

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ____ ” _____ 2023р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Автоматизований електропривод верстату з числовим програмним керуванням

Виконав : студент _____ 4 _____ курсу, групи _____ ЕП-92

(шифр групи)

Коваленко Іван Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ асист. _____ Сергієнко Олег В'ячеславович

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Рецензент _____ Вишневський О.В., асист. _____

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

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2023р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.ЕП9206.018.БР	Пояснювальна записка	71	
3	A1	141.ЕП9206.018.БР	Функціональна схема	1	
4	A1	141.ЕП9206.018.БР	Структурна схема	1	
5	A1	141.ЕП9206.018.БР	Дослідження динамічних та статичних режимів	1	

					141.ЕП9206.018.БР		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проекту		
Розроб.		Коваленко І.А.					
Керівн.		Сергієнко О. В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Теряєв. В. І.					
Зав. каф		Ковбаса С. М.			Літ. Арк. Акрушів		
					2 63		
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-92		

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Автоматизований електропривод верстату з числовим програмним керуванням

Київ – 2023р.

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 КОВБАСА
 (підпис)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Коваленку Івану Андрійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизований електропривод верстату з числовим програмним керуванням

керівник проекту Сергієнко Олег В'ячеславович
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 30.05.2023

3. Вихідні дані до проекту напруга живлення 380 В, час перехідного процесу 0.25 – 0.5, перерегулювання 3 – 4%

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. Аналітичний огляд в галузі металообробки та вибір досліджуваного пристрою. Вибір електродвигуна та розрахунок його параметрів. Розробка функціональної схеми САК. Розробка алгоритму керування. Моделювання САК. Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників,

плакатів, презентацій тощо) Функціональна схема (формат А1). Структурна схема (формат А1). Дослідження динамічних та статичних режимів (формат А1).

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 08.02.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд в галузі металообробки та вибір досліджуваного пристрою	17.04 – 23.04.2023 р.	
2	Вибір електродвигуна та розрахунок його параметрів	24.04 – 08.05.2023 р.	
3	Розробка функціональної схеми САК	08.05 – 14.05.2023 р.	
4	Розробка алгоритму керування	15.05 – 21.05.2023 р.	
5	Моделювання САК	22.05 – 04.06.2023 р.	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	05.06 – 10.06.2023 р.	

Студент

(підпис)

Іван КОВАЛЕНКО

Керівник проекту

(підпис)

Олег СЕРГІЄНКО

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки 71 сторінки, 33 рисунка, 7 таблиць, 3 додатка.

В даному дипломному проекті розглянуто систему керування електроприводом металорізального верстата з ЧПК. Особливої уваги приділено розробці моделюючої програми та системі керування електродвигуном. Проведено аналітичний огляд в сфері застосування верстатів з ЧПК а саме в металообробній сфері. Обрано пристрій для дослідження. Обраховано необхідну потужність для електродвигуна головного руху металорізального верстату. Обраховано параметри обраного електродвигуна. Сформовано вимоги до електроприводу головної подачі. Розроблено функціональну схему системи керування перетворювач частоти – асинхронний двигун. Створено модель в програмному середовищі MatLab/Simulink для дослідження статичних та динамічних режимів.

МЕТАЛООБРОБКА, ЧПК, ФРЕЗЕРНИЙ ВЕРСТАТ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЮЮЧА ПРОГРАМА, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ.

					141.ЕП9206.018.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизований електропривод верстату з числовим програмним керуванням Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Коваленко І.А.					6	71
Керівн.		Сергієнко О. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-92		
Реценз.		Вишневський О.В.						
Н. Контр.		Теряєв. В. І.						
Зав. каф		Ковбаса С. М.						

SUMMARY

The diploma project consists of a 71-page explanatory note, 33 figures, 7 tables, and 3 appendices.

This thesis project deals with the electric drive control system for a CNC metal-cutting machine. Particular attention is paid to the development of a modelling programme and an electric motor control system. An analytical review of the field of application of CNC machines, namely in the metalworking industry, was carried out. The device for the study is selected. The required power for the electric motor of the main movement of the metal-cutting machine is calculated. The parameters of the selected electric motor are calculated. The requirements for the main feed electric drive are formed. A functional diagram of the frequency converter-asynchronous motor control system was developed. A model in the MatLab/Simulink software environment was created to study static and dynamic modes.

METALWORKING, CNC, MILLING MACHINE, ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, INDUCTION MOTOR, CONTROL ALGORITHM, MATHEMATICAL MODEL, SIMULATION PROGRAMME, TRANSIENTS.

					141.EP9206.018.BW						
	letter	No of document	Sign	Date							
Devel.		I. Kovalenko			Automated electric drive of the machine with numerical control Abstract			L.	Page	Pages	
Checked		O. Sergienko								7	71
Recension		O. Vyshnevskiy						NTUU "I. Sikorskiy KPI", FEA department AEMS-ED gr. EP-92			
N. contr.		V. Teryayev									
Approved		S. Kovbasa									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ГАЛУЗІ МЕТАЛООБРОБКИ ТА ВИБІР ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИСТРОЮ	12
1.1 Загальні відомості про верстати з ЧПК	12
1.2 Класифікація фрезерних верстатів	18
1.3 Типи електроприводів фрезерних верстатів	20
1.4 Опис установки та технологічного процесу	21
1.5 Формування вимог до електроприводу та системи керування	25
Висновки до розділу	26
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ПАРАМЕТРІВ	27
2.1 Розрахунок потужності двигуна та його вибір.....	27
2.2. Побудова навантажувальної діаграми	31
2.3 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	33
2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	34
Висновки до розділу	37
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ САК	39
3.1 Розробка функціональної схеми	39
3.2 Розрахунок основних елементів силової частини	41
Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ.....	45
4.1 Базові принципи проектування алгоритму векторного керування	45
4.2 Розробка алгоритму прямого векторного керування.....	47
Висновки до розділу	49
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ САК	50
5.1 Створення моделюючої програми.....	50
5.2 Результати моделювання	58
Висновки до розділу	63
ВИСНОВКИ.....	64

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	66
ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ.....	68
ДОДАТОК А	69
ДОДАТОК В	70
ДОДАТОК С	71

ВСТУП

Металорізальні верстати є широко використовуваними промисловими машинами, які призначені для механічної обробки металевих заготовок за допомогою ріжучих інструментів. Сучасний металорізальний верстат оснащений складною системою автоматизованого електроприводу, яку можна розділити на два основних типи: привод головного руху і привод подачі. Якість виготовленої продукції великою мірою залежить від надійної та синхронізованої роботи цих приводів.

Сучасні виробничі процеси в металообробній галузі вимагають високої точності, ефективності та автоматизації. Металорізальні верстати є ключовими інструментами для механічної обробки металевих заготовок, де точність та якість продукції мають вирішальне значення. Одним з важливих аспектів досягнення цих параметрів є система керування електроприводом металорізального верстата.

Система керування електроприводом відіграє ключову роль у забезпеченні точності, динаміки та стабільності роботи верстата. Вона забезпечує керування рухом різального інструменту, подачею матеріалу та іншими важливими функціями, що впливають на якість та продуктивність обробки. Ефективне керування електроприводом дозволяє досягти точних розмірів, гладкості поверхні та оптимального використання ресурсів.

Актуальність роботи. Із розвитком технологій у сфері металорізальних верстатів, збільшується необхідність в точності відпрацювання поставленого технологічного процесу та полегшення праці людини, за рахунок використання різних систем автоматизації. Дана робота є актуальною, оскільки розробка алгоритму керування електроприводом значно полегшить використання та обслуговування металорізального верстату.

Мета роботи: провести аналітичний огляд в сфері обробки металів за рахунок використання металорізального обладнання а саме металообробних верстатів. На основі отриманої інформації розрахувати необхідну потужність

двигуна головного руху верстату. Розробити алгоритм керування електродвигуном що забезпечить високі показники якості системи та точне відпрацювання заданої траєкторії.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ГАЛУЗІ МЕТАЛООБРОБКИ ТА ВИБІР ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИСТРОЮ

Обробне обладнання є невід’ємною частиною основних засобів підприємств і є потужним виробничим ресурсом. Тому питання ефективного використання обладнання повинні бути постійною турботою керівників. Протягом експлуатації машин, верстатів та іншого обладнання їхній робочий стан погіршується, переважно через зношування окремих деталей. Це може призводити до зниження точності обробки, зменшення потужності та продуктивності. Однак, такі експлуатаційні характеристики обладнання можуть бути відновлені за допомогою технічного обслуговування, ремонту та заміни деталей або вузлів.

1.1 Загальні відомості про верстати з ЧПК

Основну частину обладнання механічних цехів складають металообробні верстати. У цю групу входять верстати для обробки ріжучим інструментом виробів із металевих матеріалів, а також пластмас, скла, кераміки та ін.

Металорізальний верстат – це машина, призначена для обробки заготовки шляхом зняття стружки (припуску) з метою отримання готової деталі заданої форми та розмірів відповідно до робочого креслення.

У сфері металообробної промисловості за останні роки спостерігається значний прогрес. Традиційні металорізальні верстати замінюються високопродуктивними верстатами з програмним управлінням та обробними центрами. Ці верстати, що базуються на використанні мікропроцесорної техніки і роботів, дозволяють створювати гнучкі автоматизовані виробництва, що суттєво підвищують продуктивність та якість виготовленої продукції.

Числове програмоване керування (ЧПК, англ. Computer numerical control, CNC) – це технологія, яка використовується для автоматизації та керування верстатами та іншими промисловими машинами. Ця система базується на

використанні комп'ютера або спеціалізованого контролера для керування рухом верстату та виконання заданих операцій.

У системі ЧПК оператор створює програму, що складається з послідовності команд, що вказують верстату, які операції виконувати та як керувати рухами інструментів. Ці команди можуть включати рухи вздовж різних осей (X, Y, Z) або обертання інструментальних шпинделів з необхідною швидкістю обертання.



Рисунок 1.1 – ЧПК оператор

Верстати з використанням технології ЧПК мають широкий функціонал, що дозволяє виконувати різноманітні завдання з різання, гравірування та фігурної обробки матеріалів. Різнманітне програмне забезпечення

застосовується для керування різними типами верстатів з їх власними конструктивними та технологічними особливостями, такими як фрезерні, шліфувальні, свердлильні, токарні та лазерні верстати. Комп'ютерна програма бере на себе всі аспекти керування верстатом, забезпечуючи обробку в автоматичному або напівавтоматичному режимі, контроль за виконанням робіт на кожному етапі та виявлення стану обладнання.

Перевагами використання верстатів з ЧПК є:

1. Такі верстати можуть використовуватися 24 години на добу, 365 днів на рік та не потребують відключення за винятком технічного обслуговування.
2. Створена програма може використовуватися безліч разів для обробки великої кількості деталей. Кожен виріб при такій обробці буде ідентичний.
3. На відміну від ручних верстатів, верстати з ЧПК не вимагають від інженерів такої кваліфікації, оскільки керування є простішим.
4. Навчання використанню верстатів з ЧПК доступне за допомогою віртуального програмного забезпечення, яке дозволяє оператору практикувати використання верстата на екрані комп'ютера.
5. Верстати з ЧПК можуть бути програмовані за допомогою високопрофесійного дизайн-програмного забезпечення, такого як Pro/DESKTOP®, що дозволяє виготовляти вироби, які не можуть бути створені за допомогою ручних верстатів, навіть тих, якими користуються кваліфіковані дизайнери / інженери.
6. Можливість керувати багатьма верстатами однієї людини, оскільки такі механізми не потребують постійного нагляду, окрім заміни ріжучого інструменту.
7. Деталі після обробки є ідентичними, що дозволяє використовувати дану технологію в промисловому масштабі.

Недоліками використання верстатів з ЧПК є:

1. Верстати з ЧПК є дорожчими, ніж ручні.
2. Для роботи з механізмом необхідно менша кількість працівників.

3. У разі виникнення помилки при роботі, необхідно звернутися до висококваліфікованого фахівця.

4. Висока вартість монтажу.

Сам верстат складається з декількох основних частин, які зазвичай називаються вузлами.

Головний привод верстата передає рух інструменту або заготівлі для здійснення процесу різання з відповідною швидкістю. У переважної більшості верстатів головний привод передає обертальний рух шпинделю, у якому закріплений ріжучий інструмент або заготівка.

Привод подачі використовується для переміщення інструмента відносно заготівки з метою формування оброблюваної поверхні. Більшість верстатів використовують привод подачі, який забезпечує прямолінійний рух вузла верстата. З комбінацією кількох прямолінійних або обертальних рухів можна досягти будь-якої просторової траєкторії.

Привод позиціонування використовується в багатьох верстатах для переміщення певного вузла з вихідної позиції в задану позицію, наприклад, при послідовній обробці кількох отворів або паралельних площин на одній заготовці. Багато сучасних верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПК) використовують один загальний привод для функцій подачі та позиціонування.

Система опори верстата складається з базових деталей, які послідовно з'єднані між собою. З'єднання можуть бути нерухомими (стійкі) або рухомими (направляючі). Система опори забезпечує правильне взаємне розташування ріжучого інструменту та заготівки під впливом силових і температурних факторів.

Маніпулюючі пристрої використовуються для автоматизації різних допоміжних рухів у верстаті, таких як зміна заготовок, їх затискання, переміщення або обертання, заміна ріжучих інструментів, видалення стружки та інші. Сучасні багатоопераційні верстати оснащені набором маніпуляторів, транспортерів та поворотних пристроїв. В деяких випадках ці функції виконує

універсальний маніпулятор з програмним управлінням, що є промисловим роботом.

Контрольно-вимірювальні пристрої необхідні в верстаті для автоматизації нагляду за правильністю його роботи. За їх допомогою відбувається моніторинг найбільш відповідальних частин верстата, працездатність ріжучого інструменту, вимірюють заготовки і вироби. При достатньому рівні автоматизації результати контрольних вимірювань надходять до керуючого пристрою, а звідти у вигляді керуючих сигналів коригують положення вузлів верстата.

Система управління може бути з ручним керуванням оператором, механічною системою керування або системою числового програмного управління (ЧПК). Зараз широко використовуються мікропроцесорні пристрої ЧПК для управління всіма типами верстатного обладнання.

В залежності від характеру виконання основних рухів і використаного інструмента, виділяються наступні основні методи обробки різанням на металообробних верстатах: точіння, стругання, довбання, свердлення, фрезерування і шліфування.

При точінні головний обертальних рух надається заготівці, а пух подачі – інструменту.



Рисунок 1.2 – Токарний верстат

При струганні на поздовжньо стругальних верстатах головний зворотно поступальний рух надається заготівці, а рух по дачі – інструменту.

При струганні на поперечно стругальних і при обробці на довбальних верстатах головний рух надається інструменту, а рух подачі заготівці

При свердленні як головний обертальний рух, так і рух подачі надається інструменту.



Рисунок 1.3 – Свердлильний верстат

При фрезеруванні головний обертальний рух надається інструменту (фрезі), а рух подачі – заготівці.

При шліфуванні головний рух завжди обертальний, він здійснюється інструментом – шліфувальним кругом. При круговому шліфуванні одночасно обертається і заготівка, чим забезпечується і кругова подача. Оскільки в більшості випадків довжина деталі, яка підлягає шліфуванню, перевищує ширину шліфувального круга, потрібна додаткова поздовжня подача уздовж осі заготівки, яку здійснюють за допомогою заготівки або шліфувального круга.

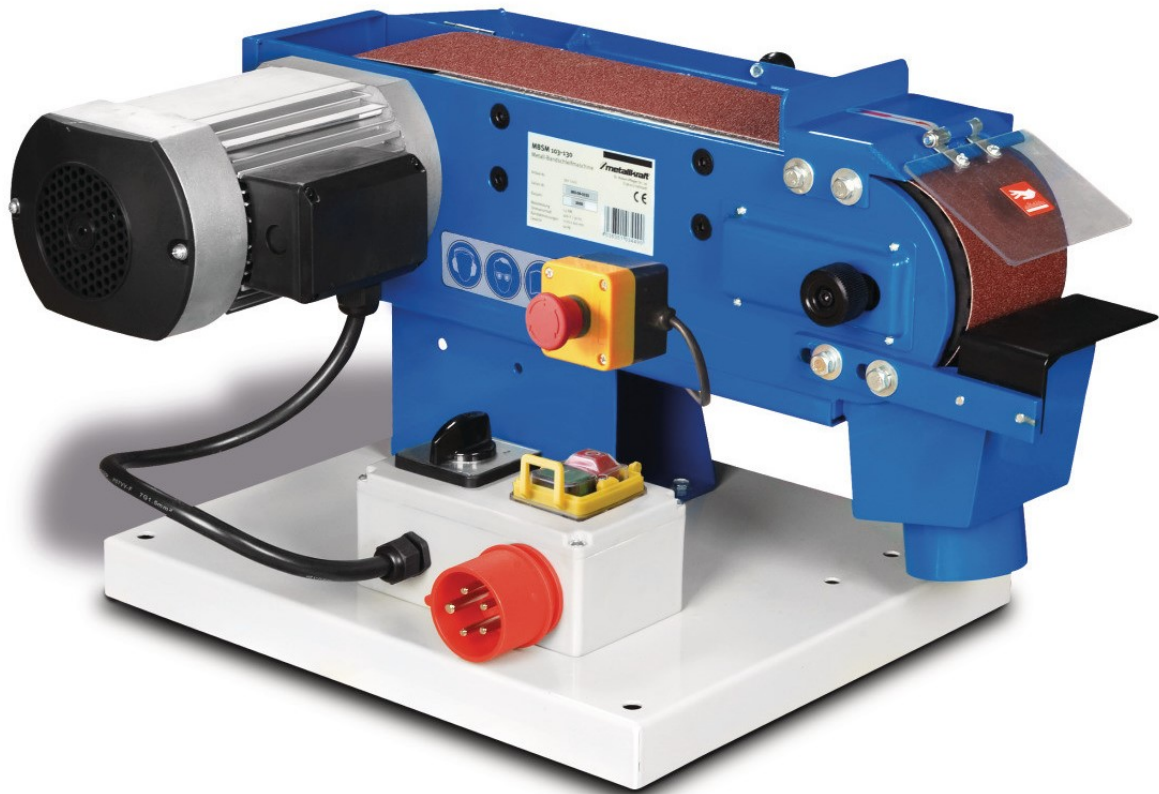


Рисунок 1.4 – Шліфувальний верстат

Під час шліфування основний рух є прямолінійним і передається інструменту через протяжку. Поступове зняття стружки, що є подачею, забезпечується різницею висоти між кожними двома сусідніми зубцями протяжки.

