

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет(ННІ) _____ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ _____

УДК 629.359

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)
конструювання та дизайну
(назва факультету (ННІ))

(підпис) Зіновій РУЖИЛО
(ПІБ)

“ _____ ” _____ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

(підпис) Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

“ _____ ” _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **СИНТЕЗ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХУ ЗАСОБУ ДЛЯ
ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ**

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Освітня програма _____ Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського
виробництва
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

(науковий ступінь та вчене звання) Д.Т.Н. професор
(підпис)

(ПІБ) Юрій РОМАСЕВИЧ

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи

(науковий ступінь та вчене звання) Д.Т.Н. професор
(підпис)

(ПІБ) Юрій РОМАСЕВИЧ

Виконав

(підпис)

(ПІБ студента) Стасенко Володимир Павлович

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет(ННІ) _____ **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ** _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

Д.т.н., професор _____ **Вячеслав ЛОВЕЙКІН**
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)
вчене звання)

“ _____ ” _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
СТАСЕНКУ ВОЛОДИМИРУ ПАВЛОВИЧУ

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ **133 – Галузеве машинобудування** _____

(код і назва)

Освітня програма _____ **Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського** _____
виробництва _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ **освітньо-професійна** _____

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **СИНТЕЗ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ**
РУХУ ЗАСОБУ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ
затверджена наказом ректора НУБіП України від “ **29** ” **грудня** **2023** р. № **2400 “С”**

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ **2024.11.15** _____

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз літератури
2. Розробка системи керування стабілізацією руху засобу для переміщення
малогабаритних вантажів
3. Охорона праці
4. Техніко економічне обґрунтування

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ _____ ” _____ р.

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Ромасевич Ю. О.** _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ **Стасенко В.П.** _____
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Ключові слова: засіб, переміщення вантажів, стійкість, коливання, керування, оптимізація.

Магістерська кваліфікаційна робота містить: вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел на 4 сторінках (31 джерело) та додатки на 9 сторінках. Основний обсяг магістерської роботи складає 60 сторінок. Кількість рисунків у роботі складає – 19, таблиць – 10.

Метою роботи є синтез системи керування процесом стабілізації засобу для переміщення малогабаритних вантажів. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

1. виконати аналіз науково-технічних публікацій у галузі конструювання засобів для переміщення вантажів та синтезу систем їх керування;
2. виконати постановку задачі оптимального керування процесом стабілізації руху засобу у статичному режимі та розв'язати задачу;
3. провести аналіз отриманих результатів та розробити рекомендації стосовно реалізації оптимального керування на практиці;
4. виконати розробку рекомендацій стосовно безпечної експлуатації засобу та провести оцінку економічних показників застосування системи.

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи були використані наступні **наукові методи:** математичне моделювання, диференціальне та інтегральне числення, наближені методи оптимізації, чисельні методи.

Об'єктом дослідження є засіб для переміщення малогабаритних вантажів.

Предметом дослідження є закони оптимального керування рухом засобу для переміщення малогабаритних вантажів у режимі стабілізації положення.

Зміст

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ.....	7
1.1 Загальні відомості про виконання переміщення вантажів та особливості експлуатації механізмів для переміщення малогабаритних вантажів.....	7
1.2 Кількісний аналіз публікацій.....	9
1.3 Змістовний аналіз публікацій.....	15
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЗАСОБУ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ.....	23
2.1 Опис об'єкта регулювання.....	23
2.2 Постановка задачі.....	25
2.3 Розв'язання задачі оптимального керування.....	30
2.3.1 Методика розв'язання задачі.....	30
2.3.2 Варіанти розв'язання задачі.....	31
2.4 Аналіз отриманих результатів.....	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗАСОБОМ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ.....	38
3.1 Розробка структурної схеми системи керування.....	38
3.2 Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи (датчики, керовані приводи, мікроконтролери).....	40

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЕКТУ.....	47
4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання операцій по переміщенню малогабаритних вантажів.....	47
4.2 Розрахунок економічної ефективності від застосування засобу для переміщення малогабаритних вантажів.....	48
РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ.....	52
5.1 Класифікація небезпечних факторів під час виконання технологічних операцій із переміщення засобу.....	52
5.2 Заходи техніки безпеки.....	54
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Людська діяльність з давніх-давен характеризувалась переміщенням різного роду вантажів. Для цього люди застосовували пристосування та механізми які полегшували цей процес. З XIX століття такі засоби обладнувались механізованим приводом що значно підвищувало ефективність транспортування вантажів. У XX сторіччі акцент був зроблений на використання електричних приводів: з'являються значна кількість електрокарів, візків з електричним приводом та інших засобів які так чи інакше отримували електричний рушій.

