

**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)

“ ” 20__ р.

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 технологічного транспортного модуля (роботара)» _____

Виконав : студент 3 курсу, групи ЕП-п21

(шифр групи)

Мужиков Андрій Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник к.т.н.доцент Теряєв Віталій Іванович

(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 _____

(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)



ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				141.0004.019.БР		
	ПБ	Підп.	Дата	«Автоматизований электропривод технологічного транспортного модуля (робокара)» Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Мужиков А.В.				2	84
Керівн.	Теряев В.І.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП- п21	
Консульт.						
Н/контр.	Теряев В.І.					
Зав.каф.	Ковбаса С.М.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: Автоматизований електропривод технологічного транспортного модуля (роботара)

Київ – 2025 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 КОВБАСА

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Мужиков Андрій Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизований електропривод технологічного транспортного модуля (роботара)

керівник проекту Теряєв Віталій Іванович, к.т.н., доц.

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

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

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2025 р. _____

3. Вихідні дані до проекту: напруга на клеммах акумулятора $U_n=540$ В, маса візка роботара $m_{візка}= 2200$ кг, максимальна маса вантажу $m_{вантажy}=1000$ кг, максимальна швидкість руху $U_{max}=30$ м/хв, максимально допустиме прискорення $a_{max}=0,25$ м/с², довжина шляху $l=100$ м.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. 1. Аналітичний огляд технологічних транспортних засобів 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3.Вибір електродвигуна та силового обладнання. 4. Розробка математичної моделі електроприводу. Розрахунок параметрів елементів електроприводу. 5. Синтез системи автоматичного керування. 6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. Аналіз результатів. 7. Спецчастина. Автоматизація електроприводу транспортного візка. 8. Розробка схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1. Загальний вид установки, 2. Схема електрична принципова, 3. Структурна схема та результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 1.04.2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник дипломного проекту

Віталій ТЕРЯЄВ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН – ГРАФІК

виконання дипломного проекту студентом групи ЕП-п21 Мужиковим А.
на тему «Автоматизований електропривод технологічного транспортного
модуля (робочара)»

Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Обсяг, с	Термін виконання	Позначки про виконання
1. Аналітичний огляд технологічних транспортних засобів 1.1. Призначення та класифікація технологічних транспортних засобів 1.2. Огляд сучасних технологічних транспортних засобів різного призначення (опис, застосування, технічні характеристики, системи електропривода, способи керування) 1.3. Опис транспортного засобу, що проєктується (застосування, кінематична схема, технічні характеристики, систем електропривода) 1.4. Розробка вимог до систем електроприводу автоматизації Висновки до розділу 1	18	20.04.25	
2.Визначення потрібної потужності електродвигуна	8	30.04.25	
3.Вибір типу електродвигуна та силового обладнання	3	1.05.25	
4.Розробка математичної моделі електроприводу (рівняння, структурна схема). Розрахунок параметрів елементів електроприводу	10	15.05.25	
5.Синтез системи автоматичного керування 5.1. Обґрунтування принципу керування електроприводом 5.2. Структурно-параметричний синтез системи керування 5.3. Розрахунок параметрів регуляторів і зворотних зв'язків	8	20.05.25	
6. Дослідження статичних і динамічних режимів системи елктроприводу (шляхом моделювання). Аналіз результатів	7	25.05.25	
7.Спецчастина. Автоматизація технологічного транспортного модуля (опціонально)	8	31.05.25	
8.Розробка (опис) схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою	3	5.06.25	
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації		10.06.25	
Разом	65		

Студент  Андрій МУЖИКОВ

РЕФЕРАТ

Даний дипломний проєкт складається з 74 сторінок пояснювальної записки, 29 рисунків, 9 таблиць, 3 додатків і містить посилання на 21 джерело.

В даному дипломному проєкті розроблено систему електроприводу руху цехового маневрового візка вантажопідйомністю 1 т. Проведено тяговий розрахунок для визначення зусиль, які має здолати двигун, щоб рухатися. Проведено розрахунок для визначення потужності приводного двигуна та перевірку за нагріванням та перевантаженням. Побудовано математичну модель двигуна та розраховано його параметри, а також описаний і побудований алгоритм непрямого векторного керування швидкістю цього двигуна.

Створено модель в програмному середовищі MatLab/Simulink для дослідження статичних та динамічних режимів.

Обрано програмований логічний контролер та датчики, на основі яких розроблено систему автоматизації механізму руху візка.

ЦЕХОВИЙ МАНЕВРОВИЙ ВІЗОК, ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, РОЗРОБКА, ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ

					141.0004.019.БР				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Мужиков А.В.			Автоматизований электропривод технологічного транспортного модуля (роботара) Реферат		Літ.	Арк.	Акрушіє
Керівн.		Теряєв. В. І.						7	84
Реценз.							КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-п21		
Н. Контр.		Теряєв. В. І.							
Зав. каф		Ковбаса С. М.							

ABSTRACT

This diploma project contain 74 pages of explanatory note, 29 pictures, 9 tables, 3 appendices and 21 links.

In this diploma project considers the control of mechanism of moving of shunting workshop trolley with load capacity 1000 kilos. Performed traction calculation for determination of efforts which the motor must overcome for moving. Performed the calculation of driving motor power with heating and overload check. Described the math model of asynchronous motor with short-circuited rotor and calculated all their parameters, and described the algorithm of indirect vector speed driving for this motor.

Built the math model in program environment MatLAB/Simulink for exploring of static and dynamic characteristics of motor.

Chosen the programmable logic controller and sensors for automation of shunting workshop trolley.

SHUNTING WORKSHOP TROLLEY, TRACTION CALCULATION,
ASYNCHRONOUS MOTOR, VECTOR DRIVING, AUTOMATION,
DEVELOPMENT, RESEARCH.

					141.0004.019.BW							
Chn.	Sheet	№ of document	Sign	Data								
Developed		Muzhikov A.V.			Automatic electric drive of technological transport module Abstract			L.	Page	Pages		
Checked		Teryayev V.I.								8	84	
Recension								NTUU "I. Sikorskiy KPI", FEA department AEMS-ED gr. EP-p21				
N. Contr.		Teryayev V.I.										
Approved		Kovbasa S.M.										

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	13
1.1 Призначення та класифікація технологічних транспортних засобів	15
1.2 Огляд сучасних технологічних транспортних засобів.....	16
1.2.1 Платформний електричний візок.....	16
1.2.2 Контейнерні візки.....	18
1.2.3 Підйомні електричні візки.....	20
1.2.4 Автоматизований електричний візок.....	21
1.3 Опис автономного маневрового транспортного візка.....	23
1.3.1 Конструкція.....	23
1.3.2 Принцип роботи.....	25
1.3.3 Технічні характеристики.....	26
1.3.4 Сфери застосування.....	26
1.3.5 Модернізація наявної моделі.....	28
1.4 Вимоги до електроприводу та автоматизації маневрового візка...	29
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.....	31
2.1 Розрахунок зусиль і попередній вибір двигуна.....	31
2.2 Визначення параметрів розрахункової схеми.....	35
2.3 Перевірка попередньо обраного двигуна.....	36
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ДВИГУНА І СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	39
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	42
4.1 Математичний опис.....	42
4.2 Розрахунок параметрів номінального режиму та схеми заміщення двигуна.....	45
4.2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	46
4.2.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення.....	47

РОЗДІЛ 5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	52
5.1 Обґрунтування принципу керування електроприводом.....	52
5.2 Структурно-параметричний синтез системи керування.....	53
5.3 Розрахунок параметрів регуляторів та зворотних зв'язків.....	57
РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	60
РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	68
7.1 Датчики.....	68
7.2 Пристрої керування.....	70
7.3 Програма для ПЛК.....	71
РОЗДІЛ 8 РОЗРОБКА І ОПИС СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....	82

ВСТУП

Сучасні промислові підприємства перебувають у постійному пошуку шляхів підвищення своєї конкурентоспроможності на світовому ринку. Це вимагає не лише впровадження нових технологій виробництва, а й глибокої модернізації вже існуючих виробничих процесів та допоміжного обладнання. Особливо актуальним є питання оптимізації внутрішньоцехової логістики, оскільки ефективне переміщення матеріалів та готової продукції безпосередньо впливає на швидкість виробництва, зниження накладних витрат та безпеку праці. Цехові маневрові візки є одним з найбільш поширених і універсальних засобів для транспортування вантажів у межах виробничих приміщень. Однак, значна частина цих візків була розроблена десятки років тому і не відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, точності позиціонування та автоматизації.

Ця дипломна робота присвячена комплексній модернізації цехового маневрового візка вантажопідйомністю 1 тонна, що експлуатується на виробничому підприємстві. Метою модернізації є суттєве підвищення його технічних, експлуатаційних та економічних характеристик, а також інтеграція в систему автоматизованого управління виробництвом. Основними напрямками модернізації є:

1. Заміна алгоритму частотного керування асинхронним двигуном на алгоритм векторного керування. Векторне керування асинхронним двигуном дозволяє досягти характеристик, подібних до двигунів постійного струму, при цьому використовуючи переваги асинхронних машин – простоту конструкції, високу надійність та низьку вартість обслуговування.

2. Перехід на автономне живлення від акумуляторної батареї. Це вирішить проблему залежності візка від стаціонарних джерел живлення та кабельних трас, що часто обмежує його мобільність та створює незручності в цехових умовах. Застосування сучасних акумуляторних технологій забезпечить достатній час автономної роботи та швидку зарядку, що сприятиме безперервності виробничих процесів.

3. Розробка програмного забезпечення для автоматичного перевезення вантажів між двома заданими станціями. Цей аспект модернізації є кроком до повної автоматизації внутрішньоцехових перевезень. Програмне забезпечення дозволить візку самостійно виконувати переміщення за заданою логікою, мінімізуючи участь оператора, знижуючи ймовірність людських помилок та оптимізуючи час доставки вантажів. Впровадження цієї функції дозволить інтегрувати візок у загальну систему управління виробництвом (MES/ERP), що відкриває нові можливості для побудови гнучких та адаптивних виробничих систем.

Актуальність даної дипломної роботи визначається кількома чинниками. По-перше, модернізація існуючого обладнання є економічно вигіднішою альтернативою придбання нового, особливо для підприємств з обмеженим бюджетом. По-друге, впровадження високоточних систем керування та автоматизації відповідає світовим тенденціям розвитку промисловості 4.0 та концепції "розумних" виробництв. По-третє, підвищення енергоефективності обладнання сприяє зниженню експлуатаційних витрат та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Реалізація запропонованих рішень дозволить не лише значно покращити функціональність існуючого маневрового візка, але й стане цінним практичним досвідом для подальшого впровадження сучасних технологій автоматизації на підприємстві.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Автоматизація сучасних підприємств є ключовим елементом четвертої промислової революції, яка змінює спосіб організації виробництва та бізнесу загалом. Вона охоплює використання роботизованих систем, штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT) та програмного забезпечення для автоматичного виконання задач, раніше покладених на людські ресурси. Це дозволяє підприємствам підвищити свою продуктивність, точність і конкурентоспроможність на ринку.

Завдяки впровадженню автоматизації, підприємства оптимізують свої виробничі процеси, зменшуючи витрати на виконання задач і час, необхідний для їх виконання. Роботизовані системи забезпечують високу точність роботи, що зменшує кількість браку і підвищує якість продукції. Крім того, автоматизація сприяє поліпшенню безпеки на виробництві, оскільки машини беруть на себе виконання небезпечних для людини завдань.

Інтеграція автоматизованих систем також розширює можливості аналізу даних. Наприклад, платформи IoT дозволяють підприємствам збирати і аналізувати інформацію в реальному часі, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень. Крім того, автоматизація відкриває шлях до масової кастомізації продуктів, забезпечуючи гнучкість виробничих процесів для задоволення специфічних потреб клієнтів.

Попри всі переваги, автоматизація також ставить перед підприємствами нові виклики. Вона вимагає значних інвестицій, а також перенавчання співробітників для роботи з новими технологіями. Однак ті компанії, що здатні впровадити інновації і адаптуватися до змін, отримують значні переваги у довгостроковій перспективі. Автоматизація – це не лише про ефективність, а й про майбутнє, в якому людські ресурси зосереджуються на творчих і стратегічних аспектах роботи.

Технологічні транспортні засоби є ключовим елементом розвитку сучасної інфраструктури, який забезпечує ефективне переміщення людей та вантажів, а також сприяє зниженню негативного впливу на довкілля. Завдяки використанню інноваційних технологій, таких як електричні двигуни, штучний інтелект, автоматизація та альтернативні джерела енергії, ці засоби транспорту представляють собою не лише технічний прогрес, але й важливий інструмент у розв'язанні глобальних екологічних та економічних проблем.

Еволюція транспортних технологій охоплює різні аспекти, зокрема вдосконалення безпеки, комфорту та доступності для користувачів. Електромобілі, автономні транспортні засоби, магнітно-левітаційні потяги та багато інших розробок формують нову реальність, де основним пріоритетом є ефективність використання ресурсів, адаптивність до потреб суспільства та зменшення шкідливих викидів. Ці досягнення відкривають нові можливості для міських і міжміських перевезень, створюючи інтегровану та екологічно безпечну транспортну систему.

Технологічний транспортний засіб – великотоннажний автомобіль, який за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення вантажів, транспортування розкритих порід і корисних копалин на відкритих гірничих розробках чи ґрунту на будівництві, а також інший механічний транспортний засіб, у тому числі обладнаний спеціальними пристроями чи механізмами, або транспортний засіб, призначений для руху тільки у поєднанні з іншим транспортним засобом, який керується машиністом (оператором, водієм) і використовується власником для забезпечення виробничих процесів під час провадження ним господарської діяльності (виготовлення продукції, виконання робіт, надання послуг), а також для переміщення сировини (матеріалів), що обробляється, і відходів виробництва. [1]

Економічність та екологічність є одними з основних аспектів технологічного транспорту. Використання електроенергії, водню або навіть сонячної енергії замість традиційного палива дозволяє суттєво зменшити рівень шкідливих викидів у довкілля. Ці новітні транспортні засоби сприяють

вирішенню проблем глобального потепління, пропонуючи більш дружнє до природи рішення для міських та міжміських перевезень.

Безпека й комфорт також виступають пріоритетами у розробці технологічного транспорту. Автономні транспортні системи забезпечують мінімізацію людської помилки, знижуючи ризик аварій і травм. Інтелектуальні системи навігації та управління дозволяють користувачам насолоджуватися плавною поїздкою, навіть в умовах інтенсивного міського руху. Крім того, розвиток громадського транспорту, як-то розумні автобуси та поїзди, робить пересування більш доступним і зручним для широкого загалу.

1.1 Призначення та класифікація технологічних транспортних засобів

Електричні транспортні візки стали невід'ємною частиною сучасної логістики та виробництва, забезпечуючи ефективне переміщення вантажів без зайвих фізичних зусиль. Завдяки розвитку технологій вони значно розширили свої функціональні можливості, пропонуючи широкий спектр моделей для різних потреб. Класифікація електричних візків залежить від конструкції, вантажопідйомності, типу управління та способу живлення, що дозволяє підібрати оптимальне рішення для конкретних умов експлуатації. Від платформних моделей для загального транспортування до автоматизованих AGV-систем, кожен тип має свої унікальні переваги та особливості, спрямовані на підвищення продуктивності та зниження витрат.



Рисунок 1.1 – Класифікація технологічних транспортних засобів

1.2 Огляд сучасних технологічних транспортних засобів

Кожен з вище наведених видів транспортних засобів має власну специфіку та область застосування. В цьому розділі будуть розглянуті різні представники цих категорій технологічних транспортних засобів з описом галузі застосування, системи керування і т.д.

1.2.1 Платформний електричний візок

Платформний електричний візок Moto-Cart від Lift Products—це потужний самохідний пристрій, призначений для транспортування вантажів у складських приміщеннях, виробничих цехах та логістичних центрах. Завдяки електродвигуну та міцній конструкції він значно спрощує процес переміщення матеріалів, зменшуючи фізичне навантаження на працівників та підвищуючи загальну продуктивність.

Основою конструкції Moto-Cart є платформа, виготовлена з міцної сталі та покрита антиковзким матеріалом, що запобігає зміщенню вантажу під час руху. Візок має вантажопідйомність до 1,500 кг, що дозволяє використовувати його

для перевезення важких предметів, таких як ящики, палети та промислове обладнання.

Система приводу працює на центральному трансмісійному електродвигуні, який забезпечує плавний рух та високу маневреність. Завдяки 24V електросистемі та двом 12V 35Ah акумуляторам, Moto-Cart може працювати автономно, долаючи до 16 кілометрів на одному заряді. Вбудований електромеханічний гальмівний механізм гарантує безпеку під час експлуатації, автоматично зупиняючи візок у разі потреби.

Зазвичай, в основі привода лежить електродвигун, вибір типу якого (асинхронний змінного струму або постійного струму, можливо з постійними магнітами) залежить від конкретної моделі візка та вимог до його продуктивності. Асинхронні двигуни цінуються за їхню надійність та невибагливість в обслуговуванні, тоді як двигуни постійного струму, особливо сучасні PMSM, можуть забезпечити високий крутний момент на низьких швидкостях та кращу енергоефективність.

Керування роботою електродвигуна здійснюється за допомогою спеціального контролера – електронного блоку, який отримує сигнали від органів керування оператора та регулює потік енергії від акумуляторної батареї до двигуна. Цей контролер відповідає за плавне регулювання швидкості та зміну напрямку руху візка. У багатьох моделях передбачена функція рекуперативного гальмування, яка дозволяє перетворювати кінетичну енергію візка під час уповільнення в електричну, повертаючи її назад в акумулятор для збільшення запасу ходу. Також контролер виконує важливі функції захисту електродвигуна та акумуляторної батареї від перевантажень та інших нештатних ситуацій. Для керування двигуном використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Колісна база розроблена для максимальної стійкості та маневреності. Візок оснащений центральним приводним колесом, яке дозволяє легко розвертатися навіть у вузьких проходах. Додаткові антистатичні смуги запобігають накопиченню електростатичного заряду, що особливо важливо для роботи у виробничих приміщеннях.

Система управління Moto-Cart включає регулятор швидкості, аварійний вимикач, індикатор заряду батареї та звуковий сигнал, що забезпечує комфортну та безпечну експлуатацію. Оператор може легко контролювати рух візка за допомогою ергономічної ручки, що дозволяє регулювати швидкість у діапазоні 0–4,8 км/год. [2]



Рисунок 1.2 – Платформний електричний візок Moto-Cart

1.2.2 Контейнерні візки

Контейнерний електричний візок Kalmar ECG90-110—це сучасне рішення для транспортування порожніх контейнерів у портах, логістичних центрах та промислових підприємствах. Завдяки електричному приводу він забезпечує екологічність, низький рівень шуму та високу ефективність роботи, що робить його ідеальним вибором для компаній, які прагнуть зменшити викиди CO₂ та оптимізувати логістичні процеси.

Конструкція цього візка розроблена для роботи з контейнерами різних розмірів. Він може штабелювати порожні контейнери на висоту від 5 до 8 одиниць, що дозволяє максимально ефективно використовувати складські площі. Вантажопідйомність моделі становить 9–11 тонн, що дає змогу працювати з контейнерами стандартних розмірів—20, 30, 40, 45, 48 та 53 футів.

