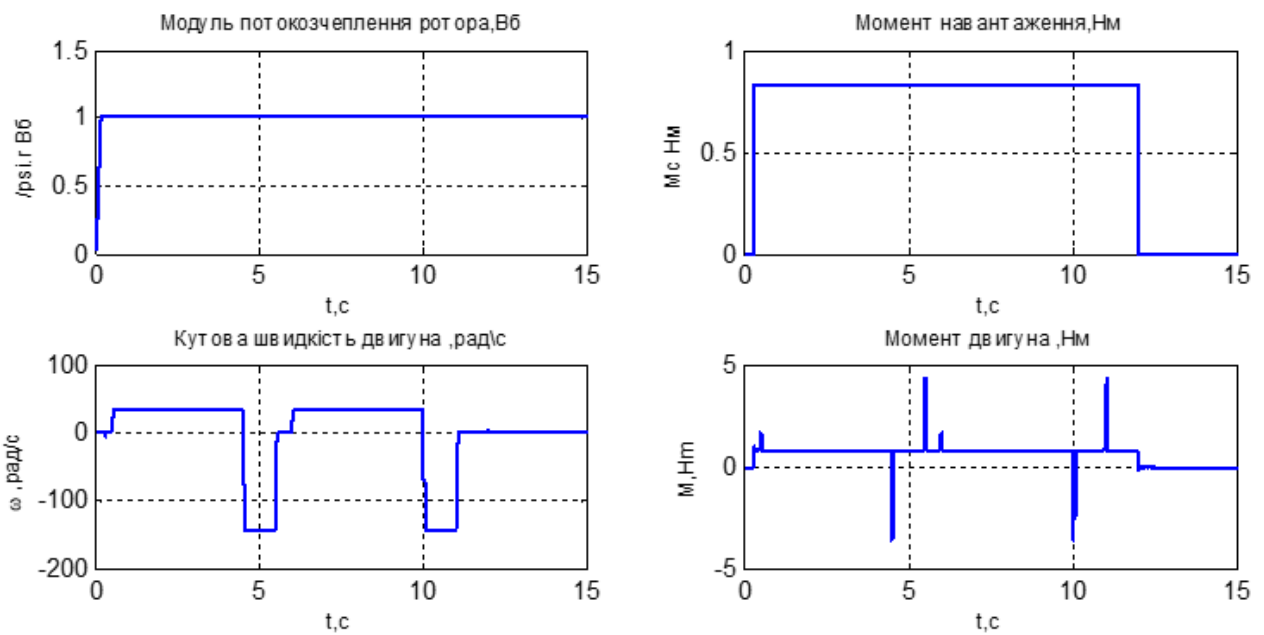


Рисунок 4.5 - Динамічні характеристики електромеханічної системи

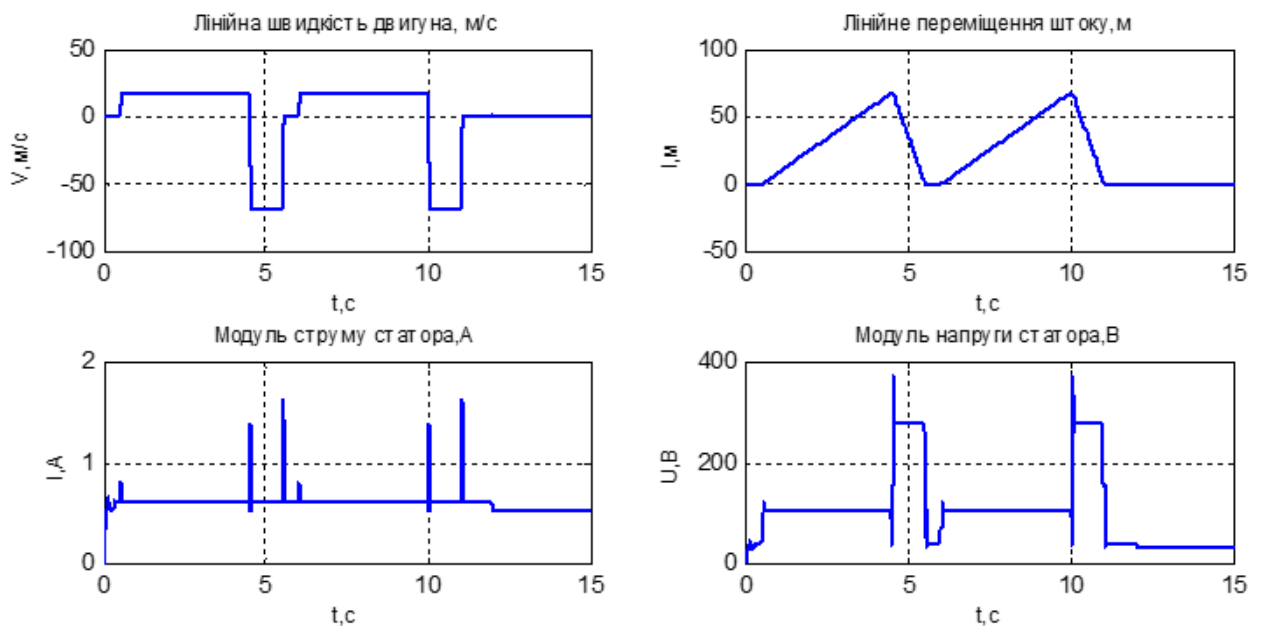


Рисунок 4.5 - Динамічні характеристики електромеханічної системи

На основі отриманих графіків функціональних параметрів системи можна зробити висновок щодо ефективності роботи електромеханічного комплексу у циклічному режимі. Починаючи з моменту часу  $t = 0.5$  с, електродвигун приводить у дію шток інжекторного пристрою, реалізуючи контрольований

розгін до кутової швидкості 35.75 рад/с. Цей період триває до  $t = 4.5$  с. Протягом цього часу інжектор виконує переміщення в прямому напрямку, забезпечуючи забір необхідної об'ємної дози полімерної суміші в об'ємі 600 мм<sup>3</sup>.

Далі, з  $t = 4.5$  с, система переходить до фази зворотного руху. Електропривод змінює напрямок обертання і розганяє шток до -143 рад/с, що відповідає активному введенню підготовленої порції полімеру в робочий канал основного формуючого преса №1. Ця стадія інжекції завершується в  $t = 5.5$  с, після чого привод зупиняється до 6.0 с, і відбувається повторення робочого циклу, що свідчить про чітку реалізацію закільцьованого автоматизованого технологічного процесу.

На графіках, які відображають зміну струму та моменту, під час переходу між фазами спостерігаються короткочасні імпульсні відхилення, що є природною реакцією системи на зміну навантаження або швидкості. Такі скачки мають незначну амплітуду й не виходять за допустимі межі, отже, не впливають критично на стабільність чи надійність системи [19].

Ключовим свідченням ефективності запропонованої стратегії керування є лінійна швидкість переміщення штока, яка залишається стабільною та становить 0.068 м/с. Це значення точно відповідає вимогам технічного завдання, що вказує на високу точність системи в контексті реалізації регламентованої траєкторії руху. Важливо, що система регулювання не лише підтримує задану швидкість, а й забезпечує відповідну динаміку при зміні режимів - відбору й інжекції.

Таким чином, автоматизований привід інжекторного пристрою на основі асинхронного двигуна з системою векторного керування продемонстрував стабільність, точність та відповідність умовам технологічного процесу. Це підтверджується графічними результатами моделювання, які верифікують коректність обраної структури регуляторів та динамічних параметрів системи.

У даному розділі дипломного дослідження було реалізовано цифрову імітаційну модель роботи інжекторного механізму, створену у середовищі MATLAB Simulink, яка повністю відтворює логіку функціонування реального

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 56   |

виробничого процесу. Застосування програмного моделювання дозволило детально відслідкувати динамічні характеристики системи, зокрема процеси запуску, прискорення, реверсу та зупинки асинхронного електропривода, що приводить у дію шток інжектора.