1.2 Класифікація фрезерних верстатів

Виготовлення широкого спектру виробів з матеріалів високої твердості неможливе без застосування фрезерування. Цей вид обробки є дуже популярним не лише в металообробній промисловості. Фрезерування застосовується для обробки різноманітних матеріалів за допомогою різних видів фрез. Відтак, правильний вибір фрезерного верстата дозволяє ефективно

настроїти виробництво різноманітних виробів високої якості, незалежно від обладнання майстерні або умов праці в обмеженому просторі.

Фреза є ріжучим інструментом, який складається з кількох зубців, кожний з яких можна розглядати як різець. Під час фрезерування основний рух здійснюється фрезою, яка обертається, тоді як заготовка, що здійснює поступальний рух (подачу), поступово притискається до зубців фрези.

Основні типи фрезерних верстатів можна класифікувати на основі їх конструктивного виконання. Залежно від цього критерію, їх можна розділити на такі типи:

Горизонтально-фрезерні верстати є станиною з горизонтально розташованим шпинделем та консольним робочим столом. Робочий стіл може рухатись у трьох площинах відносно вала зі шпинделем та закріпленого на ньому інструменту.

Вертикально-фрезерні (консольні) верстати є однією з найпоширеніших категорій такого обладнання. Вони відрізняються вертикальним розташуванням осі інструменту. Ці верстати частіше оснащені інструментами для роботи з кінцевими, циліндричними, фасонними деталями та свердлами. Вони дозволяють працювати з компактними та легкими заготовками.

Безконсольні фрезерні верстати мають шпиндель, що рухається в вертикальній площині. Горизонтальне переміщення відбувається завдяки руху робочого столу. Цей тип верстатів застосовується для обробки великих та масивних заготовок, тому стіл таких верстатів має високу міцність та жорсткість.

Поздовжньо-фрезерні верстати мають робочий стіл, який рухається в поздовжньому напрямку відносно центральної осі фрезера. Бабка шпинделю забезпечує рух в поперечному та вертикальному напрямках, а в окремих моделях може мати також поворотну функцію. Цей тип верстатів застосовується в корпусному та великогабаритному виробництві металевих деталей.

Універсальні та широкоуніверсальні верстати відрізняються за своєю конструкцією. Універсальні верстати оснащені поворотним столом, а широкоуніверсальні мають шпиндель з поворотною головкою.

Об'ємно-фрезерні верстати виконують фрезерування, використовуючи зразок готового виробу. За допомогою копіювального інструмента (вони також називаються копіювально-фрезерними) вони видаляють зайвий матеріал з заготовки, доводячи кінцевий результат до повної відповідності зразку.

Шпонкові фрезери характеризуються планетарним рухом шпинделя та зворотно-поступальним рухом робочого столу.

Карусельні фрезери працюють на основі багатопозиційної обробки. Вони мають кілька вертикальних шпинделів, які обробляють послідовно переміщувані заготовки.

1.3 Типи електроприводів фрезерних верстатів

Фрезерні верстати відносяться до групи верстатів з головним обертальним рухом, що надається інструменту. Для цих верстатів діапазон регулювання кутових швидкостей шпинделя зазвичай становить від 20:1 до 60:1. Вони не потребують зміни кутової швидкості шпинделя під час обробки, тому для фрезерних верстатів часто застосовується ступінчасте регулювання швидкості головного приводу. Це дозволяє встановлювати певні фіксовані значення швидкості, які відповідають потребам конкретних операцій обробки. У такому випадку немає спеціальних вимог до пускового моменту, тривалості пуску та гальмування приводу.

Для приводів головного руху малих і середніх фрезерних верстатів часто використовуються одно- або багатошвидкісні асинхронні двигуни, які поєднуються з коробкою передач для регулювання швидкості. Зазвичай такі двигуни мають фланцеве виконання. Привод подачі, в більшості випадків, здійснюється від головного двигуна через багатоступінчасту коробку передач. Загальний діапазон регулювання подачі становить від (20 ... 30):1. У випадках,

коли на верстаті не потрібні зуборізні операції, для приводу подачі часто використовуються окремі електродвигуни, що спрощує конструкцію верстата.

Головний привод важких поздовжньо-фрезерних верстатів також здійснюється за допомогою асинхронних двигунів з механічною ступінчастою зміною кутової швидкості шпинделя. Це дозволяє досягти необхідної робочої швидкості шпинделя в залежності від виконуваних операцій. Для приводів подачі столу і фрезерних головок таких верстатів, де діапазон регулювання швидкості становить $(40 \dots 60):1$, застосовуються синхронні двигуни, що керуються частотними перетворювачами, а також постійного струму двигуни, які включаються за допомогою системи ТП-Д.

Допоміжні приводи фрезерних верстатів, такі як приводи насосів для охолодження, змащення і гідросистем, а також швидкого переміщення фрезерних головок і поперечок у поздовжньо-фрезерних верстатах і інших, зазвичай здійснюються окремими асинхронними електродвигунами.

1.4 Опис установки та технологічного процесу

Головним рухом у фрезеруванні є обертання фрези, а рухом подачі є переміщення виробу. Під час фрезерування кожне лезо видаляє стружку лише під час певного фрагмента оберту, і форма перетину стружки постійно змінюється від нуля до максимального значення.

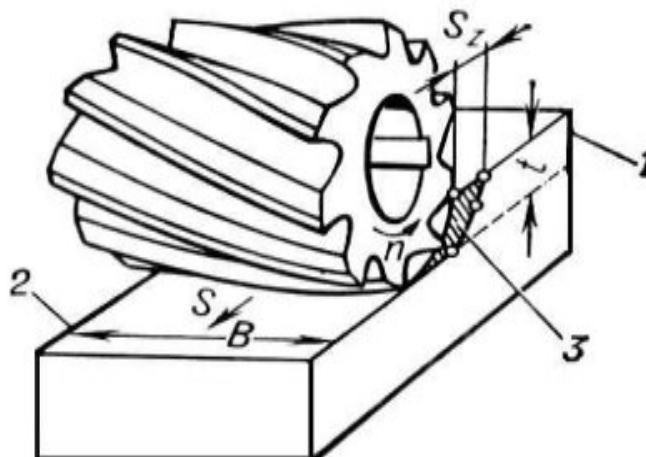


Рисунок 1.5 – Процес фрезерування

Цикл фрезерування складається з таких операцій: спочатку включається шпиндель з інструментом, потім стіл з заготівлею переміщується на швидкому ході, далі відбувається перехід на робочу подачу з урахуванням припуску, проводиться фрезерування заготовки, і, нарешті, стіл швидко переміщується від інструмента.

Для вибору електродвигуна та системи керування будемо використовувати фрезерний верстат TMM 700 Vario FDB Maschinen [7]. Його будова представлена на рис. 1.2.

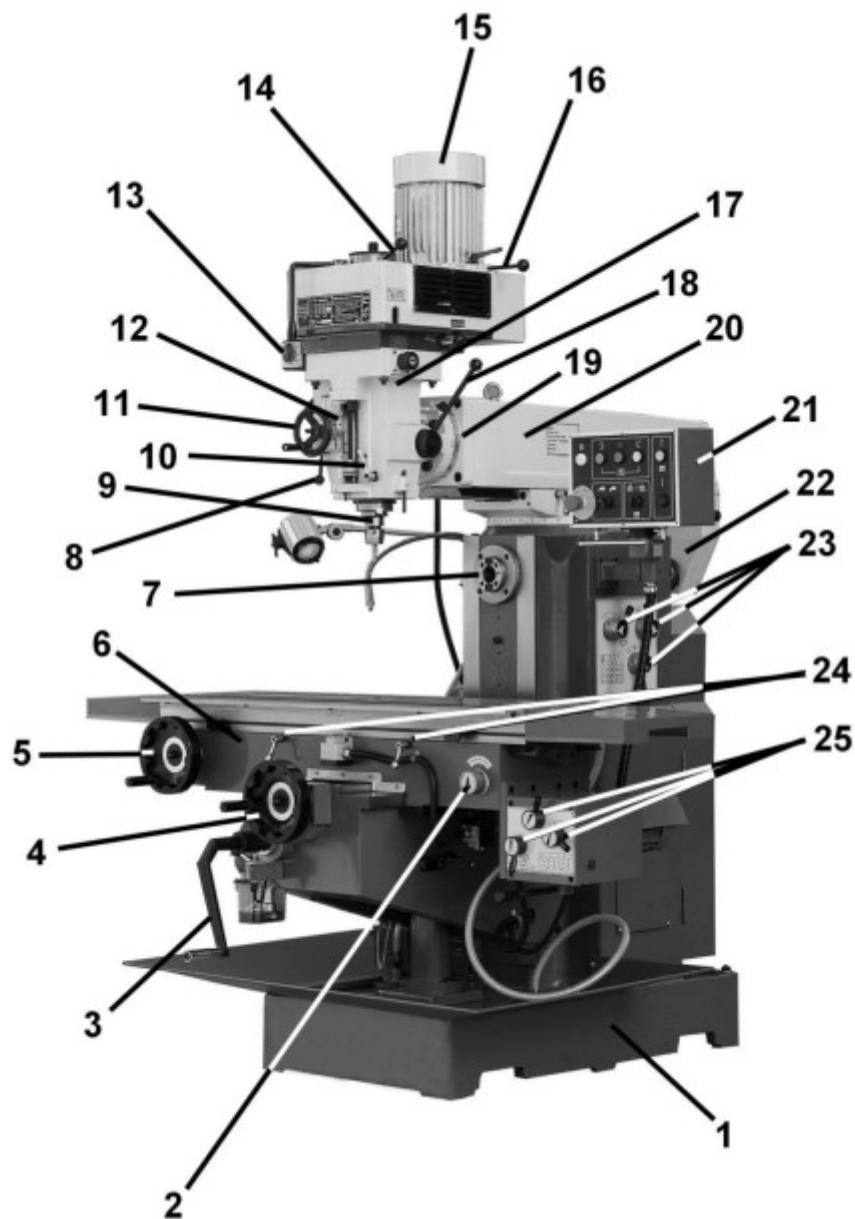


Рисунок 1.6 – Будова фрезерного верстату TMM 700 Vario FDB Maschinen

1. Основа станка;
2. Перемикач поздовжнього і поперечного переміщення стола;
3. Ручка налаштування потрібної висоти робочого стола;
4. Кермо поперечного переміщення;
5. Кермо поздовжнього переміщення;
6. Робочий стіл;
7. Горизонтальний шпиндель;
8. Важіль перемикача режимів ручного подачу вертикального шпинделя (основна подача / мікроподача (тонка подача));
9. Вертикальний шпиндель;
10. Ручка затиску пінолі;
11. Кермо ручної тонкої подачі пінолі вертикального шпинделя;
12. Шкала пінолі вертикального шпинделя;
13. Блок управління напрямком обертання вертикального шпинделя;
14. Фіксатор натягу ременів приводного вала вертикального шпинделя;
15. Електродвигун приводу вертикального шпинделя;
16. Натягувач ременів вертикального шпинделя;
17. Голова вертикального шпинделя;
18. Ручка ручного переміщення пінолі вертикального шпинделя;
19. Шкала нахилу фрезерної голови вертикального шпинделя;
20. База голови вертикального шпинделя;
21. Пульт керування;
22. Гак;
23. Ручки коробки передач горизонтального шпинделя;
24. Затискачі болти робочого стола;
25. Ручки зміни величини подачі коробки передач продольного переміщення стола

Верстат складається з наступних основних складових: станина станка, розташована на основі 1, гак 22, голова вертикального шпинделя 17, електродвигун приводу вертикального шпинделя 15, коробка передач

ременевих передач вертикального шпинделя з важелями натягу та фіксації ременів 14 і 16, робочий стіл з консоллю 6.

Станина є основою станка, жорстко закріпленою на основі 1. По вертикальних напрямних станини рухається консоль (ось Z). По горизонтальних напрямних консолі здійснюється переміщення в поперечному напрямку механізму «стіл-скіпка» (подача по осі Y), а по напрямних скіпок – подача по осі X. На правому кінці стола встановлена коробка поздовжньої та поперечної подачі стола з ручками 2 і 25. На станині розташований гак 22, який обертається на 360° навколо своєї осі по горизонталі і здійснює переміщення вперед-назад.

Голова вертикального шпинделя 17, що складається з шпиндельного вузла з шпинделем 9, коробки передач з важелями натягу та фіксації ременів 14 і 16 та електродвигуна 15, закріплена на передньому кінці гаку 22. Голова вертикального шпинделя може нахилитися вправо-вліво на $\pm 90^\circ$. У голові вертикального шпинделя 17 встановлений шпиндельний вузол, а шпиндель - в пінолі на кулькових підшипниках. Ручна подача шпинделя здійснюється обертанням валу-шестерні і переміщенням пінолі. Шпиндель має конус, в який можна вставити свердлильний патрон на втулці або інструмент з конусом. Основний рух шпинделя здійснюється за допомогою електродвигуна 15 через ремінну передачу.

Горизонтальний шпиндель 7 встановлений в станині на кулькових підшипниках. Основний рух шпинделя здійснюється окремим електродвигуном, встановленим у нижній частині станини через коробку передач.

Верстат обладнаний системою подачі мастильно-охолоджувальної рідини в зону обробки заготовки. Пульт керування 21 призначений для автоматизації процесів обробки.

1.5 Формування вимог до електроприводу та системи керування

Вимоги до електроприводу механізму приводу шпинделя обумовлені необхідністю забезпечення трьох основних режимів (пуску, усталеного руху, гальмування), а також допоміжних і налагоджувальних режимів для надійної та безперебійної роботи шпиндельного механізму.

Електропривод фрезерного верстату повинен задовольняти наступні технічні вимоги:

- необхідність забезпечення плавного пуску двигуна з обмеженим пусковим моментом;
- електропривод повинен мати можливість регулювати частоту обертання шпинделя фрезерного верстату при постійному моменті. Це дозволяє адаптувати швидкість до конкретного матеріалу і типу обробки, що забезпечує оптимальні умови різання;
- електропривод повинен забезпечувати високу точність переміщення і позиціонування шпинделя та робочого столу. Це необхідно для досягнення точності обробки і отримання якісних результатів;
- забезпечення жорсткої механічної характеристики, а саме електродвигун повинен бути надійним і стійким до тривалих робочих навантажень, вібрацій і змін температури. Він повинен мати високу міцність і довгий термін служби без збоїв;
- забезпечення заданого часу перехідного процесу $t_n = 0.5$ с.

До системи керування ставляться такі вимоги:

- дотримання мінімальних габаритних розмірів та маси;
- простота монтажу, налагодження, діагностики та технічного обслуговування;
- Система повинна мати механізми захисту, таких як: захист від струмових перевантажень, від перепадів напруги в колі керування та силовому колі, від неправильного чергування фаз, від перевищення швидкості і блокувань, таких

як: блокування від мимовільного пуску, включення приводу подачі при відключеному приводі головного руху.

Висновки до розділу

1. Розглянуто класифікацію металорізальних верстатів.
2. Представлено будову фрезерних верстатів та системи ЧПК.
3. Виділино основні вимоги до електроприводу головної подачі та до системи керування.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

2.1 Розрахунок потужності двигуна та його вибір

Для металооброблюючих механізмів розрахунок потужності використаного електродвигуна відбувається за наявності даних про матеріал заготовки та параметрів ріжучого інструменту, який приймає участь у обробці заготовки.

Розрахунок буде проводитися для фрезерного верстату TMM 700 Vario FDB Maschinen [5], параметри якого наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики TMM 700 Vario FDB Maschinenx [7]

Найменування параметру	TMM 700
1	2
Номінальна напруга, В	380
Номінальна частота струму, Гц	50
Вид струму	Змінний, трифазний
Клас безпеки	I клас
Параметри інструмента	
Максимальний діаметр торцевої фрези, мм	80
Максимальний діаметр кінцевої фрези, мм	25
Кінець шпинделя	
Конус шпинделя	Вертикальний: ISO 40; Горизонтальний: ISO 40;
Хід пінолі, мм	127
Фрезерна головка	
Поворот	360°

1	2
Нахил	$\pm 90^\circ$
Переміщення по осі Y, мм	350
Координатний стіл	
Розмір столу, мм	1250×320
Переміщення по осі X, мм	800
Переміщення по осі Y, мм	300
Переміщення по осі Z, мм	350
Максимальна навантаження на стіл, кг	350
Загальногабаритні розміри	
Довжина, мм	1730
Ширина, мм	1520
Висота, мм	2250
Вага станка нетто, кг	1650

За інструмент обробки була взята фрезерна головка ВАР 400R 80-27-6Т [6], параметри якої наведені в табл. 2.2



Рисунок 2.1 – Фрезерна головка ВАР 400R 80-27-6Т

Таблиця 2.2 – Параметри ріжучого інструмента

Параметри обробки	Значення
Максимальний діаметр торцевої фрези, мм	$D_{\phi} = 80$
Глибина фрезерування, мм	$t = 14$
Кількість зубів	$Z_{\phi} = 6$
Подача на зуб фрези, мм	$S_z = 0.2$
Ширина фрезерування, мм	$B = 16$

Тангенціальне зусилля різання, яке долає привод головного руху:

$$F_z = 9.81 \cdot C_{F_z} \cdot t^{X_{F_z}} \cdot S_z \cdot B^{U_F} \cdot Z_{\phi} \cdot D_{\phi}^{q_F} \cdot K_{ПЗ} = 9.81 \cdot 82.5 \cdot 14^1 \cdot 0.2 \cdot 16^{1.1} \cdot 6 \cdot 80^{-1.3} \cdot 1 = 963.7, \text{Н} \quad (2.1)$$

де t – глибина фрезерування, мм;

S_z – подача на зуб фрези, мм;

B – ширина фрезерування, мм;

Z_{ϕ} – число зубів фрези;

D_{ϕ} – діаметр фрези, мм;

$C_{F_z}, X_{F_z}, U_F, q_F$ - коефіцієнти та показники ступеня, які визначаються режимом різання;

$K_{ПЗ}$ – загальний поправочний коефіцієнт, прийmemo його як $K_{ПЗ} = 1$.

