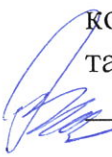


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему: «Автоматизована система управління краном з гнучкою підвіскою»

Виконав студент 2 курсу, групи АТ-29м
спеціальності 174 “ Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

 Власюк Богдан Васильович

(прізвище та ініціали студента)

 Керівник: к.т.н., доц. Гуменюк А.А.

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

 Рецензент: д.т.н., проф., Подчашинський Ю.О.

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

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп’ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.
« 12 » нової 2025р.

ЗАВДАННЯ

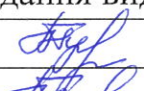
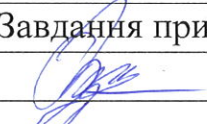
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Власюк Богдан Васильовч

1. Тема роботи: Автоматизована система управління краном з гнучкою підвіскою
2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «30» листопада 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали звіту про переддипломну практику, конструктивна схема чотириланкового крана з гнучкою підвіскою, вимоги до підтримки та часткового розвантаження ваги тіла пацієнта під час реабілітації, задані траєкторії переміщення, характеристики лебідкових механізмів, тросів, барабанів і редукторів, електродвигуни постійного струму, датчики положення, швидкості та ваги, програмований логічний контролер, середовище MATLAB Simulink, вимоги до точності й безпеки роботи системи.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці):
технічне завдання, аналіз застосування кранів із гнучкою підвіскою та існуючих реабілітаційних систем підтримки ваги тіла, розробка структурної й функціональної схем системи, вибір апаратно-технічних засобів, розробка схеми зовнішніх проводок, розрахунок сил і технічних параметрів механізмів крана, розробка математичної та імітаційної моделей, формування траєкторій переміщення, моделювання в MATLAB Simulink, розробка алгоритму керування та аналіз результатів дослідження.

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень): конструктивна схема крана з гнучкою підвіскою, структурна схема системи керування, функціональна схема автоматизації, схема зовнішніх проводок, розрахункова схема сил і левідкових механізмів, математична модель системи, схема імітаційної моделі в MATLAB Simulink, блок-схема алгоритму керування, графіки заданих траєкторій та результати моделювання.

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2, 3	Гуменюк А.А.		
4,5	Гуменюк А.А.		

7. Дата видачі завдання 22.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику	1 тиждень	виконано
2.	Збір та аналіз джерел за темою роботи, огляд існуючих систем	1 тиждень	виконано
3.	Вибір і обґрунтування технічних та програмних засобів	2 тиждів	виконано
4.	Розробка структурної, функціональної та блок-схеми	3 тиждів	виконано
5.	Аналіз отриманих результатів	4 тиждів	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	4 тиждів	виконано

Студент

(підпис, дата)

Б.В. Власюк

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис, дата)

А.А. Гуменюк

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КРАНІВ ГНУЧКОЇ ПІДВІСКИ	9
1.1. Використання роботизованих систем у медицині для реабілітації функцій нижніх кінцівок з підтримкою ваги тіла пацієнта	9
1.2. Мехатронна платформа SENLY	17
1.3. Система віртуальної 3D реабілітації FLOAT.....	20
1.4. RYSEN (Motek) стельова реабілітаційна система розвантаження ваги тіла пацієнта.....	22
1.5. Механізми та методи зневажування	25
2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КРАНОМ З ГНУЧКОЮ ПІДВІСКОЮ	29
2.1. Розробка структурної схеми системи	29
2.2. Розробка функціональної схеми автоматизації	31
2.3. Комплекс апаратно-технічних засобів.....	34
2.3.1. Вибір електродвигуна постійного струму.....	34
2.3.2. Вибір силової частини електроприводу	35
2.3.3. Вибір датчика положення та швидкості обертання валу.....	37
2.3.4. Вибір датчика ваги.....	39
2.3.5. Вибір програмованого логічного контролера.....	40
2.4. Розробка схеми зовнішніх проводок	45
3. РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРАНА ГНУЧКОЇ ПІДВІСКИ.....	47
3.1. Розрахунок чотири ланкового крана гнучкої підвіски	47
3.2. Розрахунок сил.....	49
3.3. Розрахунок приводних лебідкових механізмів.....	52
3.4. Розрахунок троса (канату)	53
3.5. Облік нелінійностей	55

	3
3.6. Розрахунок барабану	56
3.6. Розрахунок потужності двигуна	59
3.7. Розрахунок передавального числа редуктора.....	60
4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КРАНОМ З ГНУЧКОЮ ПІДВІСКОЮ.....	61
4.1. Формування траєкторії прямої.....	61
4.2. Формування складної траєкторії.....	63
4.3. Розробка імітаційної моделі роботи системи	65
4.3.1. Визначення передавальної функції приводу.....	66
4.3.2. Визначення передавальної функції двигуна	66
4.4. Моделювання серед MATLAB Simulink	69
4.5. Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою	74
ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТКИ	82

1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КРАНІВ ГНУЧКОЇ ПІДВІСКИ

1.1. Використання роботизованих систем у медицині для реабілітації функцій нижніх кінцівок з підтримкою ваги тіла пацієнта

Старіння населення в усьому світі неминуче супроводжується зростанням неврологічної захворюваності та, відповідно, числа осіб з тяжкими руховими порушеннями. У зв'язку з цим неминуче зростає попит на нові ефективні методи їх медичної реабілітації. Одним із перспективних напрямів у нейрореабілітації є використання роботів та робото технічних пристроїв, які дозволяють суттєво розширити можливості кінезотерапії пацієнтів із руховими розладами. Доказом актуальності проблеми створення ефективних роботизованих методів лікування служить створення спеціального інформаційного ресурсу «Європейська мережа з робототехніки в нейрореабілітації» («European Network on Robotics for NeuroRehabilitation»), в рамках якого розроблено проект STARS (STate of the Art Robot-Supported assessments) міждисциплінарна команда провідних дослідників у сферах робототехніки, клінічної рухової нейрореабілітації, обчислювальної техніки та нейровізуалізації; метою проекту є координація основних та прикладних досліджень у галузі робототехніки.

У нейрореабілітації роботизовані пристрої (РП) стали вперше використовуватися з 1980-х років [1], їхній потенціал був оцінений у 1990-х [2], а з 2000х років з'явилися екзоскелети [3]. Нейророботи відносяться до галузі науки, що поєднує нейробіологію, робототехніку та штучний інтелект.

Існуючі пристрої для асистування рухів у пацієнтів з неврологічною патологією можна розділити на дві категорії: електромеханічні пристрої та РП, причому фундаментальною відмінністю РП від електромеханічних пристроїв є їх адаптивність [4]. Властивість адаптивності заснована на наявності в РП вбудованих сенсорів, сигнали від яких обробляються штучним інтелектом пристрою і є основою зміни дій, що їм здійснюються. Типові РП можуть

передавати інструкції пацієнтам про те, як виконувати певні рухи, можуть допомагати виконанню рухів та керувати ними, можуть об'єктивно оцінювати можливості руху.

Класифікації РП для нейрореабілітації можна проводити, виходячи з основної функції пристрою; технічних характеристик системи; стратегії, що використовується для контролю рухів людини; з урахуванням тієї частини тіла, для якої призначено пристрій, та способом взаємодії з ним; виходячи з мобільності пристрою [5].

Згідно з основною функцією, що використовуються в нейрореабілітації РП відносяться до категорії роботів з персонального догляду (personal care robot). Відповідно до технічних характеристик, реабілітаційні роботи можуть бути класифіковані на дві основні групи: енд-ефектори (end-effectors, англ) та екзоскелети. Енд-ефектори найчастіше застосовуються для верхніх кінцівок, при їх використанні пацієнт тримає в руці маніпулятор, який керується ззовні за допомогою РП [6]. Екзоскелет – це пристрій, який одягається на тулуб або на кінцівку людини у вигляді зовнішнього каркасу, повторює біомеханіку його рухів [7]. Значно частіше екзоскелети використовуються для навчання ходьбі та стоянню, проте існують екзоскелети і для верхньої кінцівки (рука замкнена в рукав, який повторює її конфігурацію). Екзоскелет дозволяє збільшити м'язову силу шляхом прямого перенесення механічної енергії від пристрою до людини [8]. Відповідно до стратегії контролю, РП класифікують як програмовані (програма задається заздалегідь) і програмовані в процесі виконання тренувань. Відповідно до розмірів і мобільності пристрою, РП поділяють ті, що на носять (пацієнт носить РП на собі – наприклад, екзокостюм); мобільні (пристрій переважно спирається на власну вагу і може рухатися в просторі за допомогою коліс, крокуючого механізму або підвісної підвіски), стаціонарні (кріпляться до стіни або підлоги і не здатні пересуватися).

Основними категоріями хворих, які потребують інтенсивної рухової реабілітації, є пацієнти, які перенесли мозковий інсульт, хребетно-

спинномозкову травму (ХСМТ), тяжку черепно-мозкову травму (ЧМТ), а також пацієнти з дитячим церебральним паралічем [9].

Теоретичним обґрунтуванням доцільності використання РП в нейрореабілітації є так званий «феномен моторного навчання»: для закріплення в пам'яті головного мозку рухового акта необхідні багаторазові повторні інтенсивні цілеспрямовані («task-oriented») рухи, що вимагають уваги та зусиль пацієнта [10]. Вважають, що тривалі повторні інтенсивні рухи викликають посилення потоку аферентної імпульсації від паралізованої кінцівки до головного мозку, що, своєю чергою, активує процеси нейропластичності центральної нервової системи (ЦНС), що є основою справжнього відновлення порушених функцій [11]. Переваги робототерапії перед традиційною кінезотерапією полягають у її інтенсифікації (можливість використання її протягом більш тривалих періодів часу з моделюванням навантаження без перевтоми пацієнта) та у забезпеченні можливості виконання більш складних рухів [11]. Крім того, сучасні РП забезпечують наявність зворотного зв'язку роботизованого тренажера та пацієнта під час терапевтичного втручання, що підвищує безпеку тренувань та збільшує мотивованість пацієнта, оскільки пацієнту надаються об'єктивні показники досягнутих результатів [12]. Потенційний позитивний ефект від використання робототехніки в нейрореабілітації полягає також у можливості одночасного проведення заняття одним кінезотерапевтом із кількома пацієнтами. Оскільки здійснення класичної інтенсивної рухової терапії за допомогою фізичних вправ потребує участі значної кількості медичного персоналу, на кожне тренування можна витратити лише порівняно невелику кількість часу; крім того, відновна терапія, що здійснюється «вручну» є важко здійсненою у пацієнтів, з великою вагою або які мають спастичні прояви [12]. Таким чином, автоматизація процесу дозволяє не тільки проводити більш тривалі та ефективніші заняття для пацієнтів, але й зменшити фізичне навантаження на кінезотерапевта [5].

Перспективи розробок нових роботизованих систем для медичної реабілітації пов'язують насамперед у застосуванні технологій нейрокомп'ютерних інтерфейсів та віртуальної реальності для управління зовнішніми РП та навчання пацієнтів користування РП [13].

Використання роботизованих пристроїв у комбінації з традиційною кінезотерапією є перспективним напрямом у нейрореабілітації, оскільки може розширити функціональні можливості пацієнтів із руховими порушеннями та дати додаткові клінічні та економічні переваги. Створення нових ефективних генерацій роботів, розроблених з урахуванням етичних норм та досягнень сучасної інженерії – це реальний шлях до покращення якості життя людей із захворюваннями та травмами нервової системи.

В таблиці 1.1. наведені стаціонарні системи для реабілітації функцій нижніх кінцівок за допомогою ваги тіла пацієнта.

Таблиця 1.1. Стаціонарні системи для реабілітації функцій нижніх кінцівок за допомогою ваги тіла пацієнта

1	SENL Y (Lorenzo Bassi Luciani)	Мехатронна платформа, створена для оцінки причин падіння людей, основними причинами яких є: ковзання, перекидання та оступання. Включає в свою конструкцію два симетричні сектори, кожен з яких складається з бігової доріжки, полотно якої обертається навколо плоскої сенсорної поверхні. Кожна бігова доріжка є мобільною рамою, за допомогою якої стає можливим регулювати натяг бігової доріжки. Доріжки фіксуються в рамі з підвісним механізмом, в якому фіксується людина, що йде. Сенсори даної системи реєструють компоненти та моменти сили, а також ОЦМ [14].
2	BAR-TM (University Rehabilitation)	Даний пристрій складається з двох підсистем: 1-мобільна платформа і 2-фіксатор тіла в тазовій області. Забезпечує два ступені свободи рухів [15].

	Institute, Andrej Olenšek)	
3	ZeroG (Aretech)	Роботизована система підтримки ваги. Є комплексом з підвісного механізму і розташованої зверху доріжки. Створена для компенсації слабкості та поганої координації у ранній відновлювальній терапії. Ця система сконструйована таким чином, що повністю запобігає ймовірності падіння пацієнта, завдяки чому через відсутність страху падіння пацієнти відновлюються набагато швидше [16].
4	FLOAT (Lutz Medical Engineering GmbH)	Реабілітаційна система з багатоспрямованою підтримкою ваги тіла та вбудованою реабілітаційною програмою тренування рухів. Являє собою раму, що кріпиться до стелі та підвісний механізм для пацієнта. Розроблено для реабілітації пацієнтів із хворобою Паркінсона, розсіяним склерозом, ДЦП, а також перенесли травми головного та спинного мозку, ортопедичні операції та ампутації [17].
5.	Ryzen (Motek Medical)	Система RYSEN призначена для пацієнтів з порушеннями опорно-рухового апарату, які не можуть проводити реабілітаційні тренування без підтримки ваги тіла. Ці розлади можуть бути різними клінічними наслідками, враховуючи, але не обмежуючись, інсульт, пошкодження хребта або ампутації. Регульовані за всіма напрямками сили і підтримка ваги тіла RYSEN забезпечують необмежену свободу рухів, дозволяючи пацієнтам виконувати тренування ходи, рівноваги і перенесення на землі природним чином, в

		вертикальному положенні і без допомоги рук на всіх етапах терапії [18].
--	--	---

Сьогодні системи тросового зневажування активно використовуються у різних галузях. Доволі широке поширення дані системи набули і в медичній галузі. Там дані системи використовуються для реабілітації пацієнтів із травмами опорно-рухового апарату. Підхід розробки таких систем схожий, проте спостерігаються деякі відмінності. Нижче представлені деякі із систем тросового зневажування.

Однією з таких систем є ZeroG від компанії Aretech [16] (рисунок 1.1). Ця реабілітаційна система компенсації ваги заснована на одноланковому маніпуляторі. За допомогою одного троса, прикріпленого до заздалегідь встановленої колії, дана система дозволяє пацієнту переміщатися в заданій області.



Рисунок 1.1 – Система ZeroG (Aretech)

Іншою такою системою є Vector від компанії Bioness [19] (рисунок 1.2). За своєю суттю та пристроєм дуже схожа з системою ZeroG. Ця система також має рейки, вздовж якої відбувається переміщення каретки з прикріпленням до неї тросом.



Рисунок 1.2 – Система Vector (Bioness)

Ще однією системою тросового зневажування є система Float [17] (рисунок 1.3). Ця система, на відміну від вищезгаданих, включає чотири гнучкі троси. Дані троси приєднані до рухомих роликів, що переміщуються закріпленими на стелі паралельними рейками.

Пересування роликів відбувається з допомогою приводів.



Рисунок 1.3 – Система Float

Також існує система Ryzen компанії Motekmedikal [18] (рисунок 1.4). Ця система являє собою аналогічну Float систему. Також є 4 троси, закріплені через ролики, які пересуваються паралельними рейками за допомогою приводів.



Рисунок 1.4 – Система Ryzen (Motekmedikal)

Всі вищезгадані системи є найпопулярнішими на даний момент системи тросового зневажування, що застосовуються в медицині.

