

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та  
електромобільності

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**

на здобуття степеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи  
автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
на тему: Електромеханічна система виробництва шпаклівки

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-71

Третяк Ігор Дмитрович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник асист. Решетнік Віктор Сергійович \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

доц., к. т. н. Коваленко Михайло Анатолійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)



Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Київ – 2021 р.

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.7116.012.БР	Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.7116.012.БР	Пояснювальна записка	62	
3	A1	141.7116.012.БР	Креслення загального виду	1	
4	A1	141.7116.012.БР	Функціональна схема ПЧ-АД	1	
5	A1	141.7116.012.БР	Результати досліджень	1	

					141.7116.012.БР				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Третьяк І.Д.			«Дослідження режимів дисольверу»		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Решетни В.С.							
							НТУУ «КПІ», ФЕА Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71		
Н. Контр.									
Затверд.		Пересада С.М.							

**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту**

на тему: Електромеханічна система виробництва шпаклівки

Київ – 2021 р.

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики  
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації,  
електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ

**на дипломний проект студенту**

Третьяк Ігор Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електро механічна система виробництва шпаклівки,  
керівник проекту асистент Решетник В.С,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2021 року

3. Вихідні дані до проекту Діаметр апарату D=1 м, Висота заповнення апарату H=1.3 м, Необхідна ступінь неоднорідності середовища  $\eta = 0.9$ , Динамічна в'язкість рідкої фази  $\mu_{ж} = 5$  Па\*с, Щільність матеріалу зважування частинок  $\rho_{т} = 950$  кг / м<sup>3</sup> Вимоги до ЕП: точність регулювання швидкості - не менше 10%; напруга живлення - 380 В, 50 Гц, 3 фази; діапазон регулювання швидкості 30:1;.

4. Зміст пояснювальної записки 1 Аналітичний огляд пристрою виробництва шпаклівки, 2 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна, 3 Вибір електродвигуна, 4 Розрахунок силової частини електропривода 5 Розробка системи векторного керування асинхронним двигуном, 6 Дослідження перехідних процесів системи векторного керування, 7 Висновок, 8 Список літератури

5. Перелік графічного матеріалу 1. Зовнішній вигляд диссольтверу та структурна схема. 2.Схема принципова. 3.Результати моделювання

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання \_\_

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд пристрою		
	Виробництва шпаклівки	13.04	
2	Розрахунок потужності		
	та вибір електродвигуна	20.04	
3	Вибір електро двигуна	27.04	
4	Розрахунок силової частини		
	електропривода	30.04	
5	Розробка системи векторного керування		
	Асинхронним двигуном	04.05	
6	Дослідження перехідних процесів		
	Системи векторного керування	25.05	
7	Висновок	10.06	
8	Список літератури	11.06	

Студент

  
(підпис)

Третьяк І.Д.

Керівник проекту

  
(підпис)

Решетник В.С.

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ



Дипломний проект виконаний на 61 сторінках та вміщує 13 рисунків, 5 таблиці та 3 аркуші графічного матеріалу.

Метою цього дипломного проекту є збільшення продуктивності диспергуючого обладнання завдяки реалізації асинхронного електроприводу з векторним керуванням, розробка автоматизованої електромеханічної системи. Модернізація диспергуючого обладнання виконується шляхом векторно-регульованого електроприводу щоб замінити нерегульований, так як це дасть можливість збільшити діапазон регулювання, забезпечити опорний момент при нульовій швидкості, точність відпрацювання траєкторії руху, плавність розгону та гальмування електродвигуна.

Щоб досягти заданої мети було здійснено такі головні завдання: аналітична оцінка механізмів та характеристик конструкції диспергуючого обладнання, зроблено розрахунок потужності і вибір електродвигуна та перетворювача частоти, спроектовано та досліджено систему непрямого векторного керування електроприводом.

За допомогою наступних програм було здійснено розрахунок і реалізація цього дипломного проекту: MATLAB, Microsoft Office Word, Microsoft Office Visio.

ДИССОЛЬВЕР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ,  
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, СИНТЕЗ,  
МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ

					141.7116.012.БР				
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Третьяк І.Д.			Електромеханічна система виробництва шпаклівки Реферат		Літ.	Лист	Листів
Перевірив		Решетник В.С.						6	62
Т.контр							НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, гр. ЕП-71		
Н. Контр.									
Затверд.		Пересада С.М							

## ABSTRACT



The diploma project is made on 61 pages and contains 13 figures, 5 tables and 3 sheets of graphic material.

The purpose of this diploma project is to increase the productivity of dispersing equipment through the implementation of asynchronous electric drive with vector control, the development of an automated electromechanical system. Modernization of dispersing equipment is performed by a vector-controlled electric drive to replace the unregulated, as it will increase the control range, provide reference torque at zero speed, accuracy of the trajectory, smooth acceleration and braking of the motor.

To achieve this goal, the following main tasks were performed: analytical evaluation of mechanisms and design characteristics of dispersing equipment, power calculation and selection of electric motor and frequency converter, indirect system of vector control of electric drive.

With the help of the following programs the calculation and implementation of this diploma project was carried out: MATLAB, Microsoft Office Word, Microsoft Office Visio.

**DISSOLVER, ELECTRIC DRIVE, ASYNCHRONOUS, FREQUENCY  
CONVERTER, VECTOR CONTROL, SYNTHESIS, SIMULATION,  
AUTOMATION**

					141.7116.012.БР			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.	I.Tretiak				<i>Electromechanical system of putty production SUMMARY</i>	L.	Page	Pages
Checked	V.Reshetnyk						7	62
						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA, EP-71		
N. Contr.								
Approved.	S. Peresada							

## Зміст

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРИСТРОЮ ВИРОБНИЦТВА ШПАКЛІВКИ ..	11
1.1 Розташування обладнання .....	11
1.2 Обладнання.....	13
1.3 Диссольвери .....	15
1.4 Шляхи підвищення продуктивності диспергуючого обладнання .....	19
1.5 Вимоги до електроприводу .....	20
Висновки до розділу 1 .....	21
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА .....	22
2.1 Кінематичний розрахунок.....	25
Висновки до розділу 2.....	27
3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	28
3.1 Розрахунок параметрів електродвигуна.....	29
3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення.....	30
Висновки до розділу 3.....	33
4 РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	34
4.1 Розрахунок і вибір вхідного випрямляча.....	34
4.2 Розрахунок і вибір зарядного резистора і реле .....	36
4.3 Розрахунок і вибір ємності ланки постійного струму та баластного резистора.....	38
4.4 Вимірювання напруги ланки постійного струму .....	40
4.5 Вимірювання вихідного струму .....	41
4.6 Вимірювання швидкості .....	41
Висновки до розділу 4.....	42
5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ.....	43
5.1 Математична модель АД.....	43
5.2 Синтез алгоритму непрямого векторного керування АД.....	44
5.3 Вибір параметрів регуляторів системи .....	46
Висновки до розділу 5.....	48



6 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	49
6.1 Математичної моделі електромеханічного об'єкта .....	49
6.2 Дослідження динамічних режимів роботи .....	51
6.3 Дослідження характеристик процесу поступового змішування сумішей	54
Висновки до розділу 6 .....	58
7 ВИСНОВКИ .....	59
8 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	60

## ВСТУП

Різні види штукатурного покриття застосовують для обробки в промислових будівлях (просте покриття - склади, підвали), для обробки житлових приміщень і приміщень громадського користування (покращене - житлові приміщення, школи, дитячі садки, торговельні комплекси). При підвищених вимогах до обробки поверхонь будівель і споруди використовується високоякісне оштукатурювання. Технологія будівельного виробництва передбачає кілька способів виконання штукатурних робіт: вручну, механізованим способом і напівмеханізованим способом. Останні два способи виконання робіт забезпечуються механізованим інструментом, шпаклювальними агрегатами, сучасними штукатурними станціями і комплексами. Механізовані способи покриття поверхонь штукатурними розчинами і сумішами характеризуються зниженням трудових і матеріальних витрат, що в свою чергу впливає на дотримання термінів введення в експлуатацію громадських і житлових будівель при збереженні високої якості виконуваних робіт.

Метою даного бакалаврського дипломного проекту є модернізація диссольтверу на основі використання векторно-керованого асинхронного електроприводу. Така модернізація сприятиме покращенню асортименту та якості випускаємої продукції, зниженню її собівартості.

## **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРИСТРОЮ ВИРОБНИЦТВА ШПАКЛІВКИ**

Види штукатурних покриттів відрізняються вимогами виконуваних робіт, кількістю виконуваних операцій залежно від призначення конструкції або будівлі. Штукатурні покриття прості, вдосконалені та якісні.[15]

Таким чином, можна визначити основні напрямки вдосконалення сучасних технологій виготовлення штукатурних робіт:

- робота на складах сухих будівельних сумішей;
- систематизація існуючих рівнів механізації штукатурки.

### **1.1 Розташування обладнання**

На рис 1.1 представлена схема [1] послідовності операцій при виробництві ЛФМ відповідно до звичайно використовуваним вертикальним виробничим потоком. Перевагою цього методу є те, що велика частина речовин рухається по виробничому шляху без необхідності прокачування або інших транспортувань процесів. Це, значить, що майже всі види сировини мають бути доставлені в верхнє сховище, і, отже, підлоги повинні мати високу вантажопідйомність.

Для розуміння на рис 2. представленні наступні додотаків подробиці:

а: стаціонарна мешалка для попереднього розчинення, змішання або диспергування в пересувних ємкостях;

б: реєструють підлогові ваги з платформою (плюс автоматичний живильник для рідких компонентів);

з: (зліва): мішалка з фіксованою закритою ємністю,

з: (праворуч): змішувач для попереднього розчинення і змішування; d: пересувні ємності об'ємом до 800 л;

е: зазвичай великий насос; f: дисковий млин (Атритори) для тонкого диспергування;

g: змішувач паст для тимчасового зберігання пігментних паст;

j: фільтрація за часту проводиться з допомогою заглибних фільтрів, таких, як фільтрувальні мішки або патронні фільтри, нерідко спільно з поверхневими фільтрами, такими, як екранують мішки або вібраційні екрани; до: деякі зворотні ємності використовуються як контейнери (більшістю покупців);

1: пакувальну лінію для наповнення, закупорювання та нанесення етикеток.[13]

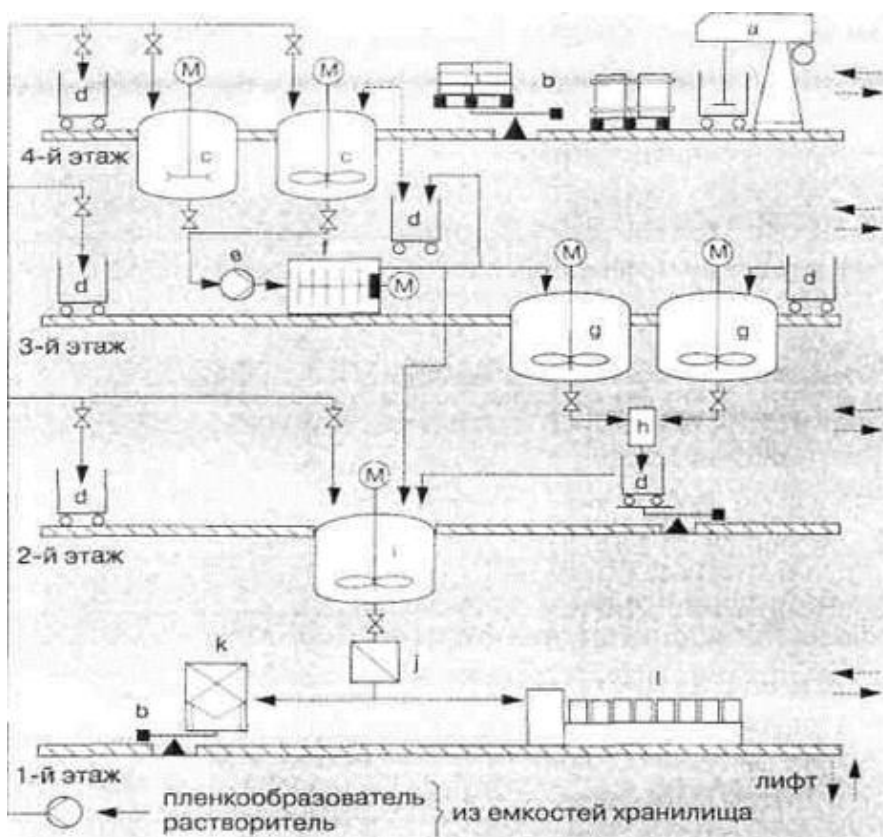


Рисунок 1.1 – Послідовність операцій при випуску ЛФМ при вертикальному виробничому потоці:

а - стаціонарна мешалка, б - ваги, с - попередній змішувач або змішувач, d - пересувні ємності, е - насос, f - дисковий млин, g - змішувач паст, h - установка вимірювання паст, і - кінцевий змішувач, j - екран, фільтр, k - контейнери, l - лінія упаковки в невеликі барабани.