Таблиця 2.3 – Параметри режиму різання

Матеріал заготовки	Матеріал різального інструменту	Тип фрези	Коефіцієнти та показники ступеня				
			C_{F_z}	X_{F_z}	Y_{F_z}	U_F	q_F
Конструкційна сталь	Твердий сплав	Торцева	82.5	1.0	0.75	1.1	-1.3

Під швидкістю різання розуміється окружна швидкість на периферії фрези, розрахунок якої проводиться за формулою:

$$v = \frac{C_v \cdot D_\phi^q \cdot K_{ПВ}}{T^m S_Z^{Y_v} \cdot t^c \cdot B^K \cdot Z_\phi^n} = \frac{332 \cdot 80^{0.2}}{180^{0.2} \cdot 0.2^{0.4} \cdot 14^{0.1} \cdot 16^{0.2} \cdot 6^0} = 237.06, \text{ м / хв}, \quad (2.2)$$

де T – стійкість фрези, хв; ($T = 180$ хв.)

D_ϕ – діаметр фрези, мм;

S_Z – подача на зуб фрези, мм;

t – глибина фрезерування, мм;

B – ширина фрезерування, мм;

Z_ϕ – число зубів фрези;

C_v, q, m, Y_v, c, k, n - коефіцієнти та показники ступеня, які визначаються видом та режимом фрезерування;

$K_{ПВ}$ – загальний поправочний коефіцієнт, який прийmemo як $K_{ПВ} = 1$.

Таблиця 2.4 – Параметри фрезерування

Фреза	Матеріал ріжучої частини	Коефіцієнти і показники ступеню						
		C_v	q	m	Y_v	c	k	n
Торцева	T15	332	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0

Після розрахунку зусилля різання та швидкості різання ми можемо визначити потужність, яка витрачається приводом головного руху.

$$P_Z = \frac{F_Z v}{60} 10^{-3} = \frac{963.7 \cdot 237.06}{60} 10^{-3} = 3.8, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Для вибору електродвигуна, який задовольнить поставлені задачі необхідно врахувати вимоги до електроприводу, наведені в розд. 1, та умову $P_{ел} \geq P_Z$.

Проаналізувавши електродвигуни, що використовуються у фрезерних верстатах, та врахувавши всі вимоги, ми обираємо асинхронних двигун серії

АИР, який призначений для повторно-короткочасного режиму роботи АИРС100L4 [16].

Таблиця 2.5 – Паспортні дані двигуна АИРС100L4

Номінальна потужність	$P_{2n} = 4.25 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{\text{лн}} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.011$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.82$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.78$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.041$
Критичне ковзання	$s_k = 0.32$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{x_1}' = 0.081$
Активна опір статора	$\overline{R_1}' = 0.071$
Приведений активний опір розсіювання ротора	$\overline{x_2}'' = 0.14$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R_2}'' = 0.054$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu}' = 2.2$

2.2. Побудова навантажувальної діаграми

Для отримання навантажувальної діаграми електроприводу, необхідно розрахувати електромагнітний момент двигуна на кожному етапі роботи. Для цього врахуємо динамічний момент та момент холостого ходу.

Формула для динамічного моменту навантаження:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \varepsilon = 0.031 \cdot 390 = 12.1 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.4)$$

де J_{Σ} - сумарний момент інерції, ε – допустиме прискорення, $\varepsilon = 390 \text{ рад/с}^2$.

Для визначення сумарного моменту інерції використаємо формулу:

$$J_{\Sigma} = (1 + \delta) \cdot J_{\text{ед}} + \frac{J_{\text{шп}}}{i_p^2} = (1 + 0) \cdot 0.011 + \frac{0.02}{1} = 0.031 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (2.5)$$

де δ – коефіцієнт, що відповідає за момент інерції редуктора, з'єднувальної муфти, $\delta = 0$, Оскільки максимальна швидкість обертання шпинделя 1350 об/хв, співпадає з швидкістю обертання ротора електродвигуна, то використання редуктора не потрібне, тобто $i_p=1$; $J_{\text{шп}}$ - момент інерції шпинделя, $J_{\text{шп}} = 0.02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Величина моменту холостого ходу залежить від різних факторів і не залишається постійною при різних швидкостях. Однак, враховуючи, що його значення не перевищує 10-15% від номінального моменту двигуна, ми можемо розрахувати його за спрощеною формулою.

$$M_{\text{хх}} = 0.6 \frac{1 - \eta}{\eta} M_{\text{ед}} = 0.6 \frac{1 - 0.82}{0.82} 28.2 = 3.7 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.6)$$

Електромагнітний момент двигуна при фрезеруванні:

$$M_{\phi} = \frac{F_z \cdot d}{2 \cdot i_p \cdot \eta} = \frac{963.7 \cdot 0.08}{2 \cdot 1 \cdot 0.82} = 47 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.7)$$

Визначимо момент кожної ділянки роботи приводу:

1. Для пуску двигуна:

$$M_1 = M_{\text{хх}} + M_{\text{дин}} = 3.7 + 12.1 = 15.8 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.8)$$

2. Фрезерування заготовки:

$$M_2 = M_{\phi} = 47 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.9)$$

3. Гальмування приводу:

$$M_3 = -M_1 = -15.8 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.10)$$

За отриманими даними, побудуємо навантажувальну діаграму, що зображена на рис. 2.1.



Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма

2.3 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_0 = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад} / \text{с} . \quad (2.11)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_0}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ рад} / \text{с} . \quad (2.12)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.041) = 150.6 \text{ рад} / \text{с} . \quad (2.13)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2H}}{\omega_n} = \frac{4250}{150.6} = 28.2 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (2.14)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda M_n = 2.2 \cdot 28.2 = 62.07 \text{ Нм} . \quad (2.15)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_{1\phi n} = U_{1лн} / \sqrt{3} = 220 B, \quad (2.16)$$

$$I_{1\phi n} = \frac{P_{2н}}{3U_{1\phi n}\eta \cos(\phi)} = \frac{4.25 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.82 \cdot 0.78} = 10.1 A. \quad (2.17)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{на} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 B, \quad (2.18)$$

$$I_{на} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 10.1 = 14.28 A. \quad (2.19)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\psi_{xx} = \frac{\sqrt{2}U_{1\phi n}}{\omega_0} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{314} = 0.987 Bб. \quad (2.20)$$

2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 2.1, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 2.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

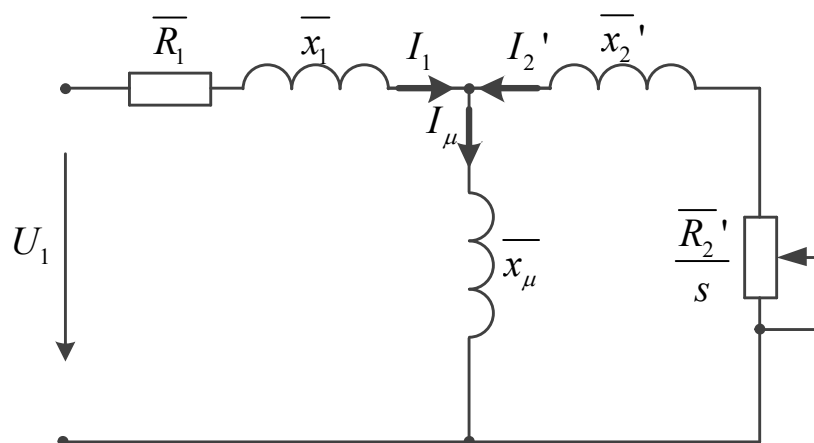


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення АД

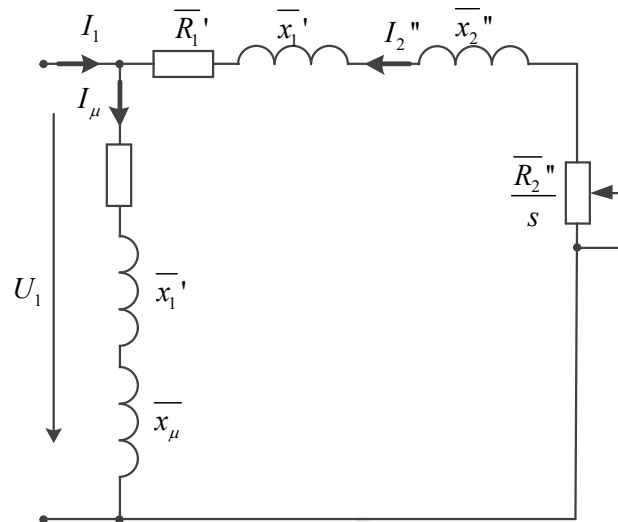


Рисунок 2.4 – Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною і Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\overline{x}_\mu + \sqrt{\overline{x}_\mu^2 + 4 \cdot \overline{x}_1' \cdot \overline{x}_\mu}}{2\overline{x}_\mu} = \frac{2.2 + \sqrt{2.2^2 + 4 \cdot 0.081 \cdot 2.2}}{2 \cdot 2.2} = 1.035. \quad (2.21)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{x}_1 = \frac{\overline{x}_1'}{c_1} = \frac{0.081}{1.035} = 0.078, \quad (2.22)$$

$$\overline{x}_2' = \frac{\overline{x}_2''}{c^2} = \frac{0.14}{(1.035)^2} = 0.13, \quad (2.23)$$

$$\overline{R}_1 = \frac{\overline{R}_1'}{c_1} = \frac{0.071}{1.035} = 0.0686, \quad (2.24)$$

$$\overline{R}_2' = \frac{\overline{R}_2''}{c^2} = \frac{0.054}{(1.035)^2} = 0.05. \quad (2.25)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться так:

$$x_1 = \overline{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.078 \cdot \frac{220}{10.1} = 1.69 \text{ Ом}, \quad (2.26)$$

$$R_1 = \overline{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0686 \cdot \frac{220}{10.1} = 1.49 \text{ Ом}, \quad (2.27)$$

$$x_2 = \overline{x_2}, \frac{U_n}{I_n} = 0.13 \cdot \frac{220}{10.1} = 2.837 \text{ Ом}, \quad (2.28)$$

$$R_2 = \overline{R_2}, \frac{U_n}{I_n} = 0.05 \cdot \frac{220}{10.1} = 1.09 \text{ Ом}, \quad (2.29)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 2.2 \cdot \frac{220}{10.1} = 47.809 \text{ Ом}. \quad (2.30)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{1.69}{314} = 0.0054 \text{ Гн}, \quad (2.31)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_0} = \frac{2.837}{314} = 0.009 \text{ Гн}. \quad (2.32)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{47.809}{314} = 0.152 \text{ Гн}. \quad (2.33)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.152 + 0.0054 = 0.1576 \text{ Гн}, \quad (2.34)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.152 + 0.009 = 0.161 \text{ Гн}. \quad (2.35)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{1.09}{0.161} = 6.788 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.36)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{1.49}{0.1576} = 9.45 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.37)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.157 \cdot \left(1 - \frac{0.152^2}{0.157 \cdot 0.161} \right) = 0.014 \text{ Гн}, \quad (2.38)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0.152}{0.161 \cdot 0.014} = 67.74 \frac{1}{\text{Гн}}, \quad (2.39)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{1.49}{0.014} + 6.788 \cdot 0.152 \cdot 67.74 = 176.893 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.40)$$

$$\mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.152}{0.161} = 1,416. \quad (2.41)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна АИРС100L4 зведені до табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри двигуна АИРС100L4

$P_{2H}, кВт$	4.25	$R_1, Ом$	1.49
$\omega_{xx}, рад / с$	157	$R_2, Ом$	1.09
$\omega_n, рад / с$	150.6	$L_m, Гн.$	0.152
$M_n, Нм$	28.2	$L_1, Гн$	0.157
$M_k, Нм$	62.07	$L_2, Гн$	0.161
λ	2.2	$\alpha, \frac{Ом}{Гн}$	6.788
$I_{1фн}, А$	10.1	$\alpha_1, \frac{Ом}{Гн}$	9.45
$\psi_{xx}, Вб$	0.987	$\sigma, Гн$	0.014
J_d	0.011	$\beta, \frac{1}{Гн}$	67.739
η	0.82	$\gamma, \frac{Ом}{Гн}$	176.893
$\cos \varphi$	0.78	μ_1	1.416

Висновки до розділу

1. Для точного обрахунку номінальної потужності електродвигуна, визначили параметри досліджуваного механізму та параметри процесу різання.
2. На основі отриманих параметрів процесу обробки здійснили вибір різального інструменту.
3. В результаті обрахунків та побудованої навантажувальної діаграми було здійснено вибір асинхронного двигуна, який може працювати в повторно-короткочасному режимі роботи, обраний двигун АИРС100L4.

3. Для використання даної моделі для отримання графіків перехідних процесів, було розраховано номінальні параметри двигуна, та параметри Т-подібної схеми заміщення.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ САК

3.1 Розробка функціональної схеми

Розглянувши технічні характеристики основних закордонних виробників сучасних перетворювачів частоти (ПЧ), таких як Alien Bradley, Siemens, ABB, Danfoss, Mitsubishi, Schneider Electric та ін., можна сформувати загальні вимоги, які ставляться кінцевим споживачем до сучасних асинхронних та синхронних електроприводів. Основні вимоги до рівнів напруги ПЧ:

- напруга і частота живлення:

- а) трифазна напруга ~ 380 В, 50 Гц;

- б) однофазна напруга ~ 220 В, 50 Гц;

- в) акумуляторне джерело живлення опціонально з підвищувальним DCDC перетворювачем $=24$ В, $=50$ В та кратні їм значення;

- вихідна частота перетворювачів частоти: $0 \dots 400$ Гц.

Алгоритми керування, які реалізуються перетворювачами:

- традиційне частотне (скалярне) керування з квадратичною та лінійною U/f характеристикою з можливістю ІR-компенсації і компенсації ковзання;

- частотне керування з ПІ-регулятором швидкості;

- векторне керування з датчиком швидкості;

- векторне бездатчикове керування.

У стандартній конфігурації електропривод повинен мати такі основні можливості інтерфейсу:

- 6 дискретних гальванічно-розв'язаних входів;

- 1 канал аналогового входу $0 \dots 10$ В;

- 1 канал аналогового входу $4 \dots 20$ мА;

- 1 канал аналогового виходу $0 \dots 10$ В;

- 2 виходи релейного типу;

- гальванічно розв'язані інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, CAN;

- вбудований ПД-регулятор технологічного параметра;
- внутрішній ключ клампера для низької потужності (до 15 кВт);
- можливість підключення фотоімпульсного датчика швидкості (енкодера);
- наявність джерел живлення +10 В та +24 В для зовнішніх підключень аналогових та дискретних сигналів.

Перетворювач частоти

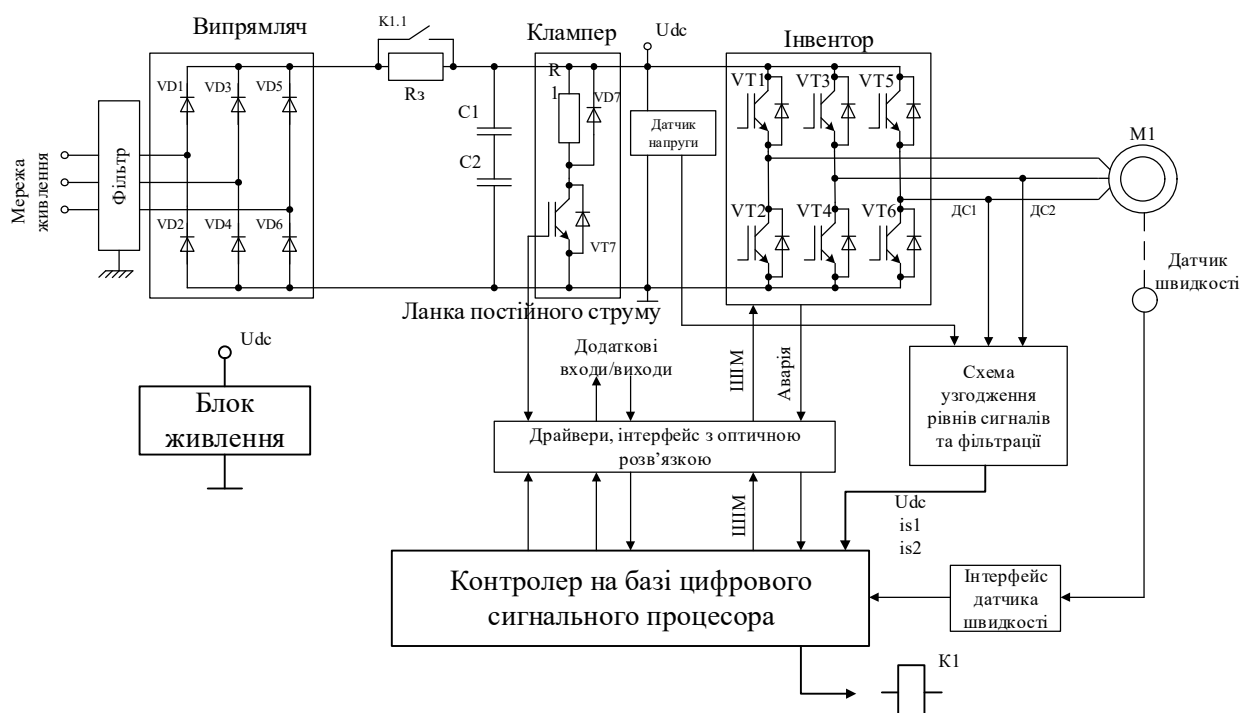


Рисунок 3.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу

Типову функціональну схему сучасного електроприводу змінного струму побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму показано на рис. 3.1. Її основу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний і керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу. З цієї причини досить часто перетворювачі частоти називають електроприводами, хоча в загальному випадку це не є коректним.

3.2 Розрахунок основних елементів силової частини

Для розрахунку основних елементів ПЧ необхідно мати значення: напруга і кількість фаз живлення, потужність, ККД і номінальний струм двигуна. Необхідні дані занесені в табл. 2.5.

Номінальні діючі і амплітудні значення фазної напруги і струму статора розраховано в (2.9)–(2.12): $U_n = 220 \text{ В}$, $U_{na} = 310 \text{ В}$, $I_n = 10.1 \text{ А}$, $I_{na} = 14.28 \text{ А}$.

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ovl} , яка, в загальному випадку, залежить від конкретного типу механізму і для обраного приводу орієнтовно дорівнює $k_{ovl} = 2,5$.

Максимальний струм на виході інвертора дорівнює

$$I_{\max} = k_{ovl} I_{na} = 2.5 \cdot 14.28 = 35.7 \text{ А} . \quad (3.1)$$

Максимальна напруга ланки постійного струму сучасних ПЧ визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, та складає приблизно: $U_{dc\max} = 750 \text{ В}$ – для ПЧ з трифазним живленням.