Недоліками перших двох систем є значні обмеження в пересуванні, тому що для коректного зневажування об'єкт повинен пересуватися під рейкою.

В останніх двох систем можна виділити невеликий недолік, яким є фіксована довжина троса. Таким чином, активна область обмежується безпосередньо висотою розташування об'єкта - чим об'єкт вище - тим більше буде відстань між двома тросами на одній рейці і тим менше буде активна робоча зона всієї системи.

1.2. Мехатронна платформа SENLY

Мехатронна платформа SENLY («SENsORIZED perturbing platform for fall assessment and prevention for eLderly and Young subjects») (рис. 5) здатна створювати збурення рівноваги під час виконання випробуваними повсякденних рухових завдань (наприклад, стояння у вертикальному положенні, ходьба) [20]. SENLY дестабілізує контроль рівноваги за допомогою пари незалежно керованих ременів, які можуть рухатися як у передньо-задньому (AP), так і в медіально-латеральному (ML) напрямках, щоб впливати на одну або обидві стопи. Вона оснащена датчиками сили, які дозволяють вимірювати вертикальні компоненти сили реакції опори (GRF), що діють під кожною стопою, та оцінювати центр тиску (COP), пов'язаний з кожною GRF. Важливо, що GRF обробляються під час роботи для запуску подій вздовж циклу ходи.

Порівняно з іншими платформами особливістю SENLY є інтеграція можливості забезпечення моно - та білатеральних збурень опорної бази у всіх горизонтальних напрямках під час широкого спектру рухових завдань, з можливістю реєстрації зовнішніх сил, що діють на випробуваних, що може бути використане для стандартизації експериментальних протоколів. Зокрема,

SENLY враховує технічні рішення, що дозволяють реалізувати практично всі експериментальні протоколи, які до цих пір виконувались з використанням різних платформ (наприклад, обурення контролю рівноваги при збереженні вертикального положення або ходьбі, обурення однієї або обох стоп, обурення в передньо-задньому та медіально-латеральному циклах). В результаті SENLY є однією з найбільш універсальних платформ, розроблених для аналізу обуреного контролю рівноваги під час динамічних рухових завдань.

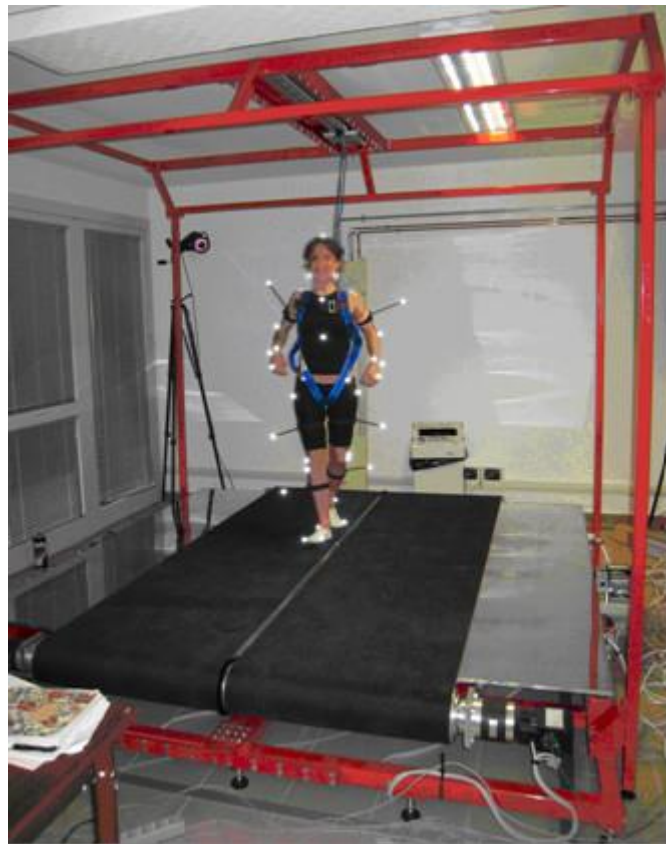


Рис. 5. Пацієнт на мехатронній платформі SENLY

SENLY складається, по суті, із двох симетричних секторів, кожен з яких включає бігову доріжку, стрічка якої охоплює сенсорну плоску поверхню. Кожна бігова доріжка є рухомою рамою, забезпеченою двома роликами і попередньо натягнутою стрічкою, натяг якої можна регулювати за допомогою системи натягу стрічки. Рухлива рама жорстко з'єднує відстань між осями роликів і забезпечує кріплення для безщіткових двигунів (JVL MAC800 750

Вт), що рухають стрічку в передньо-задньому напрямку. Дві циліндричні напрямні з'єднані з основною рамою і проходять через чотири лінійні підшипники для кожної рами бігової доріжки, дозволяючи їм незалежно переміщатися в медіально-латеральному напрямку. Завдяки цьому технічному рішенню стрічки розташовані на відстані менше 10 мм один від одного, що забезпечує більш комфортну ходу, ніж інші рішення.

Комплект датчиків навантаження, що відноситься до кожної сенсоризованої поверхні, дозволяє вимірювати три ортогональні компоненти прикладеної сили та моменту. Центр тиску оцінюється за допомогою рівноваги моментів поверхні, припускаючи, що точка застосування сили між ногою і ремнем (товщина 2 мм) спроектована вертикально на сенсоризовану поверхню. Технічні характеристики мехатронної платформи SENLY наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики мехатронної платформи
SENLY

Довжина	2500 мм
Ширина	2500 мм
Загальна висота (із захисною рамою для тестера)	3000 мм
висота пішохідної доріжки	300 мм
Максимальна вага тестера	110 кг
Максимальна висота тестера	1900 мм
Ширина бігової стрічки	750 мм
Вага бігової доріжки	110 кг
Розмір сенсорної поверхні	2290x1250x15 мм
Напрямок AP: максимальна швидкість	1,8 м/с
Напрямок AP: максимальне прискорення	8 м/с ²
Напрямок ML: максимальне зміщення	300 мм
Напрямок ML: максимальна швидкість	1,25 м/с
Напрямок ML: максимальне прискорення	2,4 м/с ²

1.3. Система віртуальної 3D реабілітації FLOAT

Динамічна система підтримки ваги тіла FLOAT (рис. 6) дозволяє гнучкі сценарії тренувань, яких часто не вистачає у традиційних варіантах реабілітації ходи [21]. Одним із найбільш інноваційних аспектів реабілітації за допомогою FLOAT є те, що тільки FLOAT дозволяє практикувати унікальні тривимірні моделі вільного руху в безпечному середовищі з підтримкою ваги тіла.



Рисунок 1.6 – Реабілітаційна система з багатоспрямованою підтримкою ваги тіла FLOAT

Оскільки ефект терапії під час тренування здебільшого обмежений функціями та видами діяльності, FLOAT допомагає покращити нервово-

м'язову координацію, постуральний контроль і загальну рухливість до такого ступеня, якого важко досягти традиційними методами терапії.

Також FLOAT – це безпечне та гнучке реабілітаційне середовище для пацієнтів після реанімації:

- Можна використовувати безпосередньо з інвалідного крісла;
- Підтримка ваги тіла до 90кг;
- Постійний захист від падіння;
- Можливий широкий спектр видів діяльності від дуже повільної ходьби з підтримкою до спеціальних вправ ADL;
- Терапевт має повний доступ до пацієнтів з усіх боків.

Основним призначенням підвісної системи FLOAT є:

- клінічна реабілітація порушень ходи у пацієнтів з неврологічними та/або ортопедичними розладами;
- проведення дослідження з хворими та здоровими людьми;
- рання реабілітація для хворих після тривалого постільного режиму.

На FLOAT можуть займатися люди з масою тіла від 4 до 200 кг та зростом від 1 до 2 м.

Стандартний комплект поставки для FLOAT включає наступні компоненти:

- 2 сталевих інтерфейси;
- 2 треки вкл. розсувні візки зі шківами;
- 1 шафа керування;
- 4 приводи;
- 1 панель пацієнта з електронікою вузла;
- 1 монітор з клавіатурою та мишкою;
- 1 пульт дистанційного керування
- Ремені розмірів S, M, L (по 1);
- Програмне забезпечення;
- Усі відповідні кабелі, антени та датчики відстані;

Опції:

- EtherCAT, мережевий інтерфейс реального часу з передачею даних для дослідницьких цілей;

- VR з 2 проекторами, керуючим ПК і контрольним планшетом, ПЗ з 7 вправами, файлами даних можна зберігати в базі даних пацієнтів FLOAT• Збільшена довжина.

Країна: Швейцарія Виробник: Reha-Stim Medtec

1.4. RYSEN (Motek) стельова реабілітаційна система розвантаження ваги тіла пацієнта

Система RYSEN (рис. 1.7.) призначена для пацієнтів з порушеннями опорно-рухового апарату, які не можуть проводити реабілітаційні тренування без підтримки ваги тіла [18]. Ці розлади можуть бути різними клінічними наслідками, враховуючи, але не обмежуючись, інсульт, пошкодження хребта або ампутації.

Інноваційний технічний дизайн RYSEN поєднує в собі вертикальні і горизонтальні допоміжних сили, пропонуючи інтуїтивно зрозумілу терапевтичну установку з безпрецедентною свободою рухів в природних умовах.

Дотримуючись принципів моторного навчання, RYSEN є основою для клінічних та дослідницьких цілей, дозволяючи пацієнтам перейти до повсякденної діяльності, безпечно виконуючи фізичні вправи в оптимальній для них точці прикладання сил.

3D підтримка надземної ваги тіла. Регульовані за всіма напрямками сили і підтримка ваги тіла RYSEN забезпечують необмежену свободу рухів, дозволяючи пацієнтам виконувати тренування ходи, рівноваги і перенесення на землі природним чином, в вертикальному положенні і без допомоги рук на всіх етапах терапії.

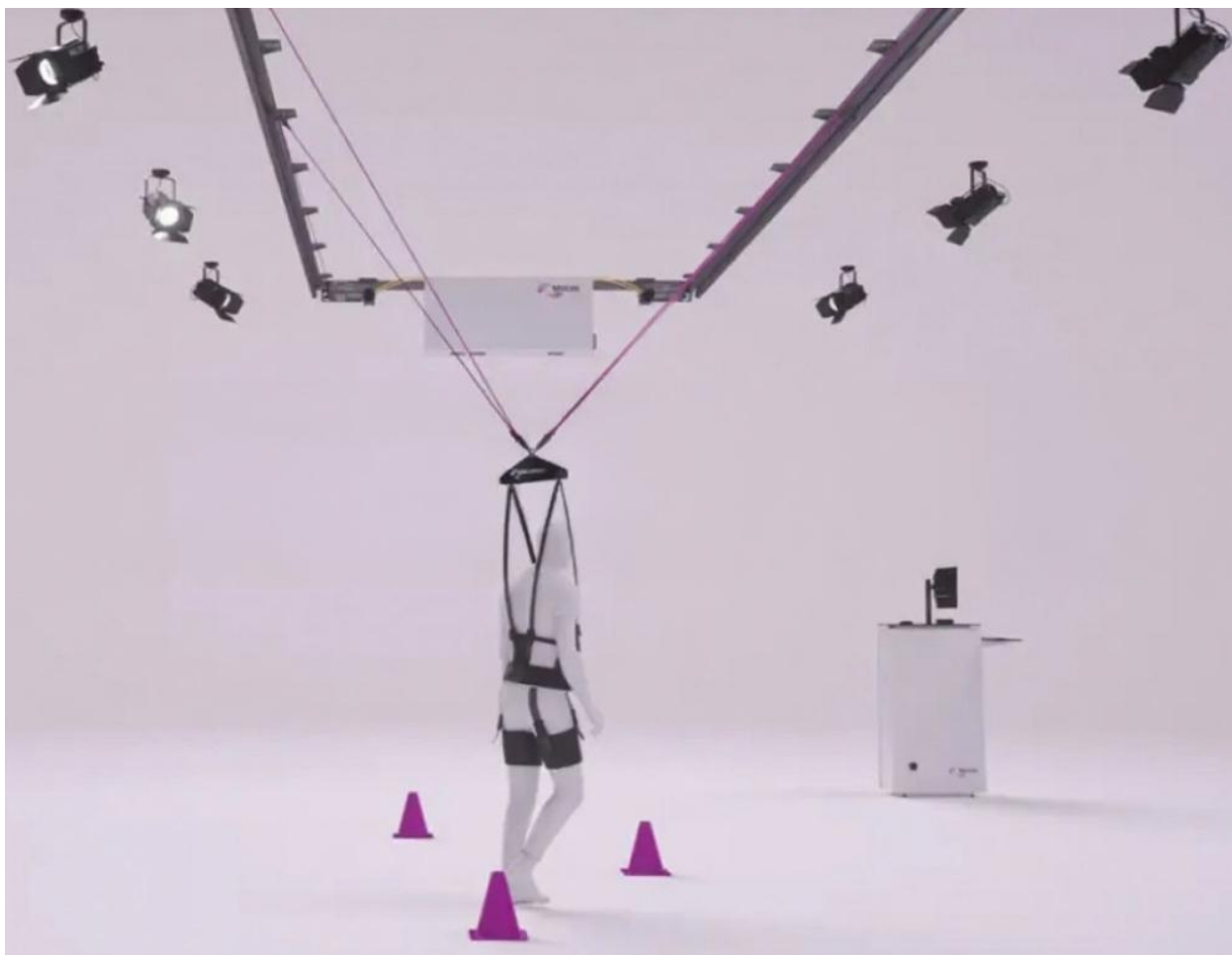


Рисунок 1.7. – Стельова реабілітаційна система розвантаження ваги тіла пацієнта RYSEN (Motek)

Широкий спектр функціональної моторної активності. Вертикальне розвантаження і горизонтальні допоміжні сили можуть бути персоналізовані відповідно до потреб кожного пацієнта, збільшуючи діапазон їх тренувальних дій на одному пристрої. Керування RYSEN за допомогою його інтуїтивно зрозумілого портативного пристрою і дає можливість виконувати широкий спектр функціональних рухових дій, не перериваючи терапію, наприклад: сидяче положення, рівновагу, ходьба, повороти, уникнення перешкод і підйом по сходах.

Необмежені природні умови тренування. Ексклюзивна підвісна система RYSEN усуває будь-які бічні обмеження і зводить до мінімуму перешкоди довільним рухам пацієнта. Незв'язані ступеня свободи забезпечують однакову

продуктивність системи в усьому робочому просторі, а відкалібровані горизонтальні і вертикальні допоміжні сили відповідають необхідній підтримки ваги тіла. В результаті RYSEN пропонує найбільш природну ходьбу і взаємодія з гравітацією на ринку.

Універсальне дослідження ходи і рівноваги над землею. При проведенні досліджень лабораторія ходьби також отримає величезну користь від динамічного і адаптивного управління силою RYSEN для створення унікальної інтерактивної середовища.

Ця простора зона, позначена високоякісною системою рейок, повністю доступна як для оператора RYSEN, так і для пацієнта.

Комплектація:

– Направляючі для 3D підтримки ваги тіла пацієнта. Удосконалена конструкція формує регульовані вгору, вперед і назад сили.

– Консоль оператора. Дозволяє управляти системою, використовуючи графічний інтерфейс, управляти даними пацієнтів і зупиняти терапевтичний сеанс.

– Блок дистанційного керування. Дозволяє оператору (лікаря) перебувати в будь-якому положенні відносно пацієнта при виборі вправ, налаштування сили розвантаження, не перериваючи при цьому терапевтичну сесію.

– Ремні безпеки трьох розмірів. Доступні дві версії ременів:

Ремені для ніг (35 см / 13,8 "і 50 см / 19,7").

Петлі для ніг, які забезпечують щільне прилягання до верхньої частини ноги.