Система приводу Kalmar ECG90-110 працює на літій-іонних батареях, які забезпечують тривалий час автономної роботи. Візок підтримує три різні модульні варіанти батарей, що дозволяє адаптувати його до конкретних умов експлуатації. Крім того, він оснащений системою швидкого заряджання, яка

підтримує максимальну потужність до 350 кВт, що значно скорочує час простою між робочими циклами.

Привод даного навантажувача є асинхронним, основою якого є двигун BoschRexroth потужністю 115/24 кВт. Для керування даним двигуном використовується керований інвертор, оскільки живлення здійснюється від акумуляторних батарей. Для керування двигуном використовується алгоритм векторного керування, оскільки він забезпечує найвищу якість керування з доступних варіантів.

Електричний привід забезпечує плавний рух та точне керування, що особливо важливо при штабелюванні контейнерів на великій висоті. Завдяки гідравлічній системі та цифровому моніторингу, оператор може контролювати всі параметри роботи в режимі реального часу, що підвищує безпеку та ефективність експлуатації.[3]



Рисунок 1.3 –Контейнерний навантажувач Kalmar ECG 90-110

1.2.3 Підйомні електричні візки

Підйомний електричний візок Moto-Cart Jr. ELT від Lift Products—це компактний самохідний пристрій, призначений для транспортування та підйому вантажів у складських приміщеннях, виробничих цехах та логістичних центрах. Завдяки електричному приводу та гідравлічному механізму підйому він значно

спрощує процес роботи, зменшуючи фізичне навантаження на працівників та підвищуючи загальну продуктивність.

Конструкція Moto-Cart Jr. ELT включає міцну платформу, яка може підніматися на висоту до 115,6 см. Вантажопідйомність візка становить 1,000 фунтів, що дозволяє використовувати його для перевезення важких предметів, таких як ящики, палети та промислове обладнання. Платформа оснащена захисними роликами, які забезпечують стабільність під час підйому та запобігають небажаному зміщенню вантажу.

Система приводу складається з двигуна постійного струму, що забезпечує плавний рух та високу маневреність, а також високий крутний момент на низьких швидкостях. Також керується за допомогою контролера і широтно-імпульсної модуляції.

Завдяки 24V електросистемі та двом 33 Ah акумуляторам, Moto-Cart Jr. ELT може працювати автономно, а вбудований автоматичний зарядний пристрій дозволяє швидко поповнювати запас енергії.

Колісна база розроблена для максимальної стійкості та маневреності. Візок оснащений пневматичними колесами, які забезпечують плавний рух навіть на нерівних поверхнях. Додаткові поліуретанові колеса запобігають пошкодженню підлоги та забезпечують безшумну роботу.

Система управління Moto-Cart Jr. ELT включає регулятор швидкості, аварійний вимикач, індикатор заряду батареї та звуковий сигнал, що забезпечує комфортну та безпечну експлуатацію. Оператор може легко контролювати рух візка за допомогою сенсорної панелі, що дозволяє регулювати швидкість та висоту підйому [4].



Рисунок 1.4 – Підйомний електричний візок Moto-Cart Jr. ELT

1.2.4 Автоматизований електричний візок

Автоматизований електричний візок XF Series TYPE B від Sharp — це високотехнологічний пристрій, який використовується для транспортування вантажів у складських комплексах, виробничих підприємствах та логістичних центрах. Завдяки своїй автономності та точному навігаційному механізму, він забезпечує безперервну роботу без необхідності участі людини.

Конструкція цього AGV побудована таким чином, щоб поєднувати компактність, міцність та функціональність. Його каркас виготовлений зі сталевих елементів, які забезпечують захист електронних компонентів, а також високу стійкість до механічних навантажень. Габарити візка — 954 мм × 480 мм × 293 мм, що дозволяє йому легко маневрувати у вузьких складських проходах та між стелажми.

Основна система приводу працює на безщітковому електродвигуні постійного струму (BLDC) з напругою DC 24V, який також є керованим. Цей двигун забезпечує тихий, плавний та енергоефективний рух, оскільки BLDC-технологія мінімізує втрати енергії та виключає механічне зношування деталей, характерне для традиційних щіткових моторів. Завдяки цьому візок має високу продуктивність та тривалий строк служби, що робить його ідеальним вибором для інтенсивної експлуатації.

Для живлення AGV використовується свинцевий акумулятор ємністю 42 Ah $\times$ 2, який забезпечує автономну роботу протягом до восьми годин без потреби у підзарядці. Коли заряд батареї знижується до критичного рівня, візок автоматично повертається до зарядної станції. Завдяки цій функції забезпечується безперервний робочий цикл, а процес логістики не переривається через низький рівень заряду.

Система навігації XF Series TYPE B базується на магнітній стрічці та IC-мітках, що гарантує точне позиціонування на маршруті та дозволяє AGV безпомилково виконувати завдання. Датчики вбудовані у конструкцію візка, щоб аналізувати навколишнє середовище, розпізнавати перешкоди та уникати зіткнень. Якщо на шляху виникає об'єкт, система активує аварійну зупинку та звуковий сигнал для попередження операторів.

Завдяки максимальній швидкості руху до 60 метрів на хвилину, візок може швидко переміщати вантажі між зонами складу, виконуючи завдання без участі людини. Його вантажопідйомність становить 200 кг, що робить його оптимальним рішенням для перевезення палет, контейнерів, ящиків та інших вантажів середньої ваги.

XF Series TYPE B оснащений розширеною системою безпеки, що включає аварійну кнопку, датчики перешкод, звукові сигнали та автоматичне вимкнення при перевантаженні або виході за межі маршруту. Це гарантує максимальну безпеку як для самого пристрою, так і для людей, що працюють поруч.

Цей AGV широко використовується у складських приміщеннях, виробничих підприємствах та логістичних центрах, де необхідна безперервна автоматизація процесів транспортування. Завдяки передовим технологіям, він дозволяє зменшити витрати на ручну працю, мінімізувати людський фактор та оптимізувати логістичні операції, що робить його важливим елементом сучасного виробництва.[5]



Рисунок 1.5 – Автоматизований візок XF Series TYPE B

1.3 Опис автономного маневрового транспортного візка

Маневровий цеховий візок—це спеціалізований транспортний засіб, призначений для переміщення вантажів у виробничих приміщеннях, складах та логістичних центрах. Він забезпечує ефективне транспортування важких та габаритних об'єктів, зменшуючи витрати часу та ресурсів.



Рисунок 1.6 – Маневровий візок виробництва КЗПТО

1.3.1 Конструкція

Його конструкція розроблена таким чином, щоб забезпечити максимальну надійність, довговічність та ефективність роботи в умовах інтенсивного використання.

Основою конструкції є міцна зварна рама, виготовлена зі сталі S235 або S355, що забезпечує високу механічну міцність та стійкість до навантажень. Рама має спеціальні посилені елементи, які дозволяють витримувати значні динамічні навантаження та удари, що виникають під час транспортування вантажів.

Колісна система маневрового візка складається з одноребордних або дворебордних колісних блоків, які забезпечують стабільний рух по напрямних. Вибір типу коліс залежить від умов експлуатації: одноребордні колеса використовуються для стандартних рейкових систем, тоді як дворебордні забезпечують додаткову стійкість та запобігають сходженню з рейок.

Привідна система візка може бути електричною або гідравлічною, залежно від вимог виробництва. У випадку електричного приводу використовуються мотор-редуктори виробництва PodemCrane (Болгарія) або SEW-Eurodrive (Німеччина), які забезпечують плавний рух та точне регулювання швидкості. Гідравлічні приводи застосовуються у важких умовах, де необхідна висока потужність для переміщення великогабаритних вантажів.

Система керування маневровим візком може бути ручною, дистанційною або автоматизованою. У стандартних моделях управління здійснюється за допомогою підвісного пульта, що дозволяє оператору контролювати рух візка. У більш сучасних версіях використовується радіоуправління, яке забезпечує більшу гнучкість та безпеку роботи.

Для підвищення безпеки експлуатації маневровий візок оснащений кінцевими вимикачами ходу, системою запобігання зіткненням, а також оптичними датчиками, які визначають перешкоди на шляху руху. Крім того, візок може бути обладнаний сигнальними світловими та звуковими пристроями, що попереджають персонал про його рух.

Електрообладнання маневрового візка включає частотний привід Schneider Electric типу Altivar, який забезпечує регулювання швидкості та плавний старт. Струмopідвід може бути тролейним закритого типу або кабельним, залежно від умов експлуатації.

Завдяки своїй міцній конструкції, потужному приводу та сучасним системам керування, маневровий цеховий візок є незамінним елементом виробничих процесів, забезпечуючи ефективне транспортування вантажів, високу продуктивність та безпеку експлуатації.[6]

1.3.2 Принцип роботи

Маневровий цеховий візок працює за принципом автоматизованого або ручного переміщення вантажів у виробничих приміщеннях, складах та логістичних центрах. Його функціонування базується на системі приводу, яка забезпечує рух, та механізмах керування, що дозволяють контролювати швидкість, напрямок і стабільність пересування.

Основним елементом, що забезпечує рух візка, є електропривод або гідравлічна система, залежно від конструкції. У випадку електричного приводу використовується мотор-редуктор, який передає обертальний момент на колісні блоки, змушуючи візок рухатися вперед або назад. Гідравлічні системи, у свою чергу, використовують гідроциліндри та насосні установки, що створюють необхідний тиск для переміщення платформи.

Керування візком може здійснюватися вручну, дистанційно або автоматично. У традиційних моделях оператор керує рухом за допомогою підвісного пульта, що дозволяє змінювати швидкість та напрямок руху. У сучасних версіях використовується радіоуправління, яке забезпечує більшу гнучкість та безпеку роботи. Автоматизовані моделі оснащені інтелектуальними контролерами, які аналізують навколишнє середовище та коригують траєкторію руху відповідно до заданих параметрів.

Стабільність руху забезпечується системою датчиків та стабілізації, яка включає оптичні сенсори, кінцеві вимикачі та пристрої запобігання зіткненням. Оптичні датчики визначають перешкоди на шляху руху, а кінцеві вимикачі обмежують робочий діапазон переміщення, запобігаючи виходу візка за межі допустимої зони.

Енергозабезпечення маневрового візка може здійснюватися через тролейний струмопідвід або акумуляторну батарею. У випадку тролейного живлення візок отримує електроенергію через спеціальні контактні системи, що забезпечують безперервну роботу. Акумуляторні моделі використовують літій-іонні або свинцево-кислотні батареї, що дозволяють працювати автономно протягом тривалого часу.

Гальмівна система відіграє важливу роль у безпеці експлуатації. Вона може бути механічною, електромагнітною або гідравлічною, залежно від конструкції. Електромагнітні гальма активуються автоматично при зупинці візка, забезпечуючи надійне утримання платформи у нерухомому стані.

Таким чином, принцип роботи маневрового цехового візка базується на взаємодії приводу, системи керування, стабілізації та енергозабезпечення, що дозволяє ефективно транспортувати вантажі у промислових умовах. Його конструкція та функціональність спрямовані на підвищення продуктивності, безпеки та автоматизації виробничих процесів.[6]

1.3.3 Технічні характеристики

Даний виріб може мати різні характеристик, які залежать від умов, в яких буде використовуватися цей візок. Основні характеристики:

Вантажопідйомність – до 100 тонн;

Довжина шляху – до 100 метрів;

Максимальна швидкість пересування – від 10 м/с до 40 м/с;

Діапазон робочих температур – від -40 C^0 до $+70\text{ C}^0$;

Режими роботи – від легкого до вельми важкого (від A1 до A8) [6].

1.3.4 Сфери застосування

Маневровий цеховий візок є незамінним елементом у багатьох галузях промисловості, де необхідне ефективне транспортування важких і габаритних вантажів. Його конструкція та функціональні можливості дозволяють використовувати його в умовах, де традиційні транспортні засоби не можуть забезпечити необхідну точність і маневреність.

Однією з ключових сфер застосування маневрового візка є металургійна промисловість, де він використовується для переміщення металевих заготовок, листового прокату, сталевих конструкцій та інших важких матеріалів. Завдяки високій вантажопідйомності та стійкості до екстремальних умов експлуатації, такі візки можуть працювати у гарячих цехах, де температура повітря досягає критичних значень.

Ще однією важливою сферою є машинобудування, де маневрові візки застосовуються для транспортування деталей, вузлів та готових виробів між виробничими ділянками. Вони дозволяють оптимізувати логістичні процеси, скорочуючи час переміщення продукції та зменшуючи витрати на ручне транспортування.

У хімічній промисловості маневрові візки використовуються для роботи у вибухонебезпечних середовищах, де необхідно дотримуватися суворих норм безпеки. Спеціальні моделі оснащені захисними системами, що запобігають утворенню іскри та забезпечують безпечне транспортування хімічних речовин та обладнання.

Важливу роль маневрові візки відіграють у гірничодобувній промисловості, де вони використовуються для переміщення руди, каменю та інших матеріалів у кар'єрах та шахтах. Завдяки міцній конструкції та потужному приводу, вони здатні працювати у складних умовах, забезпечуючи безперебійне транспортування вантажів.

У логістичних центрах та складських комплексах маневрові візки застосовуються для переміщення контейнерів, палет та інших вантажів. Вони

дозволяють автоматизувати процеси складування та транспортування, підвищуючи ефективність роботи підприємства.

Таким чином, маневровий цеховий візок є універсальним транспортним засобом, який знаходить застосування у різних галузях промисловості. Його використання дозволяє оптимізувати виробничі процеси, підвищити продуктивність та забезпечити безпеку транспортування вантажів у складних умовах експлуатації.[6]

1.3.5 Модернізація наявної моделі

Модернізація полягає в заміні двигунів постійного струму на асинхронний двигун, який має простішу конструкцію і простіший алгоритм керування. Також при виборі двигуна враховуватиметься можливість руху з нахилом в 15° , оскільки в загальному випадку двигуни в таких візках призначені для руху по прямим поверхням (тобто без нахилу.). Для керування двигуном використовуватиметься векторне керування. Для перетворення постійної напруги в змінну керовану використовуватимемо інвертор.

Іншим нововведенням є автоматичний режим роботи. В початковому варіанті є лише ручне керування.

Ще одним нововведенням була однодвигунна схема приводу, оскільки в початковій версії кожне приводне колесо мало окремий двигун.

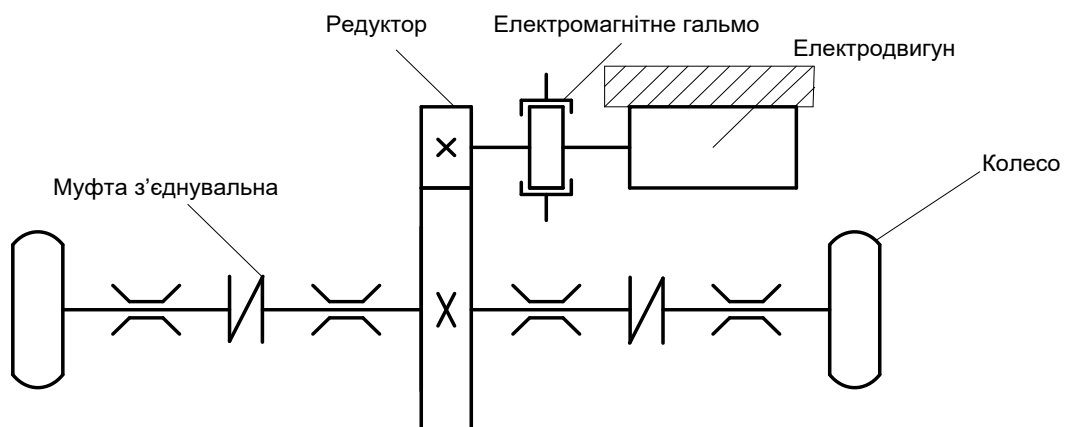


Рисунок 1.7 – Кінематична схема однодвигунного приводу коліс візка

1.4 Вимоги до електроприводу та автоматизації маневрового візка

В даній роботі розробляється маневровий транспортний візок з максимальною вантажопідйомністю в 1000 кг, максимальною швидкістю 30 м/хв і максимально можливим розгоном $0,25 \text{ м/с}^2$. Живлення двигуна здійснюється від акумуляторної батареї з напругою 540 В і ємністю 100 кВт/год. Для забезпечення коректної роботи перетворювача частоти необхідно застосувати інвертор відповідної потужності.

Для забезпечення підтримання моменту і швидкості використовуватимемо векторний закон керування швидкістю двигуна.

Основною вимогою до привода візка є достатня потужність двигуна задля уникнення перегрівання двигуна. Також важливо, щоб обраний редуктор мав таке передатне число, щоб була можливість забезпечити максимальну можливу швидкість руху візка.

Безпекові механізми візка представлені у вигляді кнопки аварійної зупинки, яка при активації повністю вимикає всі механізми візка.

Для убезпечення транспортного засобу від зіткнень використовуються датчики наближення, які у разі спрацювання зупиняють візок і активують світлову і звукову сигналізацію.

Для автоматичного режиму передбачено захист від сходу з заданого курсу, який реалізований у вигляді індукційного датчика, який у разі відхилення візка від позначеного металевим дротом (або стрічкою) шляху. У разі спрацювання візок зупиняється і вмикається світлова і звукова сигналізація.

Для обмеження руху візка між позиціями використовуємо кінцеві вимикачі, для визначення крайніх положень і обмеження подальшого руху у відповідному напрямку.

Висновки до розділу 1

1. В даному розділі були розглянуті і описані в сучасні види електричних візків, область їх застосування, особливості конструкції, вид живлення і т.д. Визначено та наведено існуючі види візків та розглянуто порівняльні технічні дані та переваги кожного із них, на основі цього далі сформовано вимоги та основні технологічні потреби електроприводу маневрового візка - робокару.

2. На основі цих даних був здійснений опис візка, що проектується. Сформовані вимоги щодо безпеки використання даного пристрою і вимоги до приводу. На основі цих вимог будуть виконуватися розрахунки і вибір комплектуючих, таких як власне двигун, інвертор і т.д. Це розділ необхідний для визначення процедури розрахунку і вибору силових елементів приводного механізму.

3. Сформульовані вимоги безпеки експлуатації візка. Дані вимоги впливають на вибір датчиків і на розробку програми для програмованого логічного контролера, з якого і буде керуватися візок за допомогою кнопок і датчиків.

РОЗДІЛ 2 ТЯГОВА ХАРАКТЕРИСТИКА І ВИБІР ДВИГУНА

2.1 Розрахунок зусиль і попередній вибір двигуна

Для вибору приводних двигунів необхідно визначити тягові зусилля для приведення візка у рух [7]. Приймаємо наступні початкові умови:

Максимальна швидкість візка – 30 м/хв. (0,5 м/с);

Максимально допустиме прискорення – 0,25 м/с²;

Максимально допустима вага вантажу – 1000 кг;

Вага візка – 2200 кг;

Діаметр колеса – 0,3 м.

При розрахунку тягового зусилля опором повітря нехтуємо через низьку швидкість руху візка.