Нерухомі резервуари часто розміщують у навантажувальні осередки, так що вони діють також як ваги, щоб вони також виконували функції ваг для автоматичного наповнення або дозоване наповнення.[14]

На рис 1.2 показано дрібнотоннажні виробництво ЛФМ тільки на одному рівні.

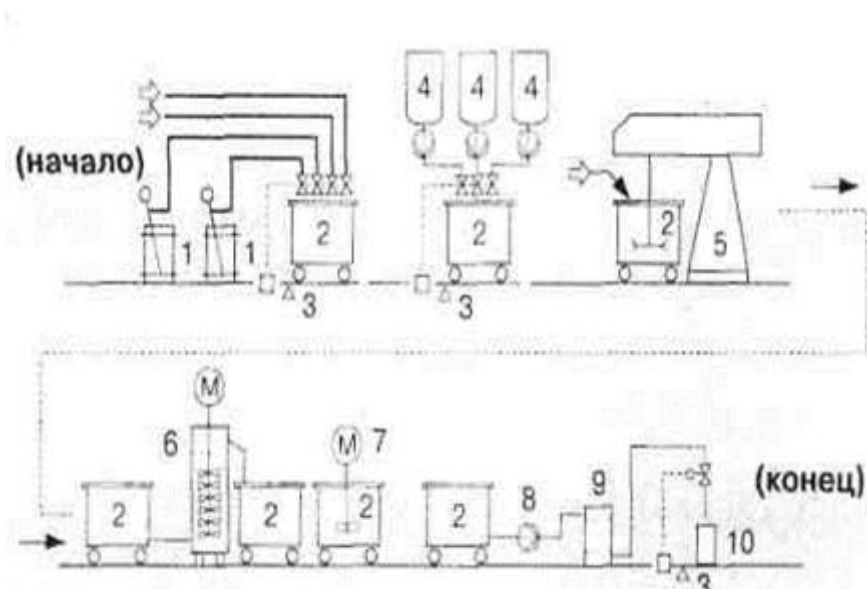


Рисунок 1.2 – Мелкотоннажное производство ЛКМ на одном уровне

## 1.2 Обладнання

Як відомо, технологічний процес виробництва пігментованого ЛФМ складається з наступних основних етапів [1, 2]:

- виробництво пігментних паст - диспергування пігментів і наповнювачів у плівкоутворювачі (розчин лаку або смоли, іноді в присутності сушарок);

- збірка ЛФМ та конфігурація "тип": суміш пігментних паст із встановленою кількістю лаків, канифолі та інших компонентних композицій (розчинники, пластифікатори, функціональні добавки) з подальшим фарбуванням (за необхідності), "декларація типу" у в'язкості, але питома вага нелетких речовин, твердість, еластичність та інші показники, встановлені в нормативній документації щодо ЛФМ;

- фільтрація та упаковка продуктів - очищення від механічних домішок та сторонніх включень (басура), великих пігментних частинок, оксидних плівок тощо. з використанням фільтраційного обладнання з подальшим розливом у пляшки.

З усіх цих фаз дисперсії найбільш дорогий та енергоємний процес. Вартість емалі обернено пропорційна розміру частинок пігменту, з яких складається лакофарбове покриття (ЛКП). У цьому сенсі ефективно подрібнення пігментів та наповнювачів є найважливішою операцією у процесі виробництва ЛФМ. Оптичні властивості, необхідні частинкам, і особливо здатність розсіювати світло (здатність розсіювання): найдрібніші частинки дисперсної фази. Ідеальний розмір частинок знаходиться в субмікронному діапазоні, отже, діаметр частинок пігменту та олій становить приблизно видимої хвилі. світло.

Тому одним з найважливіших аспектів зменшення виробничих витрат та виробничих витрат, а також забезпечення необхідних декоративних та захисних властивостей пігментованих ЛФМ та покриттів на основі є правильний підбір обладнання для диспергування та його ефективне функціонування.

При виробництві лакофарбових матеріалів для диспергування дрібнодисперсних пігментних паст каскад щаблів, що складається з розчинника та бісерного млина, наприклад проект, традиційно застосовується з великим успіхом.

Дисперсія має місце в процесі виробництва ЛФМ, коли потрібно вводити пігменти та / або наповнювачі. Дисперсія, в даному випадку, означає знищення пігментних агломератів (агломератів кристалітів або первинних частинок або агрегатів) та їх розподіл у рідкій фазі, як правило, плівкоутворюючому розчині, або при виробництві матеріалів у порошку в розплавленому полімері.

Диспергирование також відоме як " подрібнення "; Це найскладніший у технологічному плані етап, який споживає більше енергії на виробництво пігментованого ЛФМ.

Для досягнення більшої ефективності процесів диспергування в існуючому обладнанні (пристроях, апаратах), склад диспергованого матеріалу, який складається з трьох груп сировини: пігментів / наповнювачів, плівкоутворювачів (подрібнювальна смола) та розчинників, разом з диспергуванням агенти, якщо необхідно, слід підготувати те, що відоме як "оптимізація пігментної паст". (У водянистих стрілках шліфувальну смолу можна повністю замінити змочувальними та диспергуючими речовинами).

### **1.3 Диссольтвери**

Диссольтвер необхідний для гомогенізації пігментних частинок в середині плівкоутворюючої речовини, їх змочування та попереднього розпилення, а також бісерного млина для остаточного подрібнення пігментних агломератів (для зменшення еквівалентного середнього діаметра частинок і отримання вузький розподіл частинок). розмір) Диссольтвер

можуть також використовуватися як самостійні диспергуючі пристрої (наприклад, для виготовлення пігментних паст для різних ґрунтовок, водно-дисперсійних емалей та для будівництва фасадів, емалей для дорожньої розмітки тощо). Якщо кінцевий продукт не відповідає вимогам високого ступеня дисперсії. Розмір частинок суспензії пігменту після попередньої дисперсії зазвичай становить від 60 до 90 мкм. Звичайно, це значення залежить від багатьох факторів, в основному від дисперсії пігменту. [3]

Зовні диссольтвер дещо відрізняється від механічного змішувача, оснащеного мішалкою - у випадку диссольтвера - ексцентрично розташованого зубчастого диска - різака, але двигун диссольтвера набагато потужніший за змішувач. Різниця в потужності між двома блоками базується на різному призначенні обладнання. Диссольтвер в основному використовується для процесу диспергування твердих частинок у рідині, тобто для їх подрібнення. Якщо для утворення суспензії твердих частинок у рідині (для змішування двох фаз: твердої речовини - пігменту та рідини - плівкоутворювача) в середньому потрібна щільність розсіювання потужності порядку  $e = 1 \text{ Вт / кг}$ , тоді подрібнить це значення варіюється від  $e = 10 \div 100 \text{ Вт / кг}$ . Якщо механічна потужність, яка подається на систему рідинно-частинки у вигляді агломератів, дуже мала, можна змішати дві фази, але неможливо подрібнити тверді частинки.

Диссольтвер реалізує процес диспергування за допомогою гібридного механізму, одночасно змішуючи неоднорідне двофазне середовище та подрібнюючи тверді частинки. Обертання фрези на високій швидкості створює велику напругу зсуву, що призводить до руйнування агломератів. Завдяки стабільності агломератів необхідні значення напруги досягаються лише в ламінарному потоці, розсіювання турбулентної енергії є недостатнім. Отже, в процесі попередньої дисперсії середовище повинно мати досить високу в'язкість, яка досягається майже при концентрації твердих речовин та



із застосуванням спеціальних допоміжних речовин. Оскільки подрібнення відбувається лише в зоні різання, необхідно забезпечити циркуляцію двофазного середовища через область подрібнення, отже, роль суміші в процесі попередньої дисперсії в розчиннику. Потужність цього процесу - це сума потужності подрібнення та змішування зі значенням, набагато більшим, ніж один із його компонентів: суміш.[16]

При використанні диссольвера для обробки пігментних паст з тиксотропною тенденцією обов'язковою умовою є оснащення диссольвера додатковою мішалкою (розташованою безпосередньо на валу різача або на окремій шахті); інакше можлива неповна участь папки в робочій області.

Відповідно підібраний диссольвер повинен забезпечувати можливість отримання продукту не тільки з низьким середнім значенням діаметра частинок, але також з вузьким розподілом частинок за розміром. Правильне поєднання функції подрібнення різача та кінетико-геометричних умов змішування в розчиннику гарантує високу якість кінцевого продукту. Велике значення для ефективності процесу попереднього розсіювання має значення окружної швидкості різача. Введення сипучих компонентів у формувач плівки повинно проводитися на низьких швидкостях. Швидкість переддиспергіювання обертання млина повинна бути такою, щоб утворювався бункер, біля основи якого видно цоколь млина. На ефективність процесу за інших рівних умов (швидкість кола фрези, заповнення та в'язкість пігментної суспензії) також суттєво впливають геометрія та конфігурація фрези та геометрія всієї фрезерної системи "фреза - розчинення тарілка". Геометричні пропорції дисперсійної системи порівнюються з діаметром фрези наступним чином (див. Рис. 1.3):

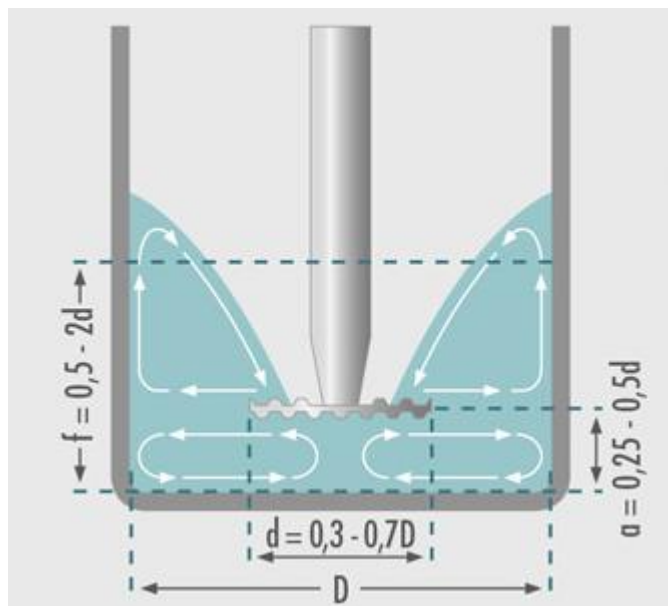


Рисунок 1.3 – Співвідношення геометричних параметрів фрези і діжі дисольвера.

- Діаметр діжі:  $D_{\text{дежі}} = (1,30 \div 3,00) d_{\text{фрези}}$  ;
- Оптимальний діаметр діжі  $D_{\text{опт}} = (2,00 \div 2,50) d_{\text{фрези}}$  ;
- Відстань від фрези до дна діжі  $h = (0,25 \div 0,50) d_{\text{фрези}}$  ;
- Статистична висота суспензії в діжі  $h_{\text{ст}} = (0,50 \div 1,50) d_{\text{фрези}}$  .

Після виконання вищезазначених кінетико-геометричних умов та забезпечення достатньо високої в'язкості суспензії в дисольрі, двофазне середовище піддається спеціальному режиму потоку . Цей потік утворює два контури циркуляції: нижній і верхній, з центром симетрії в центрі фрези. У межах циркуляційних контурів маса протікає через зону помелу фрези, а агломерати в ній проходять поступове подрібнення.

Якщо необхідно послідовно розпорошити кілька пігментних паст, доцільно використовувати обертові дисольвери.[15]

У стандартній версії цей диссольтвер може обертатися на  $180^\circ$ , хоча є моделі для роботи з двома, трьома, чотирма резервуарами, які обертають вісь розчинювача під кутом до  $360^\circ$ . Ротаційні дисольвери можна використовувати не тільки для отримання пігментних суспензій з різними кольоровими характеристиками, але і для попереднього розпилення паст у різних плівкоутворювачах, які часто навіть несумісні між собою.

Щоб уникнути забруднення вмісту контейнера для розчинення, вал і різак перед переходом до наступного контейнера миють вручну.

Вартість роторного дисольвера, звичайно, перевищує вартість його стаціонарного аналога. Однак якщо вам потрібно попередньо розподілити різні пігменти у двох, трьох чи чотирьох нерухомих контейнерах, ротаційний дисольвер буде дешевшим, ніж кілька стаціонарних. Також іноді доводиться враховувати економію виробничих площ.