Останнім часом цей клас засобів для переміщення вантажів отримав новий розвиток який пов'язаний із переміщенням вантажів в умовах міського середовища. Крім того значний прогрес у конструюванні цих засобів спостерігається у галузі складських механізмів крапкам вказані системи характеризуються значною кількістю сенсорних пристроїв (наприклад ультразвукових датчиків, лазерних датчиків) та систем розпізнавання умов навколишнього середовища і реагування на ці умови. Разом з тим при конструюванні цих пристроїв виникають принципові ускладнення які пов'язані із забезпеченням стійкості. Ця проблема стає особливо актуальною для класу засобів, які не є стійкими в статичному стані. Для забезпечення їх стійкості використовуються різноманітні алгоритми керування, які дозволяють шляхом побудови алгоритму керування забезпечити стійкість цих систем.

У даній роботі було розвинено підхід, який забезпечує стійкість засобу для транспортування малогабаритних вантажів шляхом побудови системи оптимального керування рухом засобу у статичному стані (при умові що рух засобу по певній траєкторії не здійснюється).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про виконання переміщення вантажів та особливості експлуатації механізмів для переміщення малогабаритних вантажів

Переміщення вантажів – це один із основних етапів у процесі логістики, який включає транспортування товарів від одного місця до іншого. Цей процес здійснюється за допомогою різноманітних механізмів та засобів транспорту. Він охоплює як внутрішнє переміщення вантажів у межах підприємства (склади, виробничі приміщення), так і зовнішнє транспортування (між підприємствами, населеними пунктами тощо). Успішне виконання переміщення вантажів залежить від низки факторів, таких як організація процесу, використання відповідних засобів та технологій, а також дотримання вимог безпеки та ефективності.

Переміщення вантажів може здійснюватися з різними типами товарів, що відрізняються за розмірами, вагою, формою, хімічним складом та іншими властивостями. В залежності від цього вибираються оптимальні методи та засоби для їх транспортування. Основні категорії вантажів: малогабаритні вантажі (малі коробки, пакети, сумки); великогабаритні вантажі (обладнання, меблі, палети); небезпечні вантажі (хімічні речовини, вибухонебезпечні або токсичні матеріали); рухомі вантажі (палети з товаром, які транспортуються за допомогою транспортерів або підйомників).

У даній кваліфікаційній роботі основна увага приділена саме переміщенню малогабаритних вантажів.

Переміщення вантажів можна здійснювати різними методами, залежно від обсягів, відстані та умов роботи: ручне переміщення – застосовується для невеликих вантажів або в умовах, де інші методи транспортування не можуть

бути використані; механічне переміщення – використовуються різноманітні механізми, такі як електричні візки, підйомники, конвеєри, крани, автокари та інші механізми для транспортування великих або важких вантажів; автоматизовані системи – на великих складах і підприємствах використовуються автоматизовані системи, які включають роботи, автоматичні візки, конвеєрні лінії та інші технології для зменшення участі людини в процесі транспортування вантажів.

Для транспортування вантажів використовуються різні види механізмів, що класифікуються за типом конструкції, принципом дії та іншими характеристиками: ручні візки – використовуються для малогабаритних вантажів на складах або виробничих підприємствах; підйомники та крани – використовуються для підйому важких або великих вантажів на певну висоту, а також для їх переміщення в межах складів, виробничих зон або вивантаження вантажів з транспорту; конвеєри та транспортери – автоматизовані системи для транспортування вантажів по заданому маршруту; автокари та навантажувачі – механічні засоби, які забезпечують транспортування вантажів на більші відстані в межах підприємства або зовнішньої логістики.