При виборі IGBT для автономного інвертора напруги їх максимально допустима напруга «колектор-емітер» має бути щонайменше в 1.5 рази вищою, ніж максимальна напруга ланки постійного струму, тобто

$$U_{ce} = 1.5 U_{dc\max} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В} . \quad (3.2)$$

Вибір IGBT буде здійснюватися за критеріями

$$\begin{aligned} I_c &> I_{\max} = 35.7 \text{ А}, \\ U_{ce} &> U_{ce\max} = 1125 \text{ В}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де I_c та $U_{ce\max}$ – тривалий струм колектору та напруга «колектор-емітер», які вказані в паспортних даних IGBT.

Вибираємо модуль типу SK50DGDL12T7ETE2 [8], який включає в себе IGBT-модуль з номінальними параметрами напруги «колектор-емітер» $U_{ce} = 1200 \text{ В}$ і струму колектора $I_c = 50 \text{ А}$. Даний пристрій в своєму складі має випрямляч та клампер.

Розрахуємо еквівалентний струм, який споживається з ланки постійного струму з врахуванням коефіцієнту перевантаження

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{2.5 \cdot 4250}{540 \cdot 0.82 \cdot 0.96} = 25 \text{ А}, \quad (3.4)$$

де $\eta_{inv} = 0.96$ - коефіцієнт корисної дії інвертора.

Еквівалентний опір навантаження розраховуємо як

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{25} = 21.6 \text{ Ом} \quad (3.5)$$

Ємність ланки постійного струму визначається за формулою

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 21.6} = 1.23 \text{ мФ}, \quad (3.6)$$

де $k_p = 0.04$ – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі.

Обираємо два конденсатори ЕСАР-GT-3300mkf - 400v [9] ємністю $C_c = 3300$ мкФ і максимальною напругою $U_c = 400$ В. Потрібна максимальна робоча напруга ланки постійного струму $U_{dcmax} = 750$ В досягається послідовним включенням двох конденсаторів, тобто $U_{12} = 2 \cdot U_c = 2 \cdot 400 = 800$ В, $C_{12} = C_c / 2 = 3300/2 = 1650$ мкФ = 1.65 мФ.

Вибір датчиків струму здійснюється за максимальним амплітудним значенням струму двигуна, який необхідно вимірювати (3.1). Обрано 2 давачі струму АСНС-7124, діапазон вимірювання з -40 до 40 А [10].

В конструкцію клампера входять: резистор, зворотній діод та напівпровідниковий ключ, що підключає резистор паралельно в ланку постійного струму для розсіювання енергії в режимі гальмування двигуна.

У випадку, коли вся активна потужність рекуперується в ланку постійного струму, тоді струм, що протікатиме через клампер дорівнюватиме:

$$I_{br} = \frac{P_n}{U_{dcn}} = \frac{4250}{540} = 7.87 \text{ А}, \quad (3.7)$$

що менше за значення $I_c = 50$ А, на яке спроектовано IGBT-модуль, тому обирати кламперний ключ не є потрібним.

Середня потужність за робочий цикл електроприводу, яку необхідно розсіювати на резисторі клампера, дорівнює:

$$P_{cp} = 0.25P_n = 0.25 \cdot 4250 = 1062.5 \text{ Вт}. \quad (3.8)$$

Мінімальний потрібний опір кламперного резистора розраховується наступним чином:

$$R = \frac{P_{cp}}{I_{br}^2} = \frac{1062.5}{7.87^2} = 17.15 \text{ Ом}. \quad (3.9)$$

Обираємо силовий резистор BR1K0W020 [11] з параметрами $P = 1 \text{ кВт}$, $R = 20 \text{ Ом}$.

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25 P/SP5 [12] з номінальною напругою вимірювання до 1500 В, схема підключення якого показана на рис. 3.2.

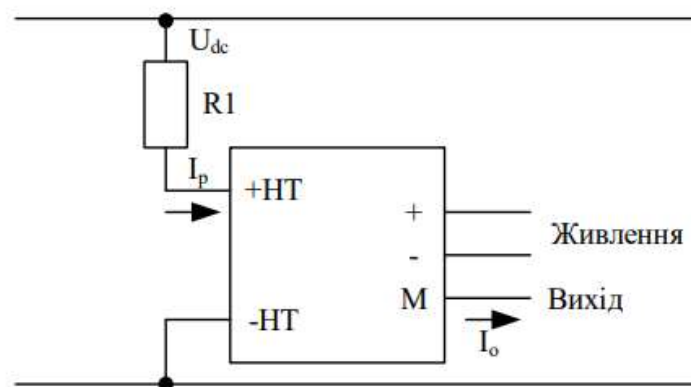


Рисунок 3.2 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що номінальний струм первинного кола $I_{pmax} = 14 \text{ мА}$, тому значення опору резистора $R1$ дорівнює:

$$R1 = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = \frac{750}{0.014} = 53.6 \text{ кОм}. \quad (3.10)$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R1 = 53.6 \text{ кОм}$ RN73C2A53K6BTDF [13].

За варіантом для асинхронного приводу, обираємо енкодер E6B2-CWZ6C 2000 P / R [14], напруга живлення 24 В, максимальна швидкість обертання 2000 об/хв.

Висновки до розділу

1. Виділені основні вимоги до асинхронного електроприводу.
2. Для кращої реалізації системи керування асинхронним двигуном було обрано систему ПЧ-АД.
 2. Розроблено функціональну схему, що включає перетворювач частоти, мікроконтролер та досліджуваний двигун.
3. На основі розробленої схеми було обраховано параметри основних елементів силової частини.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ

4.1 Базові принципи проектування алгоритму векторного керування

Для моделювання систем керування АД використовується математична модель, що записується через вектори струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат (a-b):

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, M = \mu_1(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \psi_{2b}\omega + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \psi_{2a}\omega + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \psi_{2b}\omega + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} - p_n \psi_{2a}\omega + \alpha L_m i_{1b} \end{aligned} \quad (4.1)$$

де ω – кутова швидкість, J – момент інерції двигуна, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження на валу двигуна, θ – кут повороту валу двигуна, v – коефіцієнт в'язкого тертя, $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора. Коефіцієнти, які враховують параметри двигуна; визначені в наступний спосіб

$$\sigma = L_1(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}), \beta = \frac{L_m^2}{L_1 \sigma}, \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}, \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta,$$

де R_1 і R_2 – активні опори обмоток статора і ротора, L_1 і L_2 – індуктивні опори обмоток статора і ротора, L_m – індуктивний опір взаємодії обмоток статора і ротора, p_n – число пар полюсів.

Алгоритм векторного керування АД, як правило, проектується та записується в синхронній системі координат (d-q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , що продемонстровано на рис.2.1

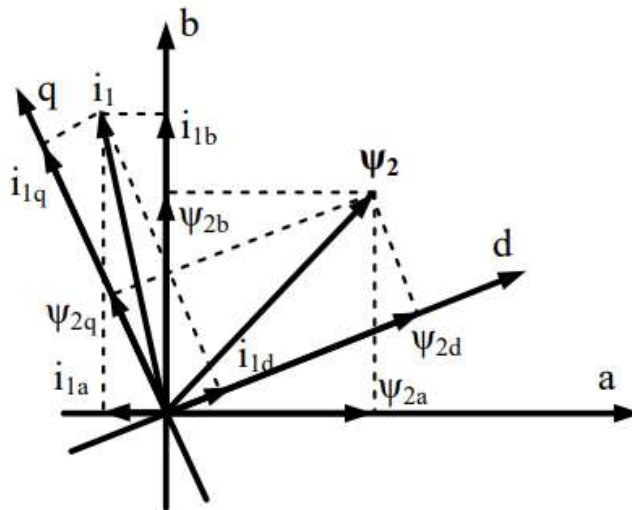


Рисунок 4.1 – Розташування вектрів АД

Перетворення координат визначається як:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= e^{-j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab}, \\ \mathbf{x}_{ab} &= e^{j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, e^{j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

де $\mathbf{x}_{dq}$ та $\mathbf{x}_{ab}$ позначають двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b), оператори $e^{-j\varepsilon_0}$ та $e^{j\varepsilon_0}$ забезпечують координатні перетворення векторів з системи координат, що обертається в стаціонарну.

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формується наступним чином. Припустимо, що для моделі АД, заданої (2.1), виконується наступне:

А.1. Струми статора і кутова швидкість ротора доступні для вимірювання.

А.2. Параметри АД відомі і незмінні.

А.3. Момент навантаження M_c невідомий, постійний та обмежений.

А.4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* та потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого та непрямого векторного керування які забезпечують

О1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості та потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \psi = 0. \quad (4.3)$$

При умові обмеженості всіх внутрішніх змінних. $\omega = \omega - \omega^*$ - похибка відпрацювання кутового положення, $\psi = \psi - \psi^*$ - похибка відпрацювання потокозчеплення.

О2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d = 0. \quad (4.4)$$

О3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

О4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними і електромагнітними координатами АД.

Синтез алгоритмів векторного керування, враховуючи вимірюваний вихід, здійснюється у два етапи. Спочатку проводиться синтез підсистеми керування потокозчепленням, а потім - підсистеми керування швидкістю. Обидві підсистеми розробляються з використанням методу зворотного проектування.

4.2 Розробка алгоритму прямого векторного керування

Алгоритм прямого векторного керування швидкістю АД з використанням замкненого спостерігача магнітного потоку пониженого порядку, який представлений на структурній схемі на рис. 2.2, включає в себе наступні елементи:

- спостерігач магнітного потоку АД

$$\begin{aligned} |\dot{\Psi}_2| &= -\alpha |\hat{\Psi}_2| + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\Psi}_2 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_d}{|\hat{\Psi}_2|}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $|\hat{\Psi}_2|$ - оцінене значення потокозчеплення ротора. ω_0 – синхронна швидкість поля АД.

- регулятор потоку

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \Psi^* + \dot{\Psi}^* - k_\Psi \dot{\Psi} - x_\Psi), \\ \dot{\Psi} &= k_\Psi \dot{\Psi} \end{aligned} \quad (4.6)$$

де $\dot{\Psi} = |\hat{\Psi}_2| - \Psi^*$ - похибка відпрацювання оціненого значення потокозчеплення.

-регулятор струму по осі(d)

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_d - \alpha \beta |\hat{\Psi}_2| + \dot{I}_d - k_i \dot{I}_d - x_d), \\ \dot{I}_d &= k_{ii} \dot{I}_d^0, \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\dot{I}_d = \frac{1}{\alpha L_m} \{ \alpha \dot{\Psi}^* + \dot{\Psi}^* - k_\Psi [-(\alpha + k_\Psi) \dot{\Psi} + \alpha L_m \dot{I}_d^0 - x_\Psi] - \dot{x}_\Psi \}, \quad (4.8)$$

де $\dot{I}_d^0 = i_d - i_d^*$ - похибка відпрацювання струму по осі(d).

-регулятор швидкості

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\mu \Psi^*} (-k_\omega \dot{\omega} + \dot{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^*), \\ \dot{M}_c &= -k_{\omega i} \dot{\omega} \end{aligned} \quad (4.9)$$

-модифікатор регулятора струму по осі(q)

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma [\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \Psi^* + \dot{I}_{q1} - k_{iq} \dot{I}_q^0 - \frac{1}{\Psi^*} (\dot{\Psi}^* \dot{I}_q^0 + \zeta)], \\ \zeta &= k_{\eta i} (\Psi^* \dot{I}_q^0), \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\dot{I}_{q1} = \frac{1}{\mu \Psi^*} [-k_\omega (-k_\omega \dot{\omega} + \mu \Psi^* \dot{I}_q^0) + \dot{M}_c + v \dot{\omega}^* + \dot{\omega}^*] - \frac{\dot{\Psi}^*}{\Psi^*} i_q^*, \quad (4.11)$$

де $\dot{I}_q^0 = i_q - i_q^*$ - похибка відпрацювання струму по осі(q).

Реальні напруги, що прикладають до обмоток статора, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

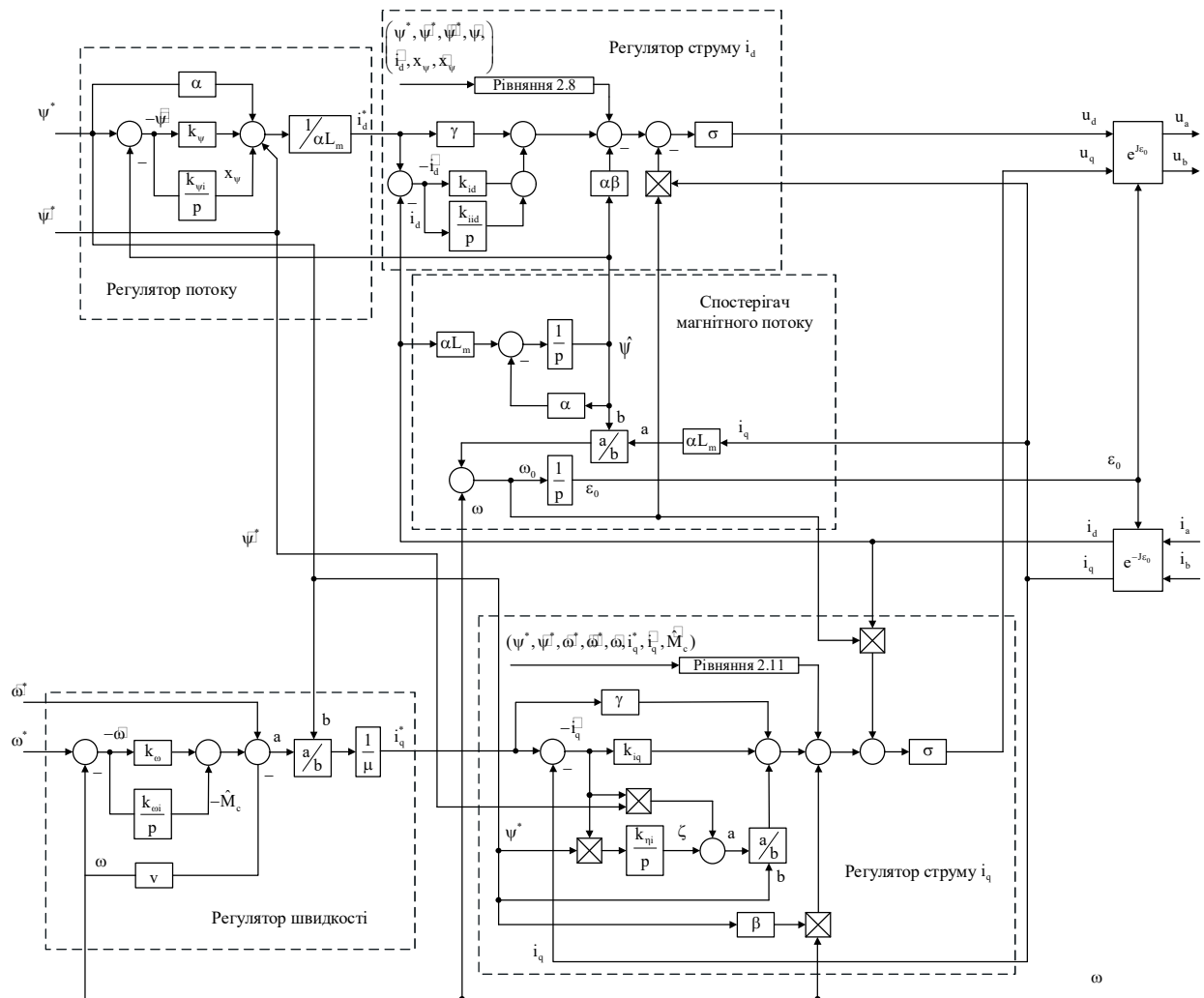


Рисунок 4.2 - Структурна схема алгоритму прямого векторного керування

Висновки до розділу

1. Наведено основні поняття проектування алгоритму прямого векторного керування.
2. Наведено рівняння спостерігача магнітного потоку, регулятора швидкості, потокозчеплення та струму.
3. На основі отриманих рівнянь була створена структурна схема, на якій показано реалізацію регуляторів, сигнали, що є вхідними і вихідними для регуляторів, загальні вхідні та вихідні сигнали, функціональні блоки перетворення координат із стаціонарної системи до синхронної.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ САК

5.1 Створення моделюючої програми

Для дослідження обраного двигуна та алгоритму керування проведемо моделювання системи автоматичного керування за допомогою програмного середовища MatLab/Simulink.

Модель асинхронного двигуна, записана в системі координат (a-b), рівня 4.1, представлена на рис.5.1 – 5.5

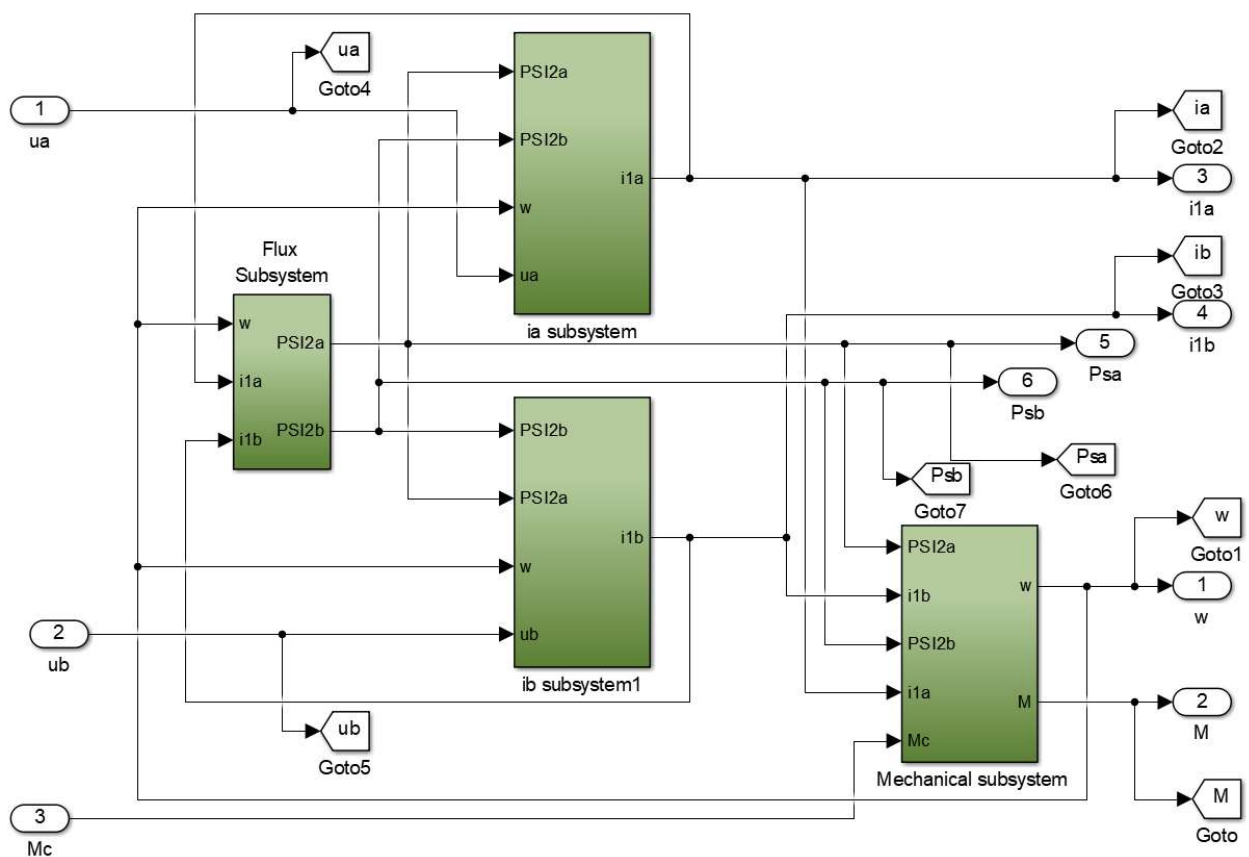


Рисунок 5.1 – Модель АД

Представлена модель складається з чотирьох частин: механічна підсистема (Mechanical subsystem), підсистема потокозчеплення (Flux subsystem), підсистема струму по осі a та b (ia subsystem, ib subsystem).