#### **1.4 Шляхи підвищення продуктивності диспергуючого обладнання**

Поряд з оптимальним вибором нового дисперсійного обладнання, завжди слід враховувати можливість збільшення продуктивності існуючих диспергаторів, не змінюючи конструкцію пристрою та схеми технології перемотування.[12]

Існує кілька способів підвищити продуктивність розсіювального обладнання.

Для стабільних і надійних диссольтверів можна запропонувати:

- дисперсія при оптимальній окружній швидкості обертання фрези;
- вибір ідеальної в'язкості та об'ємного вмісту пігменту для кожної пігментної паст.

- застосування оптимальних геометричних розмірів системи "різак - діссольвер дежа".

### 1.5 Вимоги до електроприводу

За результатами вивчення технологічного процесу можна сформулювати наступні вимоги до ЕП:

- точність стабілізації швидкості  $\pm 10\%$ ;
- діапазон регулювання швидкості 30:1;
- режим роботи – тривалий (тв=100%);
- плавний пуск та гальмування;
- безпека і надійність;
- високі техніко-економічні показники;
- низький рівень шуму;
- простота експлуатації;

Для надійної роботи потрібно забезпечити наступні види захисту:

- від самозапуску;
- від коротких замикань;
- від перенапруги;
- від перегріву;
- максимальний стурмовий захист.

### **Висновки до розділу 1**

У цьому розділі було розглянуто пристрої для масового виробництва та автоматизації в цій галузі. Була визначена можливість модернізації електроприводу дісольверу для покращення його експлуатаційних можливостей.

З аналізу технологічного процесу сформульовано основні вимоги до електроприводу та системи автоматизації, які будуть використані для проектування електромеханічної системи диссолера.

## 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Для розрахунку потужності двигуна необхідно знати параметри пристрою, перемішуване середовище та конструкцію пристроїв, візьмо з каталогу[4].

Таблиця 2.1 – Характеристики апарату й перемішуваного середовища

Діаметр апарату, м	$D = 1$
Висота заповнення апарату, м	$H = 1.3$
Щільність рідкої фази суспензії, кг/м.куб.	$\rho_{\text{ж}} = 1100$
Концентрація твердої фази в суспензії, мас.доли	$x_{\text{сп}} = 0.05$
Щільність матеріалу зважування частинок, кг/м.куб.	$\rho_{\text{т}} = 950$
Динамічна в'язкість рідкої фази, Па*с	$\mu_{\text{ж}} = 5$
Необхідна ступінь неоднорідності середовища	$\eta = 0.9$

Таблиця 2.2 – Конструкція перемішуваного пристрою

Частота обертання мішалок рад/с	$n = 10$
Висота мішалок м	$H_{\text{м}} = 0.22$
Діаметри мішалок м	$d_{\text{м0}} = 0.5$
Число горизонтальних траверс мішалки	$n_{\text{т0}} = 1$
Коефіцієнт витрати рамної мішалки	$K_{20} = 0.0033$

Розрахунок характеристики перемішуємого середовища[4].:

Визначимо об'єм перемішуємого середовища

$$V = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H = 0.25 \cdot 3.14 \cdot 1^2 \cdot 1.3 = 1 \text{ м}^3, \quad (2.1)$$

Середня щільність суспензії

$$\rho = \frac{\rho_T \cdot \rho_{ж}}{\rho_T - x_{cp} \cdot (\rho_T - \rho_{ж})} = \frac{950 \cdot 1100}{950 - 0.05 \cdot (950 - 1100)} = 1091 \text{ кг / м}^3 \quad (2.2)$$

Середня об'ємна частка твердої фази в суспензії

$$\phi_{cp} = \frac{x_{cp} \cdot \rho}{\rho_T} = \frac{0.05 \cdot 1091}{950} = 0.057 \quad (2.3)$$

Динамічна в'язкість суспензії

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{ж} \cdot \exp(4.163 \cdot \phi_{cp}^2 + 2.856 \cdot \phi_{cp}) \\ &= 5 \cdot \exp(4.163 \cdot 0.057^2 + 2.856 \cdot 0.057) = 5.973 \text{ Па} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Кінематична в'язкість суспензії

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{5.973}{1091} = 5.437 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с} \quad (2.5)$$

Розрахунок потужності перемішування:

Ширина лопаті мішалки

$$b_{л0} = 0.07 \cdot d_{м0} = 0.07 \cdot 0.5 = 0.035 \text{ м} \quad (2.6)$$

Відносна ширина зазору між мішалкою і стінками апарату

$$h_{зо0} = \frac{D - d_{м0}}{2 \cdot b_{л0}} = \frac{1 - 0.5}{2 \cdot 0.035} = 7.14 \quad (2.7)$$

Відносна ширина лопатей мішалки

$$b_{\text{ло0}} = \frac{b_{\text{л0}}}{d_{\text{м0}}} = \frac{0.035}{0.5} = 0.07 \quad (2.8)$$

Коефіцієнт опору лопатей мішалки

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{л0}} &= -21.591 \cdot \ln(1.055 \cdot h_{\text{зо0}}) + 23.426 \cdot h_{\text{зо0}} = \\ &= -21.591 \cdot \ln(1.055 \cdot 7.14) + 23.426 \cdot 2.291 = 10.07 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{ц0}} = \frac{n \cdot d_{\text{м0}}^2}{\nu} = \frac{10 \cdot 0.5^2}{5.437 \cdot 10^{-3}} = 462 \quad (2.10)$$

Параметр М

$$\begin{aligned} M_0 &= \lambda_{\text{л0}} \cdot \frac{H_{\text{М}}}{d_{\text{м0}}} \cdot (1 - b_{\text{ло0}})^2 + 3.5 \cdot n_{\text{т0}} \cdot (1 - 2 \cdot b_{\text{ло0}})^3 = \\ &= 10.07 \cdot \frac{1.3}{0.5} \cdot (1 - 0.07)^2 + 3.5 \cdot 1 \cdot (1 - 2 \cdot 0.07)^3 = 24.7 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт потужності

$$K_{\text{N0}} = \pi^2 \cdot \frac{M_0}{2 \cdot \text{Re}_{\text{ц0}}} = 3.14^2 \cdot \frac{24.7}{2 \cdot 462} = 0.26 \quad (2.12)$$

Потужність необхідна для здійснення перемішування

$$N_0 = K_{\text{N0}} \cdot p \cdot n^3 \cdot d_{\text{м0}}^5 = 0.26 \cdot 1091 \cdot 10^3 \cdot 0.5^5 = 8.5 \text{ кВт} \quad (2.13)$$



## 2.1 Кінематичний розрахунок

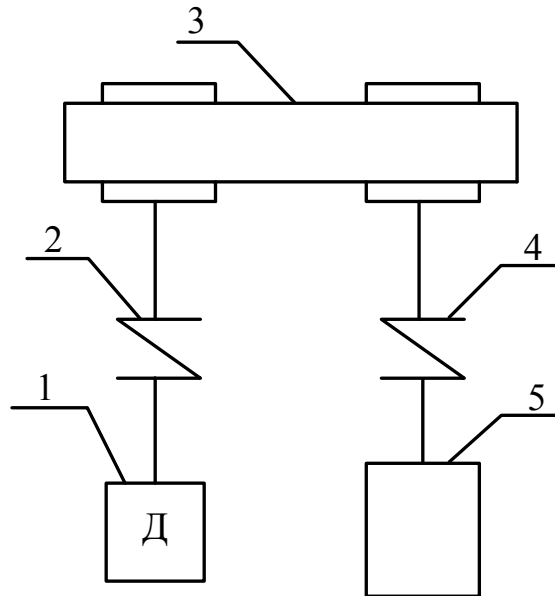


Рисунок 2.1 – Кінематична схема диссольтверу: 1 - електродвигун; 2 - муфта; 3 - ремінна передача; 4 - муфта; 5 - бочка.

Визначаємо момент інерції бочки з шпаклівкою

$$J_{\text{б}} = m_{\text{б}} \cdot S_{\text{б}} = 1091 \cdot 0.785 = 856.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \quad (2.14)$$

де  $m_{\text{б}} = \rho \cdot V = 1091 \cdot 1 = 1091 \text{ кг}$  - маса шпаклівки в бочці;

$$S_{\text{б}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 3.14 \cdot \frac{1^2}{4} = 0.785 \text{ м}^3 \text{ - площа бочки.}$$

Згідно визначених даних вибираємо з каталогу редуктор марки 1ЦУ-160 з передаточним числом 3.

Момент інерції редуктора:

$$J'_{\text{бд}} = \frac{J_{\text{б}} + J_{\text{р}}}{i_{\text{р}}^2} = \frac{856.4 + 315}{9} = 130.15 \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \quad (2.15)$$

де  $i_{\text{р}}$  - передаточне число редуктора

Момент який потрібен для перемішування шпаклівки:

$$M_{ш} = \frac{N_0}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{8500}{2 \cdot 3.14 \cdot 10} = 135.4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

де  $N_0 = 15$  кВт - потужність двигуна;

$\omega_p$  – частота вращения редуктора.

Момент приведенний до валу двигуна:

$$M'_{дв} = \frac{M_{ш}}{i_p \cdot \eta_p} = \frac{135.4}{3 \cdot 0.98} = 46.05 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.17)$$

де  $\eta_p = 0.98$  – ККД редуктора.

Сумарний момент інерції механізму:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J'_{ш} = 130.5 + 0.048 = 130.55. \quad (2.18)$$

Розрахунок потужності двигуна:

$$P_{екв} = 1.4 \cdot M'_{дв} \cdot i_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 1.4 \cdot 46.05 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 10 = 12.1 \text{ кВт}. \quad (2.19)$$

На основі визначених даних вибираємо двигун з каталогу марки 4A80B4Y3, потужністю 15 кВт та ККД 88%.

## **Висновки до розділу 2**

На основі кінематичної схеми електромеханічної системи диссольвера було розраховано приведений момент інерції та діючі в системі моменти навантаження. Враховуючи всі вхідні данні та вимоги до електропривода в подібних системах розраховано потужність та обрано електричний двигун.

### 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Враховуючи тривалий режим роботи установки, вибираємо з каталогу [5] двигун потужністю 15 кВт при  $T_B=100\%$ . Паспортні дані двигуна 4A160S2У3, при з'єднанні обмоток статора у зірку, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Паспортні дані двигуна 4A160S2У3

Номінальна потужність	$P_{2H} = 15(\text{кВт})$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1H} = 380(\text{В})$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.048(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.88$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.91$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Номінальне ковзання	$S_{\text{ном}} = 0.021$
Критичне ковзання	$S_K = 0.12$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(\text{Гц})$
<b>Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)</b>	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1' = 0.092$
Активний опір статора	$\bar{R}_1' = 0.52$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2'' = 0.12$
Приведений Активний опір ротора	$\bar{R}_2'' = 0.022$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_\mu = 4.0$

Здійснимо розрахунок номінальних даних двигуна для Т- та Г-подібної схем заміщення АД (див. рис. 3.1, 3.2).