Експлуатація механізмів для переміщення малогабаритних вантажів має ряд специфічних особливостей, які залежать від типу використовуваного обладнання, умов роботи та характеристик вантажів. Правильна експлуатація таких механізмів сприяє підвищенню ефективності роботи, безпеці працівників та зменшенню витрат на обслуговування. До основних особливостей експлуатації таких механізмів відносять:

- безпеку експлуатації (правильне навантаження і розвантаження; захист від ушкоджень і травм; своєчасне і належне навчання персоналу, який виконує безпосередню експлуатацію таких засобів);
- умови роботи (температурний режим; вологість і пил; середовище, в якому виконується переміщення, зокрема, поверхня по якій виконується переміщення);

- технічне обслуговування та своєчасний ремонт (технічна діагностика, яка включає перевірку і змащення всіх рухомих частин, контроль за електричними компонентами, особливо акумуляторних батарей; калібрування і налаштування датчиків та інших вимірювальних пристроїв);
- економічні аспекти (оптимізація навантаження із дотриманням вимоги рівномірного розподілу вантажу; раціональний вибір відповідного механізму з урахуванням типу вантажів і частоти використання);
- інноваційні технології та інтелектуалізація засобів для переміщення малогабаритних вантажів (інтелектуальні системи керування, які оснащені датчиками і програмним забезпеченням, можуть автоматично оптимізувати маршрут переміщення вантажу або контролювати рівень заряду акумуляторів; високий ступінь автоматизація процесів дозволяє значно зменшити участь людини і підвищити ефективність роботи).

Серед головних переваг електрифікованого (механізованого) переміщення вантажів можна виділити наступні:

1. зменшення фізичних навантажень на робітників;
2. підвищення продуктивності роботи завдяки підвищенню номінальних відкрити дужку робочих) швидкостей переміщення вантажів;
3. зниження витрат на переміщення вантажів (часових енергетичних матеріальних людських та інших ресурсів);
4. підвищення безпеки виконання операцій завдяки зниженню ризику отримання травм працівниками та обслуговуючим персоналом.

1.2 Кількісний аналіз публікацій

Для того щоб з'ясувати основні тренди у галузі розробки конструкції та систем керування засобами для переміщення малогабаритних вантажів було проведено кількісний аналіз наукових праць які проіндексовані у різноманітних наукометричних базах даних. Глибина пошуку складала 5

років. Крім того було вказано загальну кількість проіндексованих у тій чи іншій наукометричній базі даних публікацій. Отримані дані занесені у таблицю 1.1. Були виконані запити транспортування, малий транспортний засіб, малий транспортний засіб та транспортування, стійкість транспортного засобу, керування стійкістю транспортного засобу, керування коливаннями, оптимальне керування. Ці запити виконані англійською мовою.

Таблиця 1.1 – Кількісні показники опублікованих наукових праць, які проінденсовані у наукометричних базах даних Scopus, Web of Science та Google Scholar

Запит	Роки					Всього у базі
	2024	2023	2022	2021	2020	
1	2	3	4	5	6	7
<i>Наукометрична база даних Scopus</i>						
Transporting	4089	4521	4591	4692	4514	97334
Small vehicle	5173	6210	5802	5213	4852	80678
Small vehicle AND Transporting	24	30	28	32	24	314
Vehicle stability	7154	6967	5924	4898	4329	69356
Vehicle stability control	3828	3744	3200	2608	2330	37305
Oscillations control	4020	4545	4347	4280	4012	77729
Optimal control	32547	34465	31617	29209	27086	493673
<i>Наукометрична база даних Web of Science</i>						
Transporting	69606	82137	87318	87274	82675	1720288
Small vehicle	3975	4964	5064	4891	4495	63054
Small vehicle AND	245	313	351	379	312	4044

Transporting						
Vehicle stability	5299	5580	5254	4732	4154	52371

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Vehicle stability control	2709	2976	2835	2589	2243	28724
Oscillations control	3674	4250	4734	4751	4586	78919
Optimal control	26395	29807	30524	29223	26877	427774
<i>Наукометрична база даних Google Scholar</i>						
Transporting	45400	49700	68100	92100	111000	5050000
Small vehicle	153000	255000	360000	502000	560000	6900000
Small vehicle AND Transporting	18100	34000	32600	31900	30100	665000
Vehicle stability	127000	145000	179000	197000	226000	5720000
Vehicle stability control	93700	105000	136000	158000	166000	4900000
Oscillations control	71000	82800	98400	122000	141000	4750000
Optimal control	279000	340000	700000	1090000	1420000	7860000