Визначаємо повну масу візка з вантажем:

$$m_a = m_0 + m_b$$

де m_0 – маса візка;

m_b – маса вантажу;

$$m_a = 2200 + 1000 = 3200 \text{ кг} \quad (2.1)$$

Визначаємо коефіцієнт опору кочення в залежності від швидкості:

$$f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V^2}{2000} \right)$$

де f_0 – коефіцієнт опору кочення при русі електромобіля з малою швидкістю.

Дорівнює 0,01 за умовою задачі;

V – максимальна швидкість транспорту. Дорівнює 0,5 м/с за умовою задачі;

$$f = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{0,5^2}{2000} \right) = 0,01 \quad (2.2)$$

З наявних даних визначаємо силу опору кочення візка (за умови, що максимальний кут нахилу підлоги в цеху дорівнює 15°):

$$F_d = F_G + F_f$$

де $F_G = m_a \cdot g \cdot \sin \beta$ – опір коченню, що виникає при підйомі;

$F_f = m_a \cdot g \cdot \cos \beta \cdot f$ – опір коченню по рівній поверхні;

β – максимальний підйом, що може подолати візок. За умовою задачі дорівнює 15° .

Для завантаженого візка:

$$F_G = 3200 \cdot 9,81 \cdot 0,34 = 8124,85 \text{ Н} \quad (2.3)$$

$$F_f = 3200 \cdot 9,81 \cdot 0,94 \cdot 0,01 = 303,2 \text{ Н} \quad (2.4)$$

$$F_{d(\text{зав})} = 10673,3 + 295,1 = 8428,1 \text{ Н} \quad (2.5)$$

Для розвантаженого візка:

$$F_G = 2200 \cdot 9,81 \cdot 0,34 = 5585,8 \text{ Н} \quad (2.6)$$

$$F_f = 2200 \cdot 9,81 \cdot 0,94 \cdot 0,01 = 208,5 \text{ Н} \quad (2.7)$$

$$F_{d(\text{розв})} = 7337,88 + 202,87 = 5794,3 \text{ Н} \quad (2.8)$$

Визначаємо силу тяги на колесах:

$$F_T = m_a \cdot \frac{dV}{dt} + F_d$$

де $dV/dt = a_{\max}$ – максимально допустиме прискорення;

Для завантаженого візка:

$$F_{T(\text{зав})} = 3200 \cdot 0,25 + 8428,1 = 9228,1 \text{ Н} \quad (2.9)$$

Для розвантаженого візка:

$$F_{T(\text{розв})} = 2200 \cdot 0,25 + 5794,3 = 6344,3 \text{ Н} \quad (2.10)$$

Тяговий момент на ведучих колесах визначається за формулою:

$$M_T = F_T \cdot r_k$$

де r_k – радіус колеса. Дорівнює $r_k = D/2 = 0,3/2 = 0,15 \text{ м}$;

Для завантаженого візка:

$$M_{T(\text{зав})} = 9228,1 \cdot 0,15 = 1384,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

Для розвантаженого візка:

$$M_{T(\text{розв})} = 6344,3 \cdot 0,15 = 951,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(2.12)

Визначаємо кутову швидкість обертання колеса на максимальній швидкості:

$$\omega_k = \frac{V_{max}}{r_k} = \frac{0,5}{0,15} = 3,33 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.13)$$

Визначаємо передатне число редуктора за швидкістю обертання колеса і швидкістю обертання двигуна на холостому ходу:

$$i = \frac{\omega_{дв\ c}}{\omega_k} = \frac{157,1}{3,33} = 47,2 \quad (2.14)$$

Найближчим меншим номінальним передатним числом редуктора 40. Такий вибір редуктора здійснюється для можливості відпрацювання максимальної швидкості руху візка [7].

За передатним числом редуктора визначаємо приведений до валу двигуна момент:

$$M_c = \frac{M_T}{i \cdot \eta}$$

де η – коефіцієнт корисної дії редуктора;

Для навантаженого візка:

$$M_{c(зав)} = \frac{1384,2}{40 \cdot 0,97} = 35,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.15)$$

Для розвантаженого візка:

$$M_{c(розв)} = \frac{951,7}{40 \cdot 0,97} = 24,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

За отриманими даними будуємо спрощену навантажувальну діаграму:

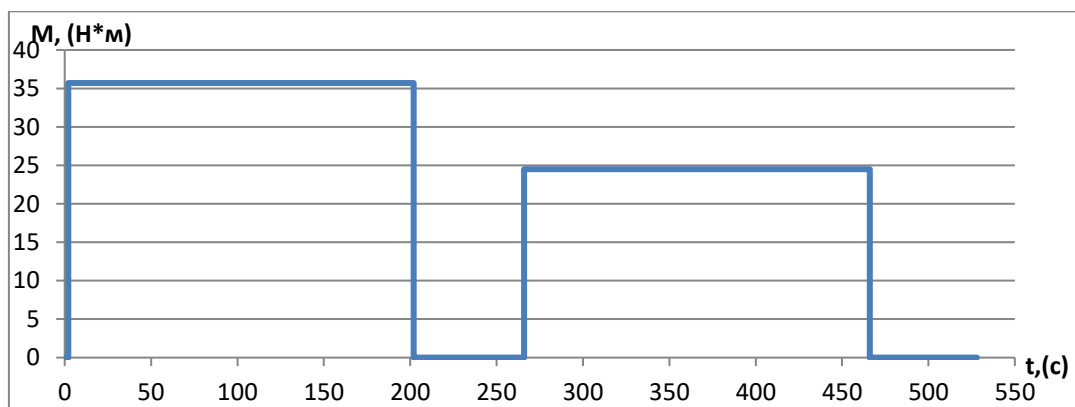


Рисунок 2.1 – Спрощена навантажувальна діаграма

При попередньому розрахунку потужності двигуна треба орієнтуватися на середньоквадратичний еквівалентний момент, визначений занавантажувальною діаграмою робочої машини.

Визначення середньоквадратичного еквівалентного моменту виконується за формулою:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_{с(зав)}^2 + M_{с(розв)}^2}{2}} = \sqrt{\frac{35,7^2 + 24,5^2}{2}} = 30,62 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.17)$$

Попередня потужність двигуна визначається за формулою:

$$P_{\text{попер}} = M_e \cdot \omega_c = 30,62 \times 157,1 = 4809,85 \text{ Вт}$$

Вплив динамічних навантажень двигуна враховується збільшенням його еквівалентної потужності P_E за допомогою поправочного коефіцієнта, значення якого складає 1,2-1,4:

$$P_{\text{екв}} = 1,4 \cdot P_{\text{попер}} = 1,4 \cdot 4809,85 = 6733,8 \text{ Вт} \quad (2.18)$$

Обираємо двигун виробника АВВ, серії М3 (IE2) (загальнопромислового призначення). Паспортна тривалість включення двигунів цієї серії складає 100%. Потужність двигуна визначається за формулою:

$$P_{\text{ен}} = P_{\text{екв}} \cdot \sqrt{\frac{T_B}{T_{B_H}}} = 6733,8 \cdot \sqrt{\frac{0,77}{1}} = 5908,9 \text{ Вт} \quad (2.19)$$

Відповідно до отриманого розрахункового значення потужності двигуна обираємо найближчий більший.

2.2 Визначення параметрів розрахункової схеми

Визначаємо радіус приведення:

$$\rho = \frac{V}{\omega_k \cdot i} = \frac{0,5}{3,33 \cdot 40} = 0,00375 \text{ м} \quad (2.20)$$

Визначаємо момент інерції візка з вантажем і без нього:

$$J_{\text{віз(зав)}} = m_a \cdot \rho^2 = 3200 \cdot 0,00375^2 = 0,045 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

$$J_{\text{віз(розв)}} = m_0 \cdot \rho^2 = 2200 \cdot 0,00375^2 = 0,031 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.22)$$

Визначаємо загальний момент інерції:

$$J_{\Sigma(\text{зав})} = J_d + J'_{\text{віз(зав)}} = 0,041 + 0,045 = 0,086 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.25)$$

$$J_{\Sigma(\text{розв})} = J_d + J'_{\text{віз(розв)}} = 0,041 + 0,031 = 0,072 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.26)$$

Визначаємо кутове прискорення двигуна:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{a_{\max}}{\rho} = \frac{0,25}{0,00375} = 66,6 \text{ рад/с}^2 \quad (2.27)$$

Визначаємо динамічні моменти під час розгону/гальмування:

$$M_{\text{дин роз (зав)}} = J_{\Sigma(\text{зав})} \cdot \varepsilon_{\max} = 0,086 \cdot 66,6 = 5,73 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.28)$$

$$M_{\text{дин гальм (зав)}} = J_{\Sigma(\text{зав})} \cdot (-\varepsilon_{\max}) = 0,086 \cdot (-66,6) = -5,73 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.29)$$

$$M_{\text{дин роз (розв)}} = J_{\Sigma(\text{розв})} \cdot \varepsilon_{\max} = 0,072 \cdot 66,6 = 4,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.30)$$

$$M_{\text{дин гальм (розв)}} = J_{\Sigma(\text{розв})} \cdot (-\varepsilon_{\max}) = 0,072 \cdot (-66,6) = -4,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.31)$$

На основі отриманих даних будуємо навантажувальну діаграму:

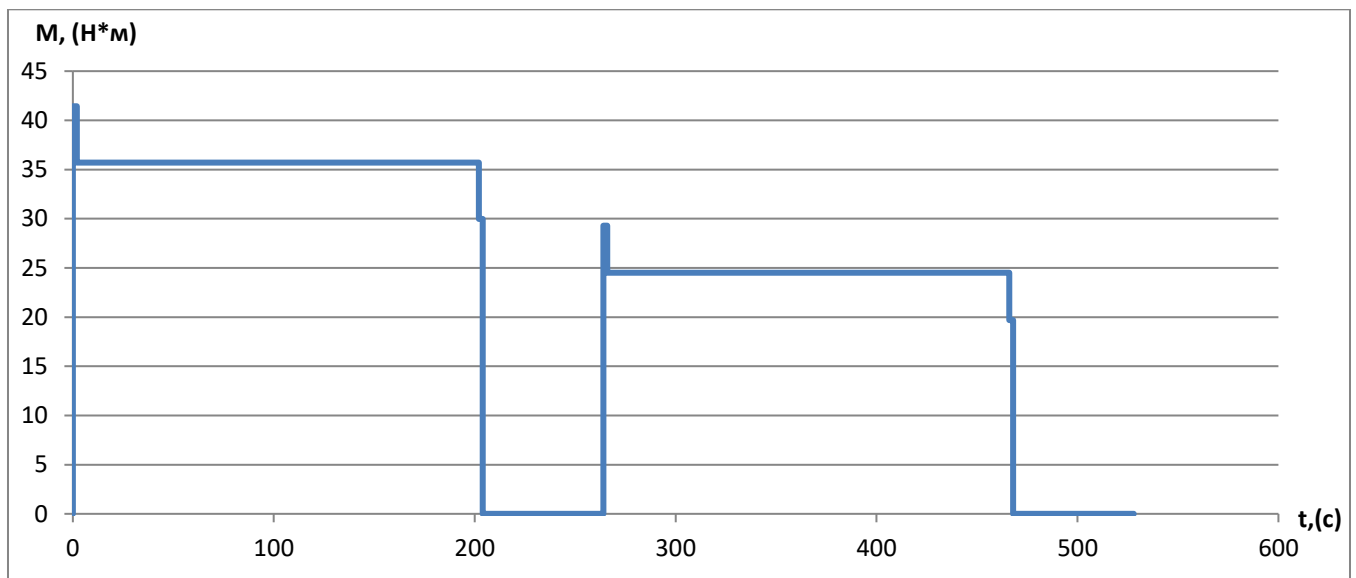


Рисунок 2.2 – Детальна навантажувальна діаграма

2.3 Перевірка попередньо обраного двигуна

Перевірка попередньо обраного двигуна по перевантажувальній здатності здійснюється по максимальному моменту $M_{\max}$, отриманому зі навантажувальної діаграми двигуна.

Максимальний момент за навантажувальною діаграмою дорівнює:

$$M_{\max} = M_{\text{с(зав)}} + M_{\text{дин роз (зав)}} = 35,7 + 5,73 = 41,43 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.32)$$

Номінальний момент двигуна становить 48,9 Н*м. Перевірка за максимальним моментом виконується.

Перевірка вибраного двигуна по нагріванню виконується методом еквівалентного моменту.

По навантажувальній діаграмі двигуна визначаються значення еквівалентного (середньоквадратичного) моменту M_e .

Для спрощення візуального сприйняття введемо проміжні значення:

$$M_{\Sigma \text{с}} = M_{\text{с(зав)}}^2 + M_{\text{с(розв)}}^2 = 35,7^2 + 24,5^2 = 1874,74 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2 \quad (2.33)$$

$$M_{\Sigma \text{роз}} = M_{\text{роз(зав)}}^2 + M_{\text{роз(розв)}}^2 = 41,43^2 + 29,3^2 = 2574,94 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2 \quad (2.34)$$

$$M_{\Sigma \text{гальм}} = M_{\text{гальм(зав)}}^2 + M_{\text{гальм(розв)}}^2 = 29,97^2 + 19,7^2 = 1286,3 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2 \quad (2.35)$$

Середньоквадратичний момент дорівнюватиме:

$$M_e = \sqrt{\frac{t_{\text{роз}} \cdot M_{\Sigma \text{роз}} + t_{\text{с}} \cdot M_{\Sigma \text{с}} + t_{\text{гальм}} \cdot M_{\Sigma \text{гальм}}}{2 \cdot (t_{\text{роз}} + t_{\text{с}} + t_{\text{гальм}})}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 2574,94 + 200 \cdot 1874,74 + 2 \cdot 1286,3}{2 \cdot (2 + 200 + 2)}} = 15,46 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.36)$$

Визначення зазначених величин виконується по наведеній раніше формулі. Варто пам'ятати, що при використанні зазначених формул при виборі двигуна для повторно-короткочасного режиму роботи, у знаменнику названих формул треба підсумувати всі проміжки часу, що входять у цикл роботи, за винятком часу пауз.

Для двигунів із самовентиляцією при зниженні швидкості погіршуються умови його охолодження. Тому реальне значення тривалості включення треба скорегувати:

$$\begin{aligned}
 TB' &= \frac{t_y + t_n + t_r}{t_y + \beta t_0 + \frac{\beta+1}{2}(t_n + t_r)} = \\
 &= \frac{400 + 4 + 4}{400 + 0,5 \cdot 120 + 0,75 \cdot (4 + 4)} = 0,87
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

Отримане значення еквівалентного (середньоквадратичного) моменту $M_{\text{ЕН}}$ слід привести до стандартного значення $TB_{\text{Н}}$ вибраного двигуна:

$$M_{\text{ЕН}} = M_{\text{е}} \cdot \sqrt{\frac{TB'}{TB_{\text{Н}}}} = 15,46 \cdot \sqrt{\frac{0,87}{1}} = 14,42 \text{ Н} \cdot \text{м}
 \tag{2.38}$$

Перевірку на нагрівання двигун проходить, оскільки:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{ЕН}} &\leq M_{\text{дв.ном}} \\
 14,42 &\leq 48,9
 \end{aligned}$$

За результатами двох перевірок робимо висновок, що двигун обрано правильно [8].

Висновки до розділу 2

1. В даному розділі були розраховані зусилля, які необхідно подолати двигуну для приведення візка до руху. На основі тягових розрахунків попередньо був обраний двигун. Даний тяговий розрахунок включає розрахунок опору коченню по прямих ділянках і по ділянках з нахилом. Аеродинаміним опором в даному випадку було знехтувано через низьку швидкість пересування візка, а також через неможливість визначення площі міделя.

Це необхідно для вибору двигуна з потужністю, яка була б достатньою для подолання даних протидіючих зусиль.

2. За результатами розрахунків був обраний редуктор (його передатне число та конструкція) та попередньо обраний двигун (розрахована попередня потужність двигуна).

При виборі враховувалися не лише зусилля, але й запас за потужністю, який дозволяє більш безпечно експлуатувати візок, оскільки потужніший двигун не так сильно грітиметься, що убезпечує обмотки від термічного руйнування.

Це необхідно для забезпечення заявлених експлуатаційних властивостей та довговічності модернізованого візка.

3. Для остаточного вибору електродвигуна були виконані перевірки за потужністю та моментом, за результатами яких зроблені висновки, що попередньо обраний двигун повністю задовольняє всі поставлені до нього вимоги. За результатами розрахунків був обраний двигун виробника ABB серії M3, модель M3AA 132MC 4 IE3 7.5 kw.

РОЗДІЛ 3 ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Відповідно до розрахунків в попередньому розділі обираємо двигун потужністю 37 кВт, який пройшов перевірки за моментом і потужністю. Обираємо двигун виробника ABB M3AA 132MC 4 IE3 7.5 kw в алюмінієвому корпусі для зниження маси готового виробу [9]. Основні дані двигуна наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри двигуна M3AA 225SMA 4 IE2 37 kw

Параметр	Значення
Потужність	7,5 кВт
Частота обертання умовна/фактична	1500/1465 об/хв
Напруга живлення	400 В
ККД	90,6%
Коефіцієнт потужності	0,81
Номінальна сила струму статора	14,7 А
Момент інерції ротора	0,0414 кг×м ²
Електромагнітний момент двигуна	48,9 Н*м
Режим роботи двигуна	S1
Тривалість включення	100%
Маса	68 кг

Відповідно до розрахунків у другому розділі обираємо редуктор з стандартним передатним числом 40. Обираємо редуктор 1Ц2У-200 [10], дані якого занесені в таблицю 3.2:

Таблиця 3.2 – Параметри редуктора 1Ц2У-200-40-23-У3

Параметр	Значення
Передатне число	40
Номінальний крутний момент на тихохідному валу	2500 Нм

Продовження таблиці 3.2

Маса редуктора	170 кг
ККД редуктора	97%
Конструктивне виконання	23

Для живлення двигуна і використаємо літій-іонну акумуляторну батарею напругою 540 В для забезпечення максимального рівня лінійної змінної напруги 380 В на виході інвертора. Такі батареї мають вищу енергетичну щільність, вищу напругу одного окремого акумулятора у порівнянні з літій-залізо-фосфатними батареями. На основі цих даних робимо висновок, що акумуляторна літій-іонна батарея аналогічної потужності і такою ж вихідною напругою матиме меншу масу за літій-залізо-фосфатний відповідник. Ємність акумулятора становитиме 100 кВт*год.

Інвертор обираємо за напругою «база-емітер» та тривало – допустимим струмом транзисторів. Номінальні діючі і амплітудні значення фазної напруги і струму статора: $U_n=220$ В, $U_{na}=310,3$ В, $I_n=14,7$ А, $I_{na}=20,8$ А.

Тривало – допустимий струм визначається як амплітудне значення номінального струму двигуна з запасом 30% [11]:

$$I_{\max} = k_n \times I_{na} = 1,3 \cdot 20,8 = 27,03 \text{ А} \quad (3.1)$$

Напруга «база-емітер» визначається як амплітудне значення лінійної напруги двигуна з запасом не менше 50% [11]:

$$U_{ce} = 1,5 \cdot U_{dc \max} = 1,5 \cdot 540 = 810 \text{ В} \quad (3.2)$$

Блоки транзисторів мають ряд стандартних напруг: 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В. З стандартного ряду обираємо блок з транзисторами на напругу 1200 В. [11] Обираємо модуль з 6 IGBT-транзисторів FP35R12KT4_B15 [12] на струм 35 А.