Вхідними сигналами для блоку механічної частини є складові вектора потокозчеплення PSI2a, PSI2b, складові вектора струму i1a, i1b та статичний

момент M_c . Вихідними сигналами є динамічний момент M та задана кутова швидкість w .

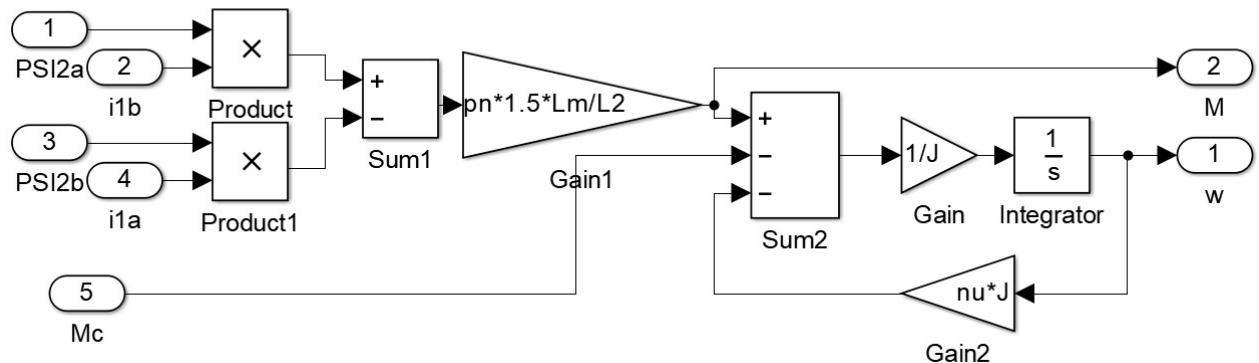


Рисунок 5.2 – Механічна підсистема

Вхідними сигналами блоку Flux subsystem є кутова швидкість w , складові вектора струму статора $i1a$, $i1b$. Вихідними сигналами є складові вектора потокозчеплення $PSI2a$, $PSI2b$.

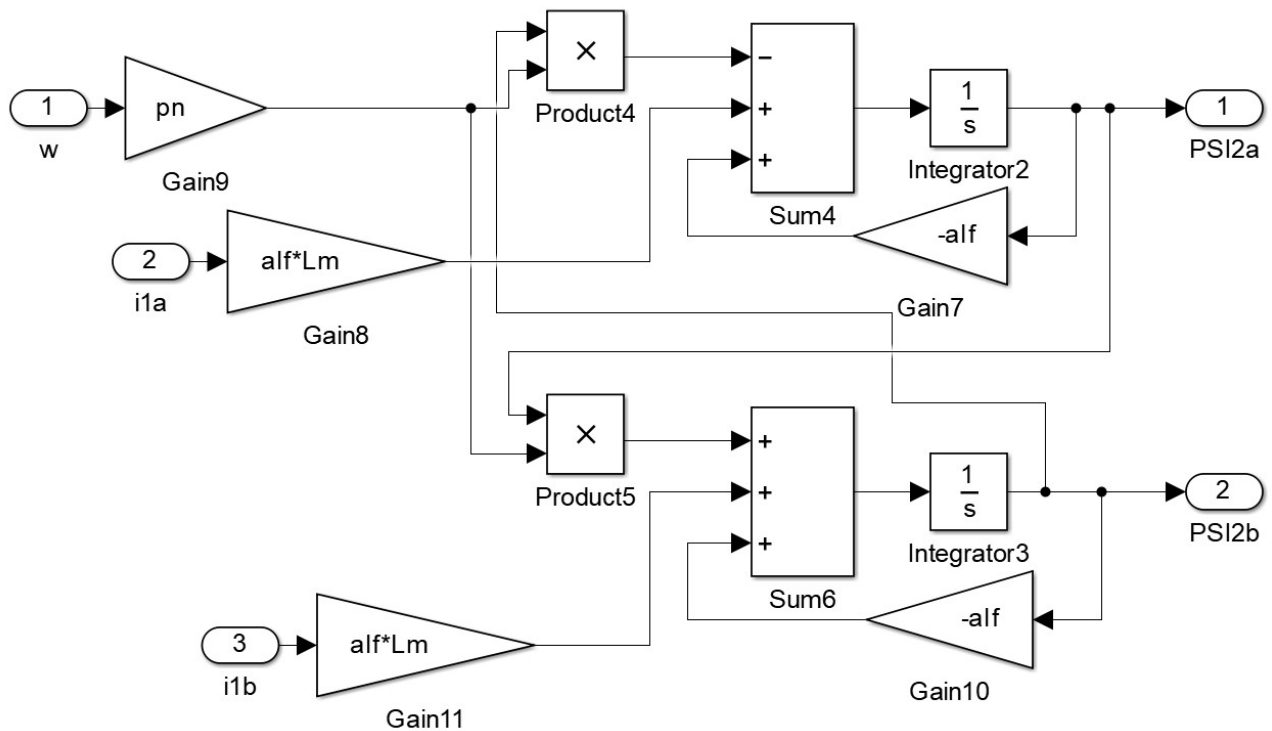


Рисунок 5.3 – Підсистема потокозчеплення

Вхідними сигналами блоку *ia subsystem* є складові вектора потокозчеплення PSI2a , PSI2b , швидкість w та компонента напруги u_a . Вихідним сигналом є компонента струму i_a .

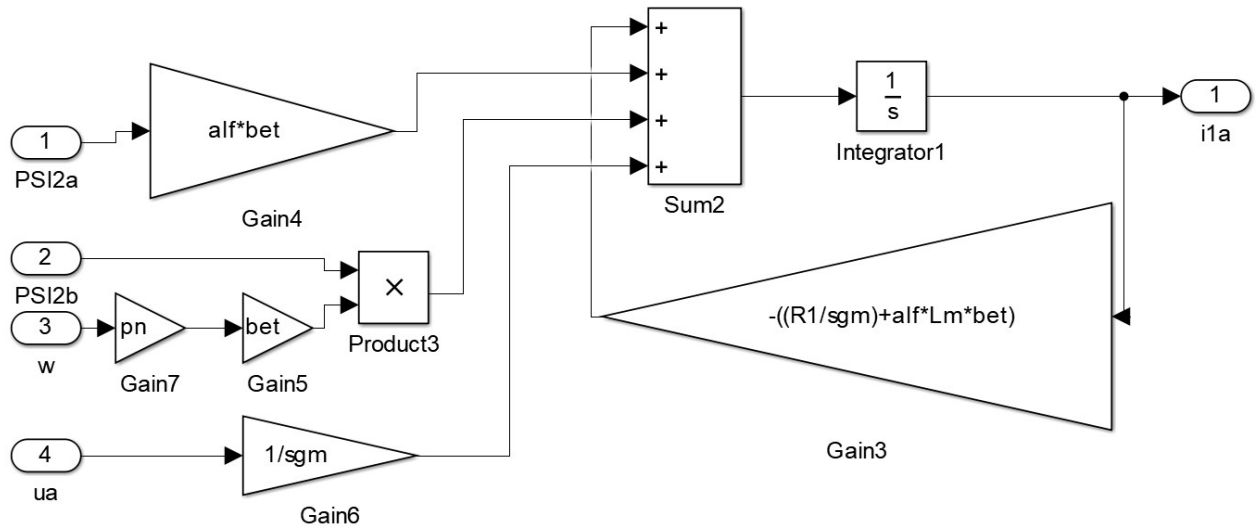


Рисунок 5.4 – Підсистема струму i_a

Вхідними сигналами блоку *ib subsystem* є складові вектора потокозчеплення PSI2a , PSI2b , швидкість w та компонента напруги u_b . Вихідним сигналом є компонента струму i_b .

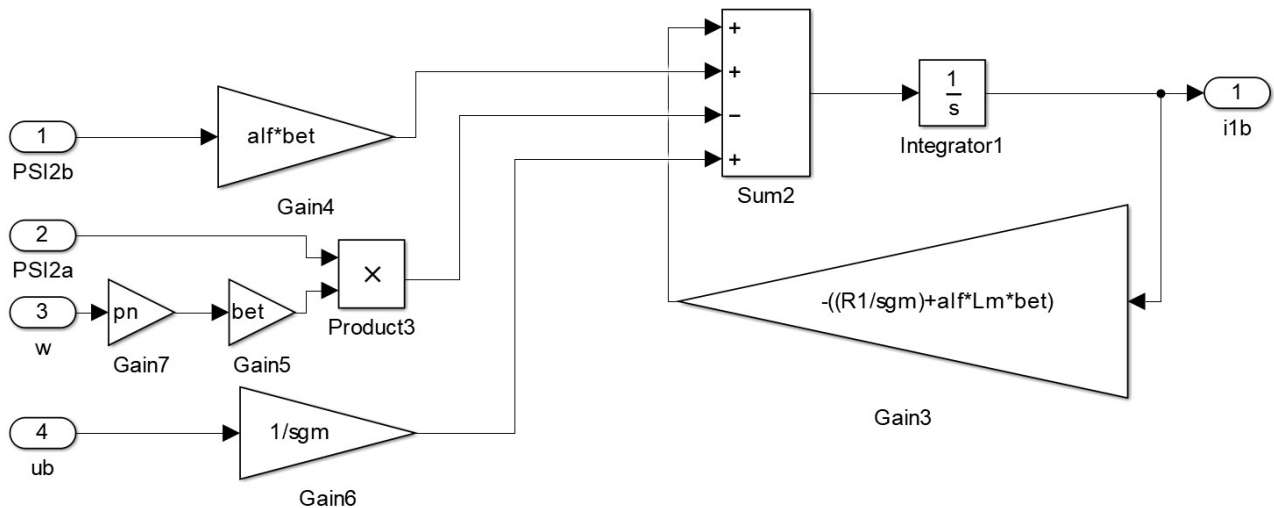


Рисунок 5.5 - Підсистема струму i_b

Алгоритм прямого векторного керування представлений на рис. 5.6 – 5.10. Модель реалізована за наведеними рівняннями 4.5 – 4.11.

На рис. 5.6 показана система зовнішніх зв'язків блоку Control block, де вхідні сигнали задане значення потокозчеплення ротора P_{sr} , перша його похідна dP_{sr} , та друга похідна ddP_{sr} , реальне значення кутової швидкості w , задане значення кутової швидкості w_r , перша dw_r та друга ddw_r похідні також синхронна швидкість обертання поля АД w_0 та компоненти вектора струму i_d та i_q . Вихідними сигналами є компоненти вектора напруги u_d та u_q .

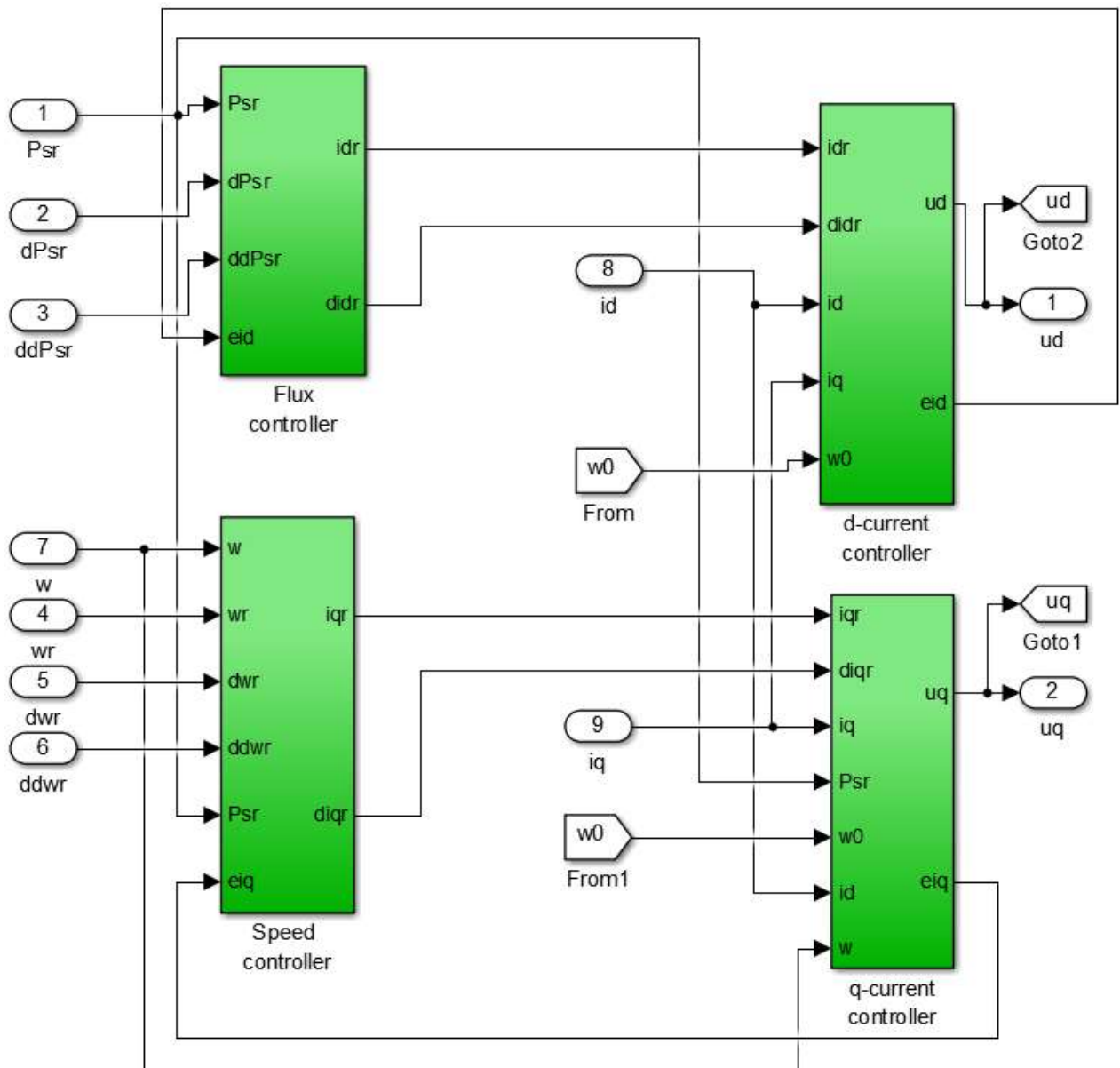


Рисунок 5.6 – З'єднання підсистем блоку прямого векторного керування

В блоці Flux controller рис. 5.7 показано утворення значення компоненти струму idr , та її похідної $didr$. Оскільки при прямому полеорієнтуванні системи струм idr залежить від потокозчеплення, то вхідними сигналами є задане

значення потокозчеплення, перша та друга його похідні, та похибка вимірювання струму e_{id} .