Необхідні розміри приміщення:

Висота стелі: 3,0-5,0 м (118,1-196,9 дюйма).

Довжина приміщення: 5,0-13,5 м (196,9-531,5 дюйма).

Ширина приміщення: 2,4-3,5 м (94,5-137,8 дюйма).

1.5. Механізми та методи зневажування

В англomовній літературі значно більше згадок про подібні системи і в них найчастіше використовується термін компенсації ваги, а в українomовній літературі зустрічається термін зневажування. Система має функцію зневажування якщо вона має ланки, які незалежно від її вертикального переміщення, мають статично стійкі становища, тобто створюється ефект відсутності сили тяжіння. Далі будуть рівнозначно використовуватися терміни компенсація ваги та зневажування.

Зневажування буває активне та пасивне. При пасивному зневаженні у системі не використовуються приводи створення сили компенсації ваги. Системи зневажування можна розділити на групи залежно від механізму дії:

1. Додаткові маси, що вводять.
2. Використовують гнучкі ланки.
3. Ті, що використовують тертя в шарнірних з'єднаннях.

Системи, що вводять додаткові маси - це системи з пасивним балансуванням [22]. В них сила тяжіння, що діє на ланку, проходила через точку її закріплення, наприклад, через шарнірне з'єднання зі стійкою. Перевагою такого методу є проста конструкція. Недолік таких систем полягає в ефекті приєднання мас, через що збільшуються інерційні властивості системи, знижується енергоефективність і швидкодія.

Системи з гнучкими ланками найперспективніші серед інших, оскільки мають високу надійність та енергоефективність, можуть бути застосовані для зневажування елементів складної структури. До недоліків належать складність конструкції такої системи.

У системах з тертям у з'єднаннях зневажування досягається за рахунок того, що сили тяжіння компенсується силами тертя, що виникають у з'єднаннях і приводах. Такі системи мають низьку енергоефективність надійність, до того ж у процесі експлуатації фрикційні властивості елементів змінюються, призводячи до втрати якості зневажування [23].

Активні системи досягають ефекту зневажування не рахунок зміни структури системи, а за рахунок застосування сили приводу. У таких системах енергоефективність перестає бути головною метою. Такі системи не створюють ефекту приєднаних мас і можуть динамічно змінювати силу зневажування в процесі роботи системи на основі показань датчиків і умов зовнішнього середовища.

Такі системи використовуються на виробничих конвеєрних лініях, як маніпулятори, в дослідних цілях при випробуванні космічних конструкцій, різних роботів та екзоскелетів, а також у медичній реабілітації, де є потреба у переміщенні та компенсації частини ваги пацієнта у русі та в процесі виконання вправ.

В англomовній літературі при описі медичних систем зневажування використовуються такі терміни:

1. Technology-assisted gait training (TAGT) - Технологічне тренування ходи, що передбачає використання автоматичних апаратів;
2. Robot-assisted gait training (RAGT) - Тренування ходи, що передбачає використання роботів;
3. Body weight inloading (BWU) – Розвантаження ваги тіла (зневажування);
4. Body weight support (BWS) systems - Система підтримки або компенсації ваги тіла (зважування);
5. Body weight supported training (BWST) – Тренування (ходи) з використанням системи підтримки ваги тіла;
6. Body weight supported treadmill training (BWSTT) - Тренування (ходи) з використанням системи підтримки ваги тіла на біговій доріжці;
7. Conventional overground training (COT) - Традиційне наземне тренування (ходи), зазвичай протиставляється тренування на біговій доріжці.

Класифікація існуючих медичних систем знегажування відбувається за такими критеріями класифікації: конструктивні особливості, ступеня свободи, тип приводу, тип системи управління, призначення системи.

Залежно від того, скільки ступенів свободи необхідно для реалізації необхідних рухів і функцій кінцевого пристрою, також можна класифікувати системи. Наприклад, для стаціонарної системи зневажування, що застосовується при реабілітації з біговою доріжкою – лише 1 ступінь свободи. Компенсація ваги проводиться у одній точці - місці кріплення схоплення. А для систем компенсації ваги, призначених для кінезотерапії суглобів та кінцівок, потрібно до шести ступенів волі.

Залежно від типу використовуваного приводу системи поділяються на:

- з електричним приводом;
- з гідравлічним приводом;
- з пневматичним приводом;
- з суміщеним приводом.

Переваги і недоліки наведених типів приводів загальновідомі, а отже повинні розглядатися в кожному конкретному випадку, враховуючи вимоги, що пред'являються.

Призначення системи - це критерій, що визначає подальші параметри системи, її конструкцію та систему управління. Залежно від призначення, конструкція системи, а також технічні характеристики та реалізовані функції істотно відрізнятимуться. До виробничих систем часто пред'являють вимоги щодо забезпечення необхідної вантажопідйомності, а медичні роботи повинні з високою точністю забезпечувати набір строго заданих рухів, а також підтримувати стійкість та супроводжувати в русі пацієнта з порушеннями опорно-рухового апарату.

Залежно від типу системи управління системи поділяються на:

- з програмним управлінням відповідно до алгоритму;
- з ручним керуванням;
- з програмним адаптивним управлінням;

Запропонована класифікація систем зневажування (компенсації ваги) не є повністю завершеною і має доповнюватися в міру розвитку області та

елементної бази мехатронних систем, потреб та можливостей людини та суспільства.

У системах зневажування можуть застосовуватися приводи з різними видами руху: приводи поступального, обертального, вібраційного та іншого виду руху. Обертальний рух застосовується в тренажерах для реабілітації верхніх кінцівок, в екзоскелетах, а вібраційний рух застосовується для підвищення ефективності реабілітаційного процесу.

Поступальний рух використовується в механізмах важелів для систем реабілітації кінцівок, а також в екзоскелетах. Існує також ряд пристроїв реабілітації з складнішим характером переміщення вихідних ланок приводів.

У системах зневажування можуть застосовуватись електромеханічні, гідравлічні та пневматичні приводи. Найбільш поширені - електроприводи, оскільки мають простоту експлуатації, високий рівень керованості та ефективності. Гідравлічні та пневматичні приводи менш поширені та використовуються в частіше екзоскелетах, призначених для високих навантажень.

Найчастіше використовуваний тип приводу роботизованих системах реабілітації – електропривод. Тип двигуна, що найчастіше використовується в роботизованих комплексах – щітковий двигун постійного струму (ДПТ). А в мобільних роботах найчастіше використовують вентильні електродвигуни. Також часто застосовуються крокові двигуни, переважно для високоточних лінійних приводів. Але вони мають відносно низький коефіцієнт корисної дії. Для реалізації обертального руху застосовуються привод унікального конструктивного виконання, а також готові мотор-редуктори.

2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КРАНОМ З ГНУЧКОЮ ПІДВІСКОЮ

2.1. Розробка структурної схеми системи

У рамках цієї роботи було поставлено завдання розробити систему формування траєкторії крана гнучкої підвіски. Розроблена структурна схема системи регулювання з відхилення та збурення, показана на рис. 2.1.

Для того, щоб описати принцип роботи системи, розберемося з кожним елементом окремо.

Почнемо з виконавчого механізму – двигуна постійного струму. Електродвигун постійного струму – електрична машина постійного струму, що перетворює електричну енергію постійного струму на механічну енергію. Двигун через редуктор з'єднаний із барабаном, на який намотаний трос. Подаючи постійний струм на двигун, ми змотуємо (або розмотуємо) барабан, тим самим змінюємо довжину троса, а отже траєкторію руху підвісу.

Як датчик положення валу двигуна в системі використовується інкрементний оптичний енкодер. Для формування імпульсів інкрементний енкодер має встановлений на валу диск з поділами, які визначають положення валу, і пристрій для зчитування цього положення. Положення диска (кут повороту) кодується шляхом чергування двох типів областей на диску, які ідентифікуються за допомогою датчиків (наприклад, для оптичного датчика це прозорі та непрозорі області).

Для визначення напрямку обертання використовують другий датчик, який зміщений щодо першого на половину ширини штриха диска або проміжку між штрихами. Для визначення початкового положення диска на нього наноситься окрема референтна шкала мітки. Масштабуючи сигнал з енкодера на контролері, будемо отримувати величину швидкості обертання валу двигуна. Таким чином, даний датчик поєднує в собі три функції: вимірювання положення, напрямку та швидкості обертання валу двигуна.

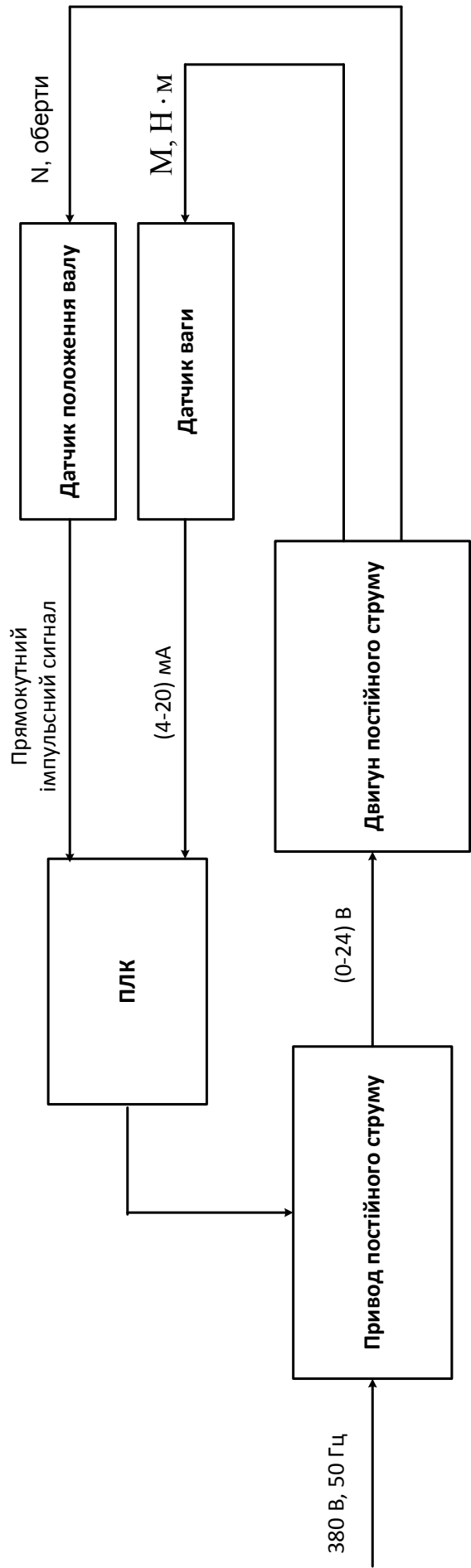


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою

Так як в процесі переміщення підвісу момент навантаження на валу двигуна змінюється, в систему додано контур регулювання збурювання. Датчик ваги перетворює величину ваги у електричний сигнал, який враховується регулятором. Таким чином, можна досягти кращих показників перехідного процесу, таких як час перехідного процесу, точність та перерегулювання.

Як пристрій порівняння використовується програмований логічний контролер (ПЛК). Контролер необхідний для збору та обробки сигналів з датчиків та формування команд для управління двигунами. Контролер повинен мати модульну структуру та можливість розширення. Таким чином, на основі сигналу неузгодженості (різниці між завданням і сигналом зворотного зв'язку), ПЛК генерує керуючий сигнал, тим самим змінює напругу, що підводиться до двигунів через приводи, а значить і траєкторію руху підвісу.

2.2. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації (ФСА) - це технічний документ, що входить до основного комплексу робочих креслень, проекрованої системи автоматизації, згідно з ДСТУ Б А.2.4-16:2008 Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. ФСА створюється з метою відображення основних технічних рішень. Об'єкт управління сприймається як комплекс устаткування (основного і допоміжного) із вбудованими у нього органами.

ФСА може бути виконана спрощеним або розгорнутим способом. Відмінність розгорнутого у цьому, що у схемі зображуються місця розташування та склад засобів автоматизації. Прилади та засоби автоматизації зображуються у вигляді умовних графічних зображень згідно з ДСТУ Б А.2.4-16:2008.

Проектування автоматизованої системи виконано за принципом трирівневої ієрархії – передбачено польовий, середній та верхній рівень.

На польовому рівні розташовуються місцеві прилади, що показують, первинні засоби вимірювання, виконавчі механізми і пристрої місцевого управління.

Середній рівень передбачає збирання та первинну обробку інформації з пристроїв польового рівня, контроль позначених параметрів, передачу (прийом) даних на верхній рівень (з верхнього рівня). На основі інформації, що надійшла середній рівень, формуються команди управління (автоматично чи оператором).

На верхньому рівні відбувається зосередження, обробка та впорядкування (формування бази даних) інформації з нижніх рівнів. Також передбачається індикація необхідних параметрів, реєстрація та зберігання інформації. Тут відбувається формування звітної документації та здійснення управління технологічними режимами системи.

АРМ призначене для відображення необхідного обсягу інформації у зручному для сприйняття вигляді та прийому команд управління від оператора. За допомогою серверної частини виконується зберігання та обробка інформації, а також обмін нею.

Функціональна схема автоматизації системи формування траєкторії крана гнучкої підвіски наведена на рис. 2.2.

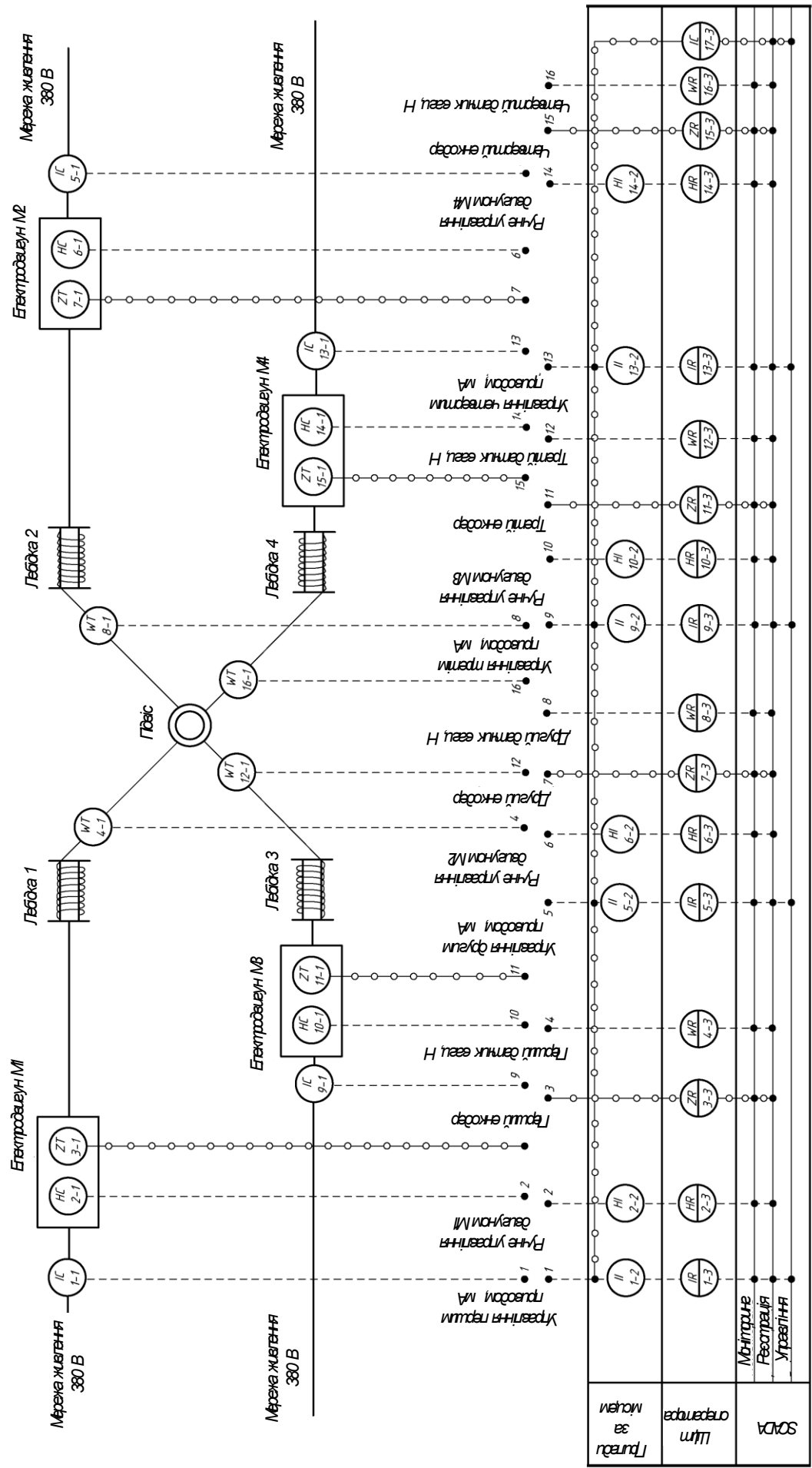


Рисунок 2.2 – Функціональна схема автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою

2.3. Комплекс апаратно-технічних засобів

2.3.1 Вибір електродвигуна постійного струму

На основі розрахунків, виконаних у главі 1, було розглянуто два мотор - редуктора черв'ячного типу: King Right Motor WG1188 та Transtecno ECM (рис. 2.3-2.4).