Для убезпечення інвертора від перевантажень і коротких замикань використаємо автоматичний вимикач. Номінальний струм теплової вставки визначається за формулою:

$$I_{dc} = \frac{k_p P_n}{U_{dcn} \eta_{iHB}} \cdot 1,25 = \frac{1,3 \cdot 7500}{540 \cdot 0,906 \cdot 0,97} \cdot 1,25 = 25,7 \text{ A} \quad (3.3)$$

де 1,25 – коефіцієнт запасу [11].

Відповідно до обчисленого значення обирає теплову вставку автомата 32 А. Обираємо автоматичний вимикач TOMZN TOB7Z-63 6kA [13] характеристики якого наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Параметри автоматичного вимикача TOMZN TOB7Z-63

Параметр	Значення
Номінальна напруга	600 В DC
Номінальний струм теплової вставки	32 А
Номінальний струм ел. магнітного розчеплювача	6 кА
Характеристика спрацювання	C

Висновки до розділу 3

1. На основі розрахунків у другому розділі обраний остаточно обраний двигун і визначені його параметри. За цими параметрами обираються перетворюючий пристрій (інвертор), автоматичний вимикач постійного струму і т.д.

Це необхідно для безпечного використання системи без перевантажень і пошкоджень відповідних силових елементів.

2. За результатами розрахунку параметрів різних силових елементів обираються відповідні пристрої з ідентичними або близькими до розрахункових параметрами.

Це забезпечує коректне виконання поставлених завдань системи.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Математичний опис

Для спрощення математичного опису асинхронного двигуна опис виконується в двофазному варіанті. Математичний опис двигуна матиме наступний вигляд [14]:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c - v\omega) \quad (4.1)$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) \quad (4.2)$$

$$i_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} \quad (4.3)$$

$$i_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} \quad (4.4)$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \quad (4.5)$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} \quad (4.6)$$

де ω – кутова швидкість ротора;

$(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (a-b);

$(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора;

$(\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплення ротора;

M – електромагнітний момент двигуна;

M_c – статичний момент на валу двигуна;

v – коефіцієнт в'язкого тертя.

Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб [14]:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} \quad (4.7)$$

$$\sigma = (L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}) \quad (4.8)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2} \quad (4.9)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \quad (4.10)$$

$$\mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2} \quad (4.11)$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – опори та індуктивності статора то ротора відповідно;

L_m – індуктивність намагнічуючого контуру;

J – повний момент інерції ротора;

p_n – кількість пар полюсів двигуна.

Алгоритм непрямого векторного керування швидкістю матиме в своєму складі регулятори швидкості, потокозчеплення та регулятори струму за координатами q і d (моментна та польова складові вектора струму статора). Відповідно матиме наступний вигляд:

- розімкнутий регулятор вектора потокозчеплення ротора [14]:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) \quad (4.12)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\psi^*} \quad (4.13)$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша та друга похідні відповідно;

i_{1d}^* – задане значення польової компоненти струму статора.

- регулятор струму по осі (d) (польової складової струму) [14]:

$$u_{1d} = \sigma(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + i_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d) \quad (4.14)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_d \quad (4.15)$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*) \quad (4.16)$$

де $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ – 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 регулятора струму;

$\dot{i}_{1d}^*$ – похідна від i_{1d}^* .

- регулятор кутової швидкості [14]:

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^*) \quad (4.17)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega} \quad (4.18)$$

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 швидкості.

- регулятор струму по осі (q) (моментної складової) [14]:

$$u_{1q} = \sigma(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + i_{1q}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q) \quad (4.19)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q \quad (4.20)$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega} + v \dot{\omega}^* \right) - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (4.21)$$

де $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ – похибка відпрацювання струму по осі (q);

u_{1q} – компонента вектора напруги статора по осі (q).

Фізичні напруги, що прикладаються до статорних обмоток двигуна описуються формулою [14]:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0(t) & -\sin \varepsilon_0(t) \\ \sin \varepsilon_0(t) & \cos \varepsilon_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

4.2 Розрахунок параметрів номінального режиму та схеми заміщення двигуна [11]:

Виконаємо розрахунок двигуна потужністю 7,5 кВт. Паспортні дані двигуна 4A132S4УЗ [15], аналогічного за потужністю та кількістю полюсів до обраного в попередньому розділі двигуна виробника АВВ при з'єднанні обмоток статора у зірку, наведені в таблиці 4.1. Синхронна частота обертання 1500 об/хв.

Таблиця 4.1 – Номінальні параметри двигуна 4A200M4УЗ

Параметри	Значення
Номінальна потужність	$P_{2H} = 7,5 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0,028 \text{ кг*м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 87,5\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi) = 0,86$
Перевантажувальна здатність	$m_k = 3$
Номінальне ковзання	$S_n = 0,029$
Критичне ковзання	$S_n = 0,195$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}'_1 = 0,085$
Активний опір статора	$\bar{r}'_1 = 0,041$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}''_2 = 0,13$
Приведений активний опір ротора	$\bar{r}''_2 = 0,033$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 3$

4.2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна [11]

Виконуємо розрахунок номінальних даних двигуна.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.23)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.24)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} \cdot (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0,029) = 152,45 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.25)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{7500}{152,45} = 49,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.26)$$

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

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 3 \cdot 49,2 = 147,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.27)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (4.28)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1 \text{ А} \quad (4.29)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310,3 \text{ В} \quad (4.30)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 15,1 = 21,36 \text{ А} \quad (4.31)$$

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

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310,3}{314} = 0,99 \text{ Вб} \quad (4.32)$$

4.2.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення [11]

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 4.1, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 4.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

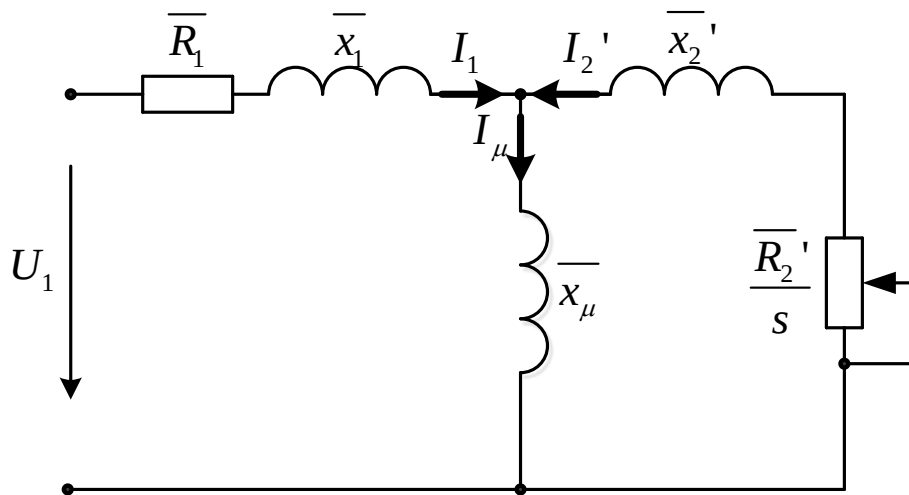


Рисунок 4.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

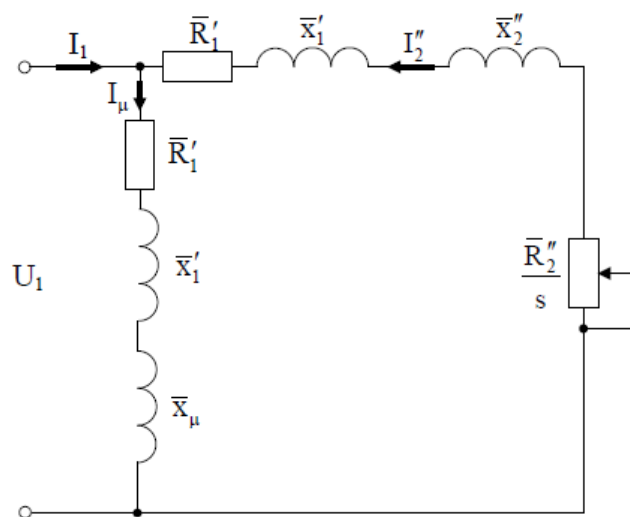


Рисунок 4.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4 \cdot \bar{x}_1' \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{3 + \sqrt{3^2 + 4 \cdot 0,085 \cdot 3}}{2 \cdot 3} = 1,03 \quad (4.33)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_1'}{c_1} = \frac{0,085}{1,03} = 0,082 \quad (4.34)$$

$$\bar{x}_2' = \frac{\bar{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0,13}{(1,03)^2} = 0,123 \quad (4.35)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0,041}{1,03} = 0,04 \quad (4.36)$$

$$\bar{R}_2' = \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0,033}{(1,03)^2} = 0,031 \quad (4.37)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,082 \cdot \frac{220}{15,1} = 1,19 \text{ Ом} \quad (4.38)$$

$$x_2' = \bar{x}_2' \times \frac{U_n}{I_n} = 0,122 \cdot \frac{220}{15,1} = 1,78 \text{ Ом} \quad (4.39)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,04 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,58 \text{ Ом} \quad (4.40)$$

$$R_2' = \bar{R}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,031 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,45 \text{ Ом} \quad (4.41)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 3 \cdot \frac{220}{15,1} = 43,71 \text{ Ом} \quad (4.42)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{0n}} = \frac{1,19}{314} = 0,0038 \text{ Гн} \quad (4.43)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_{0n}} = \frac{1,78}{314} = 0,0057 \text{ Гн} \quad (4.44)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{43,71}{314} = 0,14 \text{ Гн} \quad (4.45)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,14 + 0,0038 = 0,144 \text{ Гн} \quad (4.46)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0,14 + 0,0057 = 0,146 \text{ Гн} \quad (4.47)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів α , α_1 , σ , β , γ , μ_1 :

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0,45}{0,146} = 3,08 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.48)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,58}{0,0917} = 4,03 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.49)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0,144 \cdot \left(1 - \frac{0,14^2}{0,144 \cdot 0,146}\right) = 0,0097 \text{ Гн} \quad (4.50)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_1 \cdot \sigma} = \frac{0,14}{0,144 \cdot 0,0097} = 100,23 \frac{1}{\text{Гн}} \quad (4.51)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0,58}{0,0097} + 3,08 \cdot 0,14 \cdot 100,23 = 103,01 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.52)$$

$$\mu_1 = 1,5 \cdot \frac{L_m}{L_2} = 1,5 \cdot \frac{0,14}{0,146} = 1,44 \quad (4.53)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна 4A132S4Y3 зведені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри двигуна 4A132S4Y3

Параметри	Значення	Параметри	Значення
P_{2n} , кВт	7,5	R_1 , Ом	0,58
ω_{xx} , рад/с	157	R_2 , Ом	0,45
ω_n , рад/с	152,45	L_1 , Гн	0,144
M_n , Н·м	49,2	L_2 , Гн	0,146
M_k , Н·м	147,6	L_m , Гн	0,14
λ	3	α , Ом/Гн	3,08
I_{na} , А	21,35	α_1 , Ом/Гн	4,03
ψ_{1xx} , Вб	0,99	σ , Гн	0,0097
η	0,875	β , 1/Гн	100,23
$\cos \varphi$	0,86	γ , Ом/Гн	103,01
J_d , кг·м ²	0,028	μ_1	1,44

Висновки до розділу 4

1. В даному розділі викладений математичний опис двофазної моделі асинхронного двигуна в вигляді диференційних рівнянь. Даний опис є простішим за опис трифазної моделі і містить меншу кількість рівнянь, що сприяє зменшенню кількості можливих помилок в моделюванні. Дані для моделі взяті з аналогічного за свою потужністю двигуна серії 4А.

Це необхідно для створення математичної моделі двигуна, яка використовуватиметься для моделювання перехідних процесів, які можуть виникати при використанні реального двигуна.

2. Для даного двигуна був описаний алгоритм непрямого векторного керування швидкістю. Даний алгоритм дозволяє регулювати координати двигуна так само точно, як в двигунах постійного струму. Даний алгоритм містить не тільки регулятори, а ще й компенсації похідних за завданнями та компенсацію в'язкого тертя, що знижує похибки відпрацювання координат двигуном.

Це також необхідно для створення математичної моделі. Алгоритм забезпечуватиме необхідні якісні характеристики керування двигуном.

3. Для реалізації даного алгоритму були розраховані значення індуктивностей та опорів Т-подібної схеми двигуна, а також різні коефіцієнти, які також використовуються при описі математичної моделі двигуна і алгоритму векторного керування. Правильне виконання розрахунків і моделювання забезпечать результати, подібні до регуляторного керування двигуном постійного струму.

Це необхідно як для коректності роботи моделі двигуна, так і для алгоритму, оскільки алгоритм векторного керування включає відомості про двигун, чим і забезпечується точність регулювання.

РОЗДІЛ 5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

5.1 Обґрунтування принципу керування електроприводом

Для маневрового візка, де ключовими вимогами є висока точність керування рухом, швидка реакція на команди та стабільна робота в усьому діапазоні швидкостей, включно з низькими та нульовими значеннями, векторне керування асинхронним двигуном є беззаперечно найкращим вибором. Його перевага стає особливо очевидною при порівнянні з іншими поширеними методами керування.

На відміну від простого скалярного керування (V/f), яке підтримує лише стаке співвідношення напруги до частоти, векторне керування забезпечує значно вищий рівень контролю над двигуном. Скалярний метод, через непрямий зв'язок між частотою та швидкістю, а також вплив ковзання, не може гарантувати високої точності відпрацювання заданої швидкості або моменту. Особливо це проявляється при змінних навантаженнях, що є типовим для маневрового візка, та на низьких швидкостях, критично важливих для точного маневрування. Динамічна реакція скалярного керування також є недостатньо швидкою для оперативного реагування на команди оператора.

Векторне керування, натомість, забезпечує незалежне керування магнітним потоком та моментом двигуна шляхом розкладання струмів статора на ортогональні складові. Це дозволяє контролювати момент і швидкість з високою точністю, аналогічно керуванню двигуном постійного струму з незалежним збудженням. Завдяки цьому, маневровий візок, оснащений векторним керуванням, демонструє швидко динамічну реакцію на зміну заданої швидкості або навантаження. Стабільна робота на низьких швидкостях, включно з можливістю точного утримання позиції при нульовій швидкості, є ще однією важливою перевагою для маневрових операцій.

5.2 Структурно-параметричний синтез системи керування [14]

Як вже було зазначено, в даному проекті для керування двигуном застосовується алгоритм непрямого векторного керування швидкістю. Даний алгоритм передбачає розділення потокозчеплення і моменту. Структурна схема даного алгоритму матиме вигляд:

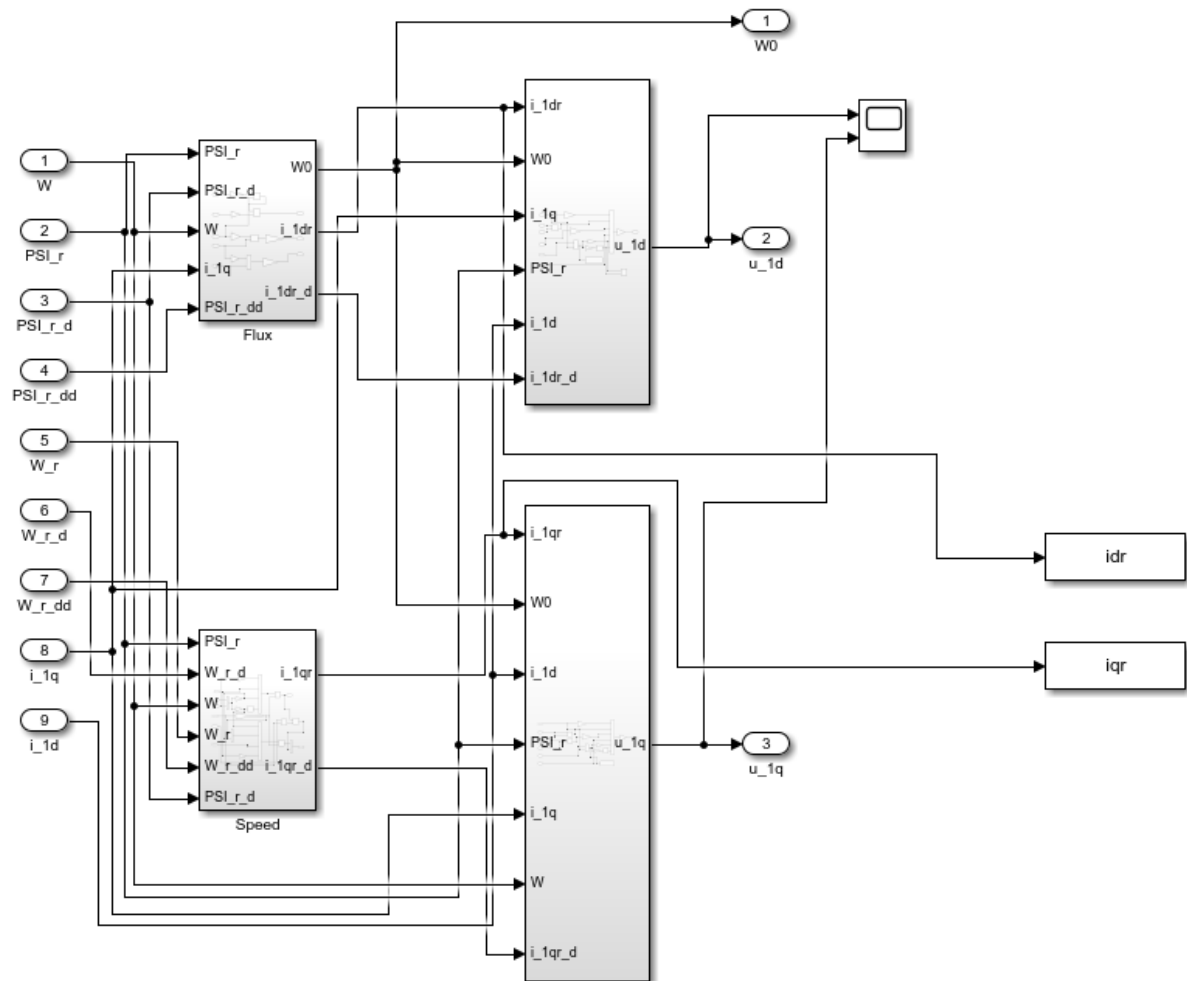


Рисунок 5.1 – Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування швидкістю

Як видно на рисунку 5.1, алгоритм містить 4 регулятори:

1) Регулятор потокозчеплення:

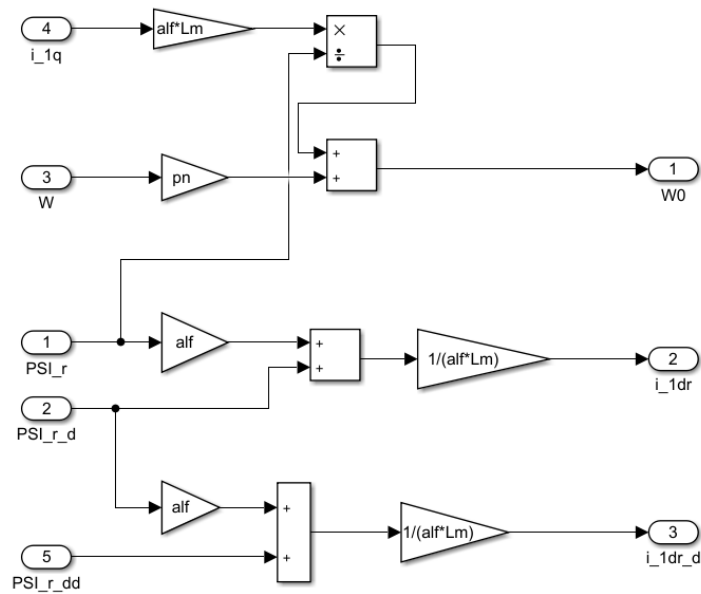


Рисунок 5.2 – Внутрішня структура регулятора потокозчеплення

В даному регуляторі забезпечується полеорієнтування (вихідна величина ω_0). Ця величина визначає швидкість, з якою обертається магнітне поле статора.