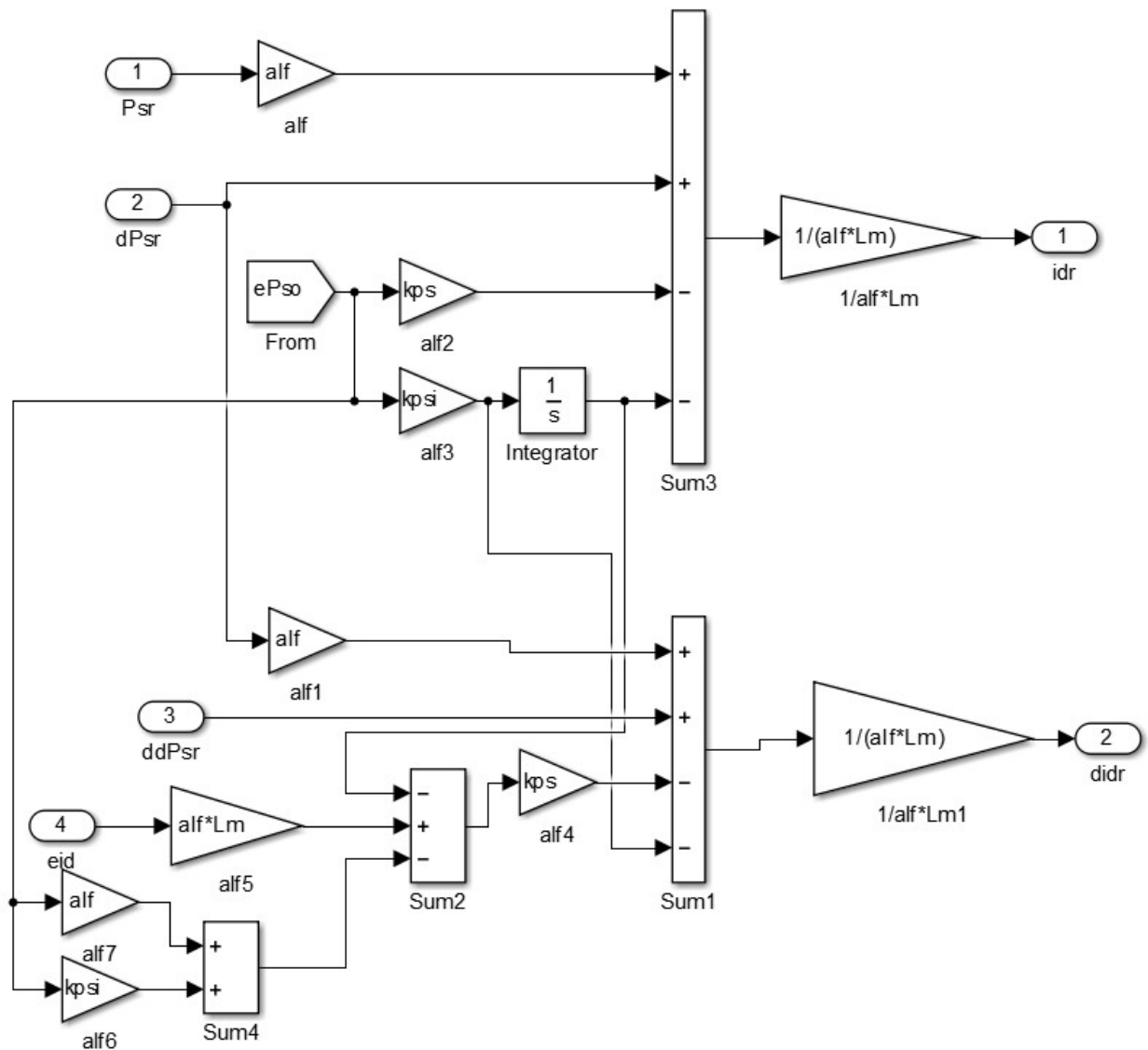


Рисунок 5.7 – Регулятор потоку

В блоці Speed controller рис. 5.8 показано утворення компоненти струму i_{qr} , та її похідної di_{qr} . Вхідними сигналами є реальна та задана кутова швидкість w та w_r , потокозчеплення P_{sr} та похибка вимірювання струму e_{iq} .

Блок d-current controller рис. 5.9 слугує для утворення компоненти u_d вектора напруги в системі координат (d-q).

Блок q-current controller рис. 5.10 слугує для утворення компоненти u_q вектора напруги в системі координат (d-q).

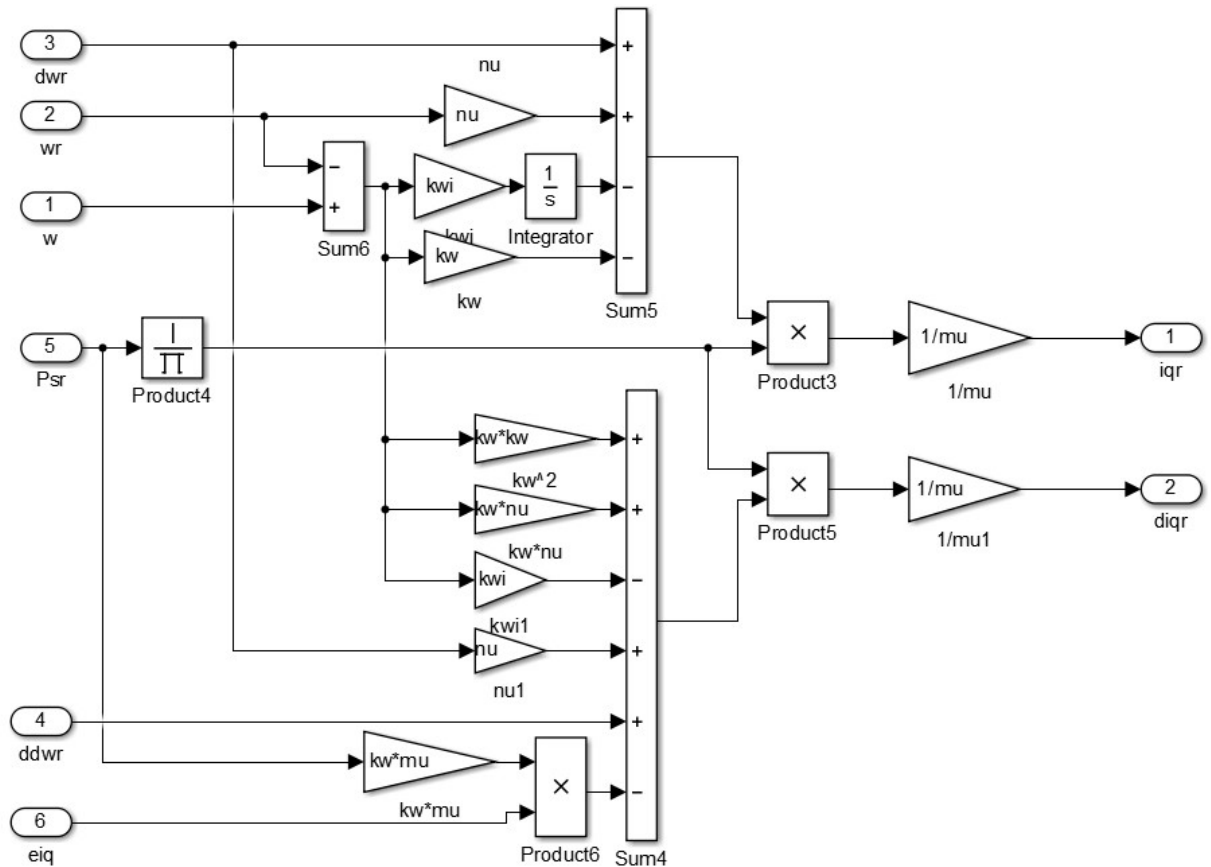


Рисунок 5.8 – Регулятор швидкості

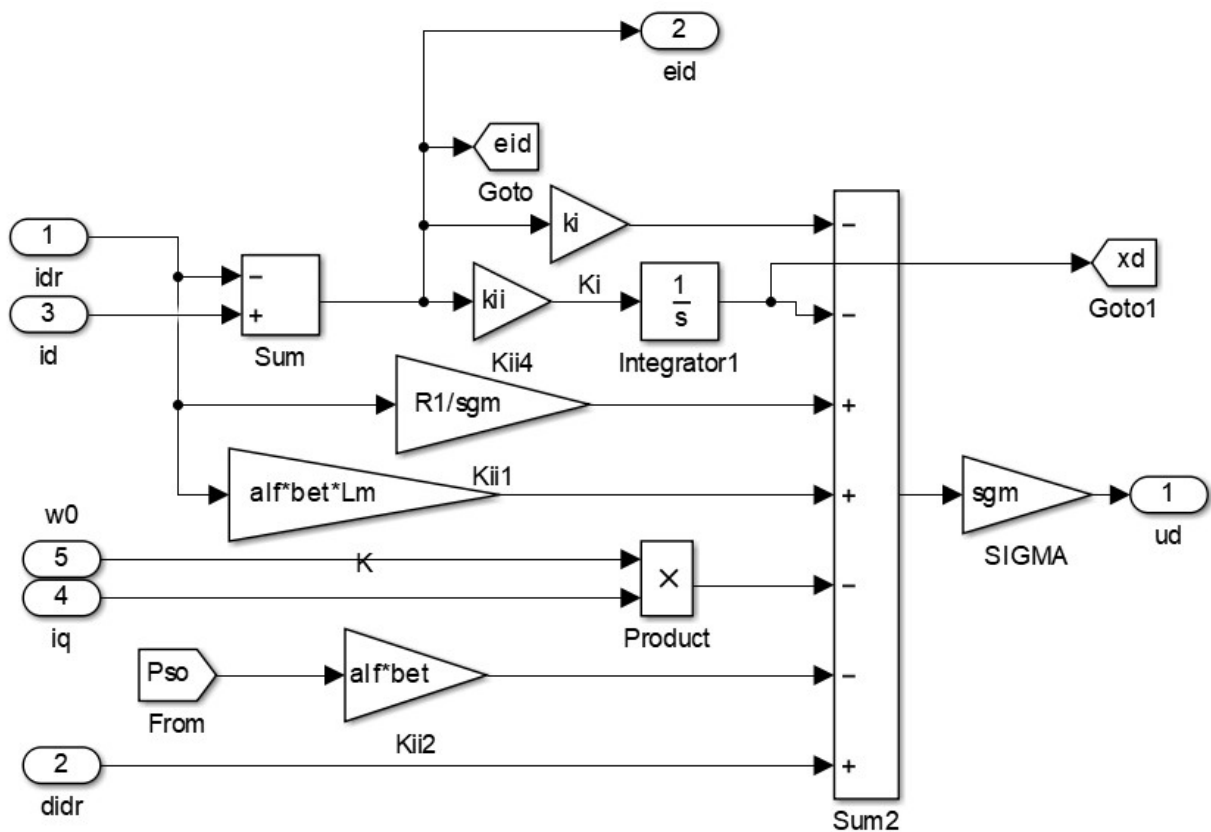


Рисунок 5.9 – Регулятор струму по осі d

Для детального дослідження алгоритму керування асинхронного двигуна необхідно отримати значення активної потужності, механічної потужності, та коефіцієнту корисної дії (ККД), що зображено на рис. 5.12.

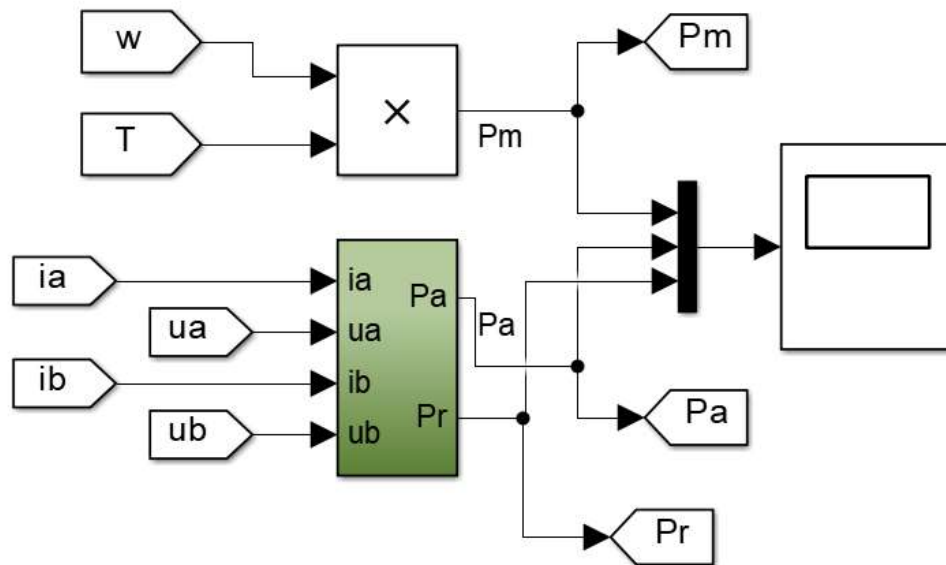


Рисунок 5.12 – Модель для обрахунку активної, реактивної та механічної потужностей

Схема, представлена на рис. 5.13, реалізує обрахунок значення модуля напруги та струму статора, за допомогою блоку що реалізує математичну функцію $\sqrt{a^2 + b^2}$.

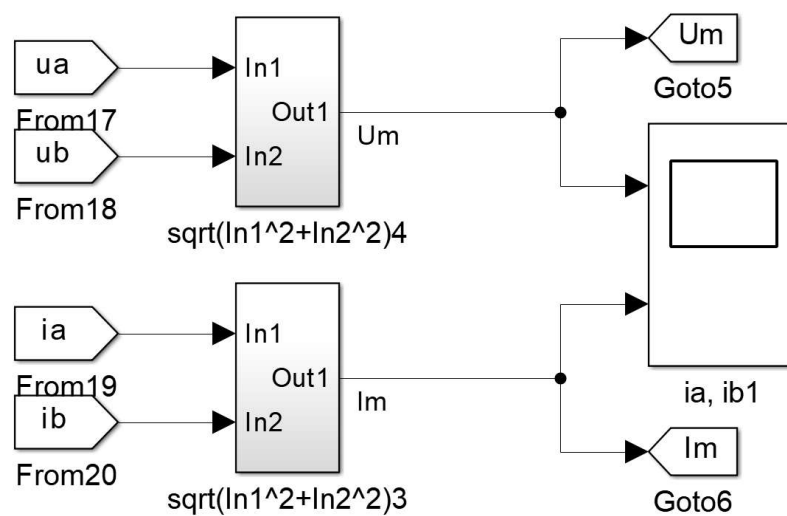


Рисунок 5.13 – Модель для обрахунку модулів за струмом та напругою

З'єднуючи всі функціональні блоки, ми отримали загальну модель для дослідження алгоритму векторного керування асинхронним двигуном змінного струму, представлену на рис. 5.14. Для отримання графіків перехідних процесів були використані блоки Scope.

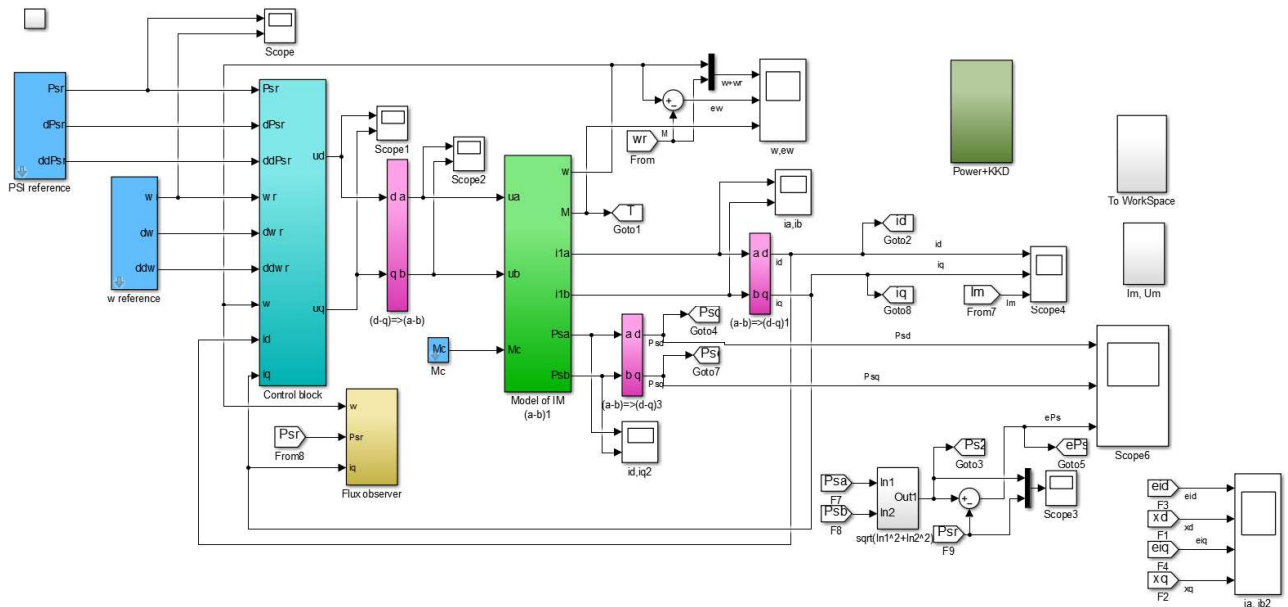


Рисунок 5.14 – Загальний вигляд моделюючої програми

5.2 Результати моделювання

Для дослідження динамічних процесів системи використаємо, складену програму в розд. 5.1. Дослідження буде проводитися по навантажувальній діаграмі, складеній в розд. 2. Для якісного дослідження системи, будемо будувати графіки перехідних процесів для статичних та динамічних режимів.

Значення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складової регуляторів, були визначені експериментально, дивлячись на графіки перехідних процесів .

Таблиця 5.1 – Використані параметри при моделюванні

Параметр	Значення
Коефіцієнт в'язкого тертя	$\nu = 0$
Пропорційний коефіцієнт регулятора кутової швидкості	$k_w = 250$
Інтегральний коефіцієнт регулятора кутової швидкості	$k_{wi} = k_w^2/2$
Пропорційний коефіцієнт регулятора струму	$k_i = 700$
Інтегральний коефіцієнт регулятора струму	$k_{ii} = k_i^2/2$
Пропорційний коефіцієнт регулятора потокозчеплення	$k_{ps} = 50$
Інтегральний коефіцієнт регулятора потокозчеплення	$k_{psi} = k_{ps}^2/4$

При моделюванні отримали графіки перехідних процесів, що показані на рис. 5.15 – 5.19.

Як бачимо, рис. 5.15, траєкторія кутової швидкості повністю відтворює задану траєкторію швидкості, що вказує на коректне виконання алгоритму керування. Невеликі відхилення зумовлені накиданням статичного моменту, але за рахунок дії регуляторів різних типів, траєкторія повертається до початкового виконання.