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд мотор-редуктора King Right Motor WG1188



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд мотор-редуктора Transtecno ECM

Порівняння характеристик двигунів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик двигунів

Двигун	King Right Motor WG1188 [25]	Transtecno ECM [24]
Потужність, Вт	600	800
Частота обертання вихідного валу, об/хв	202	300
Крутний момент, Н- м	17,9	22
Передавальне число	10	10
Напруга живлення, В	24	24

Виходячи з даних, наведених у таблиці, виберемо мотор-редуктор King Right Motor WG1188, оскільки він більше підходить до нашої системи за потужністю.

Даний мотор-редуктор є електродвигун і редуктор, суміщені в одному блоці. Таким чином, не буде проблем із їх сумісністю. Також у даного мотор-редуктора є слот для встановлення датчика положення валу (енкодера).

2.3.2 Вибір силової частини електроприводу

Для того, щоб перетворити трифазну мережну напругу 380 В на стабілізовану постійну напругу необхідний привод постійного струму. Для цього було розглянуто три приводи постійного струму: ABB DCS800-S02-0025-04/05, Sinamics DCM 6RA8018-6DV62-0AA0 та Mentor MP 25A4 (рис.2.5-2.7).



Рисунок 2.5 – Привод постійного струму ABB DCS800-S02-0025-04/05



Рисунок 2.6 – Привод постійного струму Sinamics DCM RA8018-6DV62-0AA0



Рисунок 2.7 – Привод постійного струму Mentor MP 25A4

Порівняння характеристик приводів наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик приводів постійного струму

Привод постійного струму	ABB DCS800-S02-0025-04/05 [26]	Sinamics DCM 6RA8018- 6DV62-0AA0 [27]	Mentor MP 25A4 [28]
Вихідний струм ланцюга якоря, А	30	25	25
Діапазон вихідної напруги, В	(0-400)	(0-420)	(0-550)
Напруга мережі живлення, В	380	400	(208-480)
Підтримувані протоколи зв'язку	Modbus, Profibus, Ethernet	Modbus, Profibus, Ethernet	Modbus, Profibus, Ethernet

Виходячи з даних, наведених у таблиці, був обраний привод постійного струму Mentor MP 25A4, оскільки він має найнижчу ціну та задовольняє робочим вимогам системи.

Напруга, що подається цим приводом на двигуни, управляється дистанційно з контролера по протоколу Modbus.

2.3.3 Вибір датчика положення та швидкості обертання валу

При формуванні траєкторії руху підвісу в системі необхідно контролювати кількість обертів та швидкість обертання валу двигунів. Для цього було розглянуто два датчики положення валу (енкодери): Delta Electronics ES3 та Leine Linde RSI 505 (рисунки 2.8-2.9).



Рисунок 2.8 - датчик положення вала Delta Electronics ES3



Рисунок 2.9 - датчик положення валу Leine Linde RSI 505

Порівняння характеристик датчиків наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Порівняння характеристик датчиків положення вал

Датчик	Delta Electronics ES3 [29]	Leine Linde RSI 500 [30]
Максимальна швидкість обертання, об/хв	6000	7000
Межа допустима похибки	$\pm 120''$	$\pm 90''$
Вихідні сигнали	Прямокутний імпульсний сигнал	Прямокутний імпульсний сигнал
Напруга живлення, В	(5-24)	24
Ступінь пиловологозахисту	IP65	IP66
Роздільна можливість, дискрет/об	(100-2500)	(100-10000)

Виходячи з даних, наведених у таблиці, вибір зупинимо на датчику Delta Electronics ES3, оскільки він має найпривабливішу ціну та задовольняє робочим вимогам системи.

2.3.4 Вибір датчика ваги

Для того, щоб враховувати вплив, що обурює, необхідно враховувати величину моменту навантаження на вал двигуна. Для цих цілей були розглянуті три S-подібні датчики ваги: Siemens SIWAREX WL200, Scaime ZFA та Revere 363 (рисунки 2.10-2.12).



Рисунок 2.10 - Датчик ваги Siemens SIWAREX WL200



Рисунок 2.11 – Датчик ваги Scaime ZFA



Рисунок 2.12 – Датчик ваги Revere 363

Порівняння характеристик датчиків наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик датчиків ваги

Датчик	Siemens SIWAREX WL200 [31]	Scaime ZFA [32]	Revere 363 [33]
Номінальне навантаження, кг	50	100	100
Межа допустима похибки	$\pm 0,02 \%$	$\pm 0,03 \%$	$\pm 0,03 \%$
Вихідні сигнали	(4-20) мА	(4-20) мА	(4-20) мА
Напруга живлення, В	(5-12)	10	10
Ступінь пиловологозахисту	IP67	IP65	IP65

Виходячи з даних, наведених у таблиці, виберемо датчик ваги Revere 363, оскільки він має найпривабливішу ціну та задовольняє вимогам робочих режимів системи.

Даний датчик – тензорезистивний, тобто він змінює електричний опір чутливого елемента залежно від прикладеного навантаження. Далі величина опору перетворюється на уніфікований струмовий сигнал і подається на контролер.

2.3.5 Вибір програмованого логічного контролера

Для збору та обробки сигналів з датчиків та формування команд управління двигунами було розглянуто два варіанта контролерів: Modicon Premium, та SIMATIC S7-1200 (рисунки 2.13-2.14).



Рисунок 2.13 - Контролер Modicon Premium



Рисунок 2.14 - Контролер SIMATIC S7-1200

Порівняння характеристик контролерів наведено у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Порівняння характеристик контролерів

Контролер	Modicon Premium [34]	SIMATIC S7- 1200 [35]
Пам'ять, Мб	256	2
Час циклу, мс	1	5
Типи інтерфейсів	RS-485, RS 485, Ethernet, Profibus	IxPROFINET, RJ45
Напруга живлення, В	24	24
Потужність, Вт	3	12
Температура довкілля, °C	от 0 до плюс 70	от 0 до плюс 55
Ступінь захисту	IP67	IP20

У ході аналізу характеристик найбільш підходящим виявився контролер SIMATIC S7-1200.

Програмований логічний контролер (ПЛК) SIMATIC S7-1200 (рис. 3.24) [20] представник мікро контролерів Сіменс для вирішення завдань автоматизації. (ПЛК) SIMATIC S7-1200 має конструкцію у вигляді окремих модулів. Працює у реальному часу.

Модульний контролер SIMATIC S7-1200 є базовим рішенням для простих, але високоточних завдань автоматизації. Контролер SIMATIC S7-1200 є модульним і компактним, універсальним, безпечним вкладенням і добре підходить для повного спектру додатків. Масштабований і гнучкий дизайн, комунікаційний інтерфейс PROFINET, який відповідає найвищим стандартам промислового зв'язку, і повний набір потужних інтегрованих технологічних функцій роблять цей контролер невід'ємною частиною повного та комплексного рішення автоматизації.

Графічні інтерфейси: SIEMENS пропонує програмне забезпечення для створення графічних інтерфейсів, що спрощує моніторинг та управління процесами.

Застосування: ПЛК SIEMENS використовуються у різних галузях, включаючи виробництво, енергетику, транспорт та автоматизацію будівель.



Рис. 2.15. Програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200

Технічні характеристики програмованого логічного контролеру Siemens Simatic S7-1200 наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики ПЛК Siemens Simatic S7-1200

Напруга живлення	~85...264В (~115/230) В	Номінальне
Струм споживання процесором	100 мА при ~120 В, 50 мА при ~230	
Постійна пам'ять	4 МБ, розширюється картою пам'яті до 2ГБ	
Енергонезалежна пам'ять	10кб	
Типовий час виконання	Логічних операцій - 0,08мкс, операцій зі словами - 1.7мкс, математичних операцій з плаваючою крапкою - 2.3мкс.	
Вбудовані високочастотні лічильники	6х100/30кГц	
<i>Дискретні входи</i>	Кількість 14	
Гальванічна розв'язка	групова	
Вхідна напруга/ струм	24 В/ 4 мА	
Довжина кабелю, не більше – екранований – звичайний	500м, 50м для високочастотного лічильника; 300м	
<i>Дискретні виходи</i>	Кількість 10	
Тип виходів	Замикаючі контакти реле	
Вихідна напруга	=5 ... 30 В/ ~5 ... 250 В	
Гальванічна розв'язка	індивідуальна	
Частота перемикання релейних виходів, не більше	1 Гц	
Довжина кабелю, не більше – екранований	500м;	

– звичайний	150м
<i>Аналогові входи</i>	Кількість 2
Діапазон вимірювання входних сигналів	0..10 В
Точність перетворення	$\pm 3\%$, при $t\ 25^{\circ}\text{C}$; $\pm 3,5\%$ при $t\ 0..+55^{\circ}\text{C}$
Довжина екранованого кабелю	100м, вита пара
<i>Аналогові виходи</i>	Кількість 2
Діапазон вимірювання входних сигналів	0..10 В
Точність перетворення	$\pm 3\%$, при $t\ 25^{\circ}\text{C}$; $\pm 3,5\%$ при $t\ 0..+60^{\circ}\text{C}$
Тип вихідного сигналу	0..20мА
<i>Інтерфейси зв'язку</i>	
Вбудовані інтерфейси	Ethernet/PROFINET
Обмін даними через мережі	Industrial Ethernet/ PROFINET/ PROFIBUS DP, PtP (Point-to-Point)
Протоколи	TCP/IP, ISO, MODBUS TCP
Програмування	Середовище програмування STEP 7 від V11 SP2 + HSP

Габаритні розміри програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1200 наведено на рис. 2.16.

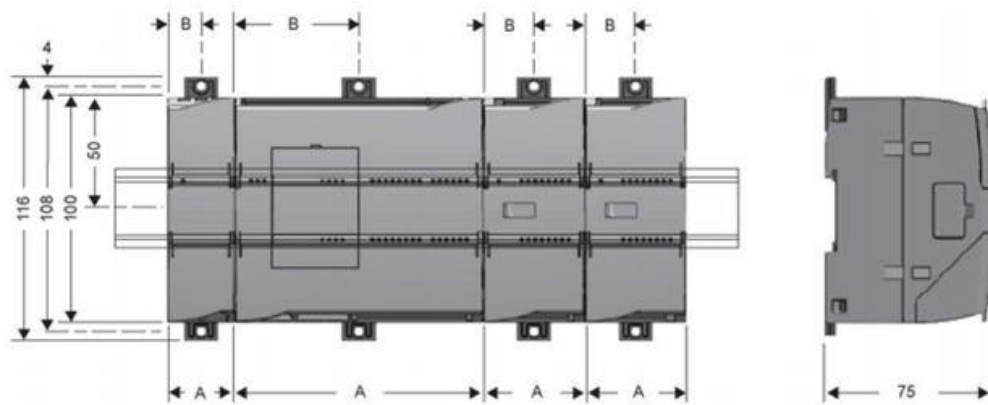


Рис. 2.16. Габаритні розміри програмованого логічного контролеру SIMATIC S7-1200

2.4 Розробка схеми зовнішніх проводок

Схема зовнішніх електричних проводок наведена в графічній частині роботи. Система включає наступні прилади:

- датчики положення валу Delta Electronics ES3;
- датчики ваги Revere 363.

Для передачі сигналів від перелічених вище датчиків на щит контрольно-вимірювальних приладів та автоматики обраний кабель контрольний з струмопровідною мідною жилою в ПВХ оболонці з ПВХ ізоляцією не палаючий (КВВГ нг 4x0,5), де 4 - кількість жил, а 0,5 - перетин жил у міліметрах.

Елементи конструкції кабелю:

- мідна однодротяна струмопровідна жила круглої форми.
- ізоляція із полівінілхлоридного пластикату. Ізольовані жили кабелів скручені. У кожному з них є лічильна пара. ізольовані жили цієї пари відрізняються за кольором один від одного та від інших жил.
- оболонка із полівінілхлоридного пластикату.

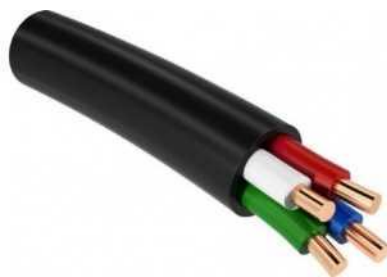


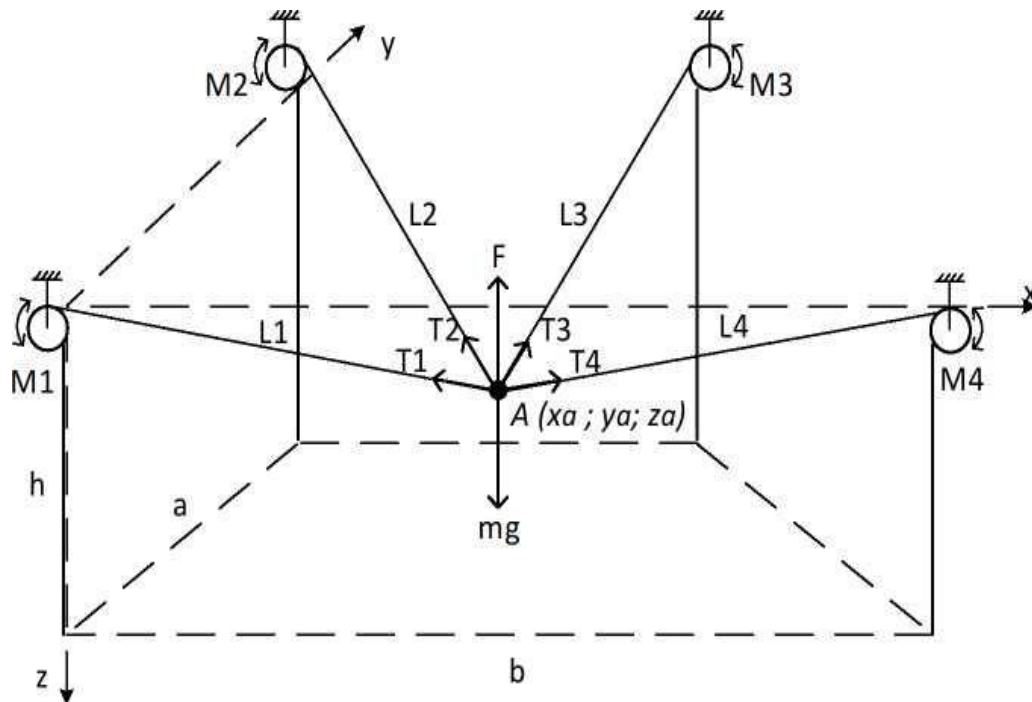
Рисунок 2.17 - Кабель КВВГ

Кабель КВВГ застосовується для прокладання в каналах, тунелях в умовах агресивного середовища, в приміщеннях, за відсутності механічних впливів на кабель.

3. РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРАНА ГНУЧКОЇ ПІДВІСКИ

3.1 Розрахунок чотири ланкового крана гнучкої підвіски

У кінематичній схемі, наведеній рис. 3.1, представлена система чотири ланкового крана гнучкої підвіски.



x_a , y_a , z_a – координати підвісу в даний час; $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ – довжина кожного троса; a – відстань між приводами $M1$ та $M2$; b – відстань між приводами $M1$ та $M4$.

Рисунок 3.1 – Кінематична схема крана

У такій системі тіло закріплене в одній точці тросами до чотирьох приводних механізмів, які розташовані в крайніх верхніх точках робочої зони. Згідно з технічним завданням система буде встановлена в кімнаті з характеристиками, представленими в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Основні параметри системи

Параметр	Значення
Висота стелі (кріплення приводу)	3 м
Довжина стін (відстань між приводами)	4 м
Площа приміщення (квадрат 4х4)	16 м ²
Величина зневажування	50 кг

Завдання управління краном на даному етапі проектування зводиться до вирішення задачі переміщення підвісу у просторі та забезпеченні сили, що компенсує вагу тіла.

Перше завдання являє собою обернену задачу кінематики, тобто. за відомим положенням підвісу в робочій зоні, необхідно визначити довжини тросів. При цьому довжини тросів дорівнюють радіусу сфери з центром у точці розміщення приводу:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = L_1^2, \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = L_2^2, \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = L_3^2, \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = L_4^2. \end{cases} \quad (3.1)$$

Розв'яжемо систему рівнянь щодо довжин:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2}, \\ L_2 = \sqrt{x_a^2 + (y_a - a)^2 + z_a^2}, \\ L_3 = \sqrt{(x_a - b)^2 + (y_a - a)^2 + z_a^2}, \\ L_4 = \sqrt{(x_a - b)^2 + y_a^2 + z_a^2} \end{cases} \quad (3.2)$$

Друге завдання – регулювання вектора сили, що компенсує – може бути вирішена зміною зусилля на кожному з чотирьох тросів шляхом незалежного

регулювання моменту на відповідному приводі. При можливості розміщення датчика ваги на підвісі можна реалізувати незалежний контур регулювання, що працює паралельно з контуром регулювання положення підвісу.

3.2. Розрахунок сил

Розрахуємо сили натягу тросів (гнучких ланок), які необхідно забезпечити для компенсації ваги тіла у поточному положенні. Ця задача може бути вирішена, якщо відома сила натягу кожного з тросів, які необхідно забезпечити для компенсації ваги тіла.

На рис. 3.2 представлена кінематична схема системи з урахуванням сил натягу тросів. Для зручності розрахунків початок координат переміщено в точку кріплення підвісу. На даному етапі припускаємо, що використовуються нерозтяжні троси.

Для того щоб розкласти вектор $\bar{F}$ на чотири вектори, що направлені з тросами, необхідно ввести уявний вектор $\bar{T}'$, який лежить у площині утвореній векторами $\bar{T}_3, \bar{T}_4$ і спочатку розкласти вектор $\bar{F}$ за базисом $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}'\}$, а потім розкласти уявний вектор $\bar{T}'$ по двох векторах $\bar{T}_3, \bar{T}_4$.

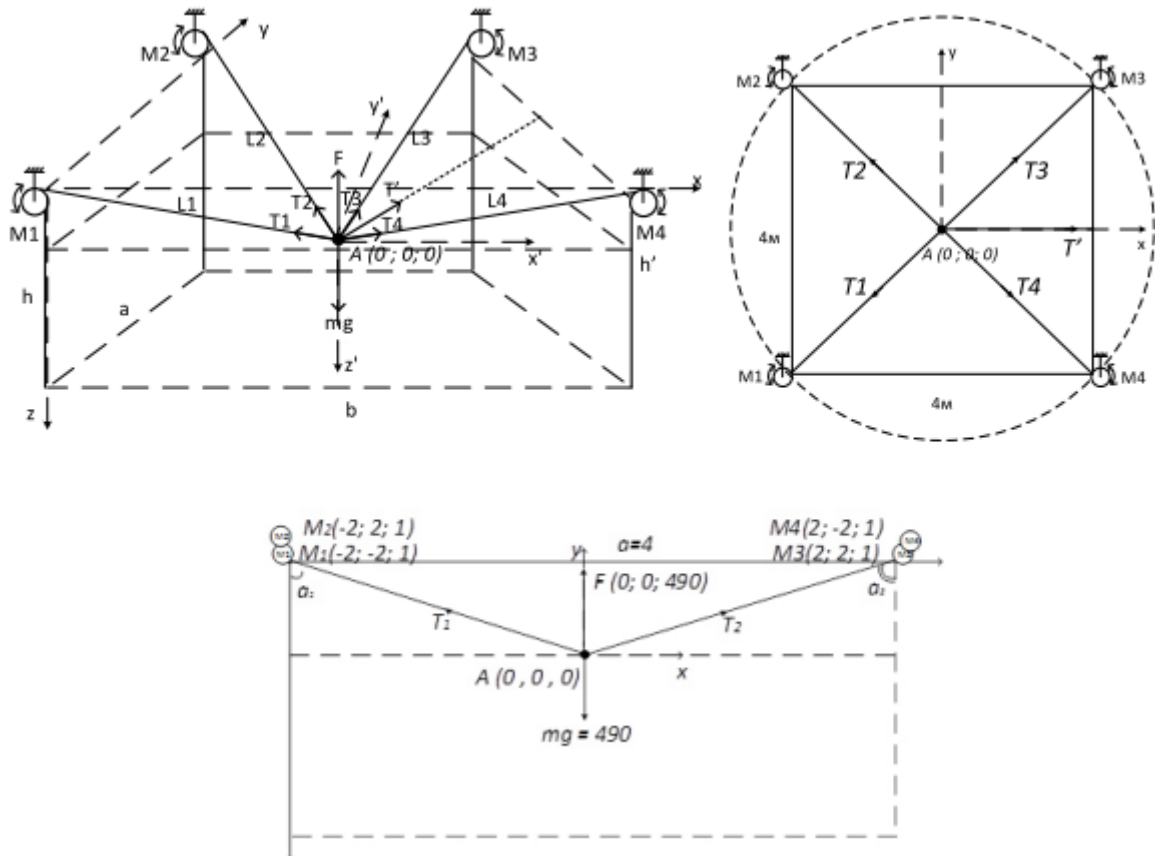
Необхідно розкласти вектор $\bar{T}_3, \bar{T}_4$ за базисом $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}'\}$, тобто. знайти такі коефіцієнти a, b, c при яких лінійна комбінація базисних векторів $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}'\}$ дорівнюватиме вектору $\bar{F}$:

$$\bar{F} = a\bar{T}_1 + b\bar{T}_2 + c\bar{T}', \quad (3.3)$$

де a, b, c – координати вектора $\bar{F}$ у базисі $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}'\}$.

Запишемо вираз (1.3) у координатній формі:

$$(0; 0; 490) = a * (-2; -2; 1) + b * (-2; 2; 1) + c * (2; 0; 1). \quad (3.4)$$



$\vec{F}$ – вектор сили, що компенсує вагу тіла; $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3, \vec{T}_4\}$ – система векторів сил натягу тросів; h – висота приміщення; h' – висота робочої площини; a – ширина робочої зони; b – довжина робочої зони.

Рисунок 3.2 – Кінематична схема крана (сили натягу)

Щоб помножити вектор на число, необхідно кожен координату вектора помножити на число:

$$(0; 0; 490) = (-2a; -2a; a) + (-2b; 2b; b) + (2c; 0; c). \quad (3.5)$$

Підсумуємо вектор у правій частині рівняння, для цього підсумуємо відповідні координати:

$$(0; 0; 490) = (-2a - 2b + 2c; -2a + 2b + 0; a + b + c). \quad (3.6)$$

Якщо два вектори рівні, то рівні та їх відповідні координати, а отже можна отримати таку систему виразів:

$$\begin{cases} -2a - 2b + 2c = 0; \\ -2a + 2b = 0; \\ a + b + c = 490. \end{cases} \quad (3.7)$$

Розв'яжемо систему рівнянь:

$$a = 122,5; b = 122,5; c = 245. \quad (3.8)$$

При розкладанні вектора $\bar{T}'$ з коефіцієнтом 245 на вектори $\bar{T}_3, \bar{T}_4$, отримаємо коефіцієнт: 122.5.

Тоді потрібне розкладання:

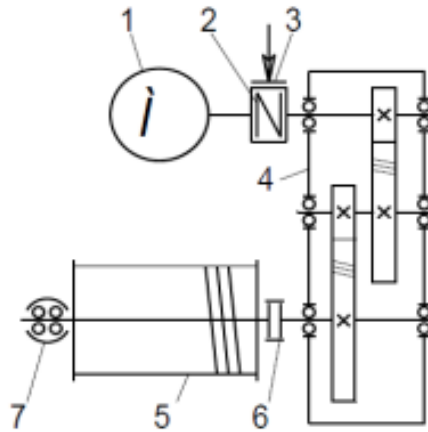
$$\bar{F} = 122.5 \cdot \bar{T}_1 + 122.5 \cdot \bar{T}_2 + 122.5 \cdot \bar{T}_3 + 122.5 \cdot \bar{T}_4. \quad (3.9)$$

З отриманих виразів можна отримати сили натягу тросів T_1, T_2, T_3, T_4 .

У центрі робочої області навантаження на всіх тросах рівномірне і дорівнює 122.5 Н. При зміщенні схоплення крана до одного з приводів, сила натягу на ньому наближатися до 490 Н (компенсуючої силі), на інших приводах буде прагнути до нуля. З даних розрахунків можна зробити висновок, що приводний лебідковий механізм повинен забезпечувати силу натягу щонайменше 490Н.

3.3. Розрахунок приводних лебідкових механізмів

Як приводний елемент крана використовується однобарабанна вантажопідйомна реверсивна лебідка з приводом електродвигуном і черв'ячним редуктором. Кінематична схема лебідки у загальному випадку представлена на рис. 3.3.



1 – електродвигун; 2 – пружна втулково-пальцева муфта з гальмівним шківом; 3 – автоматичне постійно замкнуте двоколодове гальмо; 4 – циліндричний двоступінчастий зубчастий редуктор; 5 – барабан; 6 – зубчаста муфта; 7 – виносна підшипникова опора

Рисунок 3.3 – Кінематична схема лебідки

Лебідки зазвичай застосовуються в різних вантажопідйомних машинах, таких як будівельний підйомник, баштовий або стріловий кран і т.п. При розрахунку лебідки для застосування в таких машинах актуальним завданням є визначення схеми поліспасти та його кратності, яка визначається за формулою:

$$u = \frac{k_B}{a} \quad (3.10)$$

де k_B – число гілок канату, на яких підвішений вантажозахоплювальний пристрій;

a – число гілок канату, що намотуються на барабан.

Так як у крані відсутня система блоків та поліспаст, прийmemo кратність поліспасту $u = 1$ и ККД системи $\eta = 0,98$.

3.4. Розрахунок тросу (канату)

Канат для лебідки підбирається за розривним зусиллям, що допускається, яке може бути обчислено за формулою:

$$S_p > k_z \cdot S_k, \text{ Н}, \quad (3.11)$$

де S_p – допустиме розривне зусилля в канаті, Н;

k_z – коефіцієнт запасу міцності канату на розрив, що залежить від режиму роботи механізму, визначається за таблицею 3.2;

S_k – максимальне робоче зусилля в канаті, Н.

Таблиця 3.2 – Мінімальні значення коефіцієнта запасу міцності канату

Група класифікації механізму за ISO 4301/1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Значення коефіцієнта запасу міцності для рухомих канатів	3,15	3,35	3,55	4,00	4,50	5,60	7,10	9,00

Для того, щоб визначити групу класифікації механізму, необхідно визначити режим навантаження та клас використання механізму відповідно до стандарту ISO 4301/1.

Клас використання Т5, згідно з яким механізм використовується регулярно, але з перервами. Режим навантаження системи L2 – помірний, так як наш механізм не буде регулярно піддаватися впливу найбільших навантажень. За таблицею 3.3 клас використання механізму визначено як М5, значення коефіцієнта запасу міцності при цьому буде рівне $k_3 = 4,5$.

Таблиця 3.3 – Групи класифікації механізмів загалом

Режим навантаження	Номінальний коефіцієнт розподілу навантаження <i>к_т</i>										
		T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Г1 - легкий	0,125	-	-	М 1	М 2	М 3	М 4	М 5	М 6	М 7	М 8
Г2 - помірний	0,25	-	М 1	М 2	М 3	М 4	М 5	М 6	М 7	М 8	-
Г3 - важкий	0,50	М 1	М 2	М 3	М 4	М 5	М 6	М 7	М 8	-	-
Г4 – дуже важкий	1,0	М 2	М 3	М 4	М 5	М 6	М 7	М 8	-	-	-

Максимальне робоче зусилля в канаті, що навивається на барабан під час підйому вантажу, визначається наступним чином:

$$S_k = \frac{(m+q) \cdot g}{a \cdot u \cdot \eta}, \quad (3.12)$$

де m – маса вантажу, що піднімається, кг;

q – маса схвату, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

α – число гілок канату, що намотуються на барабан;

u – кратність поліспасту.

Маса схвату може бути обчислена за формулою:

$$q = (0,06 \dots 0,08) \cdot m = 3,5 \text{ кг.} \quad (3.13)$$

Таким чином, максимальне робоче зусилля дорівнює:

$$S_k = \frac{(50+3,5) \cdot 9,8}{1 \cdot 1 \cdot 0,98} = 535 \text{ Н.} \quad (3.14)$$

Допустиме розривне зусилля при цьому дорівнює:

$$S_p > k_z \cdot S_k = 4,5 \cdot 535 = 2407,5 \text{ Н.} \quad (3.15)$$

Необхідний діаметр канату і всі його дані можна визначити за розрахованим розривним зусиллям канату за ДСТУ 2688-99. Було обрано сталевий канат подвійної звивання типу ЛК-Р діаметром 5,6 мм. При цьому маса 1000м канату приблизно дорівнює 116 кг.

Довжина канату, намотуваного на барабан, дорівнює максимальній відстані між двома протилежними точками робочої області крана, тому довжина канату Γ повинна дорівнювати 6,4 м. У процесі використання трос буде деформуватися, тому прийемо $\Gamma = 7$ м. У такому випадку маса канату дорівнюватиме 0,812 кг.

3.5. Облік нелінійностей

У процесі експлуатації канат піддається пружній деформації, величину якої необхідно враховувати під час складання математичної моделі.

Сила натягу троса визначається згідно із законом Гука:

$$\bar{F} = k \cdot \bar{\Delta l}, \text{ Н,} \quad (3.16)$$

де Δl — абсолютне подовження;

k – коефіцієнт пружності.

Коефіцієнт пружності може бути знайдений за такою формулою:

$$k = \frac{E \cdot S}{L}, \quad (3.17)$$

де E – модуль Юнга (механічна характеристика матеріалу);

S – площа поперечного перерізу канату;

L – довжина канату.