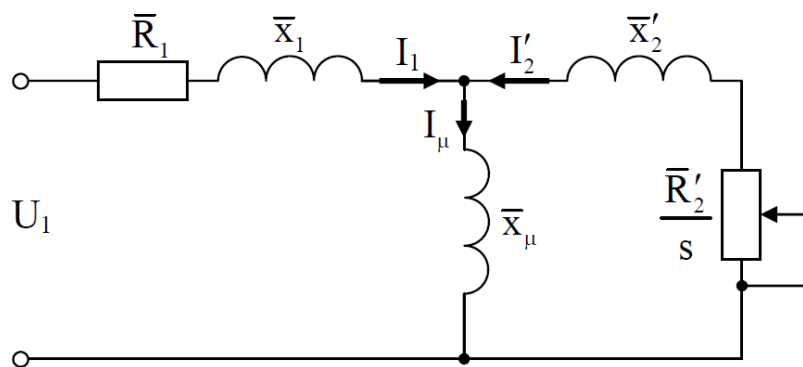


Рисунок 3.1 – Т - подібна схема заміщення АД

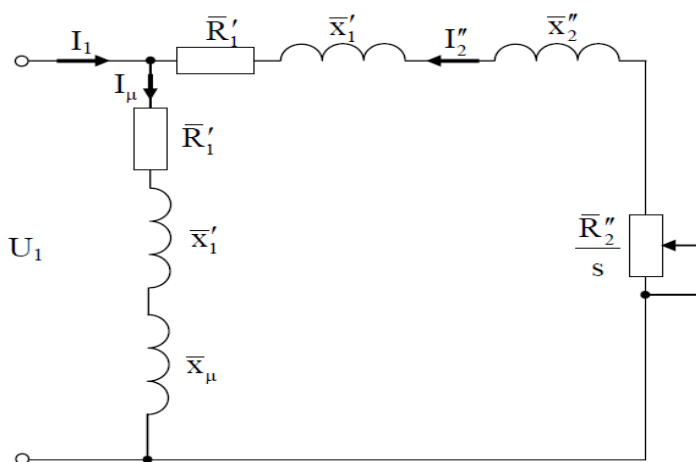


Рисунок 3.2 – Г-подібна схема заміщення АД

### 3.1 Розрахунок параметрів електродвигуна

Електрична швидкість поля статора

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (3.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (3.2)$$

Номінальна швидкість двигуна

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_{ном}) = 157(1 - 0.021) = 153.7 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (3.3)$$

Номінальний момент

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{15000}{153.7} = 97.6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності з каталогу)

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2 \cdot 97.6 = 195.2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.5)$$

Номінальне діюче значення фазної напруги

$$U_{1nf} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (3.6)$$

Номінальне діюче значення струму статора

$$I_{1n} = \frac{P_{2n}}{3 \cdot \eta \cdot U_{1nf} \cdot \cos \varphi} = \frac{15000}{3 \cdot 0.88 \cdot 220 \cdot 0.91} = 28.4 \text{ А} \quad (3.7)$$

Номінальне амплітудне значення струму статора

$$I_{1na} = \sqrt{2} I_{1n} = \sqrt{2} \cdot 28.4 = 40.16 \text{ А} \quad (3.8)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{1nf}}{\omega_{0n}} = \frac{220}{314} = 0.7 (\text{Вб}) \quad (3.9)$$

### 3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Коефіцієнт перерахунку

$$C_1 = \frac{\bar{X}_\mu + \sqrt{\bar{X}_\mu^2 + 4 \bar{X}_\mu \cdot \bar{X}_1}}{2 \cdot \bar{X}_\mu} = \frac{4 + \sqrt{4^2 + 4 \cdot 4 \cdot 0.092}}{2 \cdot 4} = 1.022 \quad (3.10)$$

Параметри Т-подібної схеми у абсолютних одиницях

$$X_1 = \frac{\bar{X}_1}{C_1} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = \frac{0.092}{1.022} \cdot \frac{220}{28.4} = 0,7 \text{ Ом} \quad (3.11)$$

$$R_1 = \frac{\bar{R}_1}{C_1} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = \frac{0.52}{1.022} \cdot \frac{220}{28.4} = 4 \text{ Ом} \quad (3.12)$$

$$X_2 = \frac{\bar{X}_2}{C_1^2} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = \frac{0.12}{1.022^2} \cdot \frac{220}{28.4} = 0.9 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

$$R_2 = \frac{\bar{R}_2}{C_1^2} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = \frac{0.022}{1.022^2} \cdot \frac{220}{28.4} = 0.16 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

$$X_\mu = \bar{X}_\mu \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = 4 \cdot \frac{220}{28.4} = 30.96 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.7}{314} = 0.002 \text{ Гн} \quad (3.16)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_0} = \frac{0.9}{314} = 0.003 \text{ Гн}$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{30.96}{314} = 0.098 \text{ Гн} \quad (3.17)$$

Індуктивності статора і ротора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 0.002 + 0.098 = 0.1 \text{ Гн} \quad (3.18)$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_\mu = 0.003 + 0.098 = 0.101 \text{ Гн}$$

Обчислення значень параметрів  $\alpha, \alpha_1, \beta, \beta_1, \gamma, \gamma_1, \gamma_2, \sigma, \sigma_1$

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.16}{0.101} = 1.6 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \\
\alpha_1 &= \frac{R_1}{L_1} = \frac{4}{0.1} = 40 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \\
\sigma &= L_1 \left(1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.1 \cdot \left(1 - \frac{0.098^2}{0.1 \cdot 0.101}\right) = 0.005 \text{ Гн} \\
\sigma_1 &= L_2 \left(1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.101 \left(1 - \frac{0.098^2}{0.1 \cdot 0.101}\right) = 0.00505 \text{ Гн} \\
\beta &= \frac{L_\mu}{\sigma \cdot L_2} = \frac{0.098}{0.005 \cdot 0.101} = 194.06 \frac{1}{\text{Гн}} \\
\beta_1 &= \frac{L_\mu}{\sigma_1 \cdot L_1} = \frac{0.098}{0.005 \cdot 0.1} = 196 \frac{1}{\text{Гн}} \\
\gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_\mu \cdot \beta = \frac{4}{0.005} + 1.6 \cdot 0.098 \cdot 194.06 = 830.42 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \\
\gamma_1 &= \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 \cdot L_\mu \cdot \beta_1 = \frac{0.16}{0.00505} + 40 \cdot 0.098 \cdot 196 = 800 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \\
\gamma_2 &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_\mu \cdot \beta + \alpha = \frac{4}{0.005} + 1.6 \cdot 0.098 \cdot 194.06 + 1.6 = 832.03 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Результати розрахунків параметрів асинхронного двигуна представлені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри двигуна 4A160S2Y3:

$P_{2H}, \text{кВт}$	15	$R_1, \text{Ом}$	4
$\omega_{xx}, \text{рад/с}$	157	$R_2, \text{Ом}$	0.16
$\omega_H, \text{рад/с}$	153.7	$L_1, \text{Гн}$	0.1
$M_H, \text{Нм}$	97.6	$L_2, \text{Гн}$	0.101
$M_K, \text{Нм}$	195.2	$L_\mu, \text{Гн}$	0.098
$\lambda$	2	$\alpha, \text{Ом/Гн}$	1.6
$I_{1на}, \text{А}$	28.4	$\alpha_1, \text{Ом/Гн}$	40
$\psi_{1xx}, \text{Вб}$	0.7	$\beta, 1/\text{Гн}$	194.06
$\eta$	0.88	$\gamma, \text{Ом/Гн}$	830.42
$\cos \varphi$	0.91	$\sigma, \text{Гн}$	0.005
$J_d \cdot \kappa^2 \cdot m^2$	0.048		



### Висновки до розділу 3

В даному розділі було вибрано електродвигун потужністю 15 кВт серії 4A160S2Y3. Згідно з паспортними даними двигуна, були розраховані параметри Т-подібної та Г-подібної схем заміщення електродвигуна. Також для можливості моделювання системи електроприводу та визначення його статичних і динамічних властивостей було розраховано константи

$\alpha, \alpha_1, \beta, \beta_1, \gamma, \gamma_1, \gamma_2, \sigma, \sigma_1$ .

## 4 РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 4.1 Розрахунок і вибір вхідного випрямляча

Для того щоб правильно вибрати діоди випрямляча треба розрахувати величину діючого струму, який протікає через діод, беручи до уваги коефіцієнтів запасу.

Розрахунок номінального значення випрямленого струму

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} \cdot P_n}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1.3 \cdot 15000}{380 \cdot 0.88 \cdot 0.95} = 61.4 \text{ A} \quad (4.1)$$

де  $U_{dcn}$  – номінальне значення випрямленої напруги;  $k_{ovl}$  – перевантажувальна здатність електроприводу  $P_n$  – номінальна потужність перетворювача;  $\eta_{inv} = 0.95$  – коефіцієнт корисної дії перетворювача

Так як живлення перетворювача від однофазної мережі живлення  $U_{grid} = 380 \text{ В}$ , напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде приблизно рівною  $U_{dcn} = \sqrt{2}U_{grid} = 540 \text{ В}$ .

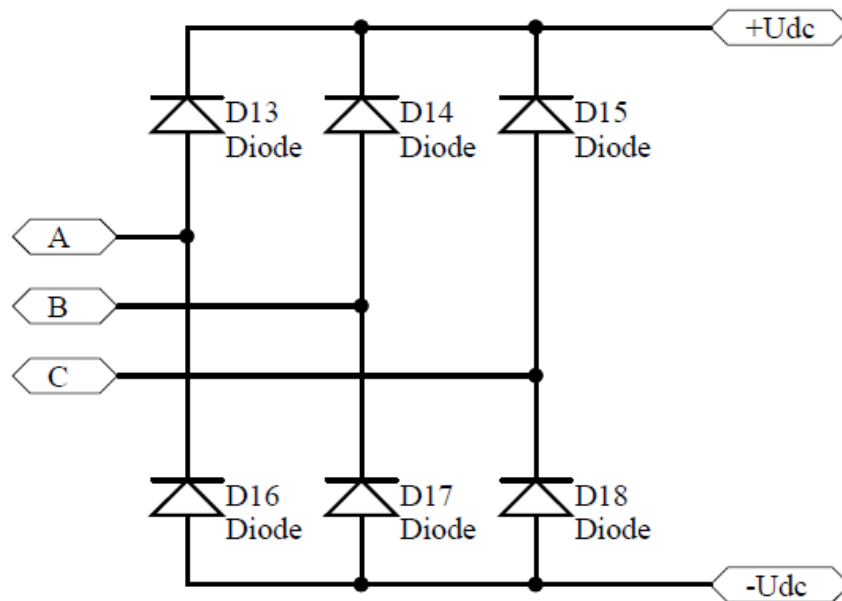


Рисунок 4.1 – Схема некерованого випрямляча

Для вибору силових діодів та IGBT максимально-допустима зворотна напруга (напруга колектор-емітер) автономного інвертора має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто

$$U_{\max} > 1.5U_{\text{dc max}} ,$$

так як  $U_{\text{dc max}}$  знаходиться в межах 750 – 800 В, тому прийmemo  $U_{\text{dc max}} = 750 \text{ В}$ , таким чином

$$U_{\max} = 1.5U_{\text{dc max}} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В(В)}. \quad (4.2)$$

Вибір силових діодів може бути здійснений за критерієм

$$I_{\text{VD}} > I_{\max} , \quad U_{\text{VDmax}} > U_{\max} ,$$

де  $I_{\text{VD}}$  та  $U_{\text{VDmax}}$  – відповідно тривалий струм діода та зворотня напруга, які вказані в паспортних даних діода.

Обраний діод типу Semikron SKR 130/12 Diode [21] за наведеними вище критеріями беремо у кількості 6 штук (VD13-VD18) для створення некерованого випрямляча як зображено на рис. 4.1, тому що укомплектованого випрямляча з такими характеристиками немає:

$$I_{VD} = 130A > I_{\max} = 61.4A,$$

$$U_{VD\max} = 1200V \geq U_{\max} = 1125V,$$

#### 4.2 Розрахунок і вибір зарядного резистора і реле

При включенні інвертора треба забезпечити заряд конденсаторів фільтра з обмеженим струмом. Для цього підключимо резистор з шунтуючим контактом в ланку постійного струму (рис.4.2). Схема керування реле представлена на рис. 0.

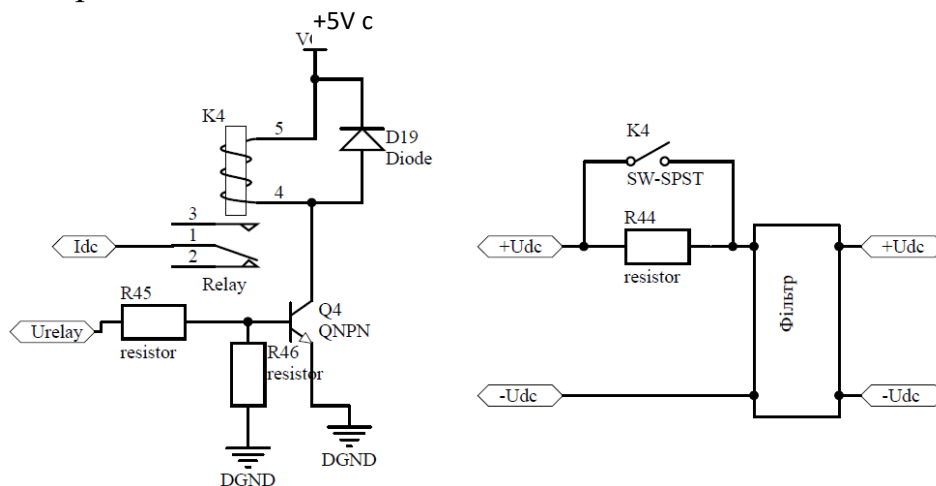


Рисунок 4.2 – Зарядне коло

Розрахунок зарядного резистора здійснюється за формулою:

$$R_{44} = \frac{U_{dcn}}{k_3 \cdot I_{np}} = \frac{380}{0.9 \cdot 61.4} = 6.876(\text{Ом}). \quad (4.3)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт запасу.