Також в даному регуляторі формуються завдання полеутворюючого струму і першої його похідної. Ці величини використовуються в регуляторі поле утворюючого струму: сам струм порівнюється з відповідним струмом в двигуні, а похідна використовується для компенсації, зменшуючи похибку в перехідних процесах даного компоненту струму.

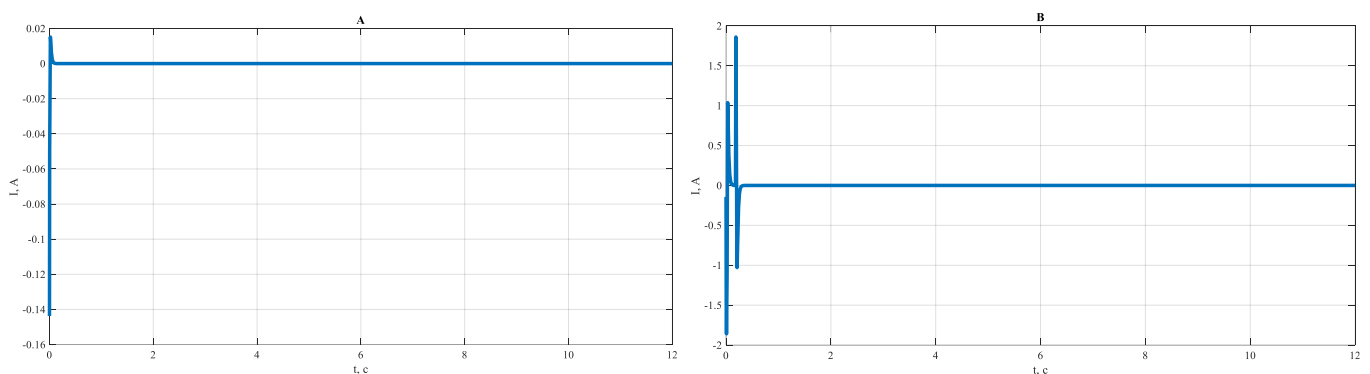


Рисунок 5.3 – Похибки відпрацювання полеутворюючих струмів:

А – з врахуванням похідної;

В – без врахування похідної.

Рисунок 5.3 доводить, що врахування похідної за завданням поле утворюючого струму значно покращує якість перехідних процесів за цим компонентом струму.

2) Регулятор швидкості:

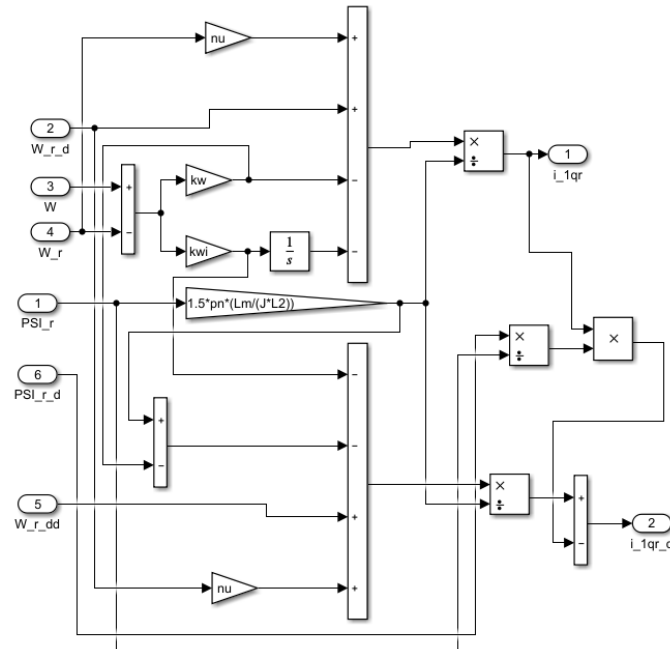


Рисунок 5.4 – Внутрішня структура регулятора швидкості

В даному регуляторі на основі порівняння швидкостей завдання і двигуна формується завдання моментоутворюючого струму, а також похідна а цим завданням. Також регулятор включає похідну за завданням швидкості та компенсацію в'язкого тертя для підвищення точності відпрацювання швидкості та зменшення значень динамічних похибок.

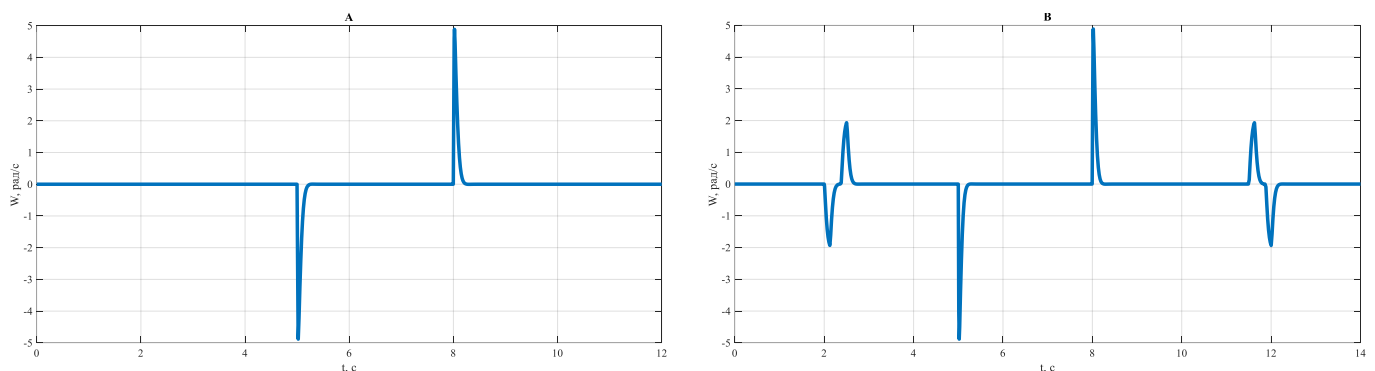


Рисунок 5.5 – Похибки відпрацювання швидкості

А – з врахуванням похідних;

В – без врахування похідних.

Рисунок 5.5 також демонструє відмінності в якості відпрацювання швидкості з врахуванням та без врахування похідних за завданням швидкості. У випадку нехтування цими похідними похибки виникають не лише при стрибкоподібному накиданні статичного моменту, а й при розгоні та сповільненні.

Нехтування ж похідною за завданням моментотворюючих струмів призводить до погіршення якості перехідних процесів за відповідною компонентою струму.

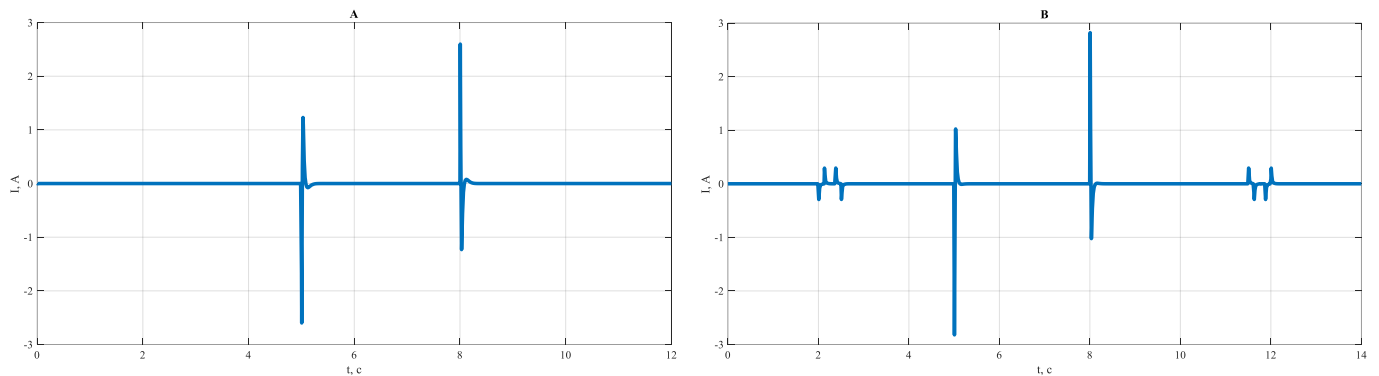


Рисунок 5.6 – Похибки відпрацювання моментотворюючих струмів

А – з врахуванням похідної;

В – без врахування похідної.

Як і в решті випадків, перехідні процеси значно погіршуються при нехтуванні похідною за завданням.

3) Регулятор полеутворюючої складової струму:

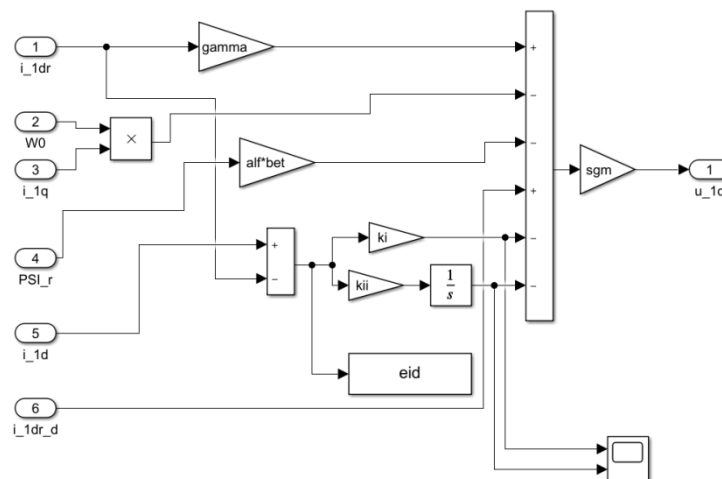


Рисунок 5.7 – Внутрішня структура регулятора полеутворюючого струму

Даний регулятор призначений для порівняння полеутворюючої складової струму двигуна і завдання і формування керуючого впливу (напруги) U_d .

4) Регулятор моментоутворюючого струму забезпечує відпрацювання відповідної складової струму і формує керуючий вплив U_q .

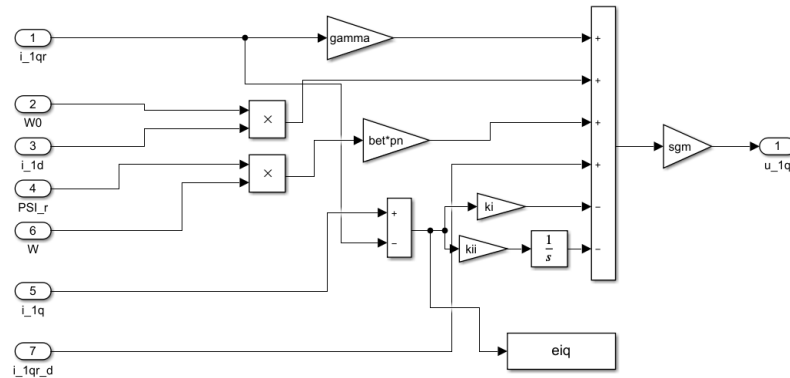


Рисунок 5.8 – Внутрішня структура регулятора моментоутворюючого струму

Даний регулятор призначений для порівняння моментоутворюючої складової струму двигуна і завдання і формування керуючого впливу (напруги) U_q .

5.3 Розрахунок параметрів регуляторів та зворотних зв'язків [11]

Задане значення максимального відхилення швидкості при дії постійного момента навантаження. $\omega = 7,7$ рад/с (5% від ω_n). З цього випливає що налаштування пропорційної складової регулятора швидкості становитиме:

$$k_{\omega} = \frac{M_n}{J\tilde{\omega}} = \frac{49,2}{0,086 \cdot 7,7} = 74,3 \text{ с}^{-1} \quad (5.1)$$

Далі прийнято, що помилка відпрацювання швидкості не повинна мати перерегулювань, тому:

$$k_{\omega i} = \frac{k_{\omega}^2}{4} = 1380,12 \quad (5.2)$$

Для визначення налаштувань контуру регулювання струму знайдено значення частоти недемпфованих коливань контуру регулювання швидкості $\omega_{0\omega} = \sqrt{k_{\omega i}} = 37,15$ рад/с та прийнято коефіцієнт розділення $\varepsilon = 3$, звідки випливає, що частота недемпфованих коливань контурів регулювання струму дорівнює:

$$\omega_{0i} = \varepsilon \omega_{0\omega} = 3 \cdot 37,15 = 111,45 \text{ рад/с.} \quad (5.3)$$

Тому налаштування інтегральної складової регуляторів струму буде:

$$k_{ii} = \omega_{0i}^2 = 12421,1. \quad (5.4)$$

Задаючись тим, що коефіцієнт згладжування коливань може бути прийнятим $\xi=0,707$ (в перехідних процесах будуть перерегулювання), то коефіцієнт пропорційної складової регуляторів струму буде:

$$k_i = \sqrt{2k_{ii}} = \sqrt{2 \cdot 12421,1} = 157,6 \text{ с}^{-1} \quad (5.5)$$

Висновки до розділу 5

1. В даному розділі аргументовано вибір алгоритму керування двигуном з порівнянням з іншими стандартними алгоритмами керування швидкістю асинхронного двигуна.

Це необхідно для визначення найбільш підходящого для виконання задач алгоритму керування, який би забезпечував не лише задану швидкість, а й необхідний електромагнітний момент.

2. Був викладений детальний опис алгоритму непрямого векторного керування швидкістю та описані основні компоненти та був продемонстрований їх вплив на якість керування.

Це необхідно для більш глибокого розуміння впливу різних складових регуляторів на перехідні процеси. Результати цього розділу враховуватимуться при моделюванні.

3. Були розраховані пропорційні та інтегральні складові регуляторів струму і швидкості відповідно до необхідних якісних показників перехідних

процесів за швидкістю та струмом. Це необхідно для визначення величини перерегулювання в перехідних процесах та обмеження динамічних похибок на певному заданому значенні.

За результатами даного розділу створюватиметься математична модель двигуна з відповідним алгоритмом керування, де враховуватимуться конкретні налаштувальні параметри регуляторів.

РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В даній роботі досліджується непряме векторне керування швидкістю, тому механічні характеристики двигуна будуть абсолютно жорсткими, тобто паралельні осі моменту двигуна (див. рис. 6.1).

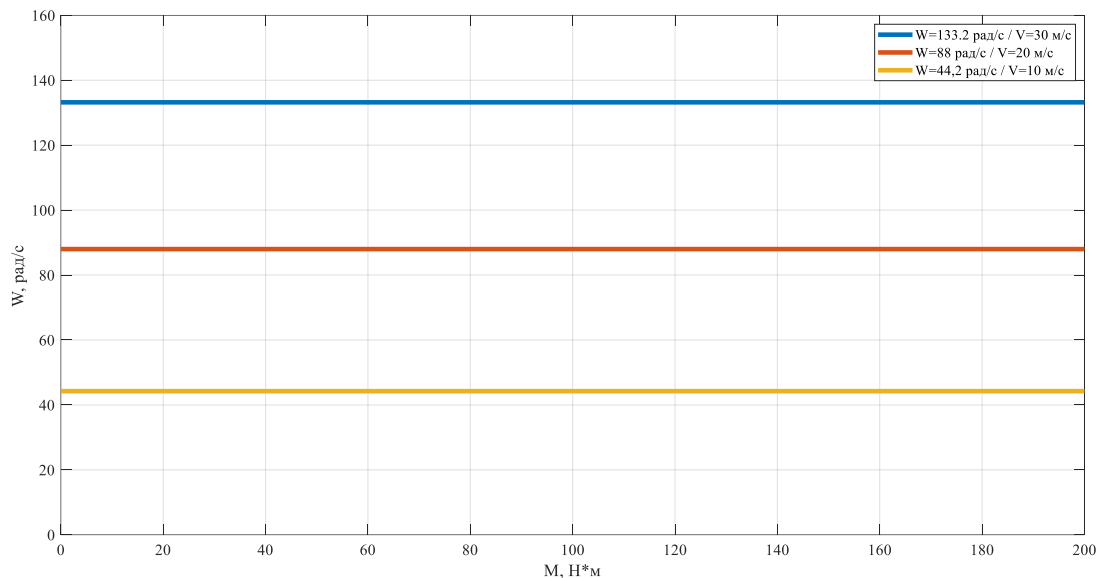


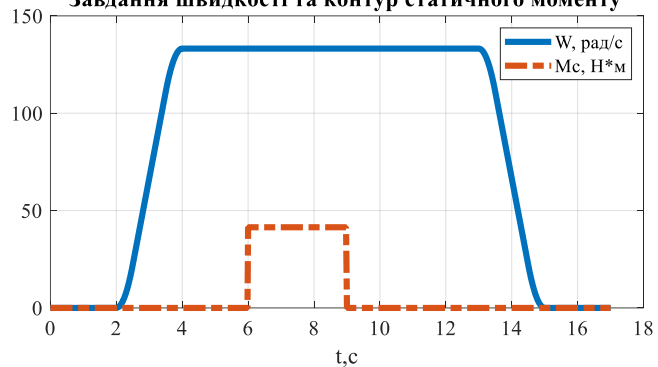
Рисунок 6.1 – Абсолютно жорсткі механічні характеристики двигуна

Представлені механічні характеристики відповідають тим, які мають бути при векторному керування швидкістю. Також з отриманих статичних характеристик можна зробити висновок, що двигун при алгоритмі векторного керування здатен витримувати статичний момент значно більший за критичний без зниження швидкості.

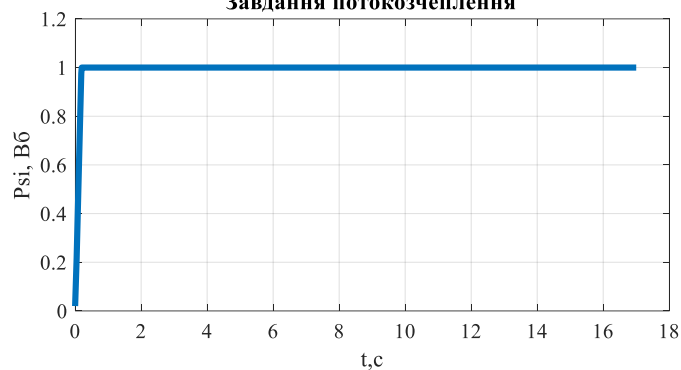
Динамічні характеристики двигуна відображатимуть якість перехідних процесів при накиданні і скиданні навантаження, а також відпрацювання швидкості при різних умовах.