Для канату ЛК-Р діаметром 5,6 мм згідно з ГОСТ 2688-80 модуль Юнга (маркувальна група) $E = 1570 \text{ Н/мм}^2$. Тоді, знаючи довжину канату $L = 7 \text{ м}$, можемо розрахувати коефіцієнт пружності:

$$k = \frac{1570 \cdot \pi \cdot 5,6^2}{7 \cdot 4} = 5524 \text{ Н/м}, \quad (3.18)$$

Знаючи силу натягу троса та коефіцієнт пружності, можна розрахувати його подовження:

$$\Delta l = \frac{F}{k}, \text{ м.} \quad (3.19)$$

Це продовження згодом необхідно буде враховувати в алгоритмі управління траєкторією підвісу.

3.5 Розрахунок барабану

Барабани лебідок вантажопідйомних машин виконуються звареними або литими. Їх поверхня може бути гладкою для укладання канату в кілька шарів або з канавками (нарізною) для укладання канату в один шар, як показано на рис. 3.4.

Число шарів укладання канату на барабан орієнтовно визначено у таблиці 3.4. У системі, що розробляється, довжина канату не буде

перевищувати 50м, а значить достатньо одного шару укладання троса.

Таблиця 3.4 – Число шарів укладання канату на барабан лебідки

Довжина канату, що намотується на барабан (L), м	Число шарів укладання (m)
до 50	1
50.125	2
125...200	3

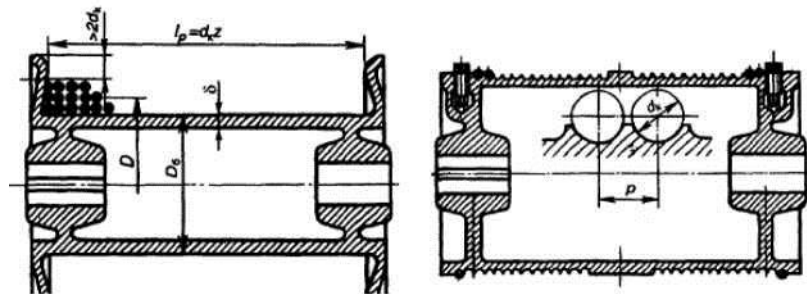


Рисунок 3.4 – Типи барабанів лебідок (ліворуч - гладкий, праворуч з канавками)

Мінімальний діаметр барабана визначається за формулою:

$$D_0 > h_1 * d, \quad (3.20)$$

де h_1 – коефіцієнт вибору діаметра (також вибирається за ДСЕТ ISO 4301/1 - від 11,2 до 25,0);

d – діаметр канату.

Звідси:

$$D_0 = 18 \cdot 5,6 = 100,8. \quad (3.21)$$

Для зручності розрахунків виберемо діаметр барабана $D_0 = 110$ мм.

Кількість робочих витків в одному шарі навивки визначається за формулою:

$$Z_p = \frac{1000 \cdot L}{\pi \cdot m \cdot (m \cdot d + D_6) \cdot \varphi} = \frac{7000}{3,14 \cdot 1 \cdot (1 \cdot 5,6 + 110) \cdot 1} = 19,27, \quad (3.22)$$

де φ – коефіцієнт нещільності навивки каната (для нарізних барабанів $\varphi = 1$);

L – довжина канату;

m – кількість шарів укладання канату на барабан;

d – діаметр канату;

D_6 – діаметр барабана.

Загальна кількість витків Z визначається за такою формулою:

$$Z = Z_p + Z_z + Z_k = 19,27 + 1,73 + 3 = 24, \quad (3.23)$$

де Z_p – число запасних витків (від 1,5 до 2);

Z_k – число витків канату, що під затискним пристроєм (для нарізних барабанів Z_k становить від 3 до 4).

Визначимо основні конструктивні розміри барабана. Довжина барабана з нарізкою обчислюється за такою формулою:

$$L_6 = Z \cdot t, \quad (3.24)$$

де t – крок нарізки барабана.

Крок нарізки t визначається за формулою:

$$t = d + (2 \dots 3) \text{ мм}, \quad (3.25)$$

Виберемо крок нарізки рівним 7 мм. У такому разі довжина барабана дорівнює:

$$L_6 = 24 \cdot 7 = 168 \text{ мм}. \quad (3.26)$$

Конструктивно співвідношення між довжиною барабана та його діаметром має знаходитися в таких межах:

$$0.5 < \frac{L_6}{D_6} < 3.0. \quad (3.27)$$

Параметри підібрані правильно, оскільки співвідношення входить у межі:

$$0.5 < \frac{168}{110} = 1,53 < 3.0 \quad (3.28)$$

3.6 Розрахунок потужності двигуна

Необхідну потужність двигуна можна визначити за максимальним робочим зусиллям в канаті S_k , швидкості навивки канату на барабан v_k та ККД $\eta = 0,98$. Швидкість навивки канату на барабан визначається за формулою:

$$v_k = v_{гр} \cdot u = 1 \text{ м/с}, \quad (3.29)$$

де $v_{гр} = 1$ – задана швидкість підйому вантажу, м/с;

u – кратність поліспасту (у системі відсутня, тому $u = 1$).

Необхідну потужність двигуна можна знайти за формулою:

$$N_{дв} = \frac{S_k \cdot v_k}{1000 \cdot \eta} = \frac{535}{980} = 0.55 \text{ кВт} = 550 \text{ Вт}. \quad (3.30)$$

3.7 Розрахунок передавального числа редуктора

Передатне число редуктора визначається наступним виразом:

$$i_p = \frac{n_{дв}}{n_6}, \quad (3.31)$$

де $n_{\partial\partial}$ – частота обертання валу електродвигуна, хв^{-1} ;

n_{∂} – частота обертання барабана, хв^{-1} .

Частота обертання барабана визначається за середнім діаметром навивки канату:

$$n_{\partial} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot v_k}{\pi \cdot [D_{\partial} + m \cdot d \cdot (2 \cdot m - 1)]} = \frac{60000}{3,14 \cdot [110 + 1 \cdot 5,6]} = 165,2 \text{ об/мин.} \quad (3.32)$$

За умови, що частота обертання валу електродвигуна дорівнюватиме 1000 об/хв, передатне число редуктора:

$$i_p = \frac{1000}{165,2} = 6,053. \quad (3.33)$$

Підбір редуктора здійснюємо за необхідним передатним числом i_p редуктора, частотою обертання валу електродвигуна n , режиму роботи і потужності на швидкохідному валу редуктора. При виборі редукторів механізмів підйому значення потужності на швидкохідному валу редуктора визначається за формулою:

$$N_p \geq k * N_{\text{дв}} = 1,3 \cdot 0,55 = 0,605 \text{ кВт}, \quad (3.34)$$

де $N_{\text{дв}}$ – номінальне значення потужності обраного двигуна;

k – коефіцієнт навантаження, значення k залежно від режиму роботи становлять: $k=1,5$ (легкий); $k=1,3$ (середній); $k=1,1$ (важкий).

Група режиму роботи механізму визначається за ДСТУ ISO 4301/1.

4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КРАНОМ З ГНУЧКОЮ ПІДВІСКОЮ

4.1 Формування траєкторії прямої

Розглянемо найпростіший приклад управління формуванням траєкторії підвісу - рух прямою. Припустимо, підвіс у початковий час перебуває у точці А з координатами (1, 3, -1). При цьому довжини тросів дорівнюватимуть:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11} = \sqrt{1^2 + (-3)^2 + (-1)^2} = 3,32 \text{ м}, \\ L_{12} = \sqrt{1^2 + (3-4)^2 + (-1)^2} = 1,73 \text{ м}, \\ L_{13} = \sqrt{(1-4)^2 + (3-4)^2 + (-1)^2} = 3,32 \text{ м}, \\ L_{14} = \sqrt{(1-4)^2 + 3^2 + (-1)^2} = 4,36 \text{ м}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

У точці з координатами (2, 2, -2) троси будуть мати наступні довжини

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{21} = \sqrt{2^2 + 2^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м}, \\ L_{22} = \sqrt{2^2 + (2-4)^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м}, \\ L_{23} = \sqrt{(2-4)^2 + (2-4)^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м}, \\ L_{24} = \sqrt{(2-4)^2 + 2^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м}. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

На рис. 4.1 показано схему переміщення.

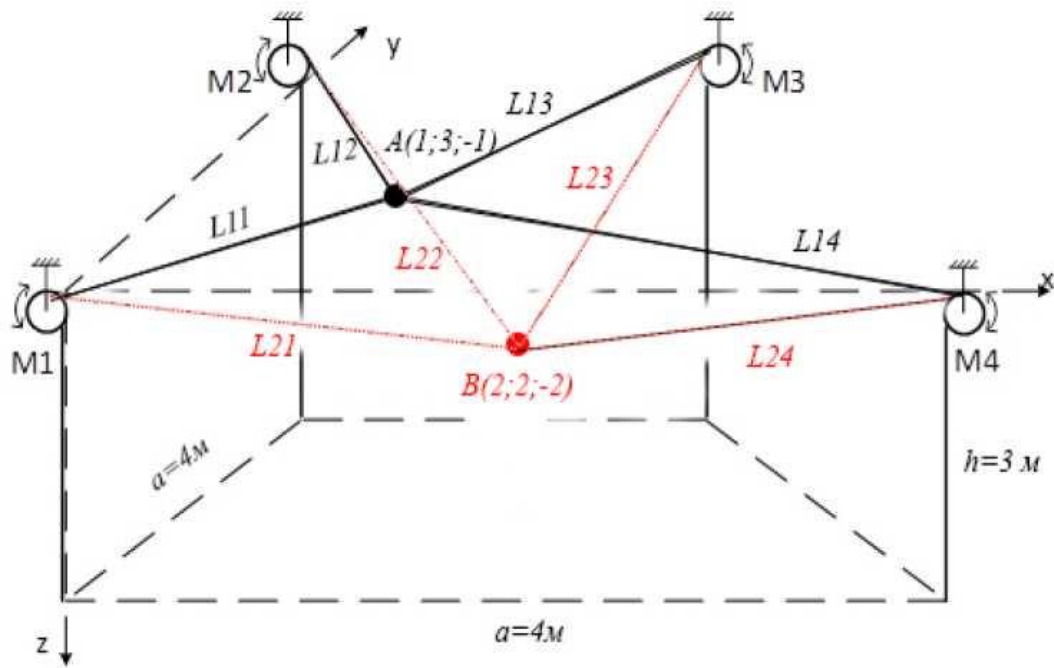


Рисунок 4.1 – Переміщення підвісу прямою

З урахуванням розтягувань довжини тросів дорівнюватимуть:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11f} = L_{11} + \frac{F}{k} = 3,32 + \frac{122,5 \cdot 3,32}{5524} = 3,39 \text{ м}, \\ L_{12f} = 1,73 + \frac{122,5 \cdot 1,73}{5524} = 1,77 \text{ м}, \\ L_{13f} = 3,32 + \frac{122,5 \cdot 3,32}{5524} = 3,39 \text{ м}, \\ L_{14f} = 4,36 + \frac{122,5 \cdot 4,36}{5524} = 4,46 \text{ м}, \\ L_{21f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м}, \\ L_{22f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м}, \\ L_{23f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м}, \\ L_{24f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м}. \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Та довжина тросів, яку потрібно змотати або відмотати:

$$\begin{cases} \Delta L_1 = L_{11f} - L_{21f} = -0,15 \text{ м}, \\ \Delta L_2 = L_{12f} - L_{22f} = -1,77 \text{ м}, \\ \Delta L_3 = L_{13f} - L_{23f} = -0,15 \text{ м}, \\ \Delta L_4 = L_{14f} - L_{24f} = 0,91 \text{ м}. \end{cases} \quad (4.4)$$

Знаки “–” у системі рівнянь 4.4 відповідають за напрямок обертання двигунів.

Діаметр барабана D_6 дорівнює 0,11 м, тому за 1 обертання барабан змотує (відмотує) $\pi \cdot D_6 = 0,35$ м канату. Так як передатне число двигуна дорівнює 10, кількість обертів, яке має виконати кожен двигун:

$$\begin{cases} N_1 = \Delta L_1 \cdot \frac{10}{0,35} = -4,36 \text{ об}, \\ N_2 = \Delta L_2 \cdot \frac{10}{0,35} = -51,23 \text{ об}, \\ N_3 = \Delta L_3 \cdot \frac{10}{0,35} = -4,36 \text{ об}, \\ N_4 = \Delta L_4 \cdot \frac{10}{0,35} = 26,47 \text{ об}. \end{cases} \quad (4.5)$$

Ці обороти кожен двигун повинен буде виконати за те саме час, оскільки нас цікавить саме узгоджене за часом управління.

4.2 Формування складної траєкторії

Як складну траєкторію розглянемо рух підвісу по колу. Траєкторія руху показана на рис. 4.2, рух відбувається у площині ХУ.

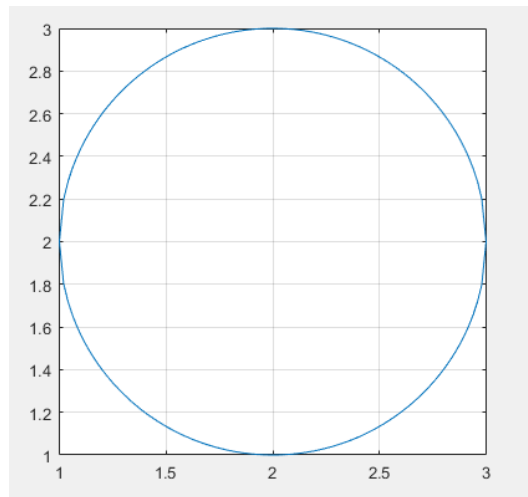


Рисунок 4.2 – Траєкторія руху підвісу

Для того, щоб застосувати алгоритми управління формування такої траєкторії, знайдемо координати кола за допомогою програми, показаної на рис. 4.3.

```

Trajectory.m  x  +
1 - x0=2;
2 - y0=2;
3 - r=1;
4 - x=linspace(x0-r, x0+r);
5 - y=sqrt(r^2 - (x-x0).^2);
6 - plot([x, x(end:-1:1)], [y + y0, -y + y0]);
7 - grid on;
8 - axis square;|

```

Рисунок 4.3 – Математичний опис траєкторії

Ця програма математично описує траєкторію кола, також створюється два масиви з x і y в координатах, послідовно обходять коло і розподіленими рівномірно. Матриці з координатами показано на рис. 4.4.

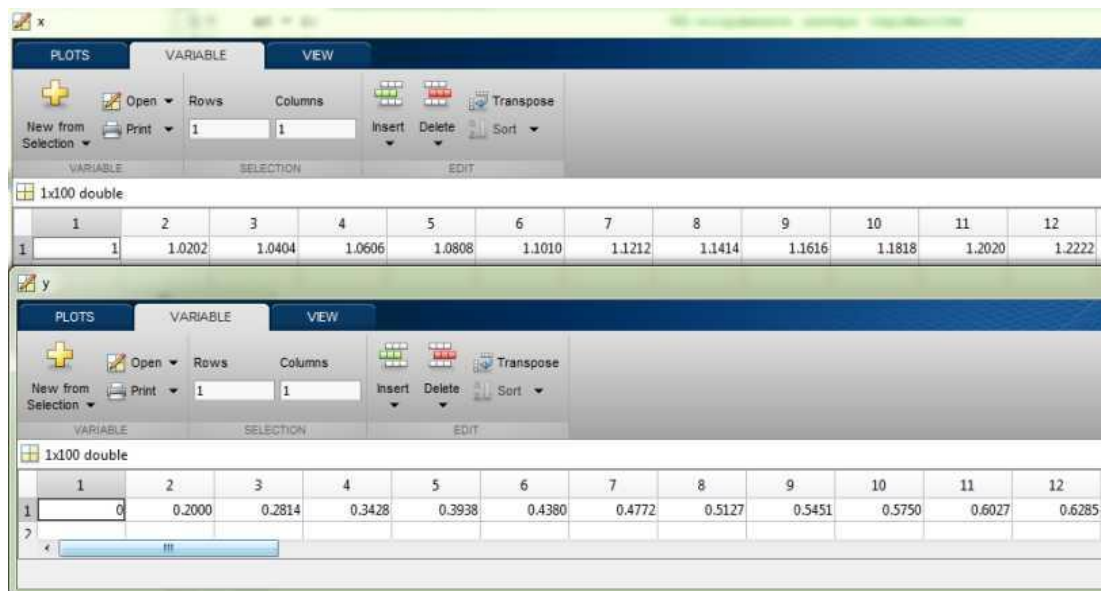


Рисунок 4.4 – Масиви координат

Пропонується послідовно вибирати з масивів координати та передавати їх у керуючу програму. Таким чином, будь-яка складна траєкторія може бути представлена сумою відрізків прямих, причому чим менше крок, тим плавніше буде траєкторія.