Зарядний резистор (рис. 4.2) призначений для обмеження струму на виході випрямляча при включенні перетворювача частоти в мережу живлення з метою захисту діодів випрямляча, при досягненні напругою в ланці постійного струму на перед визначеного значення подається команда на спрацювання зарядного реле яке шунтує зарядний резистор.

Опір струмообмежуючого резистора  $R_{45}$  треба розрахувати таким чином, щоб зарядний струм не перевищував допустимого для діодів випрямляча значення

$$R_{45} = \frac{U_{\text{relay}}}{I_{\text{б. max}}} = \frac{3.3}{0.1} = 33(\text{Ом}) \quad (4.4)$$

У відповідності з рекомендаціями вибрано резистор  $R_{44}$  типу АН10WJ-6K8R-Hitano[22] з опором 6.8 Ом та потужністю 10 Вт,  $R_{45}$  типу 33R-5%-0W25-CFR [24] з опором 33 Ом та потужністю 0.25 Вт та  $R_{46}$  типу R010K12W з опором 10 кОм та потужністю 0.5 Вт.

Вибрано реле К4 типу АМ3-24В [25] з значенням напруги та струму, що комутується 24В та 80А постійного струму відповідно. Пусковий струм реле складає  $I_{\text{реле.пуск}} = 1\text{А}$ . Вибрано діод VD19 типу 1N753 на напругу 6.2 В та потужність 0.4 Вт щоб забезпечити протікання струму при розриві кола котушки реле.

По напрузі  $U_{KE}$ , та по максимальному струму колектора, що відповідає пусковому струму реле  $I_{K \text{ max}} = I_{\text{реле.пуск}}$  вибрано транзистор Q4 типу 2SD471 [26] з номінальною напругою  $U_{KE} = 30\text{В}$ , струмом колектора  $I_c = 1\text{А}$

### 4.3 Розрахунок і вибір ємності ланки постійного струму та баластного резистора

Ємність випрямляча визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 6.876} = 3087 (\text{мкФ}), \quad (4.5)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні  $(0.02 \div 0.05)$ ,  $m$  – число фаз випрямляча,  $f$  – частота напруги мережі живлення,  $R_0$  – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму розраховується за формулою

$$R_0 = \frac{U_{\text{dcn}}}{I_{\text{dc}}} = \frac{380}{61.4} = 6.2 (\text{Ом}) \quad (4.6)$$

тому беремо:

$$k_p = 0.04; \quad m = 3; \quad f = 50, \text{Гц}$$

Вибираємо по каталогу [27] конденсатор типу В43742В4109М000 ємністю  $C_c = 10000$  мкФ та максимальною напругою 350 В. Потрібна ємність та робоча напруга фільтру досягається включенням двох конденсаторів послідовно отримуючи напругу 700 В та ємність  $C_9 = C_{10} = 5000$  мкФ, як зображено на рис.4.3.

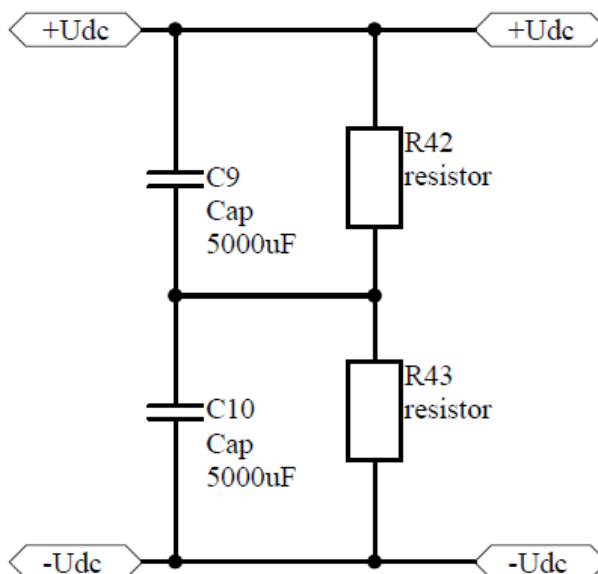


Рисунок 4.3 – Схема включення фільтра та баластного резистора

Для нормальної роботи фільтра необхідно паралельно до конденсаторів встановити резистори. Відповідно до рекомендацій потужність кожного резистора має складати  $P_R = 0.25$  Вт, тоді сумарна потужність 2 резисторів складає

$$P_{R_\Sigma} = P_R \cdot 2 = 0.25 \cdot 2 = 0.5 \text{ Вт}. \quad (4.7)$$

Розрахуємо сумарний опір 2 резисторів

$$R_\Sigma = \frac{U_{DCn}^2}{P_{R_\Sigma}} = 583.2 \text{ (кОм)}. \quad (4.8)$$

Відповідно до схеми підключення резисторів (рис.4.3) можемо записати їх сумарний опір:

$$R = \frac{1}{2} R_\Sigma = \frac{583.2 \cdot 10^3}{2} = 291.6 \text{ (кОм)} \quad (4.9)$$

Отже вибираємо баластний резистор  $R_{42}=R_{43}=300\text{кОм}$  типу 300K-1%-0W25-MFR, яких взято два і підключені вони послідовно відносно один одного і паралельно до конденсаторів. Розроблений фільтр представлений на рис.4.3.

#### 4.4 Вимірювання напруги ланки постійного струму

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика U18 типу LV25-600, схема підключення якого показана на рис.4.4.

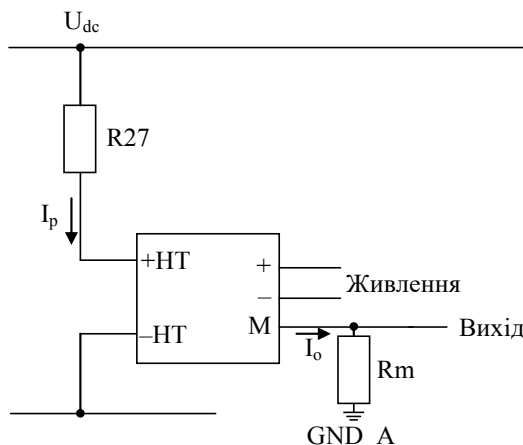


Рисунок 4.4 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола  $I_{p\max} = 15$  мА. Тому значення опору резистора  $R_{27}$  дорівнює:

$$R_{27} = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.015} = 50000 \text{ Ом.} \quad (4.10)$$

Визначимо і потужність резистора

$$P_R = I_{p\max}^2 R = (15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50000 = 11.25 \text{ (Вт)} \quad (4.11)$$

Вибираємо резистор  $R_{27}$  укомплектований з 12 однакових резисторів які підключені послідовно для отримання необхідної потужності і величини опору, резистор типу 5K1-5%-1W-CFR.

Максимальний струм на виході датчика приймає значення 37.5 мА. Резистор  $R_m$  приймемо 92 Ом типу 92R-0.1%-0W25-MFR. Для того щоб отримати напругу 3.3В на виході з датчика напруги.



#### 4.5 Вимірювання вихідного струму

Вибір датчика струму може бути здійснений на сайті [28] . Оскільки обраний датчик струму буде використовуватись на виході інвертора , то по розрахованому значенню  $I_{na}$  вибираємо датчик U15,U16 типу HLSR 80-p/SP10, номінальний струм якого складає 80А, діапазон вимірювання 0...200 А.

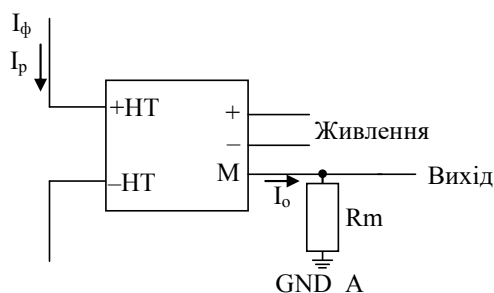


Рисунок 4.4 – Підключення датчика струму

#### 4.6 Вимірювання швидкості

Для вимірювання швидкості та положення було обрано енкодер типу E40S6-2500-6-L-5[29], основні характеристики якого наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні параметри енкодера типу E40S6-2500-6-L-5

Напруга живлення, В	5-24
Роздільна здатність, імп/об	2500
Вихідні послідовності	A, B, Z
Тип виходів	відкритий колектор
Максимальний вихідний струм $I_{max}$ , мА	50мА

### **Висновки до розділу 4**

В даному розділі було вибрано перетворювач частоти та здійснено розрахунок і підбір основних силових елементів.

## 5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Векторні алгоритми керування АД зазвичай розв'язуються використовуючи такі підходи – пряме та непряме керування. Стандартно, будь-який підхід базується на керуванні з орієнтацією по потокозчепленню електричної машини. Підхід непрямого керування формує задане значення вектора магнітного поля ротора, яке визначає динаміку електромеханічної системи з асимптотичним відпрацюванням цього ж вектора. Пряме векторне керування використовує в своїй структурі асимптотичний спостерігач вектора потокозчеплення ротора.

Так як, алгоритм із використанням в свої структурі спостерігача підвищує складність в проектуванні, потребує більшої обчислювальної потужності контролера та зменшує надійність системи, розглянемо алгоритм непрямого векторного керування швидкістю [6].

### 5.1 Математична модель АД

Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, що записана в стаціонарній системі координат (*a-b*) :

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - \nu\omega, & M &= \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\
 \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n\omega\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\
 \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n\omega\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\
 \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n\omega\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
 \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n\omega\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора,  $(i_{1a}, i_{1b})^T$  – компоненти вектора струму статора в системі координат  $(a-b)$ ,  $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$  – компоненти вектора потокозчеплень ротора,  $(u_{1a}, u_{1b})^T$  – компоненти вектора напруги статора,  $M_c$  – момент навантаження,  $\nu$  – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб:

$$\sigma = L_1 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \gamma = \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right), \quad (4.2)$$

де  $J$  – повний момент інерції ротора,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  – опори й індуктивності статора і ротора відповідно,  $L_m$  – індуктивність намагнічуючого контуру,  $p_n$  – число пар полюсів.

## 5.2 Синтез алгоритму непрямого векторного керування АД

Структура алгоритму непрямого векторного керування складається з:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення [6]

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (5.3)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (5.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi, \quad (5.5)$$

де  $\psi^*$ ,  $\dot{\psi}^*$ ,  $\ddot{\psi}^*$  – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно,  $\phi$  – робастифікуючий зв'язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку  $\phi = 0$ ,  $\varepsilon_0$  – кутове положення системи координат  $(d-q)$  відносно  $(a-b)$ .

- регулятор струму по осі  $(d)$  (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left( \gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

де  $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$  – похибка відпрацювання струму по осі  $(d)$ ,  $u_{1d}$  – компонента вектора напруги статора по осі  $(d)$ ,  $(k_i, k_{ii}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

- регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + \nu \omega^* \right) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[ -k_\omega \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + \nu \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (5.8)$$

де  $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$  – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно,  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$  – похибка відпрацювання кутової швидкості,  $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості.

- регулятор струму по осі  $(q)$  (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left( \gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{1q}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

де  $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$  – похибка відпрацювання струму по осі  $(q)$ ,  $u_{1q}$  – компонента вектора напруги статора по осі  $(q)$ .

Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування зображена на рис. 5.1.