При накиданні і скиданні статичного навантаження за сталої швидкості матимемо наступні динамічні характеристики:

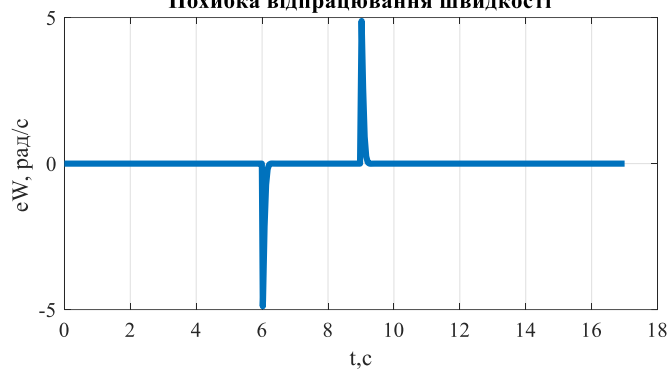
Завдання швидкості та контур статичного моменту



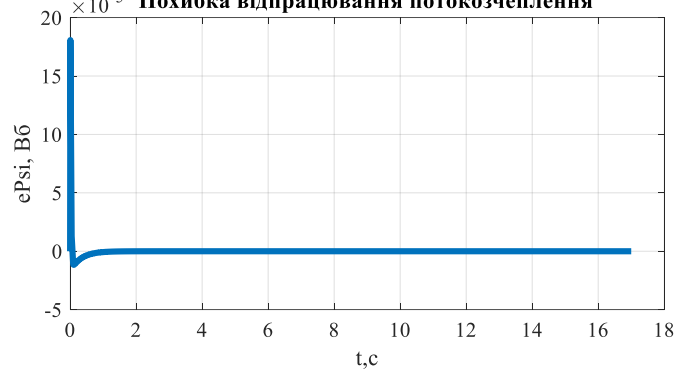
Завдання потокозчеплення



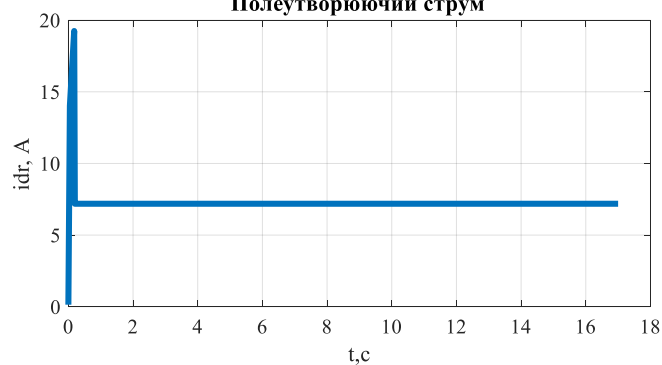
Похибка відпрацювання швидкості



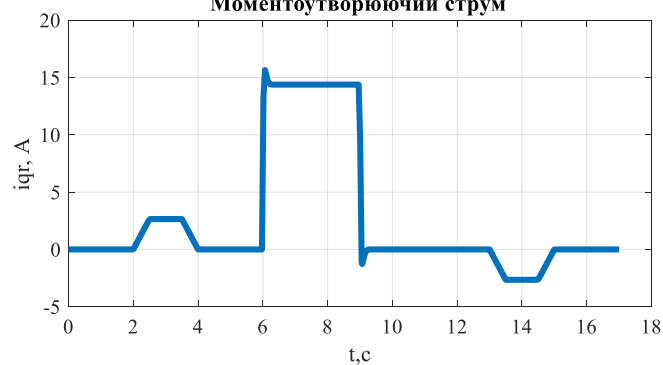
Похибка відпрацювання потокозчеплення



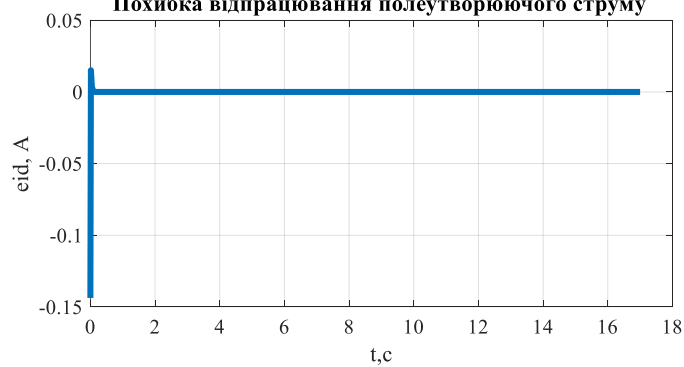
Полеутворюючий струм



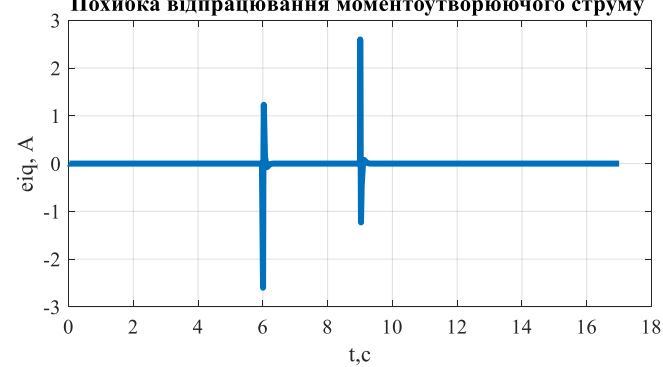
Моментотворюючий струм

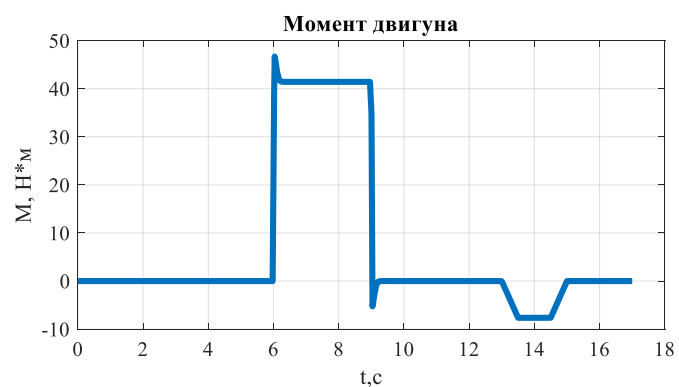
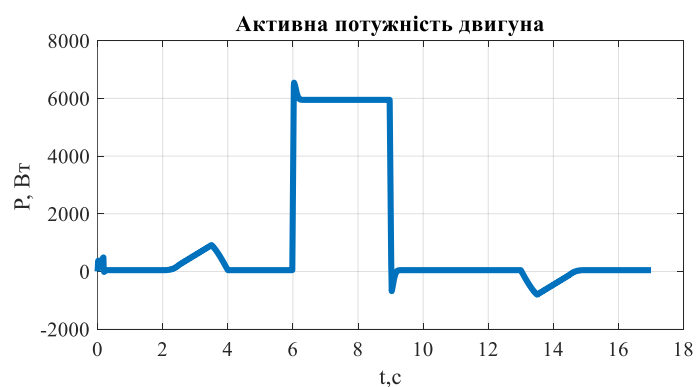
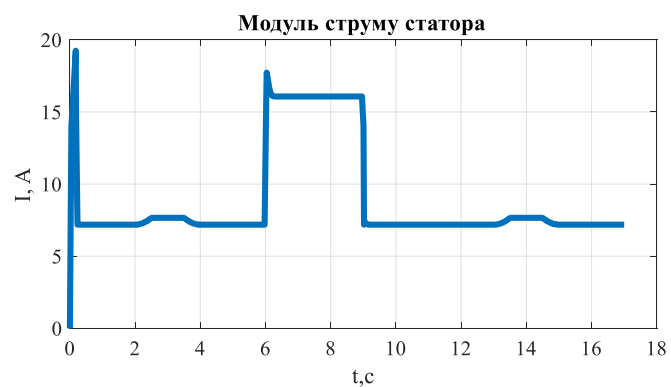
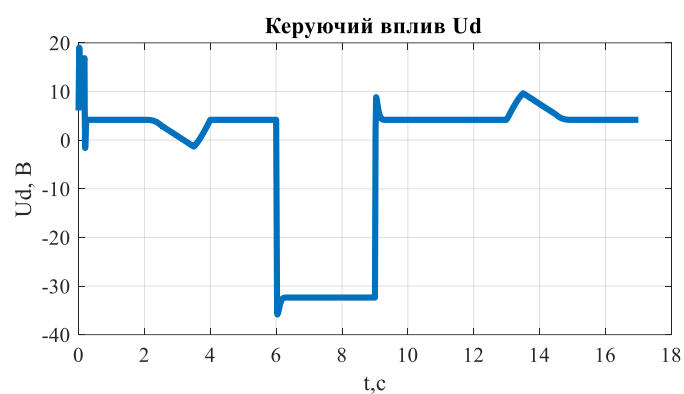


Похибка відпрацювання полеутворюючого струму



Похибка відпрацювання моментотворюючого струму





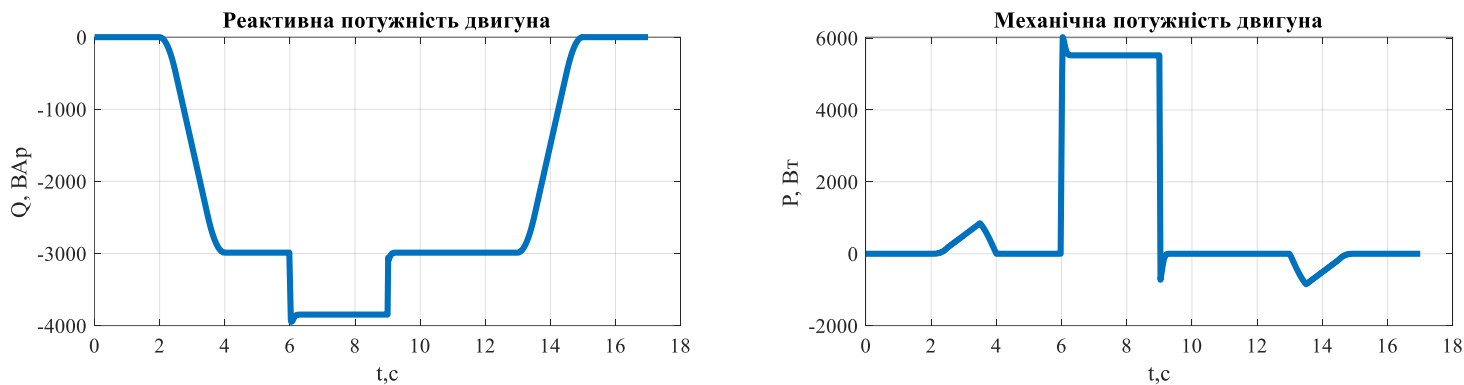


Рисунок 6.2 – Перехідні процеси двигуна при накиданні та скиданні навантаження при сталій швидкості

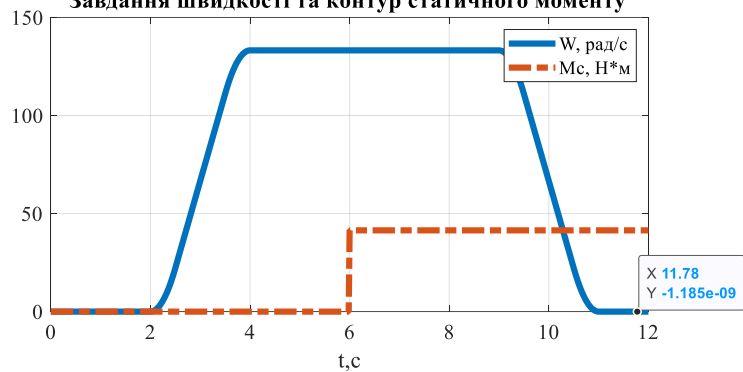
Відповідно до розрахунків коефіцієнтів регуляторів, похибка відпрацювання швидкості та характер перехідного процесу відповідають тим, що передбачалися розрахунками. Перехідні процеси за струмом також відповідають розрахункам.

Компенсації похідних за швидкістю усуває похибки в перехідних процесах розгону і гальмування. Також відсутність похибок при розгоні і гальмуванні зумовлена тривалістю розгону та сповільнення.

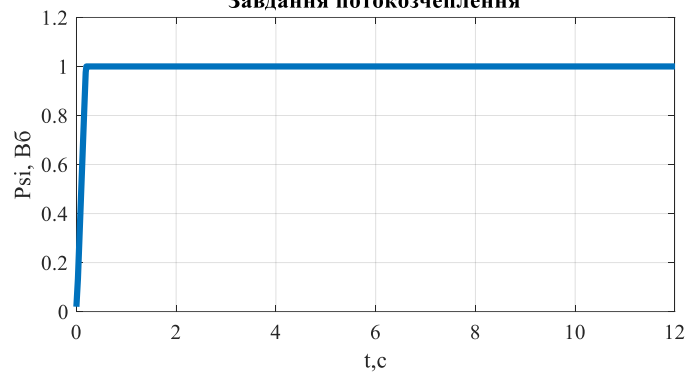
Напруга на виході інвертора дещо перевищує розрахункове значення в 311 В в моменти прикладання навантаження. Варіантом вирішення цієї проблеми може бути зниження швидкості. Також варто зазначити, що моделювання проводиться з прикладанням номінального моменту двигуна, який є більшим за максимальне значення необхідного крутного моменту відповідно до розрахунків, що також впливає на модуль напруги на виході інвертора.

При гальмуванні з прикладеним статичним моментом отримаємо наступні перехідні процеси:

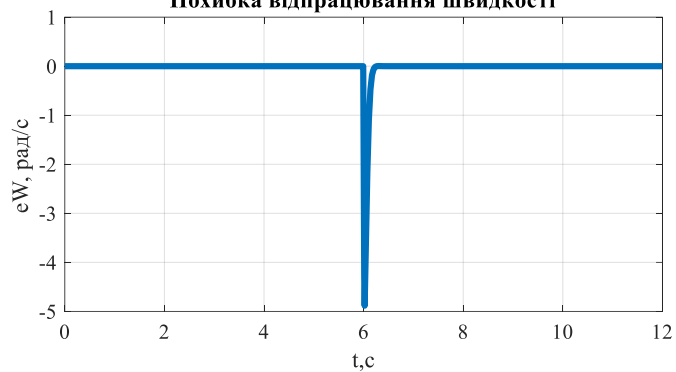
Завдання швидкості та контур статичного моменту