Із даних які наведено в таблиці 1.1 випливає що за темою транспортування спостерігається майже незмінний цікавість наукової спільноти до цих проблем. Позитивно зростаючий тренд показує запит малий транспортний засіб крім того значну динаміку приросту наукових праць можна спостерігати за запитом стійкість транспортного засобу та керування стійкістю транспортного засобу. Запити керування коливаннями та оптимальне керування також показують тренд до збільшення наукових

публікацій які проіндексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science.

Таблиця 1.2 – Кількісні показники топ-5 країн за проіндексованими науковими працями

Запит	Топ-5 країн та кількість праць, які опубліковані афілійованими науковцями цих країн
1	2
<i>Наукометрична база даних Scopus</i>	
Transporting	<input type="checkbox"/> United States 25 845 <input type="checkbox"/> China 16 940 <input type="checkbox"/> Japan 7 437 <input type="checkbox"/> Germany 6 495 <input type="checkbox"/> United Kingdom 6 030
Small vehicle	<input type="checkbox"/> United States 22 412 <input type="checkbox"/> China 17 698 <input type="checkbox"/> United Kingdom 4 341 <input type="checkbox"/> Germany 4 236 <input type="checkbox"/> Japan 3 991
Small vehicle AND Transporting	<input type="checkbox"/> United States 82 <input type="checkbox"/> China 39 <input type="checkbox"/> Germany 29 <input type="checkbox"/> Canada 15 <input type="checkbox"/> Italy 15
Vehicle stability	<input type="checkbox"/> China 27 993 <input type="checkbox"/> United States 11 569 <input type="checkbox"/> India 4 049 <input type="checkbox"/> South Korea 2 617 <input type="checkbox"/> United Kingdom 2 467

Продовження таблиці 1.2

1	2
Vehicle stability control	<input type="checkbox"/> China 16 677 <input type="checkbox"/> United States 5 780 <input type="checkbox"/> India 1 649 <input type="checkbox"/> South Korea 1 345 <input type="checkbox"/> Japan 1 251
Oscillations control	<input type="checkbox"/> United States 17 026 <input type="checkbox"/> China 16 252 <input type="checkbox"/> Germany 5 448 <input type="checkbox"/> United Kingdom 4 908 <input type="checkbox"/> Japan 4 517
Optimal control	<input type="checkbox"/> China 121 755 <input type="checkbox"/> United States 108 342 <input type="checkbox"/> United Kingdom 24 424 <input type="checkbox"/> Germany 23 284 <input type="checkbox"/> India 21 802
<i>Наукометрична база даних Web of Science</i>	
Transporting	<input type="checkbox"/> USA 504,150 <input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA 272,487 <input type="checkbox"/> GERMANY 149,345 <input type="checkbox"/> JAPAN 113,013 <input type="checkbox"/> ENGLAND 109,186
Small vehicle	<input type="checkbox"/> USA 18,115 <input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA 16,353 <input type="checkbox"/> GERMANY 3,438 <input type="checkbox"/> ENGLAND 3,367 <input type="checkbox"/> JAPAN 3,025

Small vehicle AND Transporting	<input type="checkbox"/> USA	953
	<input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA	641
	<input type="checkbox"/> GERMANY	340
	<input type="checkbox"/> ENGLAND	287
	<input type="checkbox"/> ITALY	202