Єдиною умовою є наявність математичного опису траєкторії, в іншому завдання управління повністю покривається формуванням траєкторії прямої.

4.3. Розробка імітаційної моделі роботи системи

Для складання операторно-структурної схеми системи у MATLAB Simulink необхідно визначити передавальні функції елементів системи, тобто написати рівняння, що зв'язують вхідну та вихідну величину кожного з елементів.

4.3.1 Визначення передавальної функції приводу

Привод постійного струму, який використовується в даній системі, є тиристорним перетворювачем, що описується наступним диференціальним рівнянням:

$$T_{ТП} \frac{dU_{ТП}}{dt} + U_{ТП} = K_{ТП} U_{РТ}, \quad (4.6)$$

де $U_{РТ}$ – вихідна напруга контуру регулювання струму;

$U_{ТП}$ – вихідна напруга тиристорного перетворювача;

В операторній формі це рівняння має вигляд:

$$T_{ТП} p U_{ТП}(p) + U_{ТП}(p) = K_{ТП} U_{РТ}(p). \quad (4.7)$$

Звідси передатна функція тиристорного перетворювача:

$$W_{ТП}(p) = \frac{U_{ТП}(p)}{U_{РТ}(p)} = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} p + 1}. \quad (4.8)$$

4.3.2 Визначення передавальної функції двигуна

Двигун постійного струму незалежного збудження описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} U_{ТП} = R_{Я} I_{Я} + L_{Я} \frac{dI_{Я}}{dt} + C_E \omega, \\ M_{ДВ} = M_{НАГР} + J \frac{d\omega}{dt}, \\ M_{ДВ} = C_M I_{Я}, \end{cases} \quad (4.9)$$

де $R_{Я}$ і $L_{Я}$ – активний опір та індуктивність якірного ланцюга;

C_E і C_M – конструктивні постійні двигуни, що залежать від конструктивного виконання двигуна (кількість пар полюсів і т.д.);

$M_{НАГР}$ – момент навантаження на валу двигуна;

J – момент інерції частин приводу, що обертаються, приведений до валу двигуна.

У загальному випадку на двигун діє 2 впливу, що показані на рис. 4.5.

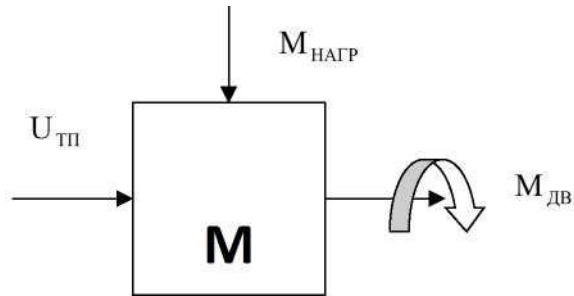


Рисунок 4.5 – Вплив на двигун постійного струму

Для отримання передавальної функції двигуна за керуючим впливом вважаємо, що $M_{НАГР} = 0$ (принцип суперпозиції).

Перетворимо друге рівняння системи (4.9):

$$M_{ДВ} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.10)$$

Підставимо його у третє рівняння системи (4.9):

$$C_M I_{Я} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.11)$$

Звідси:

$$I_{Я} = \frac{J}{C_M} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.12)$$

Підставляємо у перше рівняння системи (4.9):

$$U_{ТП} = \frac{L_{я}J}{C_M} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{я}J}{C_M} \frac{d\omega}{dt} + C_E\omega \quad (4.13)$$

Зв'язок між електрорушійною силою (ЕРС) якоря і кутовою швидкістю, а також між моментом, що обертає, і струмом якоря в системі одиниць СІ визначається єдиним електромагнітним коефіцієнтом:

$$c = C_M = C_E . \quad (4.14)$$

Тоді рівняння (3.13) можна записати так:

$$\frac{U_{ТП}}{c} = \frac{L_{я}J}{c^2} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{я}J}{c^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega, \quad (4.15)$$

де $\frac{R_{я}J}{c^2} = T_M$ – електромеханічна постійна часу якірного ланцюга двигуна;

$\frac{L_{я}}{R_{я}} = T_{\mathcal{E}}$ – електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна.

В результаті отримуємо диференціальне рівняння двигуна постійного струму:

$$\frac{U_{ТП}}{c} = T_M T_{\mathcal{E}} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega. \quad (4.16)$$

Переходимо до операторної форми:

$$\frac{U_{ТП}(p)}{c} = T_M T_{\mathcal{E}} p^2 \omega(p) + T_M p \omega(p) + \omega(p). \quad (4.17)$$

Звідси отримуємо передатну функцію двигуна постійного струму для швидкості обертання:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_M T_{\Sigma} p^2 + T_M p + 1)} \quad (4.18)$$

Якщо застосувати заміну $T_M T_{\Sigma} = T_1 T_2$ та $T_M = T_1 + T_2$, то передавальну функцію можна подати у вигляді послідовно з'єднання двох інерційних ланок:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (4.19)$$

Так як $T_M \gg T_{\Sigma}$, можна приблизно прийняти:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_M p + 1)(T_{\Sigma} p + 1)}. \quad (4.20)$$

4.4. Моделювання серед MATLAB Simulink

Перед початком моделювання необхідно визначити розрахункові параметри двигуна постійного струму. Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга T_{Σ} може бути знайдена за формулою:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}, \text{ с}, \quad (4.21)$$

де L_{Σ} – індуктивність обмотки якоря, Гн;

R_{Σ} – опір обмотки якоря, Ом.

Для двигуна, обраного в розділі 3.1 $L_{\Sigma} = 9 \cdot 10^{-2}$ Гн та $R_{\Sigma} = 0,409$ Ом.

Звідси:

$$T_{\Sigma} = \frac{9 \cdot 10^{-2}}{0,409} = 0,22 \text{ с}. \quad (4.22)$$

Електромеханічну постійну часу можна визначити за такою формулою:

$$T_M = J \frac{R_a}{c}, \text{ с}, \quad (4.23)$$

де J – момент інерції мас, що обертаються, приведений до валу двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (для обраного двигуна дорівнює 0,027);

c – конструктивна стала двигуна (для обраного двигуна дорівнює 1,04).

Таким чином, електромеханічна постійна часу дорівнює:

$$T_M = 0,027 \cdot \frac{0,409}{1,04} = 0,01 \text{ с}. \quad (4.24)$$

Усі змінні підраховані і можна приступати до моделювання.

Готова схема представлена рис. 4.6. Дана схема аналогічна для приводів М2, М3 і М4. В якості впливів використовуються результати, отримані в керуючій програмі.

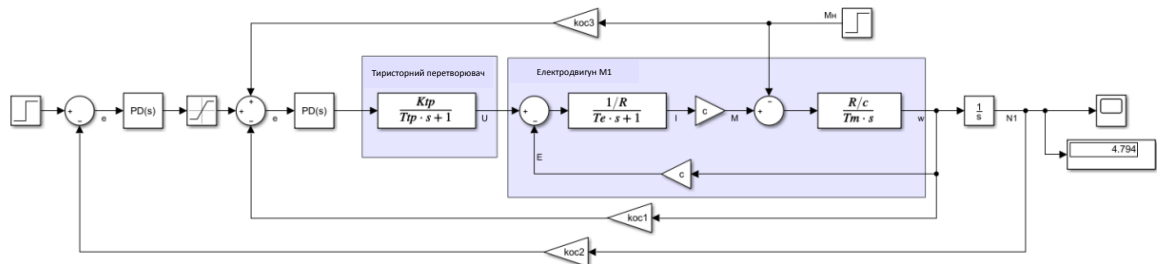


Рисунок 4.6 – Операторно-структурна схема САР в MATLAB Simulink

У даній системі було вирішено відмовитися від використання ПІ- та ПІД-регуляторів, тому що їх введення значно збільшує перерегулювання в системі, що може негативно вплинути на керування траєкторією підвісу.

Проведемо порівняння ПІ- та ПІД-регуляторів. Результати, отримані під час моделювання з використанням ПІ-регуляторів, показані у таблиці 4.1, з

використанням ПД-регуляторів - у таблиці 4.2. Коефіцієнти регуляторів отримані методом автоматичного налаштування MATLAB.

Таблиця 4.1 – Показники якості під час використання П-регуляторів

Регулятори	Коефіцієнти регуляторів K_P	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %
Регулятор швидкості	0,16	2	0
Регулятор положення	21,63		

Таблиця 4.2 – Показники якості під час використання ПД-регуляторів

Регулятори	Коефіцієнти регуляторів		Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %
	K_P	K_D		
Регулятор швидкості	0,35	0,04	1,8	0
Регулятор положення	14,29	0,08		

Як можна помітити, якісні показники перехідних процесів не сильно відрізняються, а отже, достатньо використання П-регуляторів.

Графік перехідного процесу першого приводу показаний на рис. 4.7.

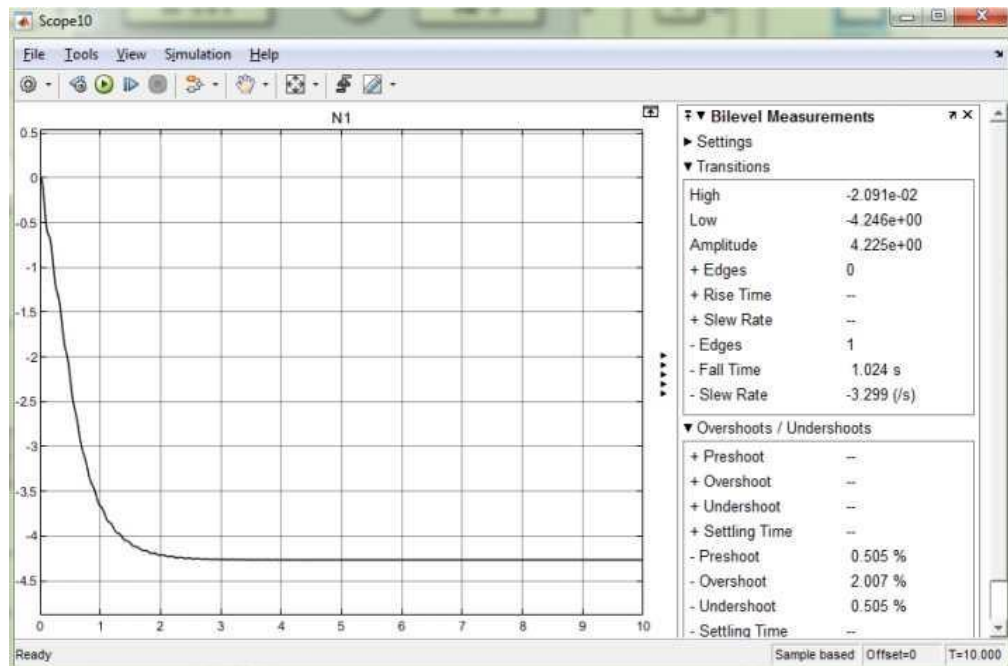


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу першого приводу

Час перехідного процесу становив приблизно 3 секунди, перерегулювання 0%, а помилка, що встановилася, дорівнює нулю.

Тепер проведемо випробування всієї системи відразу, тобто будемо подавати керуючі на кожен привід. Перехідні процеси кожного приводу представлені на рис.4.8.

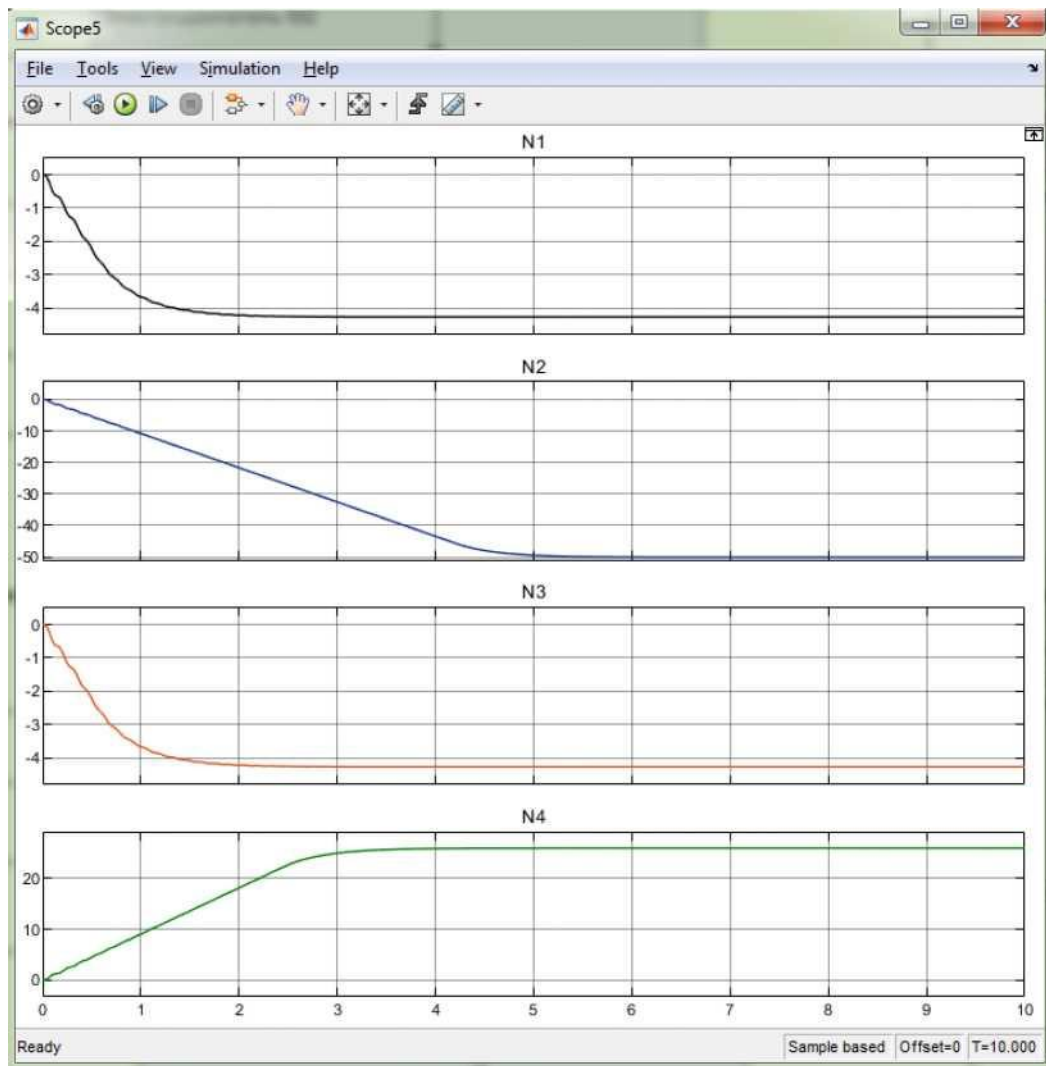


Рисунок 4.8 – Графіки перехідних процесів приводів (вид руху – одночасне з максимальною швидкістю)

Як можна побачити з малюнка, приводи працюють різний час, тому що всі вони працювали з максимально можливою швидкістю.