Завдання потокозчеплення



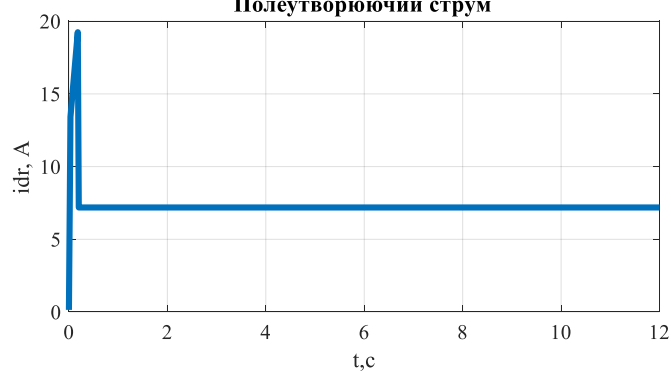
Похибка відпрацювання швидкості



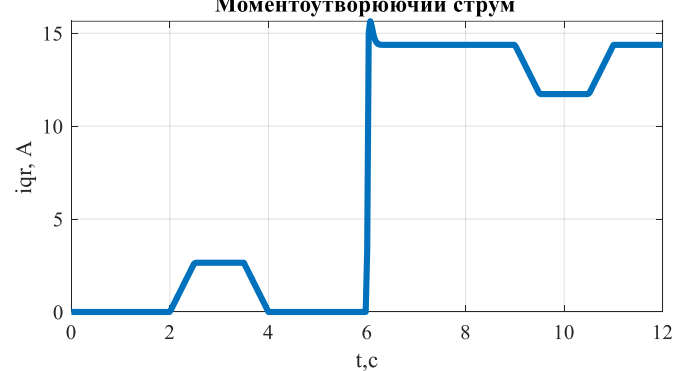
Похибка відпрацювання потокозчеплення



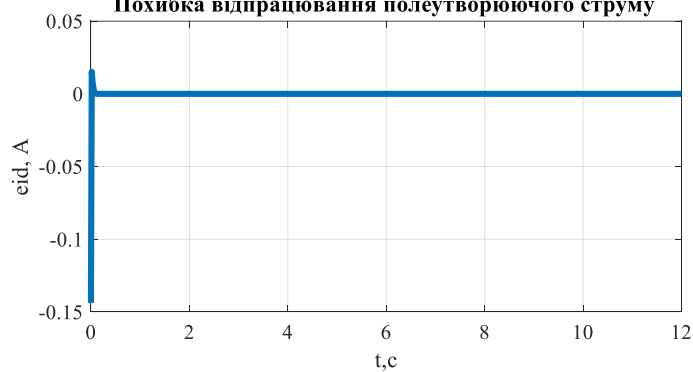
Полеутворюючий струм



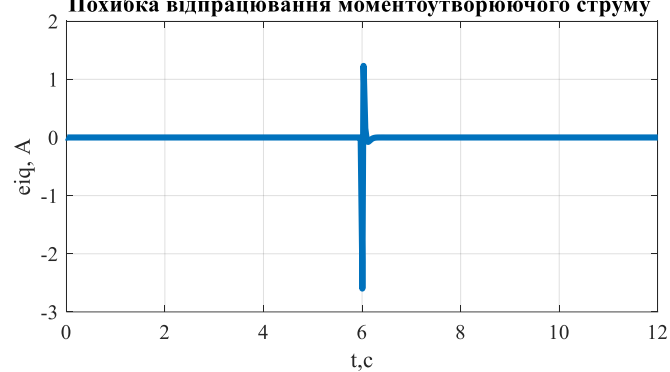
Моментутоворюючий струм

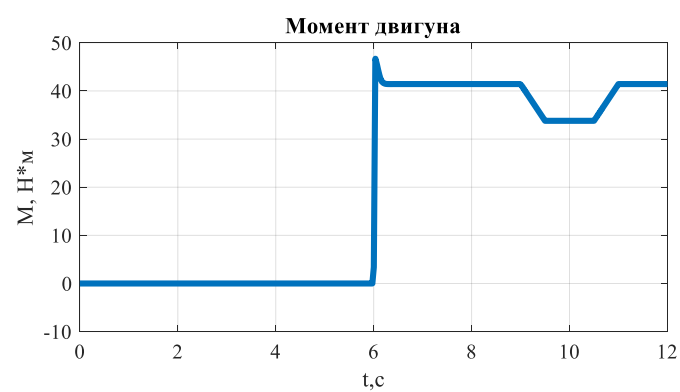
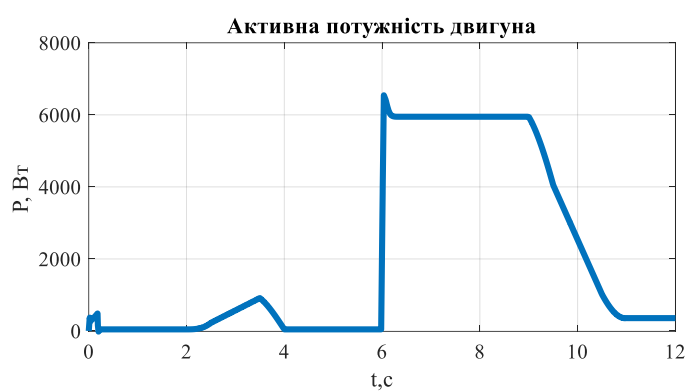
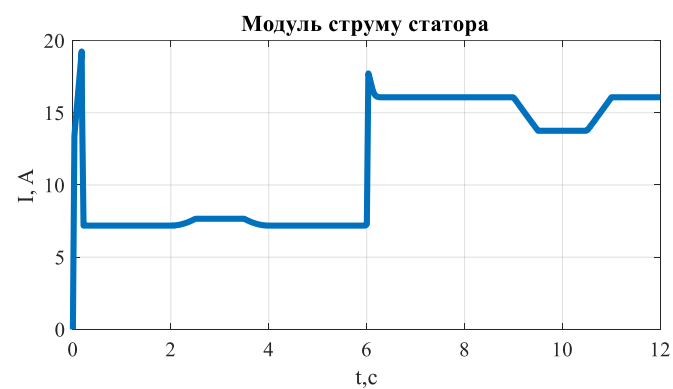
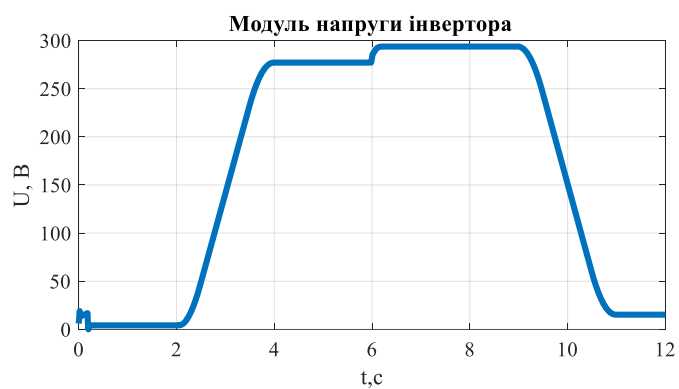
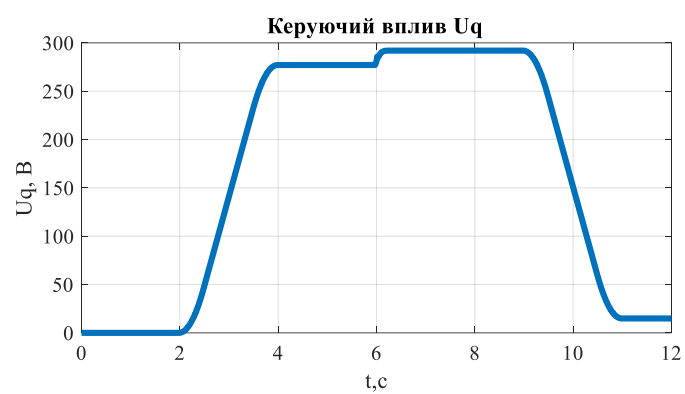


Похибка відпрацювання полеутворюючого струму



Похибка відпрацювання моментутоворюючого струму





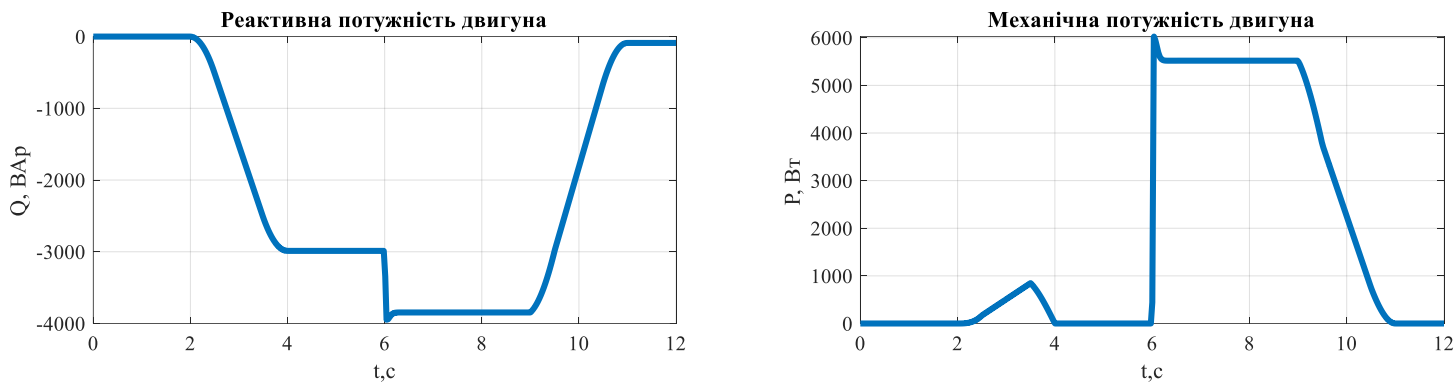


Рисунок 6.3 – Динамічні характеристики при гальмуванні під навантаженням

За результатами моделювання видно, що візок повністю відпрацьовує нульове завдання навіть під навантаженням. Похибка виникає лише в момент зняття навантаження.

В цілому за результатами моделювання можна зробити висновок, що при виконанні покладених на даний візок завдань напруга на виході інвертора і струм статора не перевищуватимуть номінальних параметрів, що підтверджує правильність вибору двигуна.

Висновки до розділу 6

Даний розділ присвячений моделюванню роботи двигуна в різних режимах для дослідження властивостей обраного асинхронного двигуна з векторним керуванням.

В ході моделювання було визначено, що двигун здатен тримати сталу швидкість під навантаженням, яке перевищує критичний момент двигуна. Щодо динамічних властивостей системи, то перехідні процеси за швидкістю під час розгону та сповільнення проходять без похибок, що може бути наслідком вводу компенсацій за похідними завдання швидкості. Перехідні процеси під час прикладання навантаження, а саме динамічні похибки – перебувають в дозволених межах. Самі ж перехідні процеси є монотонними. Це доводить, що коефіцієнти регулятора обрані правильно.

Також була досліджена здатність двигуна тримати номінальний момент при нульовій швидкості та в процесі гальмування. Даний дослід показав, що двигун і алгоритм повністю виконує поставлені задачі.

РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для виконання системи автоматизації необхідно обрати елементи керування цією системою. Це датчики, контролери, частотні перетворювачі. Схематичне зображення розташування датчиків в візку наведено на рисунку 7.1.

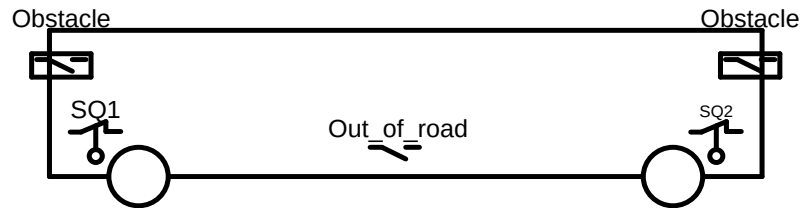


Рисунок 7.1 – Розташування датчиків

7.1 Датчики

Для автоматизації цехового маневрового візка необхідно використати датчики для виявлення перешкод на дорозі та датчик для визначення маршруту. Для обмеження руху візка вздовж заданої траєкторії руху використовуються кінцеві вимикачі (в якості запобіжного механізму).

1) Датчики для виявлення перешкод на дорозі

З цією метою використаємо дискретні ультразвукові датчики RU50U-S18-AP8X-H1141. Характеристики даних датчиків наведено в таблиці 7.1. Перевагою даного датчика над інфрачервоними і мікрохвильовими аналогами є можливість точної роботи за будь-якого рівня освітлення і запиленості а також робота на визначеній відстані і в чітко визначеному напрямку. Недоліком такого датчика є доволі вузький кут огляду [15].

Таблиця 7.1 – Параметри датчика наближення RU50U-S18-AP8X-H1141

Робоча відстань	50...500 мм
Роздільна здатність	0.2 мм
Робоча напруга живлення	15...30 VDC
Стан виходу	NO
Вихідний сигнал	PNP

Продовження таблиці 7.1

Електричне підключення	Кабель
Довжина кабелю	2 метри
Ступінь захисту	IP67

Для автоматизації даного візка буде використано 12 датчиків. По 4 спереду і ззаду для виявлення перешкод безпосередньо на шляху. І по 2 датчики по кутках для виявлення перешкод по краях дороги. Розташування датчиків наведено на рисунку 7.1.

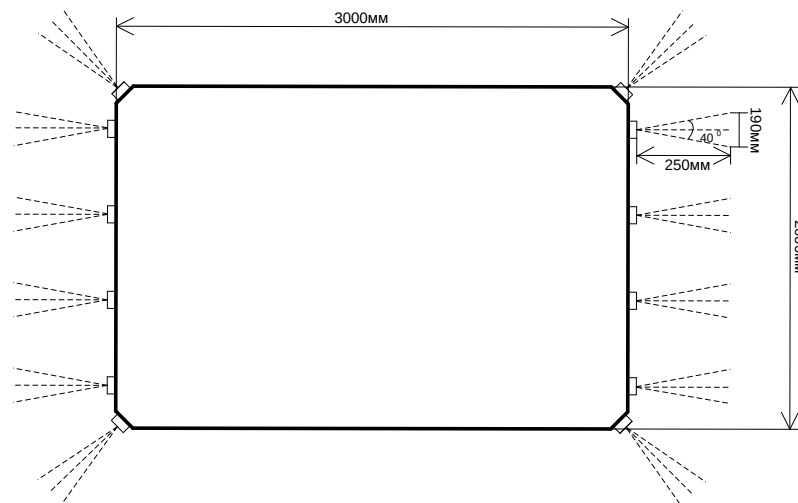


Рисунок 7.2 – Схематичне зображення візка з розташуванням датчиків виявлення перешкод

2) Датчик для визначення маршруту

В якості такого датчика буде використовуватися індукційний дискретний датчик LJ12A3-4-Z/BY PNP, який буде орієнтуватися за прокладеним по дорозі сталевим дротом. Характеристики датчика наведені в таблиці 7.2 [16].

Таблиця 7.2 – Параметри індуктивного датчика LJ12A3-4-Z/BY PNP

Напруга живлення	6-36 VDC
Тип виходу	PNP
Нормальний стан виходу	NO
Підключення	Кабель 1м
Частота спрацювання	10-55Гц
Відстань спрацювання	4 мм

3) Кінцеві вимикачі

Для обмеження руху візка вдовж шляху використаємо роликові кінцеві вимикачі L52K13MEM121. Датчик встановлюється на візок, а на кінцях дороги встановлюються опори, які замикатимуть ці вимикачі. Характеристики даних кінцевих вимикачів наведені в таблиці 7.3 [17].

Таблиця 7.3 – Параметри кінцевого вимикача L52K13MEM121

Номінальний струм	3 А
Допустима частота комутацій	до 3000 циклів/год
Механічна зносостійкість	10 млн циклів
Нормальний стан контактів	1 NO та 1 NC
Ступінь захисту	IP65

7.2 Пристрої керування

Для керування рухом візка будуть використовуватися інвертор та програмований логічний контролер АВВ АС500-еСо. Для керування використовуватимемо тактові кнопки для ручного керування, кнопки з фіксацією для реалізації функцій аварійної зупинки і активації автоматичного режиму роботи.

1) Програмований логічний контролер

Для керування частотним перетворювачем використаємо АВВ АС500-еСо Standard (стандартна конфігурація). Даний контролер має достатньо дискретних входів для забезпечення керування, а також надає змогу керувати частотним перетворювачем через Ethernet або Modbus. Параметри даного ПЛК наведені в таблиці 7.5 [18].

Таблиця 7.5 – Параметри ПЛК АВВ АС500-еСо Standard

Напруга живлення	24 VDC або 230 VAC
Цифрові входи	24 (24 VDC)
Цифрові виходи	16

Продовження таблиці 7.5

Комунікаційні інтерфейси	RS-485, Ethernet, CANopen, Modbus TCP
Можливість використання додаткових модулів	Так
Підтримка CoDeSys	Так

Для керування використовуватимемо кнопки тактові (для ручного керування переміщенням), кнопки з фіксацією (для аварійної зупинки і перемикавання режимів керування). Для світло звукової сигналізації використаємо Сигналізатор звуковий (зумер) 22мм червоний LED 24V AC/DC [XB5KS2B4] Harmony XB5 Schneider Electric.[19]

7.3 Програма для ПЛК

Проектований візок матиме два режими роботи: ручний (тобто керування з пульта) та автоматичний (автоматичний рух між 2 станціями з очікуванням на завантаження та розвантаження по 1 хв). В ручному режимі візок керуватиметься за допомогою кнопок «Forward» і «Backward», а в автоматичному режимі при затисканні кнопки «Auto» і орієнтуватиметься за індуктивним датчиком. Датчики наявності перешкод зупинятимуть візок і вмикатимуть світло шумову сигналізацію у будь-якому випадку.

Синтез програми для автоматичного режиму виконуємо методом графо переходу. Цей метод підходить для повністю автоматизованих і навіть циклічних процесів. Для такого методу програмування використовуються RS-тригери – найпростіші запам'ятовуючі прилади, які за сигналом Set змінюють вихідний сигнал на логічну одиницю, а за сигналом Reset – на логічний нуль.

Система матиме наступні вхідні сигнали:

Emergency – аварійна зупинка;

Forward – команда на рух вперед;

Backward – команда на рух назад;

SQ1 – кінцевий вимикач крайнього лівого положення;

SQ2 – кінцевий вимикач крайнього правого положення;

Auto – команда на ввімкнення автоматичного режиму роботи;

Obstacle – сигнал з датчиків наявності перешкод;

Out_of_road – сигнал з індуктивного датчика (сигнал про сходження з маршруту).

Система матиме такі вихідні сигнали:

Front – команда на рух вперед;

Back – команда на рух назад;

Caution – сигнал про заваду або сходження з шляху;

Кнопка аварійної зупинки і кінцеві вимикачі мають нормально-закриті контакти.

Ручний режим

На основі опису принципу роботи схеми складаємо програму на мові LD.

Складаємо логічні рівняння, що описують ручний режим керування:

$$Front = Emergency \cdot Forward \cdot (\overline{Backward} + Front) \cdot SQ2 \cdot \overline{Auto} \cdot \overline{Obstacle} \quad (7.1)$$

$$Back = Emergency \cdot (\overline{Forward} + Back) \cdot Backward \cdot SQ1 \cdot \overline{Auto} \cdot \overline{Obstacle} \quad (7.2)$$

$$Caution = Obstacle + (Auto \cdot \overline{Out}) \quad (7.3)$$

Програма матиме вигляд:

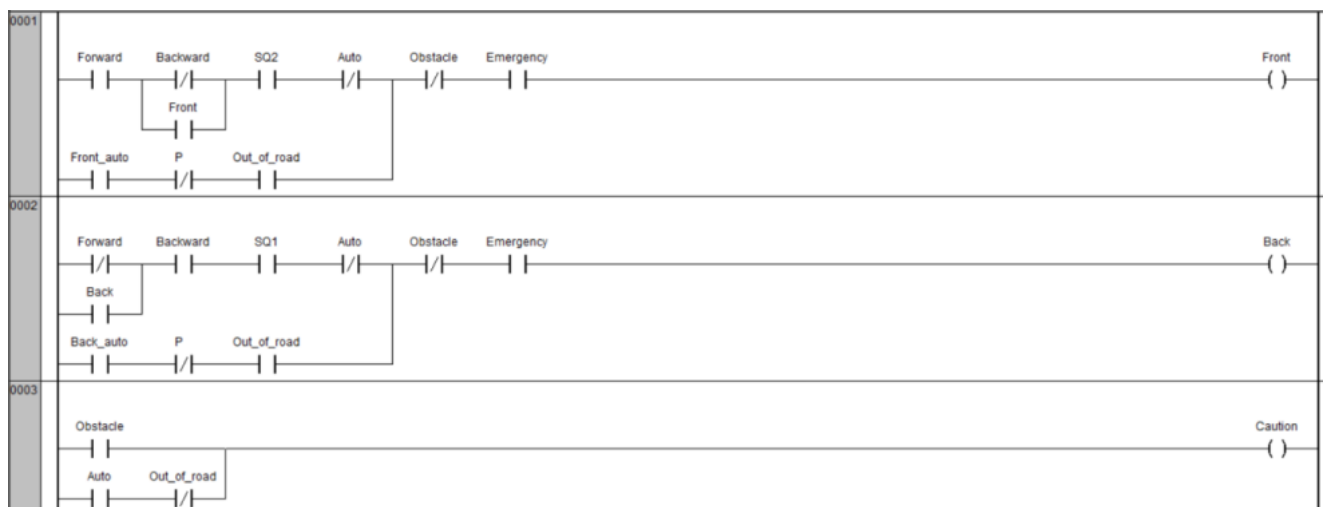


Рисунок 7.3 – Фрагмент програми, що описує ручне керування

Автоматичний режим

Програму для автоматичного режиму складаємо за графо переходом. Графопереходи матимуть вигляд:

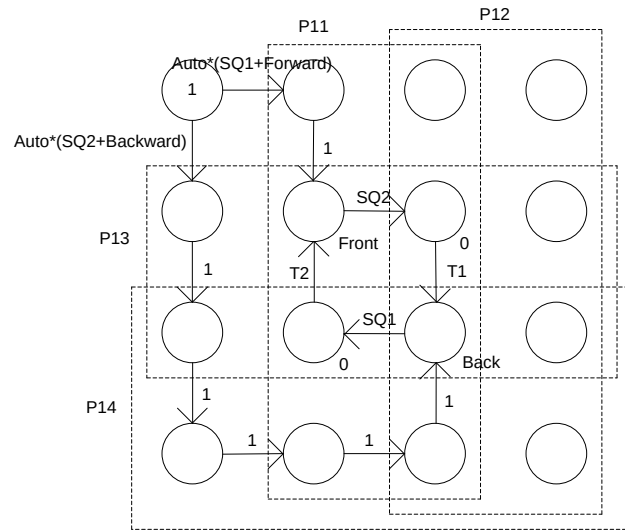


Рисунок 7.4 – Графоперехід, що описує роботу візка в автоматичному режимі

За графопереходом складаємо логічні рівняння:

$$S_{p11} = Auto \cdot (\overline{SQ_1} + Forward) \cdot \overline{P_{12}} \cdot \overline{P_{13}} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} + \overline{P_{12}} \cdot \overline{P_{13}} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} \quad (7.4)$$

$$S_{p12} = \overline{SQ_2} \cdot P_{11} \cdot P_{13} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} + P_{11} \cdot \overline{P_{13}} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} \quad (7.5)$$

$$S_{p13} = Auto \cdot (\overline{SQ_2} + Backward) \cdot \overline{P_{11}} \cdot \overline{P_{12}} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} + P_{11} \cdot \overline{P_{12}} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} + P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} \quad (7.6)$$

$$S_{p14} = \overline{P_{11}} \cdot \overline{P_{12}} \cdot P_{13} \cdot \overline{P} + T_1 \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot \overline{P} \quad (7.7)$$

$$R_{p11} = \overline{Auto} + \overline{Emergency} \quad (7.8)$$

$$R_{p12} = \overline{SQ_1} \cdot P_{11} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} + \overline{Auto} + \overline{Emergency} \quad (7.9)$$

$$R_{p13} = \overline{P_{11}} \cdot \overline{P_{12}} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} + \overline{Auto} + \overline{Emergency} \quad (7.10)$$

$$R_{p14} = T_2 \cdot P_{11} \cdot \overline{P_{12}} \cdot P_{13} \cdot \overline{P} + \overline{Auto} + \overline{Emergency} \quad (7.11)$$

$$T_{11} = P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} \quad (7.12)$$

$$T_{12} = P_{11} \cdot \overline{P_{12}} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} \quad (7.13)$$

$$Front_auto = P_{11} \cdot \overline{P_{12}} \cdot P_{13} \cdot \overline{P_{14}} \cdot \overline{P} \quad (7.14)$$

$$Back_auto = P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot \overline{P} \quad (7.15)$$