Продовження таблиці 1.2

1	2	
Vehicle stability	<input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA	23,783
	<input type="checkbox"/> USA	9,730
	<input type="checkbox"/> SOUTH KOREA	2,513
	<input type="checkbox"/> INDIA	2,489
	<input type="checkbox"/> ENGLAND	1,857
Vehicle stability control	<input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA	13,915
	<input type="checkbox"/> USA	4,650
	<input type="checkbox"/> SOUTH KOREA	1,267
	<input type="checkbox"/> INDIA	1,143
	<input type="checkbox"/> FRANCE	1,033
Oscillations control	<input type="checkbox"/> USA	18,888
	<input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA	15,990
	<input type="checkbox"/> GERMANY	6,747
	<input type="checkbox"/> ENGLAND	5,319
	<input type="checkbox"/> JAPAN	5,252
Optimal control	<input type="checkbox"/> PEOPLES R CHINA	113,588
	<input type="checkbox"/> USA	99,735
	<input type="checkbox"/> ENGLAND	22,303
	<input type="checkbox"/> GERMANY	22,161
	<input type="checkbox"/> CANADA	18,979

Крім того було проведено аналіз який дозволив встановити топ-5 країн за кількістю проіндексованих наукових публікацій у базах даних Scopus та Web of Science. Відповідна інформація наведена у таблиці 1.2. Ці дані показують що лідерами в галузі робіт із транспортування є Сполучені Штати Америки, Китай, Японія, Німеччина, та Об'єднане Королівство. Цей тренд підтверджується обома наукометричними базами даних. Крім того його

можна поширити і на запит малі транспортні засоби. За запитом стійкість транспортного засобу лідирує Китай, Сполучені Штати Америки, Індія, Південна Корея та Об'єднане Королівство. За запитом керування стійкістю транспортного засобу також значну кількість праць має Франція. При керуванні стійкістю руху транспортного засобу виникають задачі керування коливаннями у цій галузі (за цим запитом) лідируючі позиції займають вчені зі Сполучених Штатів Америки. Крім того значна кількість праць спостерігається у вчених з Китаю, Німеччини, Сполученого Королівства та Японії. Задачі оптимального керування які будуть розглядатися У даній магістерській роботі також приваблюють багатьох вчених. У цьому плані значний вклад за кількісними показниками становлять країни: Китай, Сполучені Штати Америки, Об'єднане Королівство, Німеччина, Індія. Канада також є однією із провідних країн де науковці активно займаються питаннями оптимального керування.

Таким чином можна зробити висновок що питання розробки транспортних засобів взагалі і малогабаритних транспортних засобів зокрема є надзвичайно актуальними. При цьому виникають різноманітні задачі, які розв'язуються за допомогою підходів керування коливаннями, забезпеченням стійкості, оптимального керування. У цьому плані лідерами серед країн світу за кількістю наукових публікацій є Сполучені Штати Америки та Китай. Ще одним центром виконання наукових досліджень у цій галузі є країни західної Європи. Можна виділити Японію та південну Корею як країни в яких також досить активно проводяться дослідження вказаних наукових питань.

1.3 Змістовний аналіз публікацій

У статті [1] розв'язано задачу самобалансування засобу для переміщення вантажів. Автори використали математичну модель двоколісного електричного мотоцикла, яка ґрунтується на рівняннях Лагранжа другого роду. Вони розробили три стратегії керування. Крім того, у

дослідженні з'ясовано, чи може допомогти крутний момент переднього колеса для вирішення задачі стабілізації транспортного засобу.

У науковій публікації [2] використано концепцію мобільної перевернутої маятникової системи. Тут двоколісна роботизована транспортна система розглядається як персональний транспортний пристрій під назвою TransBOT (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд засобу TransBOT

TransBOT має два режими руху: звичайний режим автомобіля, де ввімкнено стабільний контакт із землею, що підтримується двома колесами та двома коліщатами, а також режимом балансування, який підтримує стабільне положення з двома колесами на землі. Механізм балансування можна використовувати для транспортування у вузьких і жвавих міських районах. Для різних драйверів у роботі запропоновано використати лінійних регуляторів. Крім того, були проведені експериментальні дослідження з водіями різної ваги, а також із завданнями водіння в приміщенні та поза приміщенням, щоб переконатися в тому, що такий транспортний засіб TransBOT можна реалізувати на практиці.

У дослідженні [3] запропоновано двоколісний самозбалансований засіб (моноколесо). Через дефіцит енергетичних ресурсів і місць для паркування в місті ідея цього легкого електричного допоміжного персонального моноколеса може бути використана в майбутній транспортній системі. Засіб має малу поздовжню довжину, з двома коаксіальними колесами, він обладнаний електричною системою керування для балансування. Для того, щоб досягнути стійкості у конструкції передбачено сервомотори для приводу двох коліс. Стан дисбалансу визначається датчиками.