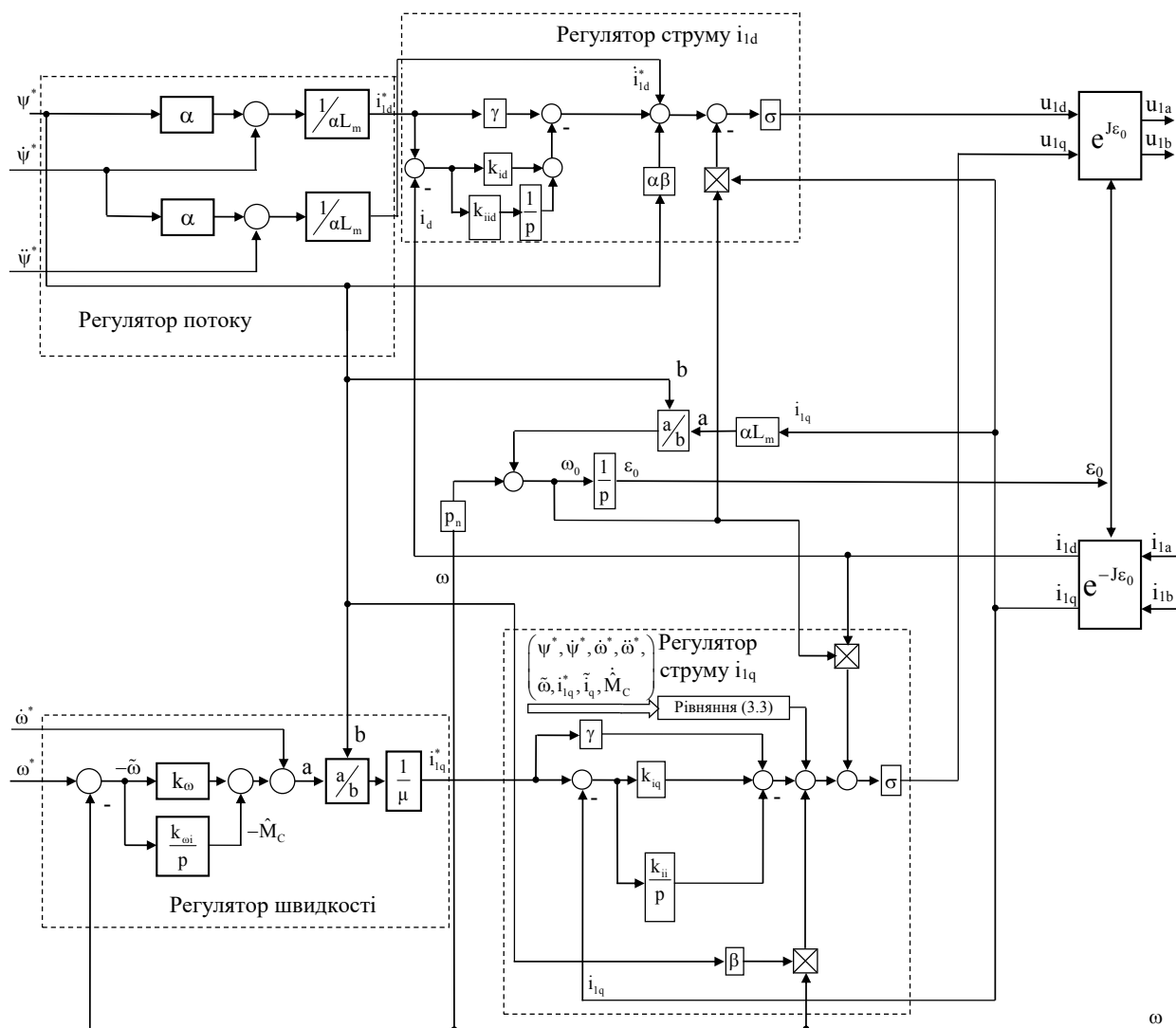


Рис.5.1 – Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування

### 5.3 Вибір параметрів регуляторів системи

Система рівнянь (5.4)-(5.7) буде стійкою при відомому налаштуванні регуляторів  $(k_{\omega}, k_{\omega i}, k_i, k_{ii}) > 0$ . Структура похибок відпрацювання в контурах регулювання струму уніфікована і задана лінійним диференціальним рівнянням другого порядку з характеристичним рівнянням:

$$p^2 + k_p p + k_i = 0, \quad (5.10)$$

де  $k_p$  і  $k_i$  – значення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної дії регуляторів швидкості та струму.

Використовуються стандартні співвідношення для розрахунку коефіцієнтів регуляторів [18]:

$$\begin{aligned} k_i &= \frac{k_p^2}{2} (\xi = 0.707) \\ k_i &= \frac{k_p^2}{2} (\xi = 1) \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \psi_i &= \frac{(\alpha + k_\psi)^2}{2} (\xi = 0.707) \\ \psi_i &= \frac{(\alpha + k_\psi)^2}{4} (\xi = 1) \end{aligned} \quad (5.12)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт демпфування.

Типове співвідношення між швидкодією контурів регулювання таке, що кожен зовнішній контур якнайменше вдвічі менше швидкодіючий, ніж внутрішній, задається вибором співвідношення власних частот недемпфованих коливань в кожному з ізольованих контурів регулювання  $\omega_{oc} > (2 - 3)\omega_{oi}$ ,  $\omega_{oi}^2 = k_i$ ,  $i = c, \omega$ , де індекси  $c$  і  $\omega$  відносяться до контурів регулювання струму і кутової швидкості відповідно.

Приймаємо наступні значення параметрів регулятора для налаштування алгоритму:  $k_\omega = 100$ ,  $k_{\omega i} = 5000$ ,  $k_i = 700$ ,  $k_{ii} = 120000$ .

### **Висновки до розділу 5**

В даному розділі розглянуті принципи реалізації систем векторного керування асинхронним електродвигуном. Проведено синтез регуляторів. Складено структурну схему алгоритму непрямого векторного керування.



## 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

### 6.1 Математичної моделі електромеханічного об'єкта

На основі математичного опису елементів системи керування та використовуючи результати розрахунків представлених в попередніх розділах сформовано на базі прикладних програм MATLAB SIMULINK, для дослідження динамічних режимів роботи стрічкового конвеєра. Структура моделей приведена на рисунках 6.1-6.3.

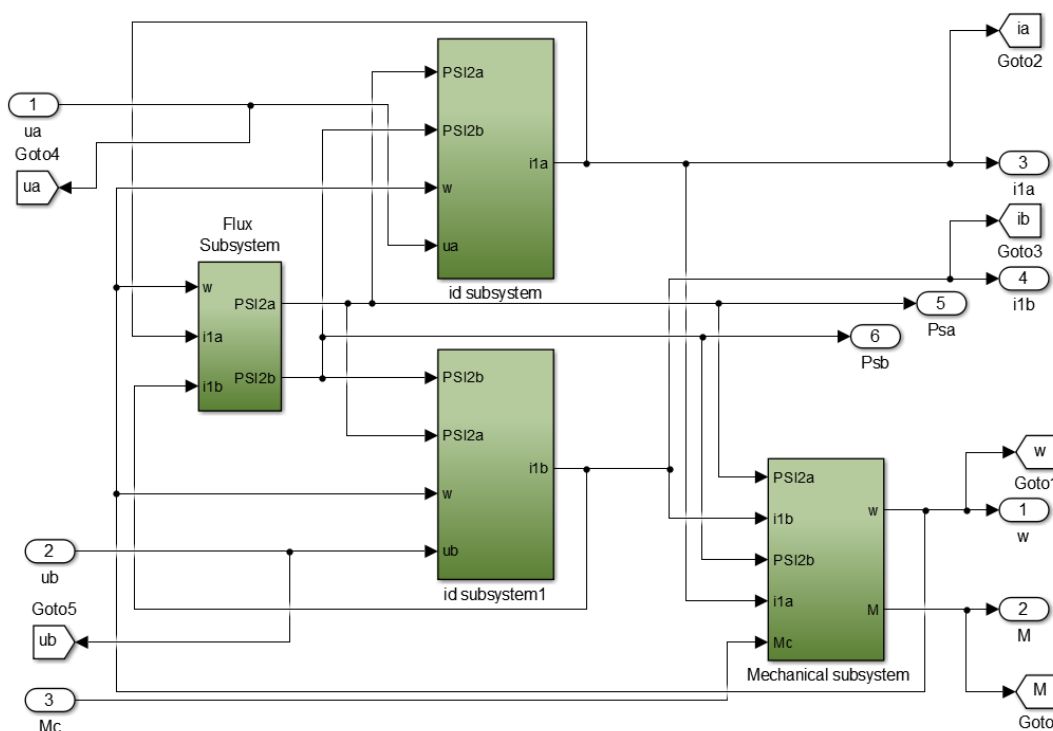


Рисунок 6. 1. Математична модель АД в координатах статора (a-b) в  
середовищі MATLAB Simulink

Результати моделювання представлені на рис. 6.2 – рис. 6.3.

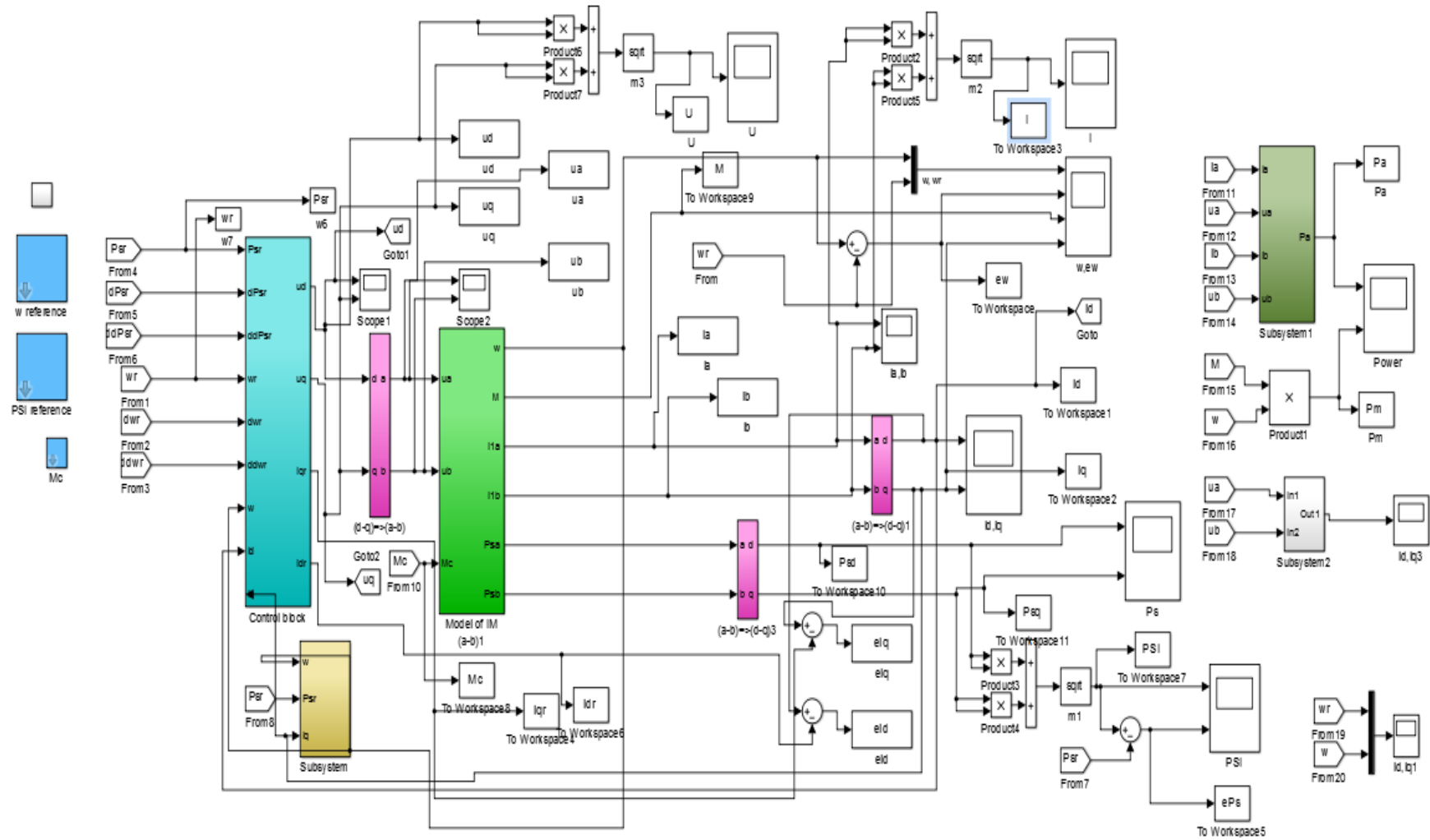


Рисунок 6.2 – Загальний вигляд моделі не прямого векторного керування в середовищі MATLAB

## 6.2 Дослідження динамічних режимів роботи

Режим роботи двигуна наступний:

За час від 0.25 до 0.35 секунди розганяється до заданої швидкості  $\omega = 153,7$  рад/с. Збуджується двигун за 0,2 секунди, і значення потоку досягає 0,98 Вб.

Після розгону до заданої швидкості, на 1.5 секунді накидається навантаження, рівне номінальному  $M_H = 97,6$  М\*н. Динамічна похибка при цьому складає 0,5 рад/с. Задане потокозчеплення відпрацьовується. Напруга  $U_q = 311$  В. через 2.7 секунд момент навантаження знімається і через 5 секунд відбувається зупинка. На 5.5 секунді двигун повністю зупиняється і відключається від мережі. Перехідні процеси наведені на рисунках 6.4 та 6.5.