У ході численних віртуальних експериментів були побудовані графіки перехідних процесів та усталеного режиму роботи, які дають повну картину поведінки електромеханічної системи в реальних умовах навантаження. Отримані результати дозволили здійснити ґрунтовний аналіз параметрів керування, таких як зміна кутової швидкості, струмів, моменту навантаження, а також лінійного переміщення приводу.

З аналізу побудованих залежностей можна зробити обґрунтований висновок, що впроваджена схема непрямого векторного керування асинхронним двигуном забезпечує стабільну, точну та ефективну роботу приводу інжекційного пристрою. Реакція системи на зміну завдання, а також її стійкість до перехідних процесів свідчить про те, що електропривод з розробленою схемою керування відповідає всім технічним вимогам, які висуваються до подібних промислових установок, зокрема щодо точності дозування, енергоефективності, та плавності ходу [17].

Таким чином, можна стверджувати, що результати моделювання підтверджують доцільність та працездатність запропонованої системи, а сам проект має практичну цінність для впровадження в сучасні технологічні процеси, де потрібна висока точність інжекції полімерних матеріалів у виробничих циклах.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | <i>ЕМКС 124001 000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 57   |

## ВИСНОВКИ

У межах представленого дипломного дослідження було виконано повномасштабну розробку автоматизованої електромеханічної системи керування рухом штока інжекторного пристрою, що використовується для реалізації дозованого введення полімерного матеріалу під час формування профільних погонажних виробів. На основі порівняльного аналізу різних технічних рішень у сфері подачі та інжекції термопластичних мас було обґрунтовано доцільність впровадження модифікованої конструкції інжекторного блоку з уточненою кінематичною та функціональною структурою.

Система включає основні компоненти: пластикатор первинного завантаження, інжекційний циліндр, плунжерний механізм (шток), привідну гвинтову передачу типу “гвинт-гайка”, терморегулюючий блок, асинхронний двигун з частотним керуванням, а також допоміжні елементи автоматичного контролю параметрів тиску та температури. Узгоджене функціонування пластикатора з інжектором досягнуто завдяки алгоритмічно налаштованій системі керування, що забезпечує подачу полімерної суміші у точно задані координати поперечного перерізу виробу з регульованим кроком.

Визначення необхідної потужності привідного електродвигуна виконано через розрахунок опору навантаження, що створюється в процесі інжекції розплаву полімеру. В результаті проведених інженерних розрахунків було підібрано оптимальний привід потужністю 0.12 кВт із серії 4AAA56A4YU3, який повністю відповідає технічним вимогам до продуктивності, надійності й динаміки системи.

Для вивчення динаміки електромеханічного вузла було розроблено комп’ютерну імітаційну модель інжекторного пристрою в середовищі MATLAB Simulink, що відображає всі основні етапи роботи приводу: збудження, прискорення, інжекція, зупинка, реверс. В основі моделі лежить математичне

|       |      |          |        |      |                    |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|       |      |          |        |      | ЕМКС 124001 000 ПЗ | Арк. |
|       |      |          |        |      |                    | 58   |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

представлення асинхронного двигуна в системі координат d-q з використанням алгоритму непрямого векторного керування.

На основі проведеного моделювання були побудовані графіки перехідних процесів, які підтверджують стійкість, точність і динамічну узгодженість системи керування. Усі проміжні та фінальні результати дозволили зробити висновок, що застосування векторного керування забезпечує високу точність відпрацювання швидкісної траєкторії штока, стабілізацію струму та моменту в режимах зміни навантаження, а отже - створює оптимальні умови для реалізації вимог технологічного процесу.

Таким чином, спроектована система має високий потенціал для впровадження у виробничі лінії, де необхідне високоточне, енергоефективне та автоматизоване введення термопластичних матеріалів, і може бути основою для подальших досліджень або промислової модернізації.

|       |      |          |        |      |                    |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|       |      |          |        |      | ЕМКС 124001 000 ПЗ | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 59   |