У роботі [4] описано концепцію змагання двоколісних роботів типу перевернутого маятника на трасі MCR (Microm car rally). Запропонований конкурс проводитиметься з використанням комерційно розроблених малих і недорогих роботизованих транспортних засобів, і очікується, що до нього залучатимуться висококваліфіковані інженери.

Метод керування на основі нечіткої нейронної мережі на основі радіально-базисних функцій використано у роботі [5] для вирішення проблеми збалансування та адаптації до різних дорожніх покриттів. Для цього створено математичну модель транспортних засобів-балансирів. По-друге, нечітке керування та нейронна мережа на основі радіально-базисних функцій поєднані, щоб отримати систему керування Система керування транспортними засобами балансування побудована на платформі Simulink MATLAB і моделюється за допомогою таких методів: нечітке RBF нейронної мережі ПД-регулювання, нечітке ПД-регулювання та традиційні методи ПД-регулювання. На балансирному транспортному засобі проведено експерименти з самобалансування. Після порівняння експериментальних результатів, автори виявили, що перший метод представляє кращу якість керування, ніж інші дві.

У статті [6] розроблено нову самобалансуючу платформу для підйому сходами AGV (рис. 1.2).

Засіб AGV може рухатись по будівельному майданчику. У конструкції використано два ступені свободи, які дозволяють платформі обертатись

навколо двох взаємно перпендикулярних осей. Діапазони обертання від -15 до +15 градусів. Завдяки системі керування із зворотним зв'язком з інерціальним вимірювальним блоком засіб може самобалансуватись. Це дозволяє механізму зменшити вібрацію, що діє на вантажі, що перевозяться під час руху AGV на нерівній місцевості, але також дозволяє платформі підтримувати раціональне положення центру ваги під час підйому засобу.