Щоб реалізувати узгоджене за часом управління, введемо в контур управління ланки Saturation (Насичення). Ці ланки обмежують сигнал висотою, цим зменшується сигнал управління. Для того, щоб визначити поріг обмеження, необхідно виділити найдовший перехідний процес і визначити його співвідношення з іншими. Значення коефіцієнтів склали 0.5 для першого та третього приводів та 0.75 для четвертого. Підсумкові графіки перехідних процесів показані на рис. 4.9.

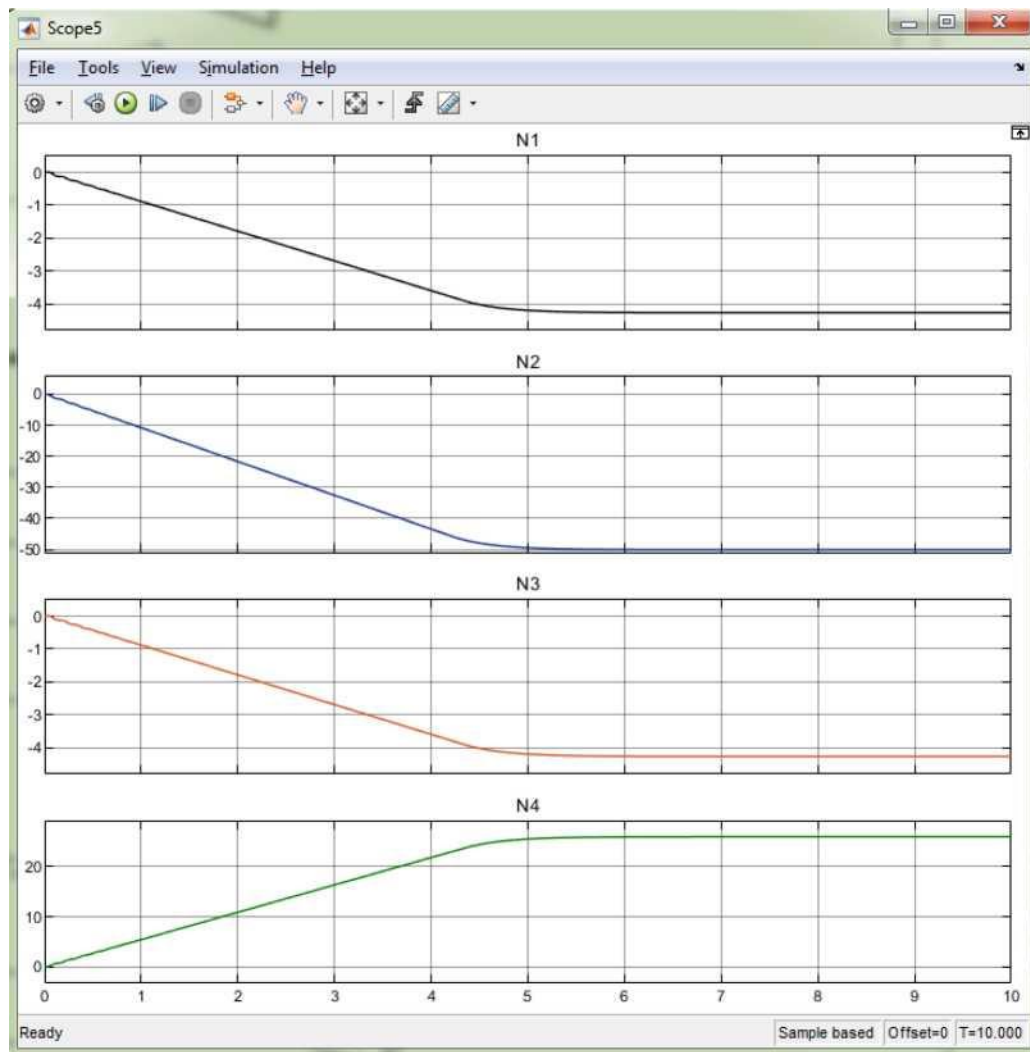


Рисунок 4.9 – Графіки перехідних процесів приводів (вид руху - погоджене за часом)

Перехідні процеси тривають те саме час, отже завдання управління системою формування траєкторії вважатимуться виконаною успішно.

4.5. Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою

Кожен елемент контролю та управління повинен мати свій ідентифікатор (тег), структура якого повинна мати форму AAA_BBB_CC.

1. AAA - параметр, що складається з 3-х символів, що приймає значення:

CUR (Current) – електричний струм;

HND (Hand) – ручне управління;

POS (Position) – положення;

WGT (Weight) – вага.

2. BBB – код технологічного апарату (або об'єкта), що містить 3 символи:

ENG (Engine) – двигун;

SUS (Suspension) – підвіс;

3. CC – уточнення чи порядковий номер.

Перелік ідентифікаторів сигналів наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Перелік ідентифікаторів сигналів

Ідентифікатор	Призначення ідентифікатора
CUR_ENG_01	Величина струму, що підводиться до першого двигуна
HND_ENG_01	Ручне керування першим двигуном
POS_ENG_01	Положення валу першого двигуна
WGT_SUS_01	Величина ваги на першому тросі
CUR_ENG_02	Величина струму, що підводиться до другого двигуна
HND_ENG_02	Ручне керування другим двигуном
POS_ENG_02	Положення валу другого двигуна
WGT_SUS_02	Величина ваги на другому тросі
CUR_ENG_03	Величина струму, що підводиться до третього двигуна
HND_ENG_03	Положення валу третього двигуна
POS_ENG_03	Положення валу третього двигуна
WGT_SUS_03	Величина ваги на третьому тросі

CUR_ENG_04	Величина струму, що підводиться до четвертого двигуна
HND_ENG_04	Ручне керування четвертим двигуном
POE_EMO_04	Положення валу четвертого двигуна
WGT_SUS_04	Величина ваги на четвертому тросі

Блок-схема алгоритму розрахунку керуючих впливів наведено на рис. 4.10.

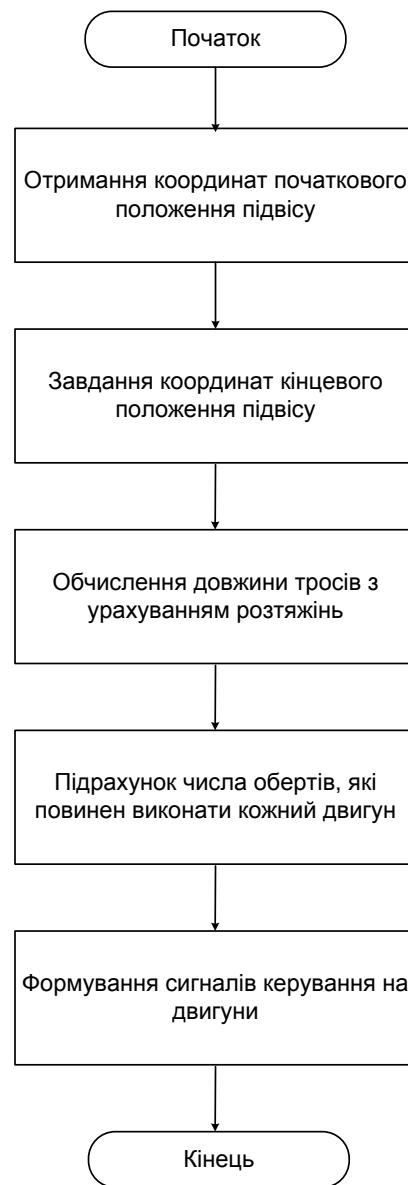


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритму розрахунку керуючих впливів

Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою наведено на рис. 4.11

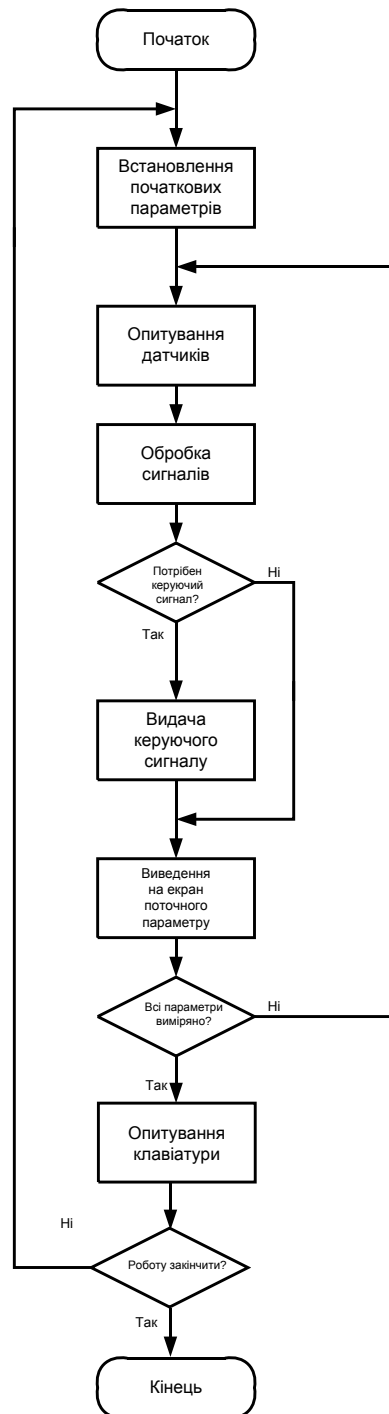


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи управління краном з гнучкою підвіскою

Висновки

В ході виконання магістерської дипломної роботи була створена автоматизована система управління краном з гнучкою підвіскою.

Були розраховані довжини тросів для позиціонування схвату у будь-якій точці робочої області крана. Також були розраховані конструктивні розміри та тип барабана приводного механізму, потужність електродвигуна, передатне число редуктора, довжина та розривне зусилля троса. Було обрано двигун постійного струму, джерело постійного струму, датчик положення кута валу двигуна, датчик ваги, а також ПЛК, що підходять під цю систему.

Було розроблено алгоритм управління краном формування траєкторії прямий і написана керуюча програма. Правильність розрахунків програми та працездатність системи були підтверджені моделюванням у прикладному пакеті програм MATLAB Simulink. Для вирішення завдання формування складних траєкторій було запропоновано рішення щодо заміни складної траєкторії відрізками прямих, при цьому була написана програма, що описує траєкторію кола.

Загалом розроблена універсальна система, яка згодом може бути використана як готове рішення для завдань переміщення великогабаритних конструкцій, дослідження ефективності різних методів реабілітації пацієнтів, фото- та відеозйомки у сфері розваг.

Список використаних літературних джерел

1. Gosine R.G., Harwin W.S., Furby L.J., & Jackson R.D. An intelligent end-effector for a rehabilitation robot. //Journal of Medical Engineering & Technology. 1989; 13(1–2), 37–43.
2. Krebs H.I., Hogan N., Aisen M.L., & Volpe B.T. Robot-aided neurorehabilitation. //IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1998;6(1), pp.75–87.
3. Veneman J.F. Kruidhof, R. Hekman, E.E. Ekkelenkamp, R. Van Asseldonk, E.H. & Van der Kooij, H. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. //IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007; 15(3), 379–386.
4. Iosa M., Morone G., Cherubini A., Paolucci S. The Three Laws of Neurorobotics: A Review on What Neurorehabilitation Robots Should Do for Patients and Clinicians //J. Med. Biol. Eng. 2016. DOI 10.1007/s40846–016–0115–2.
5. Morone G., Rosati G., Masiero S., Poli P. Robotic Technologies and Rehabilitation: New Tools for Stroke Patients' Therapy. BioMed Research International. 2013; Article ID 153872, 8 p.
6. Fazekas G., Horvath M., Toth A. A novel robot training system designed to supplement upper limb physiotherapy of patients with spastic hemiparesis. //Int J Rehabil Res. 2006;29:251–254.
7. Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective // J. Neuroeng Rehabil. – 2009. – Vol.6. – P. 5.
8. Kalyan K. Mankala, Sai K. Banala, and Sunil K. Agrawal. Novel swing-assist un-motorized exoskeletons for gait training //J. Neuroeng. Rehabil. – 2009. – Vol. 6. – P. 24.
9. Calabrò R.S, Cacciola A, Bertè F, Manuli A, Leo A, Bramanti A, Naro A, Milardi D, Bramanti P. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in

- neurological disorders: where are we now? // *Neurol Sci.* 2016. Apr. 37(4). P. 503–14. doi: 10.1007/s10072-016-2474-4. Epub 2016 Jan 18.
10. Sabel B.A., Matzke S., Prilloff S. Special issues in brain plasticity, repair and rehabilitation: 20 years of a publishing strategy // *Restor. Neurol. Neurosci.* – 2010. – Vol.28, №6.-P. 719–728.
 11. Lim P.A., Tow A.M. Recovery and regeneration after spinal cord injury: a review and summary of recent literature // *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2007; Jan.; 36 (1): 49–57.
 12. Belda-Lois J.M., Mena-del Horno, S., Bermejo-Bosch, I., Moreno, J. C., Pons, J. L., Farina, D., et al. Rehabilitation of gait after stroke: A review towards a top-down approach. // *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation.* – 2011. – №8 (1): 66.
 13. Collinger J.L., et al., High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *Lancet*, 2013. 381(9866): 557–64.
 14. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3453503/>
 15. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4903006/>
 16. <http://www.aretechllc.com/>
 17. <http://thefloat.ch/>
 18. <https://med-technology.com.ua/ua/p1221257671-rysen-motek-potolochnaya.html>
 19. <https://bionessmedical.com/vector/>
 20. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3453503/>
 21. <https://zenetdnepr.com.ua/ua/p2796688507-sistema-virtualnoj-reabilitatsii.html?srsltid=AfmBOopfo6q6HRDL5iLjkkBCSgH3sYsBEB9O16r46z9gC0EBuxtNutEG>
 22. Wongratanaphisan, Theeraphong, Matthew O. Cole, Influence of body weight unloading on human gait characteristics: a systematic review // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* – 2008. – №15. – p. 53.

23. Lin, Po-Yang, Win-Bin Shieh, Dar-Zen Chen, // Design of perfectly statically balanced one-DOF planar linkages with revolute joints // Journal of Mechanical Design – 2009. – №131-5.
24. <https://www.transtecno.com.ua/produktsiia/kompaktni-motor-reduktory-minitecno/dc/dc-wormgearmotors-ndcm-ecm>
25. https://www.kingright.com.tw/uk/product/spur-gear-motor_SF1188.html
26. https://library.e.abb.com/public/0f9cb67cef209d1685257dd600516ff8/3ADW000194_REVH.pdf
27. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/240/109478240/att_851818/v1/manual-DC-Converter_en.pdf
28. <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2144-gelijkstroomregelaars-mentor-mp-user-guide-en-iss7-0476-0000-07.pdf>
29. <https://deltaww.com.ua/es3-0ccg6941-inkrementalnyy-enkoder-s-tselynym-valom-360imp-otkkol-strob-24v-es3-0ccg6941?dsort=added&dorder=DESC>
30. <https://www.scribd.com/document/350234958/Leine-Linde-Rotary-Encoders>
31. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/622/32466622/att_42716/v1/A5E02199611A-05_BA_Waagezellen_SIWAREX_WL200_en.pdf
32. <https://scaime.com/product/post/zfa>
33. <https://www.larit.co.il/wp-content/uploads/2015/11/363.pdf>
34. <https://media.distributordatasolutions.com/schneider2/2020q3/documents/f50b4cf9eee724e992197220e89aedb6ac617fd6.pdf>
35. https://privod.kiev.ua/ua/programmiruemyj_kontroller_siemens_simatic_s7-1200_cpu_1211c_6di_4do_2ai_0-10v_dc_20_4-28_8v_dc_program_data_memory_50_kb

Додатки