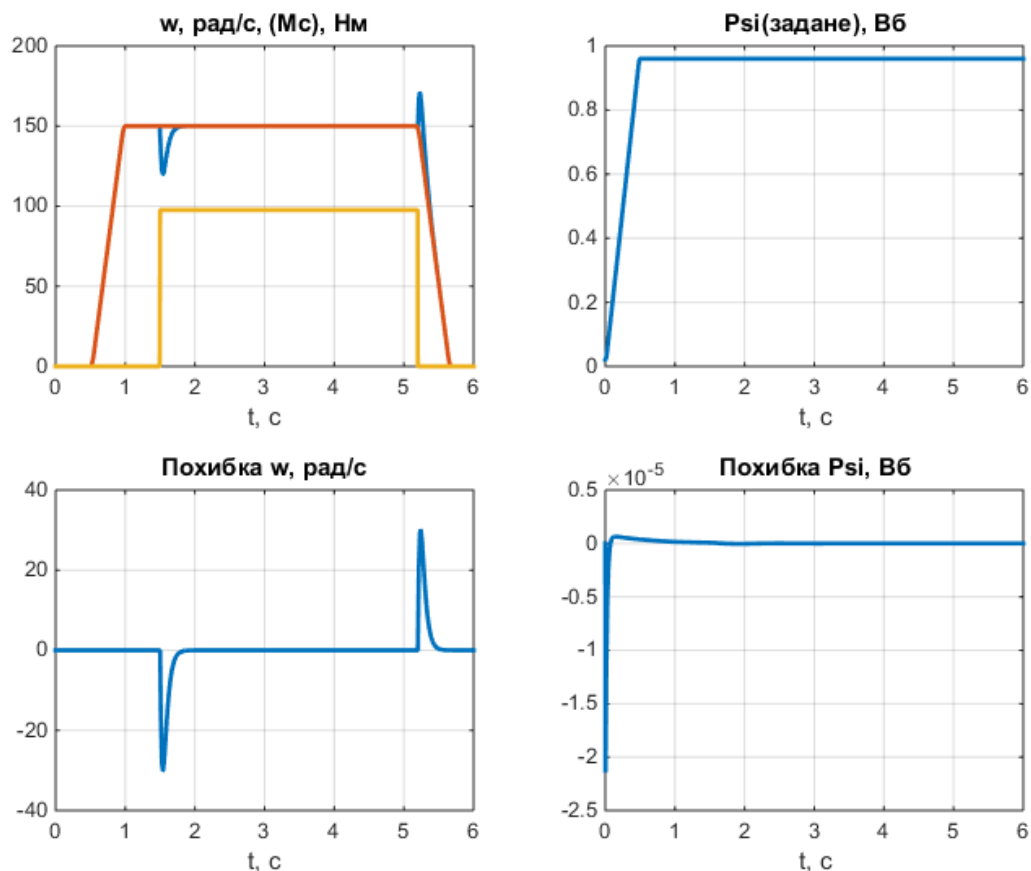


Рисунок 6.3 – Перехідні процеси в АД з алгоритмом непрямого векторного керування при  $\omega^* = \omega_n = 153.7$  рад/с

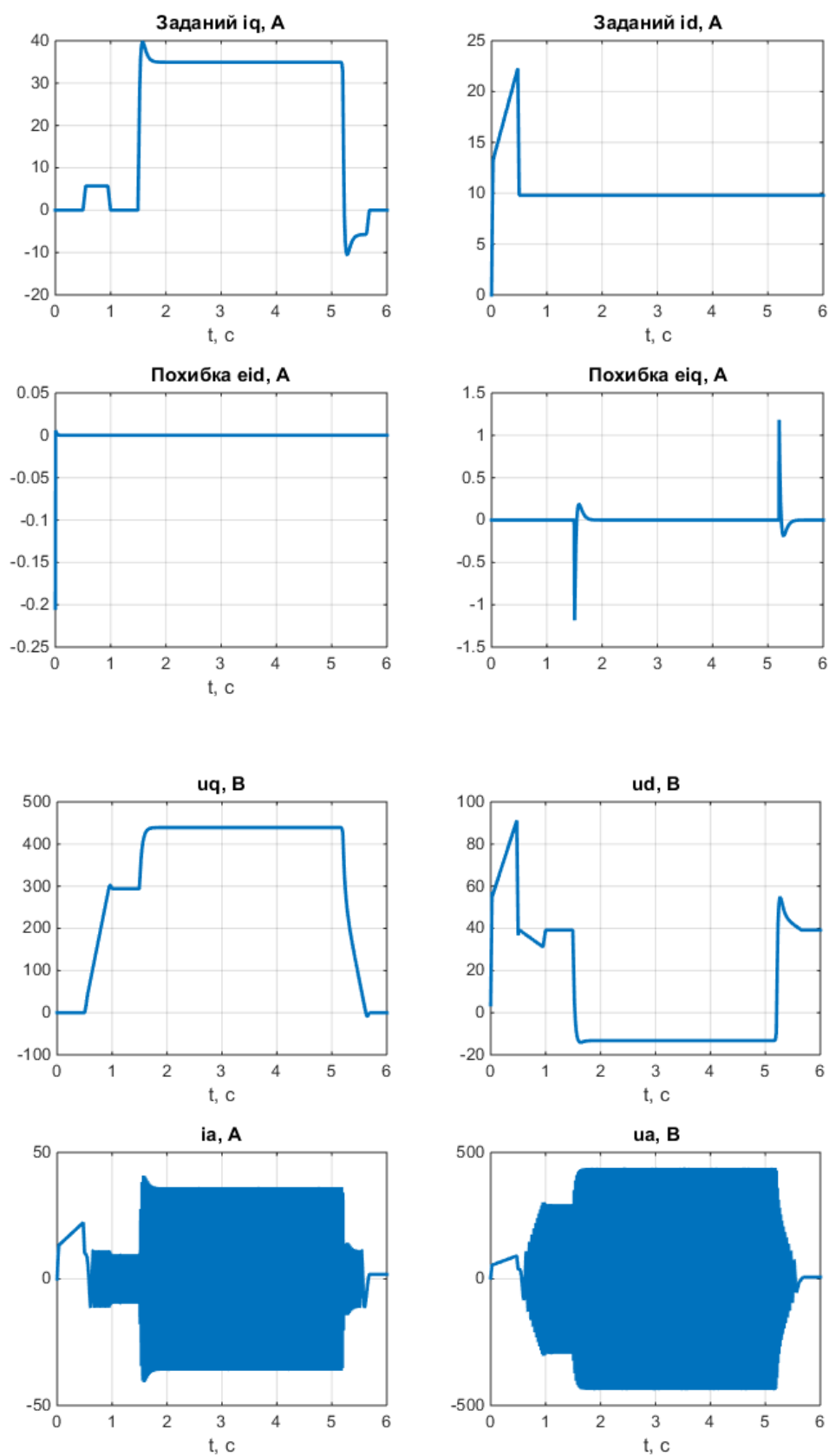


Рисунок 6.4 - Перехідні процеси в АД з алгоритмом непрямого векторного керування при  $\omega^* = \omega_n = 153.7 \text{ рад/с}$

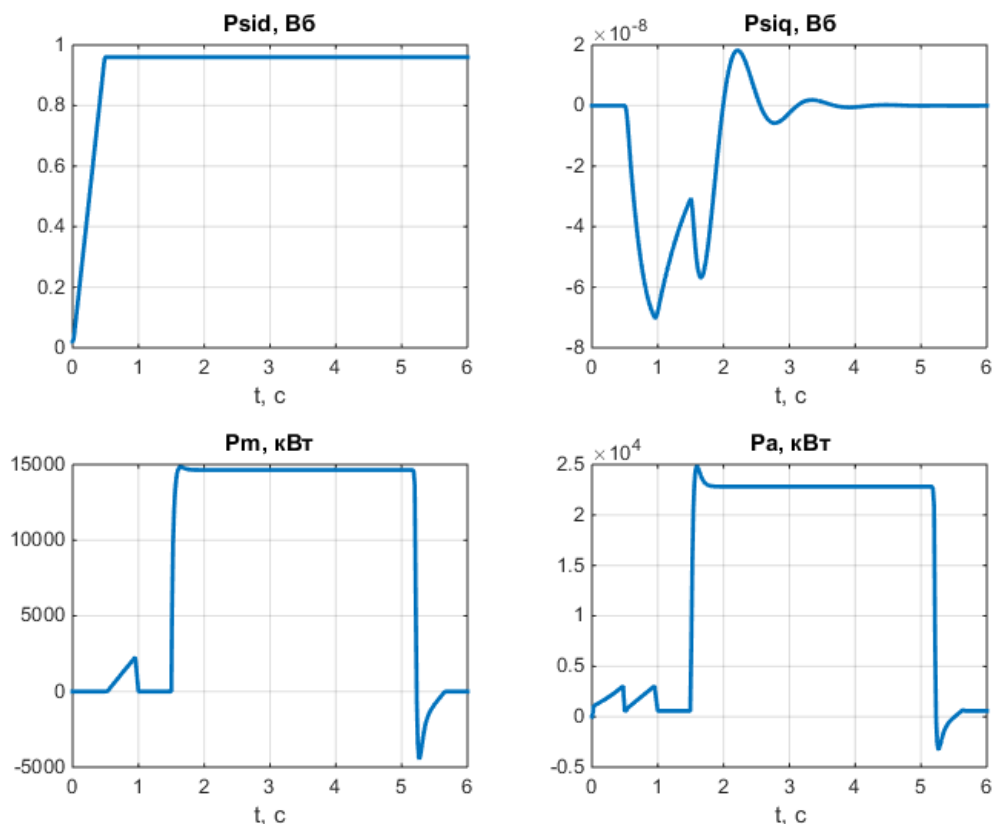


Рисунок 6.5 - Перехідні процеси в АД з алгоритмом непрямого векторного керування при  $\omega^* = \omega_n = 153.7 \text{ рад/с}$

З аналізу перехідних процесів які представлено на рис. 6.3 та рис. 6.4., а саме з графіків похибок відпрацювання швидкості та модуля потокозчеплення, видно, що цілі керування – асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості ротора та модуля вектора потокозчеплення досягаються, так як їх похибки асимптотично прямують до нуля. Модуль напруги статора при накиданні номінального моменту навантаження збільшується, для компенсації дії цього ж момента й для забезпечення відпрацювання кутової швидкості ротора на заданому значенні. Польова компонента струму статора регулює потокозчеплення, має стрибкоподібний характер тільки в початковий момент часу для швидкого збудження АД, далі залишається сталою, оскільки керування відбувається в першій зоні. Моментотворюючий струм статора регулює кутову швидкість

ротора та прямопропорційний моменту на валу двигуна, тому повторює його форму. Графік модуля струму статора має ділянку збудження та ділянку відпрацювання кутової швидкості. Також з отриманих результатів видно, що потокозчеплення по осі (q) приблизно дорівнює нулю (майже відсутнє), а потокозчеплення по осі (d) повторює форму заданого потокозчеплення. За умовою ідеального полеорієнтування процеси в механічній та електромагнітній підсистемах розв'язані між собою. Це можна побачити на графіках динамічної поведінки системи (польова компонента струму статора регулює потокозчеплення, а моментотворююча компонента струму статора регулює момент двигуна).

### **6.3 Дослідження характеристик процесу поступового змішування сумішей**

Дослідження проведено для величин навантаження  $M_C = 0,3 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,5 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,8 \cdot M_H$ ,  $M_C = M_H$ .