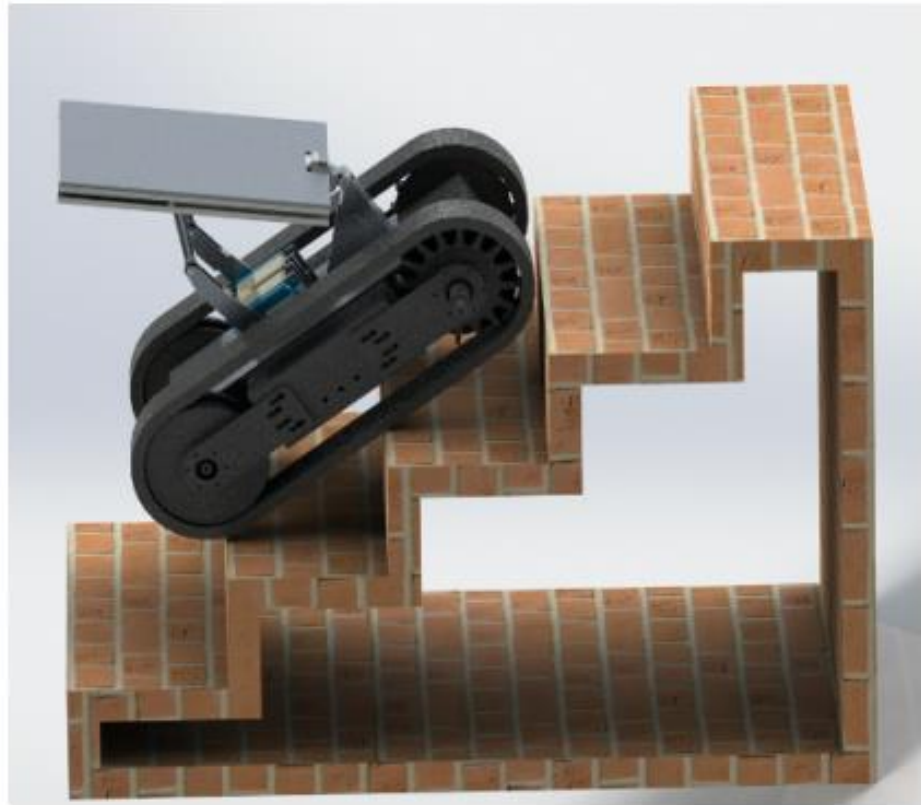


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд засобу AGV

У статті [7] представлено логіку керування для стабілізації маятника із реактивним колесом. Таке керування знайшло застосування в області робототехніки, керування ракетними двигунами та самобалансування транспортних засобів. Керування було розроблене з використанням нелінійних методів. Керування для перевертання маятника було розроблене з використанням керування на основі пасивності, а керування для балансування маятника в перевернутому положенні була розроблене з використанням зворотного керування (backstepping control). Результати

моделювання представлені та пояснені з обґрунтуванням розробленої логіки керування.

У роботі [8] представлено метод синтезу регулятора за критерієм оптимальної ефергоефективності для двоколісних самобалансуючих транспортних засобів. Автори вибирали функцію багатоцільового споживання на основі квазіоптимальності та мінімуму енергії. Синтез законів керування виконано на основі аналітичного дизайну агрегованих регуляторів (ADAR) з багатоманітністю квазіоптимальності. Результати запропонованого методу моделюються та порівнюються з іншими методами.

У статті [9] було реалізовано простий у використанні двоколісний засіб із самобалансуванням за допомогою плати керування Arduino, інерційного вимірювального блоку та шести датчиків навантаження (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд засобу із самобалансуванням

Двоколісний транспортний засіб, розроблений у цій статті, базується на інерційному датчику для визначення нахилу транспортного засобу, а датчик навантаження доданий для визначення положення водія, коли він стоїть на двоколісному транспортному засобі. Щоб покращити ситуацію, коли потужність двигуна не відповідає прикладеному навантаженню датчики навантаження мали не лише виявляти зміни центру ваги людини вліво та вправо, а й але також використовується для виявлення передніх і задніх змін

центру ваги (щоб виправити різницю кутів між центром ваги людини і центром засобу). Крім того, датчики навантаження також використовувалися для оцінки висоти центру тяжіння людини, щоб люди з різним зростом і вагою могли мати однакові враження від переміщення на засобі.

У статті [10] досліджуються засоби керування прямолінійним рухом і поворотом різноосьового двоколісного транспортного засобу з самобалансуванням (DATWSB) (рис. 1.4).