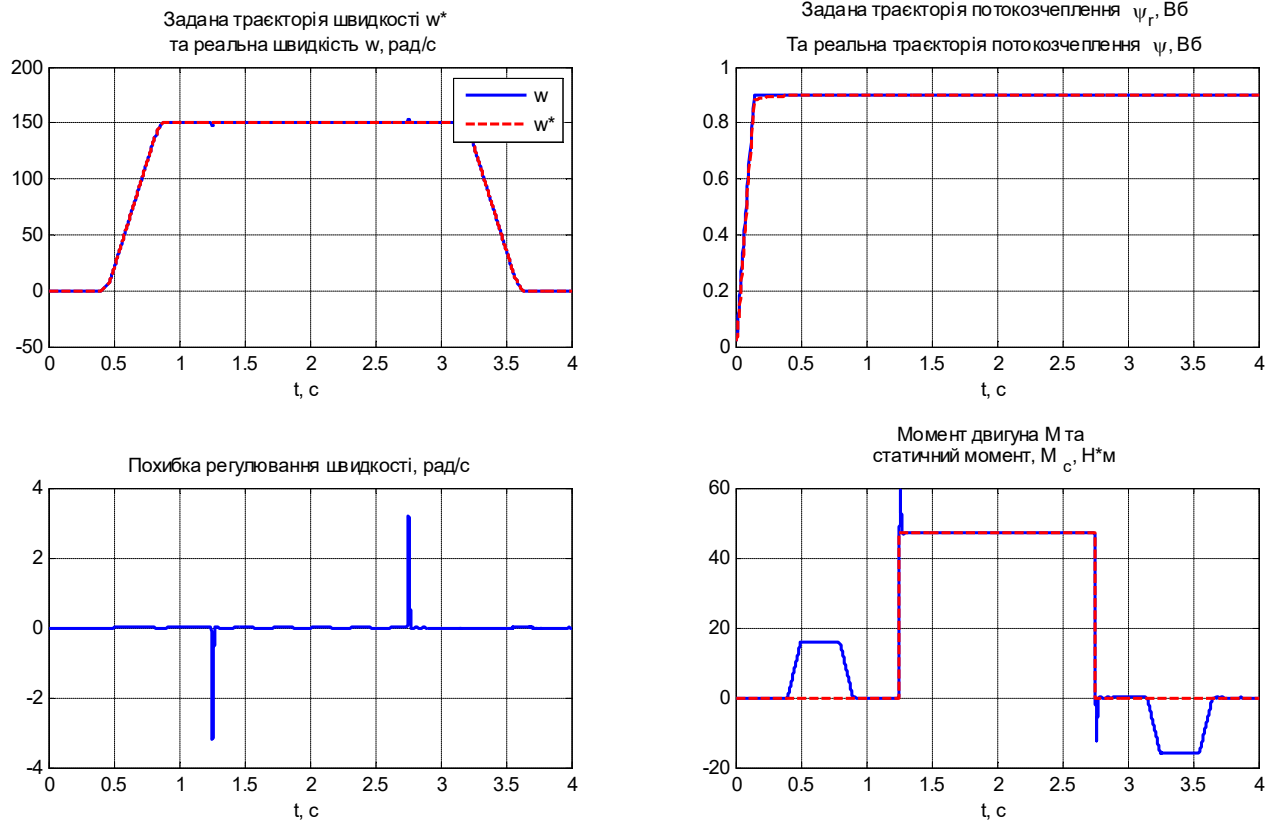


Рисунок 5.15 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості та потокозчеплення

На рис.5.16 показані графіки перехідного процесу по струму. На даних графіках добре видно дію блоку перетворення системи координат з стаціонарної системи (a-b) в синхронну (d-q). Графік моменту рис.5.15 повністю повторює графік струму i_q , оскільки момент прямо пропорційно залежить від струму i_q .

Аналогічно рис. 5.17, видно дію блоку перетворення координат із синхронної (d-q) в стаціонарну (a-b). Напруги u_d та u_q є керуючою дією системи.

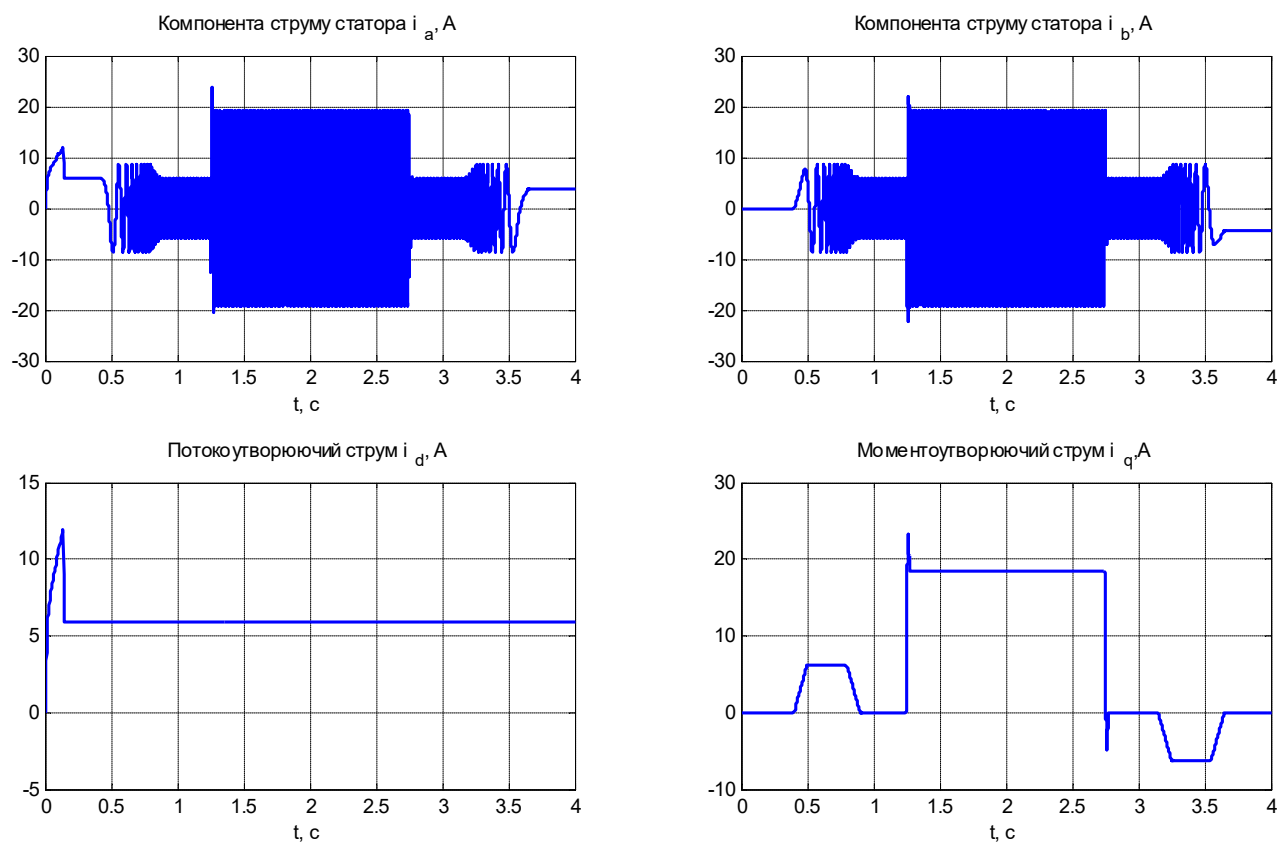


Рисунок 5.16 – Графіки перехідних процесів різних компонент струму

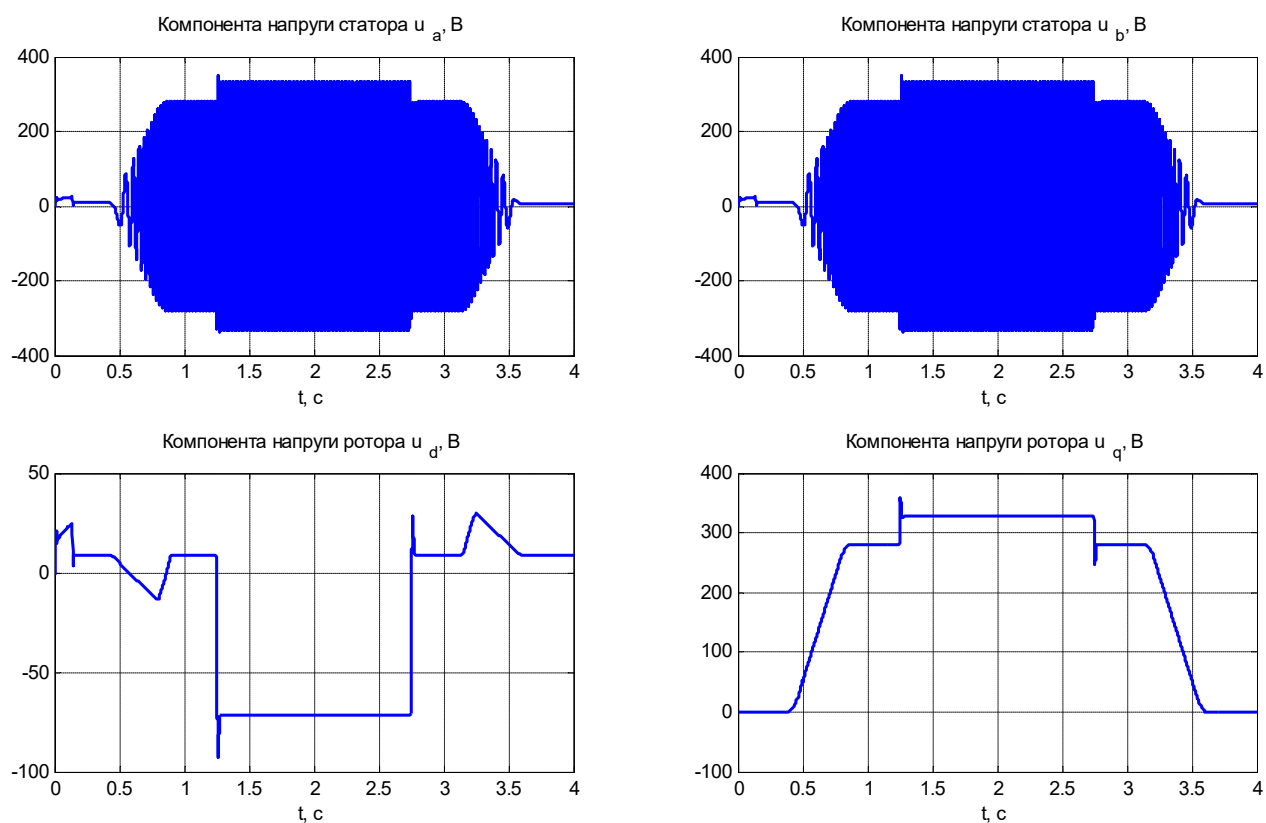


Рисунок 5.17 – Графіки перехідних процесів різних компонент напруги

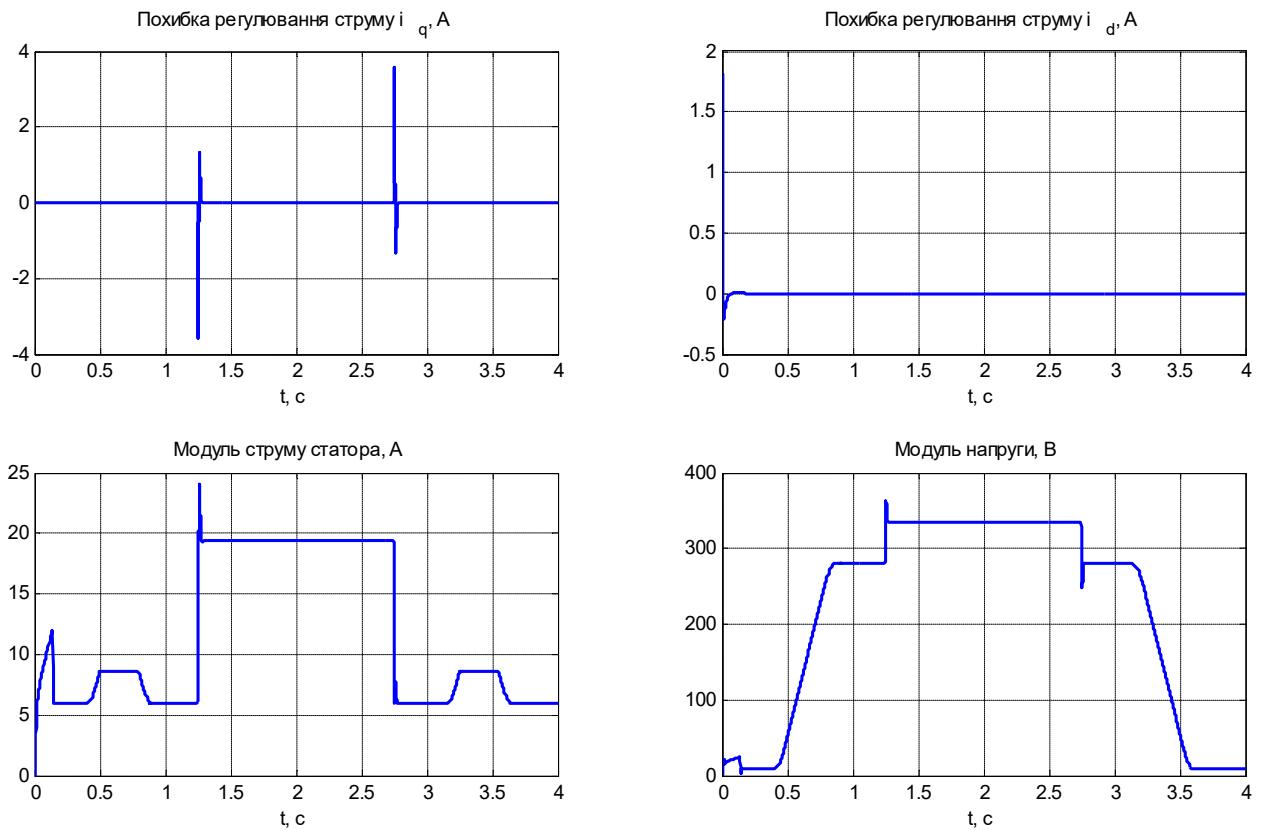


Рисунок 5.18 – Графіки перехідних процесів похибок регулювання струмів ротора та модулі струму та напруги

Оскільки похибки регулювання струму по осям d і q нульові, то обраний алгоритм керування повністю відпрацьовує задану траєкторію. Можна зробити висновок, що алгоритм прямого векторного керування реалізований вірно.

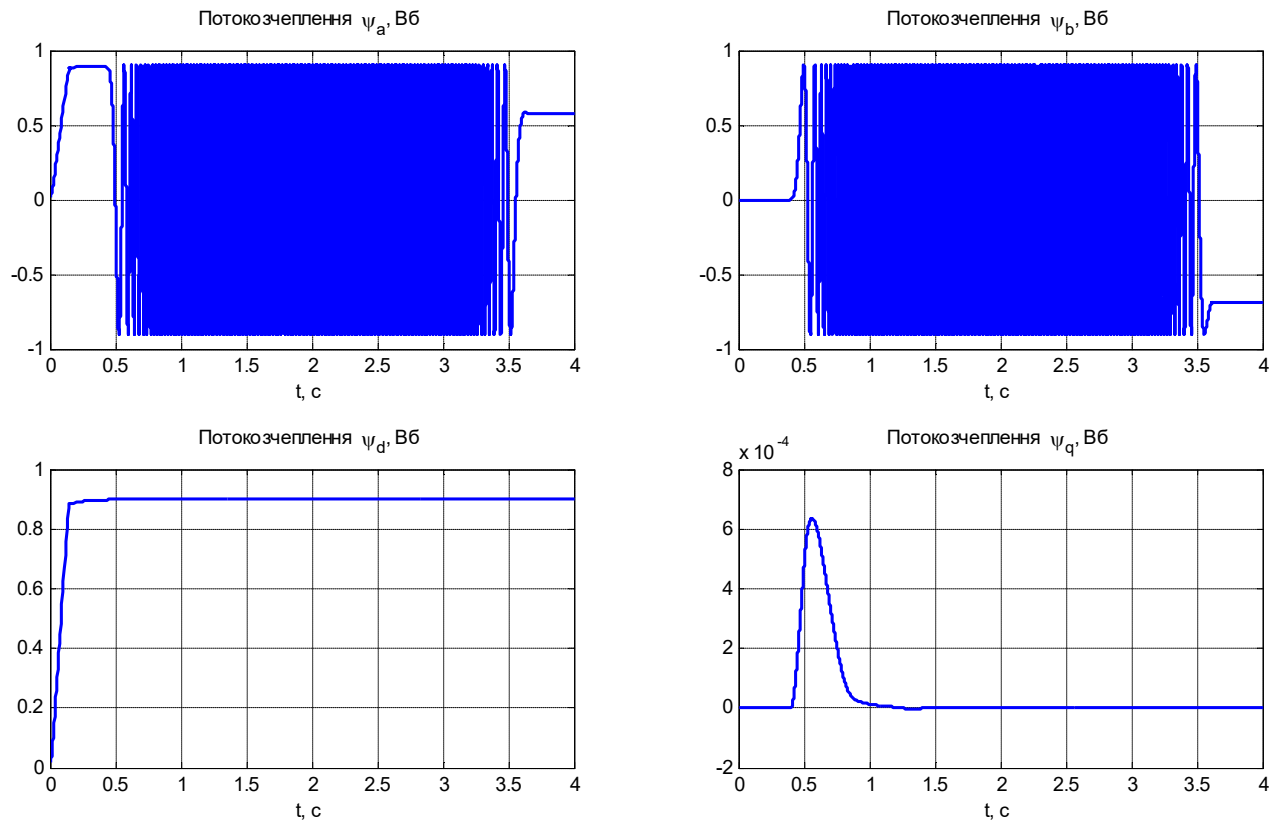


Рисунок 5.19 – Графіки перехідних процесів потокозчеплення

Висновки до розділу

1. Було описано процес створення моделюючої програми та було додано опис кожного функціонального блоку.
2. Для перевірки правильності створеної моделі були побудовані графіки перехідних процесів системи прямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна.

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті було розглянуті сучасні системи обробки металів за допомогою використання верстатів з числовим програмним керуванням. Створено автоматизовану систему керування електроприводом даного верстата.

1. Наведені основні поняття верстату, системи числового програмного керування (ЧПК). Для кращого розуміння теми металооброблюючих механізмів були наведені приклади різних верстатів що використовуються у сучасній сфері обробки металевих заготовок.

2. Провівши аналіз різноманітних металообробних верстатів, для дослідження, було обрано універсальний фрезерний верстат TMM 700 Vario FDB Maschinen та металорізальний інструмент – фрезерну головку ВАР 400R 80-27-6Т.

3. Для створення системи автоматичного керування, обрахували необхідну потужність головного руху, а саме обертання фрези, електроприводу обраного верстату. Оскільки процес фрезерування передбачає повторювано короткочасні дії, то для більшої стійкості системи було обрано асинхронний двигун серії АИРС100L4 з підвищеним ковзанням. Провели обрахунок номінальних параметрів двигуна та параметрів Т – подібної схеми заміщення, були використані для моделювання алгоритму керування в програмному середовищі MatLab/Simulink 2014a.

4. Було описано процес розробки моделюючої програми, наведено будову всіх функціональних блоків та показано спосіб їх з'єднання, розроблена структурна схема.

5. На основі інформації про використаний електродвигун, була розроблена функціональна схема, головною частиною якої є частотний перетворювач та мікроконтролер, за допомогою якого відбувається процес керування. Обраховані основні елементи силової частини електроприводу та проведено вибір обладнання.

6. Використовуючи розроблену програму було отримано графіки перехідних процесів електроприводу. З результатів видно, що складений алгоритм керування ідеально відпрацьовує завдання, що свідчить про коректність його роботи.