Двигун розганятиметься до номінальної швидкості  $\omega_H = 153,7$  рад/с. Тривалість дії навантаження складає 4 секунд. Результати приведені на рисунках 6.4 – 6.5

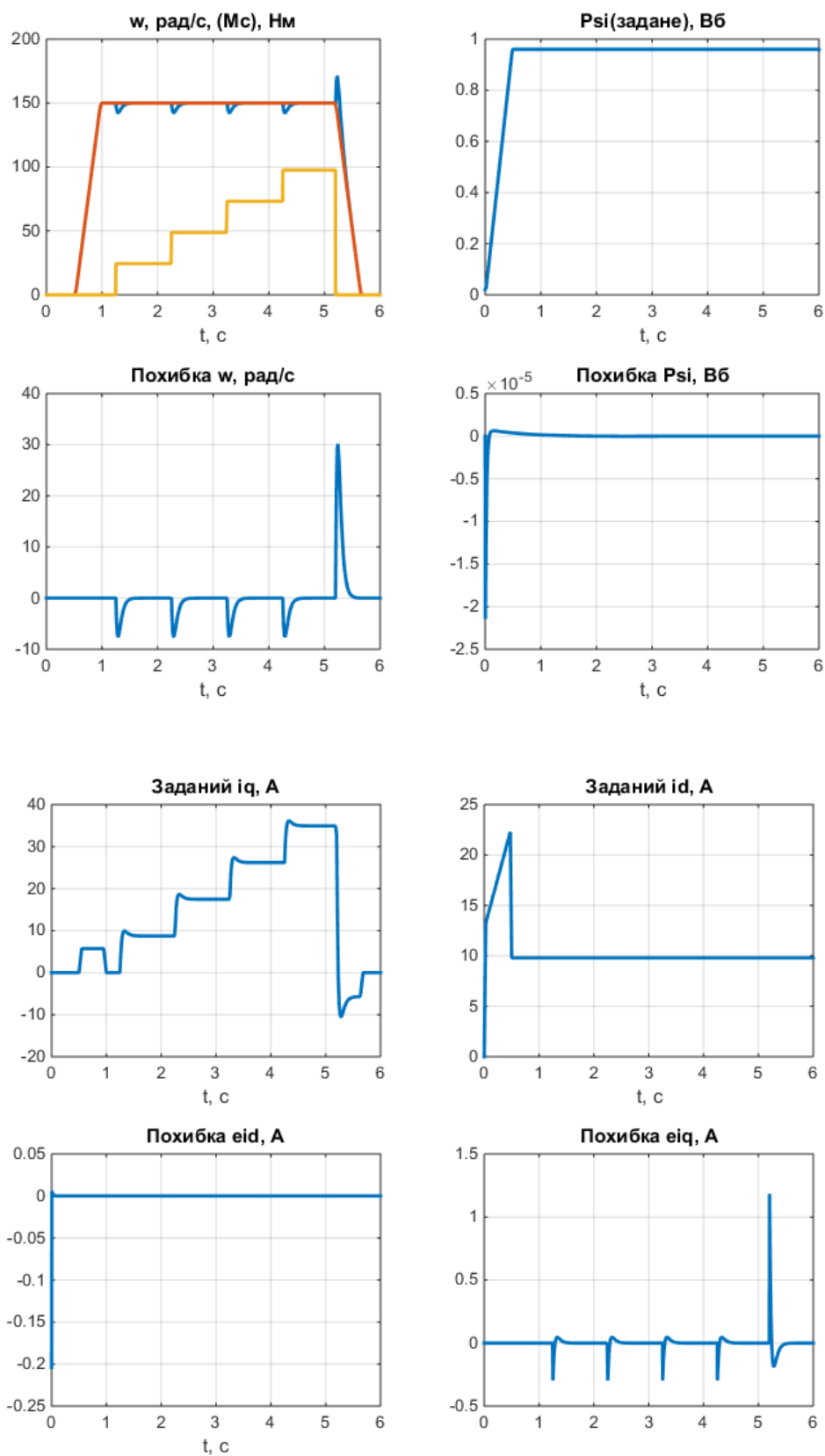


Рисунок 6.6 - Перехідні процеси двигуна конвеєра при  $\omega = 153,7$  рад/с та при навантаженні  $M_C = 0,3 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,5 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,8 \cdot M_H$ ,  $M_C = M_H$ .

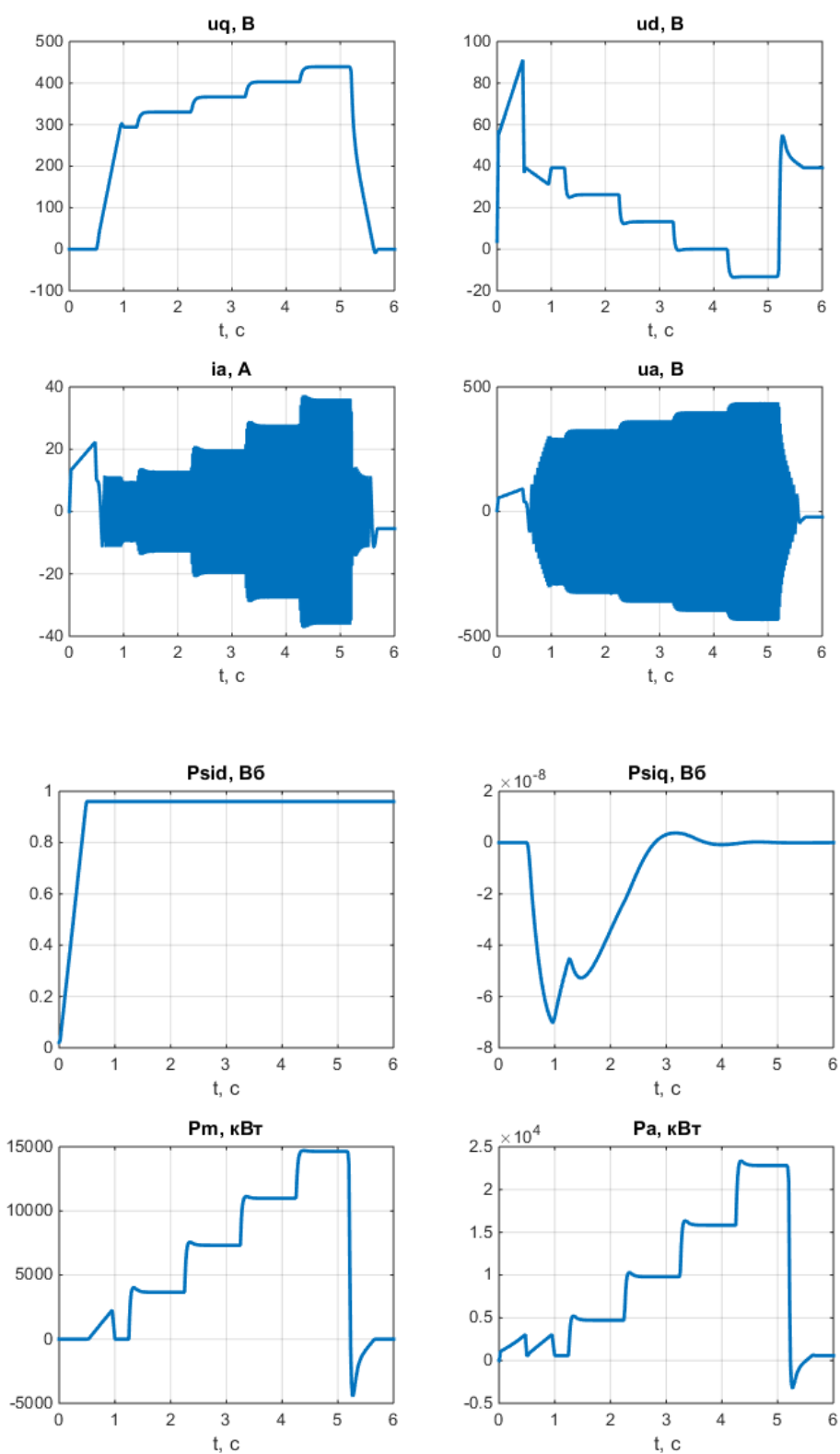


Рисунок 6.7 - Перехідні процеси двигуна конвеєра при  $\omega = 153,7$  рад/с та при навантаженні  $M_C = 0,3 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,5 \cdot M_H$ ,  $M_C = 0,8 \cdot M_H$ ,  $M_C = M_H$ .



Проаналізувавши графіки похибок швидкості, ми бачимо, що похибка присутня лише під час скидання статичного момету. Швидка компенсація помилки відпрацювання польової компоненти струму свідчить про те, що траєкторія заданого збудження буде реально відтворена, що підтверджено на попередньому графіку.

Поява помилки відпрацювання моментної компоненти струму сигналізує про прикладення та зняття навантаження у відповідний момент часу. Результати моделювання також показують, що полеорієнтування забезпечується цим векторним алгоритмом управління, оскільки похибка в асимптотичному тесті зчеплення дорівнює нулю. Фактична зв'язок на осі (q) майже дорівнює нулю, і вісь (d) повторює вказаний шлях.

### Висновки до розділу 6

У цьому розділі моделювання проводили в програмному середовищі Matlab Simulink. Дослідження динамічних характеристик АД. Перехідні процеси в електроприводі досліджували за допомогою алгоритму непрямого векторного управління при номінальній швидкості обертання вала  $\omega^* = \omega_n = 153.7$  рад/с. Були також досліджені динамічні характеристики процесу поступового змішування сумішей. Переглядаючи графіки, ми можемо стверджувати, що вимоги до електроприводу виконані.

## 7 ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті здійснена розробка електропривода для головного механізму дисольверу.

На основі аналізу технологічного процесу були сформульовані основні вимоги до електроприводу і системи автоматизації. Ці вимоги реалізовано за допомогою векторно-регульованого асинхронного електроприводу.

На основі розрахунку потрібної потужності був здійснений вибір електродвигуна та перетворювача частоти. Також було спроектовано систему непрямого векторного керування асинхронним електроприводом.

Результати моделювання електроприводу при номінальній частоті обертання валу електродвигуна та при частоті 10% від номінальної свідчать про те, що задані траєкторії регульованих координат відпрацьовуються і тільки при накиданні моменту існує динамічна похибка по швидкості, яка швидко зникає. Тому можна заключити, що задачі керування виконуються згідно вимог.

Складено електричні схеми електроприводу, схему технологічного процесу та специфікації електрообладнання.

## 8 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 – Брок Г., Гротеклаус П., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Машляковского. М.: Пэйнт-Медиа, 2004. 548 с.
- 2 – «Подбор диспергирующего оборудования для производства пигментированных лакокрасочных» Рыбин Н.В., к.х.н., главный технолог ООО ПО "ХИМТЭК"
- 3 – Горловский И.А. и др. Оборудование заводов лакокрасочной промышленности. СПб.: Химия, 1992. 200 с
- 4 – С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко, Розрахунки і вибір механічних перемішувальних пристроїв вертикальних ємкісних апаратів.
- 5 – Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А 90. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с
- 6 – Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости // Техн. електродинаміка. –1999. –№ 4. – С. 26–31.
- 7 – Т . Брок, М. Гротэклаус, П. Мишке. Європейське керівництво по лакофарбових матеріалів і покриттів.
- 8 – Доманский І.В.,Решенов А.С.,Соклов Н.В. Машины та апарати хімічного виробництва.
- 9 – Лілія Шмід- Диспергирование – фрезами.
- 10 – Оборудывание для производства шкаклёвки:  
<http://molpromline.ru/katalog>.
- 11 – Корнієнко Я.М. ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
- 12 – Ламбурн Р. (ред). Лакокрасочные материалы и покрытия: Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Машляковского и А. М. Фроста. СПб.: Химия, 1991. 512 с.

- 13 – Лакокрасочные покрытия. Технология и оборудование: Справ, изд. / Под ред. А. М. Елисаветинского. М.: Химия, 1992. 416 с.
- 14 – <https://www.uzli.info/proizvodstvo-i-vidy-shpaklevki>
- 15 – <https://msd.com.ua/kraska/ukr/tehnolog.html>
- 16 – <https://zto2004.org/p184893380-dissolver-napolnyj.html>
- 17 – Есаков В.П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. Киев: Вища школа, 1981. – 247 с.
- 18 – Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. – К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. –96 с.
- 19 – Попович М. Г. Теорія електропривода: [Підручник]/За ред. Поповича М.Г.–К.: Вища школа, 1993. – 494с.
- 20 – Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М., «Энергия», 1977.
- 21 – Datasheets для діодів випрямляча Semikron SKR 130/12 Diode // <http://uk.rs-online.com/web/p/rectifier-schottky-diodes/0656502/>
- 22 – Datasheets для резистора - <https://www.rcscomponents.kiev.ua/catalog>
- 23 – Datasheets для зарядного реле [http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FV23132-X0000-A001%7FN%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_V23132-X0000-A001\\_N.pdf](http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FV23132-X0000-A001%7FN%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_V23132-X0000-A001_N.pdf)
- 24 – Datasheets для резистора 33Ом <http://elcom.zp.ua/ru/goods/view/909>
- 25 – Выбор реле - [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/am3-24b-automotive-electromagnetic-relays-am3-24bp\\_88724.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/am3-24b-automotive-electromagnetic-relays-am3-24bp_88724.html)
- 26 – Datasheets для выбору транзистора <http://www.tme.eu/ua/details/2sd471/tranzystory-npn-tht/> .

- 27 – Каталог конденсторів для ланки постійного струму  
[https://en.tdk.eu/inf/20/30/db/aec/B43742\\_B43762.pdf](https://en.tdk.eu/inf/20/30/db/aec/B43742_B43762.pdf)
- 28 – Каталог датчиків струму [https://www.lem.com/ru/product-list?measurement=52&nominal\\_val=45-90](https://www.lem.com/ru/product-list?measurement=52&nominal_val=45-90)
- 29 – Datasheets для енкодера// [Електронний ресурс] / Режим доступа  
[http://www.autonicsonline.com/product/product&product\\_id=4251](http://www.autonicsonline.com/product/product&product_id=4251)