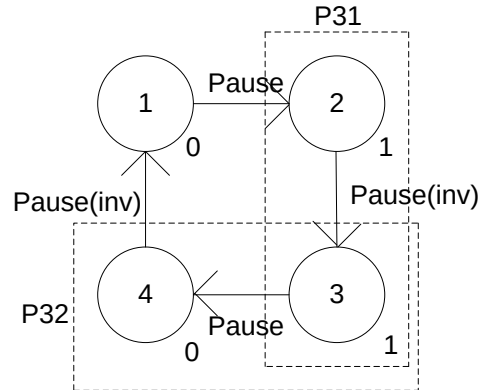


Рисунок 7.5 – Графоперехід, що описує функцію паузи (для автоматичного режиму)

За графопереходом складаємо логічні рівняння:

$$S_{p21} = Pause \cdot \overline{P_{22}} \quad (7.16)$$

$$S_{p2} = \overline{Pause} \cdot P_{21} \quad (7.17)$$

$$R_{p21} = Pause \cdot P_{22} \quad (7.18)$$

$$R_{p22} = \overline{Pause} \cdot \overline{P_{22}} \quad (7.19)$$

$$P = P_{21} \cdot \overline{P_{22}} + P_{21} \cdot P_{22} \quad (7.20)$$

За результатами попередніх розрахунків складаємо готову програму:

$$Front = Emergency \cdot ((Forward \cdot (\overline{Backward} + Front) \cdot SQ2 \cdot \overline{Auto}) + \\ + Front_auto \cdot Out \cdot \overline{P}) \cdot \overline{Obstacle} \quad (7.21)$$

$$Back = Emergency \cdot ((\overline{Forward} + Back) \cdot Backward \cdot SQ1 \cdot \overline{Auto}) + \\ + Back_auto \cdot Out \cdot \overline{P}) \cdot \overline{Obstacle} \quad (7.22)$$

$$Caution = Obstacle + (Auto \cdot \overline{Out}) \quad (7.23)$$

Візуалізація до програми матиме вигляд:

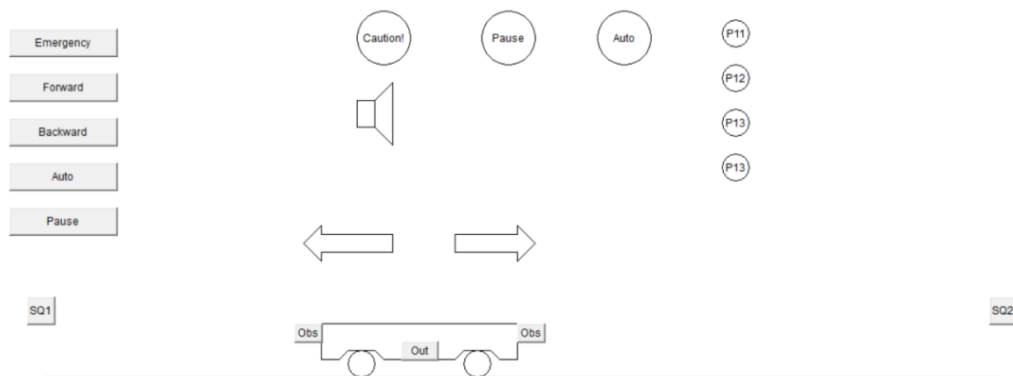


Рисунок 7.6 – Схематичне зображення процесу роботи візка

Висновки до розділу 7

1. В даному розділі відповідно до завдань, які має виконувати цеховий маневровий візок, а також відповідно до вимог безпеки, сформованих в першому розділі, були обрані датчики. Ці датчики відповідатимуть за визначення маршруту та виявлення перешкод на шляху, що зробить автоматичний режим роботи візка безпечним для оточення та власне для візка. Для обмеження переміщення між станціями використовуватимуться роликові кінцеві вимикач з нормально замкнутим контактом.

Все це необхідно для реалізації автоматичного керування візком.

2. Також в даному розділі обраний програмований логічний контролер, який має забезпечувати автоматичний і ручний режим керування рухом візка. Підбір здійснений з умови забезпечення необхідної кількості входних і вихідних сигналів, що використовуються для керування рухом.

Для аварійних випадків передбачена кнопка аварійної зупинки з самоблокуванням. Для перемикання між автоматичним і ручним режимами керування також використовується кнопка з самоблокуванням. Для решти операцій використовуються тактові кнопки.

3. На основі завдання керування і наявних вимог щодо безпеки створена програма на мові програмування Ladder Diagram (LD). Ця мова обрана тому, що є доволі простою з точки зору сприйняття і повністю задовольняє всі вимоги, щодо керування двигуном.

На основі даних рівнянь була здійснена візуалізація процесу роботи візка.

РОЗДІЛ 8 РОЗРОБКА І ОПИС СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Схема керування рухом візка та силова схема електроприводу представлені на рисунку 8.1.

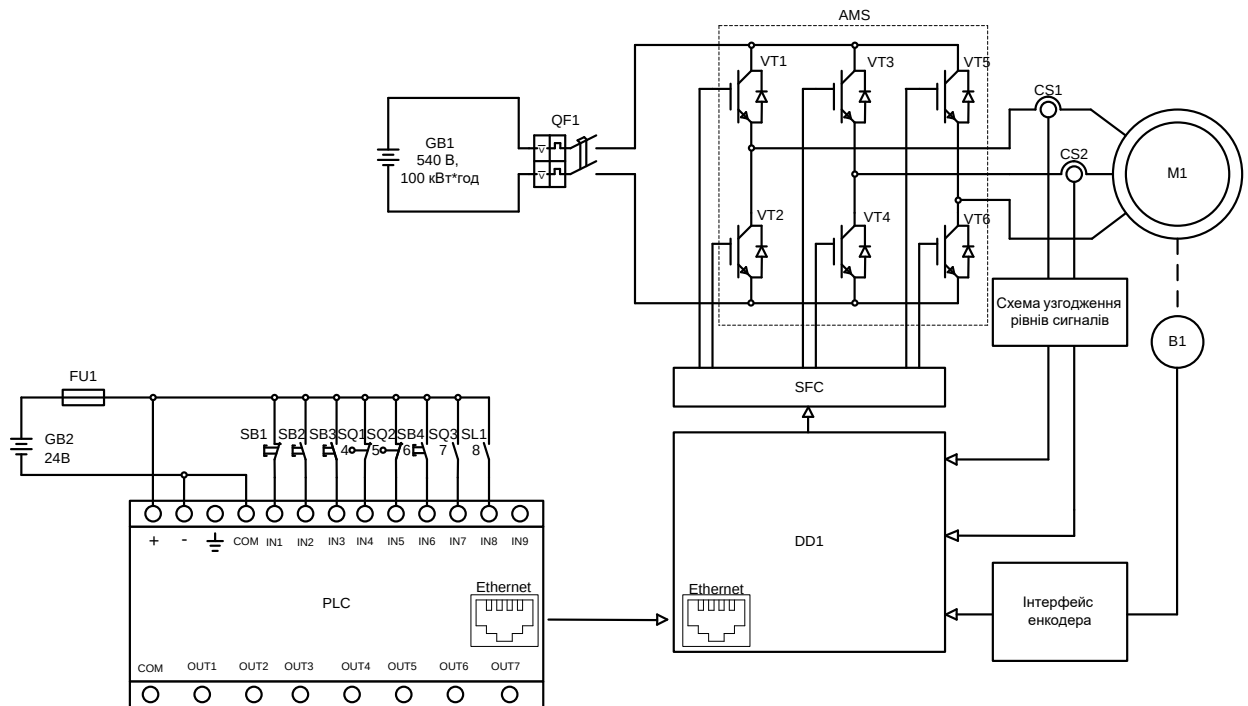


Рисунок 8.1 – Схема керування рухом візка та силова схема

Дана схема містить блок керування інвертором і силову схему. Вся схема складається з наступних елементів:

- 1) Акумуляторна батарея GB1 (540 В, 100кВт*год) – забезпечує живлення приводного двигуна;
- 2) Інвертор AMS – забезпечує перетворення постійної напруги в змінну і реалізує алгоритм керування за допомогою сигнального процесора. Складається з 6 IGBT-транзисторів з зворотними діодами;
- 3) Драйвер SFC – забезпечує гальванічну розв'язку між силовим колом і колом керування;
- 4) Автоматичний вимикач постійного струму QF1 – використовується для підключення акумулятора і забезпечує захист двигуна та інвертора від надструмів і коротких замикань;

5) Датчики струму CS1, CS2 – потрібні для забезпечення зворотного зв'язку за струмом для реалізації алгоритму векторного керування;

6) Асинхронний двигун M1 – приводить до руху візок. Керується сигнальним процесором через інвертор;

7) Енкодер B1 – призначений для вимірювання кутової швидкості та положення ротора двигуна. Використовується для забезпечення зворотного зв'язку за швидкістю для реалізації алгоритму векторного керування;

8) Програмований логічний контролер PLC – призначений для керування рухом візка за допомогою кнопок і датчиків. Під'єднується до сигнального процесора за допомогою інтерфейсу пакетної передачі даних Ethernet.

9) Акумуляторна батарея GB2 (24В) – використовується для живлення ПЛК і реалізації дискретних сигналів;

10) Кнопки і датчики:

- SB1 – Emergency – кнопка аварійної зупинки;
- SB2 – Forward – кнопка, що реалізує команду на рух візка вперед;
- SB3 – Backward – кнопка, що реалізує команду на рух візка назад;
- SQ1 – кінцевий вимикач крайнього лівого положення;
- SQ2 – кінцевий вимикач крайнього правого положення;
- SB4 – Auto – кнопка для перемикання між ручним і автоматичним режимами;
- SQ3 – індуктивний датчик для визначення шляху;
- SL – ультразвуковий датчик для виявлення перешкод на шляху.

Висновки до розділу 8

В даному розділі побудовані силова схема електроприводу маневрового візка та схема керування інвертором, який забезпечує перетворення постійної напруги в змінну за заданим законом.

Розробка схеми є завершальною частиною даного проекту і є результатом проектування складових електроприводу, виконаного у попередніх розділах. Дана схема дає практичне уявлення про призначення всіх обраних раніше елементів і про систему керування в цілому.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даному дипломному проєкті була виконана модернізація електроприводу механізму руху цехового маневрового візка вантажопідйомністю 1000 кг.

1. В першому розділі даної роботи був проведений аналітичний огляд різновидів технологічних транспортних засобів (електричних візків) різного призначення і конструкції, обраний візок для модернізації, визначені вимоги до електроприводу і системи автоматизації. Метою даного розділу був збір інформації про технічні дані сучасних електричних транспортних модулів для виведення вимог до модернізованого в даному проєкті цехового візка.

За результатами даного розділу здійснювався вибір комплектуючих, алгоритму керування, створена програма для автоматизації.

2. В другому розділі на основі вхідних даних візка проведений тяговий розрахунок для визначення зусиль, які має подолати привод, щоб зрушити візок з місця. З отриманих значень зусиль визначена попередня потужність двигуна і виконані перевірки за нагріванням і перевантаженням для асинхронного двигуна визначеної потужності. Метою даного розділу було визначення всіх зусиль, що протидіють руху візка і, через приведення цих зусиль до валу двигуна, визначення механічної потужності двигуна, що був обраний в наступних розділах.

За результатами даних розрахунків розрахована необхідна потужність двигуна, за якої він не перегріватиметься за заданих умов експлуатації, а також витримуватиме прикладений до валу момент.

3. В третьому розділі обрані основні силові прилади, що забезпечують функціонування візка, а саме інвертор (блок з IGBT-транзисторами), електродвигун, редуктор і автоматичний вимикач постійного струму.

Метою даного розділу є розрахунок струмів і напруг двигуна в номінальному режимі і вибір комплектуючих, які коректно працюватимуть за

даних обставин і не пошкоджуватимуться прикладеними до них струмами і напругами.

Для обраної в цьому розділі моделі двигуна будуть розраховані номінальні параметри, такі як опори та індуктивності обмоток. Ці параметри є необхідними для створення математичної моделі двигуна, яка відображатиме перехідні процеси, що відбуваються в реальному електроприводі.

4. В четвертому розділі описана двофазна модель асинхронного двигуна та алгоритм непрямого векторного керування швидкістю, а також розраховані параметри двигуна, на основі яких будується модель електроприводу.

Даний розділ має на меті створення математичної моделі, яка достатньо детально передаватиме властивості реального двигуна з алгоритмом непрямого векторного керування швидкістю.

На основі цих описів в наступних розділах будуватиметься модель для отримання графіків перехідних процесів, які необхідні для остаточного аналізу всіх прийнятих раніше рішень.

5. В п'ятому розділі викладене обґрунтування вибору алгоритму керування двигуном, виконаний детальний опис системи автоматизованого керування.

Даний розділ присвячений опису алгоритму непрямого векторного керування. Саме в цих розрахунках закладаються характеристики керування, а саме якість перехідних процесів, яка визначається коефіцієнтами регуляторів струму та швидкості.

6. Шостий розділ присвячений моделюванню перехідних процесів при пуску, гальмуванні та накиданні навантаження на вал двигуна. За отриманими в результаті моделювання графіками перехідних процесів виконаний аналіз моделі, оцінка якості керування двигуном.

Результати даного розділу є доказом того, що алгоритм, двигун і решта силових компонентів обрані правильно.

7. Сьомий розділ присвячений автоматизації маневрового візка. Відповідно до потреб обрані датчики, кінцеві вимикачі, кнопки (з самоблокуванням та тактові) та програмований логічний контролер з

відповідною кількістю входів і виходів. За умовами роботи візка складена програма для ПЛК і виконана візуалізація процесу роботи досліджуваного візка.

8. За результатами усіх попередніх розділів створені схеми керування і силова схема приводу. Розписані призначення всіх функціональних вузлів цих схем.

За результатами всі попередніх розділів виконані креслення: загального виду, схема електрична принципова.

Отримані результати можуть бути використані у подальших дослідженнях та практичному впровадженні подібних систем у промислових технологічних процесах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1) Визначення технологічного транспортного засобу. Стаття, URL:
<https://news.dtki.ua/state/other/56917-shho-je-texnologicnim-transportnim-zasobom-roziasnennia-vid-derzpraci>
- 2) Платформний електричний візок Moto-cart. Сайт виробника, URL:
https://www.liftproducts.com/electriccarts/moto_cart.html
- 3) Електричний контейнерний навантажувач Kalmar ECG 90-110. Сайт виробника, URL:
<https://www.kalmarglobal.com/equipment/masted-container-handlers/electric-empty-container-handler-ecg90-110/>
- 4) Підйомний електричний візок Moto-Cart Jr. ELT. Сайт виробника, URL:
<https://www.kalmarglobal.com/equipment/masted-container-handlers/electric-empty-container-handler-ecg90-110/https://www.liftproducts.com/electriccarts/moto-cart-jr-elt.html>
- 5) Автоматизований електричний візок XF Series TYPE B. Сайт виробника, URL:
https://global.sharp/business/en/agv/products/xf_series/spec.html
- 6) Маневровий цеховий візок. Сайт виробника, URL:
<https://kzpto.com.ua/uk/vizok/>
- 7) Студентська наукова робота «Дослідження тягового балансу електромобіля». Наукова стаття, URL:
https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/ABTOM_TPAH_CП/Авт_та_тракт_2020/new_r/Tiagovy_i_balans.pdf
- 8) Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода. Навчальний посібник, URL:
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6b220c6e-71a9-4503-9b98-78c634132053/content>
- 9) ABB M3AA 132MC 4 IE3 7.5 kw електродвигун ABB. Сайт дистриб'ютора, URL:

<https://systemax.ua/elektrodivigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodivigateli/m3-ie3/m3aa-132mc-4-ie3-7-5.html>

10) РЕДУКТОР Ц2У-200 | 1Ц2У-200. Сайт виробника, URL:

<https://aip.com.ua/reduktory/ts2u-200-i-1ts2u-200/>

11) Керування електроприводами курсовий проект. Навчальний посібник, URL:

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c0b166f2-c0cd-4760-a093-67fe3c56435e/content>

12) EconoPIM 2 1200 V, 35 A three phase PIM IGBT module with fast TRENCHSTOP™ IGBT4, Emitter Controlled 4 diode and NTC. Сайт дистриб'ютора, URL:

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FP35R12KT4_B15-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=db3a30432313ff5e01237ada8baf7c60

13) Автоматичний двополюсний вимикач постійного струму 2P 32A TOMZN TOB7Z-63. Інтернет-магазин, URL:

<https://prom.ua/ua/p2405048398-avtomaticheskij-dvuhpolysnyj-vyklyuchatel.html>

14) С.М. Ковбаса, М.М. Желінський - Методичні вказівки до практичних робіт №7 і №8 з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем».

15) А.Е. Кравчик, М.М Далаф, В.І. Афонін, Є.А. Соболенская - Асинхронні двигуни серії 4А. Довідникові матеріали. м. Москва 1982р.

16) Ультразвуковий датчик RU50U-S18-AP8X-H1141. Сайт дистриб'ютора, URL:

<https://peko.com.ua/distance-sensors/ultrasonic-distance-sensors/turck-ru50u-s18-ap8x>

17) Індукційний датчик LJ12A3-4-Z/BY PNP. Сайт дистриб'ютора, URL:

<http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=LJ12A3-4-Z-BY>

18) Кінцевий вимикач L52K13MEM121. Сайт дистриб'ютора, URL:

<https://axiomplus.com.ua/ua/koncevye-vyklyuchateli/product-63957/?srsltid=AfmBOooJ0h90QAx9lfZzfdaqVBsAMYIKm6yz2Lmlmfmt5NkWlhKbUmvo#tab-attrs>

19) Програмований логічний контролер АВВ AC500-еСо. Сайт виробника, URL: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac500-eco>

20) Сигналізатор звуковий XB5KS2B4. Сайт виробника, URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/XB5KS2B4/дзвоник-непер-пер-сигн-черв-підс-24в/>

21) Системи автоматизації лабораторний практикум. Частина 2. Навчальний посібник, URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ec3f10fa-eec8-43b4-9f5f-aac8493fb300/content>