За результатами проведеної роботи можна створити систему керування електроприводом будь-якого металообробного верстату, знаючи його параметри та процес різання металу. На основі отриманих даних можна проводити дослідження різних двигунів для використання їх у металорізальних верстатах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теряєв В. І. Електромеханічні системи автоматизації в металообробці та машинобудуванні. Конспект лекцій, 2017. 324 с.
2. Сандлер А.С. Электропривод та автоматизація металоріжучих станків, 1972. 440с.
3. А. А. Шульга, І. І. Полупан, А. А. Ткаченко. Автоматизований електропривод металорізальних верстатів: Краматорськ, 2010. 126 с.
4. Загальні відомості про металообробне обладнання. URL: <https://studfile.net/preview/5119139/page:33/> (дата звернення: 03.05.2023)
5. Універсальний фрезерний верстат TMM 700 Vario FDB Maschinen. URL: <https://fdb-maschinen.com.ua/metalloobrabotka/frezernyj-standok-po-metallu-fdb-maschinen-tmm-700> (дата звернення: 10.05.2023)
6. ВАР 400R 80-27-6Т Фрезерна головка. URL: https://gefestplus.com/p1033874677-bap-400r-frezernaya.html?source=merchant_center&gclid=EAIaIQobChMIInK2h-InL_gIVKgd7Ch0Q_w2zEAQYBSABEG_L6dfD_BwE (дата звернення: 11.05.2023)
7. Інструкція до верстату TMM 700 Vario FDB Maschinen. URL: [https://sm-tools.com.ua/files/R-nstr_TMM_700_ru_\(2016_02\).pdf](https://sm-tools.com.ua/files/R-nstr_TMM_700_ru_(2016_02).pdf) (дата звернення: 12.05.2023)
8. IGBT модуль SK50DGDL12T7ETE2. URL: <https://www.semikron-danfoss.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/sk50dgd112t7ete2-24922370.html> (дата звернення: 15.05.2023)
9. Конденсатори електролітичні ECAP-GT-3900mkf - 400v (GT). URL: <https://kosmodrom.webakula.com.ua/ru/kondensator-elektrolitichniy/ecap-gt-3900mkf-400v-gt.html>

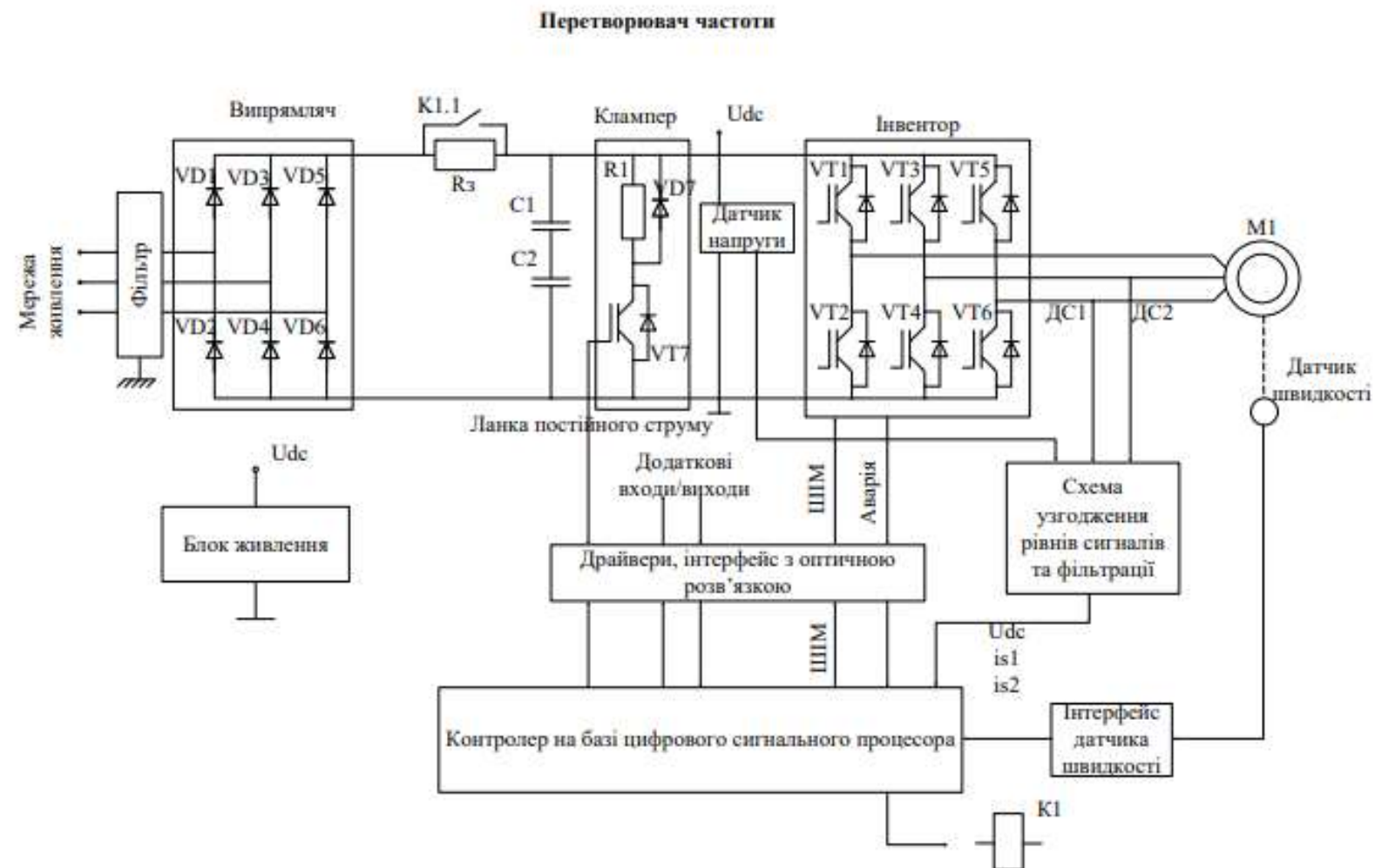
10. Давач струму ACHS-7124. [Електронний ресурс] URL:
<https://arduino.ua/prod5380-achs-7124-current-sensor-carrier-40a-to-40a>
11. Гальмівний резистор BR1K0W020. [Електронний ресурс] URL:
<https://privodok.com.ua/delta-electronics-br1k0w020>
12. Датчик вимірювання напруги LV-25 P/SP5. URL:
<https://www.sea.com.ua/ua/elektronnye-komponenty/daciki-naprazenia-na-effekte-holla/lv25-psp5/>
13. Резистор RN73C2A53K6BTDF. [Електронний ресурс] URL:
<https://www.chipdip.am/product/rn73c2a53k6btdf-1>
14. Енкодер E6B2-CWZ6C 2000 P / R. URL:
https://prom.ua/ua/p557894533-enkoder-inkrementalnyj-e6b2.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_b2b&gclid=EAIaIQobChMI88Px-N-7_wIVCm0YCh0pZwxMEAYYASABEgLn3vD_BwE
15. Електродвигун АИРС100L4. URL:
<https://systemax.ua/elektrodvigateli/jelektrodvigateli-s-povishennim-skolzheniem/airs/airs100l4.html>

ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

Позна- чення	Найменування	Кільк.	Примітка
	Енкодер		
BV1	E6B2-CWZ6C 2000	1	
	Конденсатор		
C1, C2	ECAP-GT-3900mkf - 400v (GT)	2	
	Електродвигун		
M1	АД АИРС100L4 4.25кВт 380В 1500 об/хв	1	
	Резистор		
R1	BR1K0W020	1	
	IGBT модуль		
VT1... VT6	SK50DGDL12T7ETE2	1	
	Датчики		
ДН1	LV-25 P/SP5	1	
ДС1,ДС2	ACHS-7124	2	

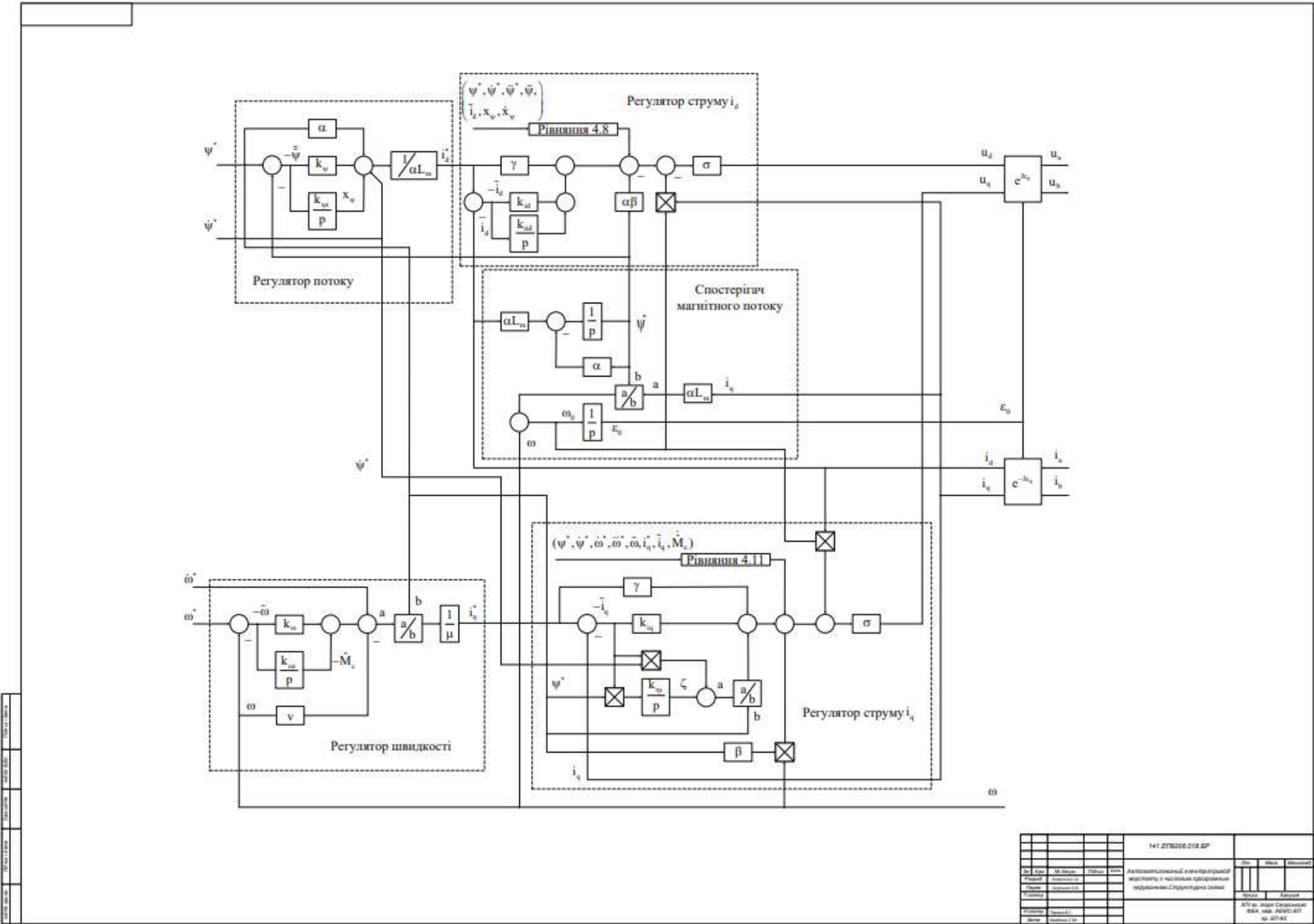
					141.ЕП9206.018.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Коваленко І.А.				Автоматизований електропривод верстату з числовим програмним керуванням Специфікація	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівн.	Сергієнко О. В.						68	71
Реценз.	Вишневський О.В.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-92		
Н. Контр.	Теряєв. В. І.							
Зав. каф	Ковбаса С. М.							

ДОДАТОК А



					141.672206.018.RP				
№	Дата	№ Выезда	Годовая	Срок	Автоматизированный электронный документ, удостоверяющий личность гражданина Российской Федерации на территории Российской Федерации. Функциональные сведения:				
М.П.Подпись:	Подпись: _____				Дата	Место	Масштаб		
Т.И.Инициалы	Подпись: _____								
М.П.Подпись:	Подпись: _____				Дата	Место	Масштаб		
Т.И.Инициалы	Подпись: _____								

ДОДАТОК В



141.276256.018.0P							
Дат.	Дат.	Відп.	Відп.	Відп.	Автоматизовані електричні пристрої з частотною регуляцією швидкості. Структурна схема		
Розроб.	Дат.	Відп.	Відп.	Відп.			
Перев.	Дат.	Відп.	Відп.	Відп.			
Відп.	Дат.	Відп.	Відп.	Відп.			
Дат.	Дат.	Відп.	Відп.	Відп.			
					АТД ім. Миколи Стороженка ФЕА, м.б. АБМО-871 ар. 871-82		

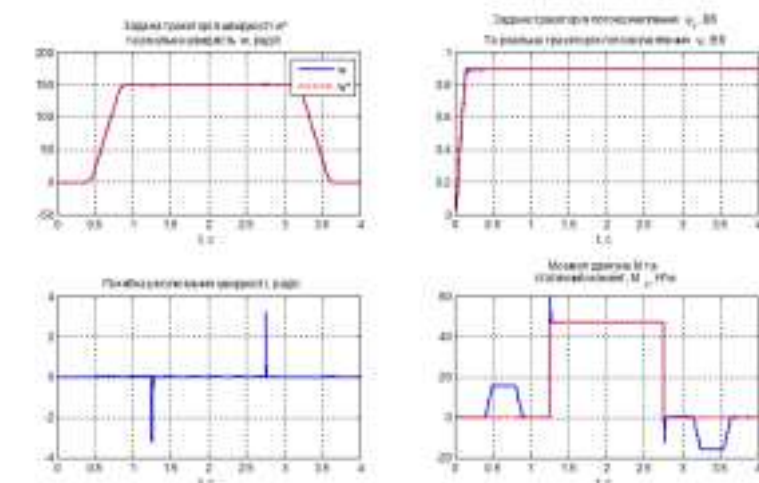


Рисунок 5.14 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості та потокозчеплення

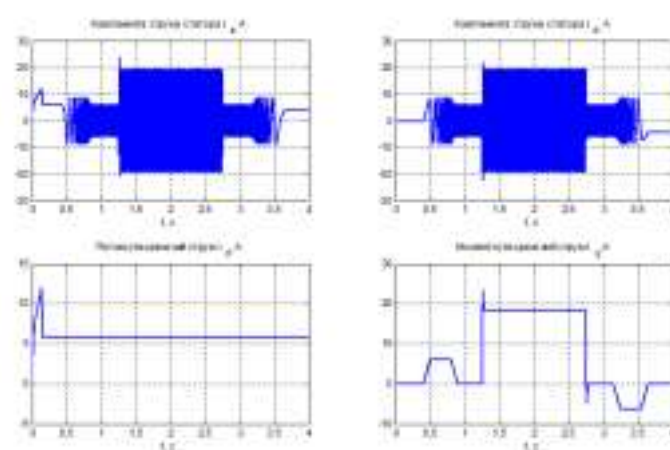


Рисунок 5.15 – Графіки перехідних процесів різних компонент струму

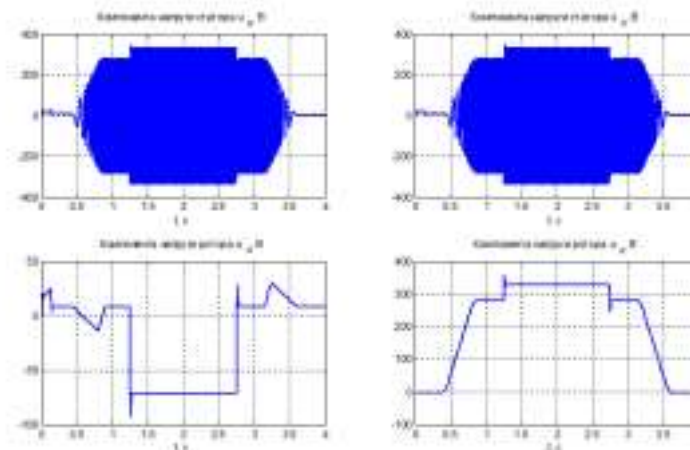


Рисунок 5.16 – Графіки перехідних процесів різних компонент напруги

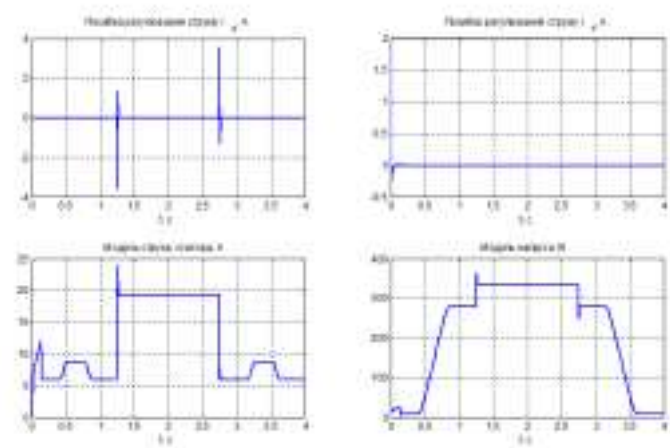


Рисунок 5.17 – Графіки перехідних процесів виходок регулювання струму в роботі та модулі струму та напруги

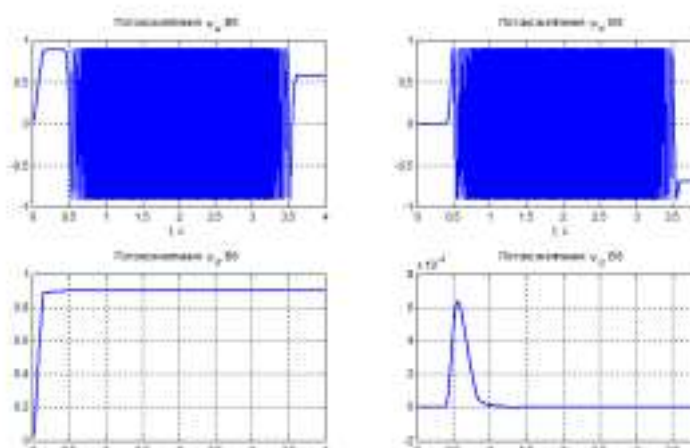


Рисунок 5.18 – Графіки перехідних процесів поточкоточення

[illegible]