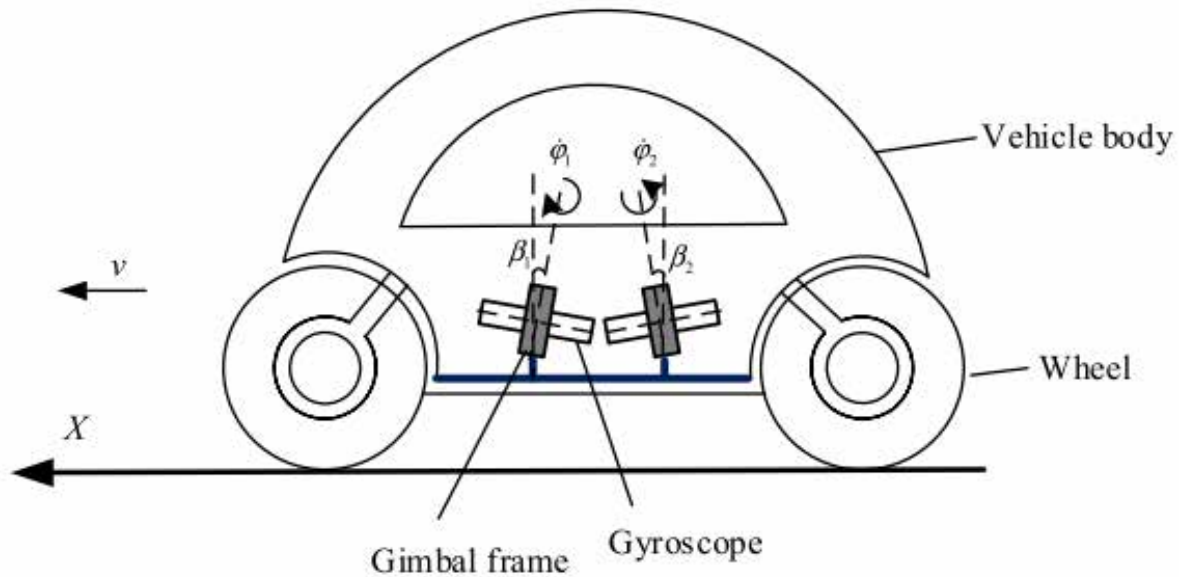


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення засобу DATWSB

Для опису невизначеності, викликані умовами роботи, використовується система перевернутого маятника (IPS) з гіроскопічним ефектом. На основі узагальнених координат побудовано нелінійну математичну модель із використанням рівнянь Лагранжа. Контролер режиму ковзання (SMC) і контролер адаптивного режиму ковзання (ASMC) відповідно призначені для керування системою, в якій використовується зворотний зв'язок за кутом крену. Наведено результати моделювання трьох моделей із контролерами та без них, які вказують на те, що ASMC може сприяти швидшому відновленню IPS у вертикальному положенні під час прямолінійного переміщення та кращому досягненню бажаного кута крену під час повороту порівняно з SMC. Bikesim (комерційне програмне

забезпечення) використано для створення моделі двоколісного автомобіля з функцією самобалансування в поєднанні з Matlab/Simulink. Результати показують, що ASMC може гарантувати захист від перешкод і здатність до повороту засобу DATWSB.

У роботі [11] для вирішення проблеми самобалансування використано метод маховика за принципом перевернутого маятника. Щоб подолати вплив невизначеностей моделі, вплив шуму, автори розробили контролер балансу засобу (рис. 1.5) відповідно до алгоритму стійкого керування.

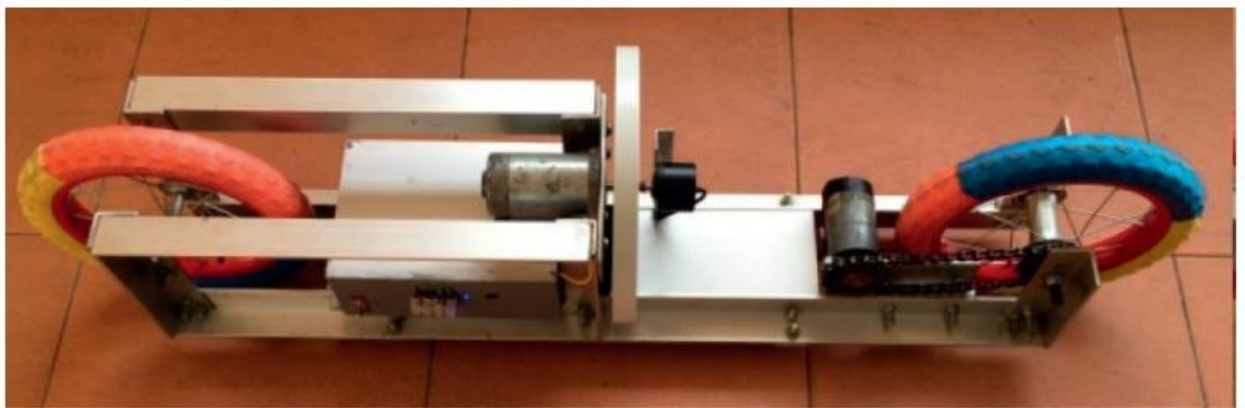


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд засобу із маховиком

Щоб отримати ефективний контролер, автори запропонували використовувати алгоритм зменшення порядку моделі. Результати моделювання та експериментів підтвердили правильність наведених у роботі розв'язків.

У статті [12] вивчалася двоколісна система самобалансування автомобіля з візуальним розпізнаванням положення автомобіля. Фільтр Калмана та алгоритм ПД-регулювання були застосовані для зменшення високочастотних перешкод акселерометра та низькочастотної похибки гіроскопа, покращення швидкості відгуку та точності керування двигуном. Зображення дороги були отримані за допомогою датчика зору пристрою. На основі обчислення відстані між віссю дороги та виявлення наявності перешкод було розроблено механізм раннього попередження за допомогою обчислення групового агента для покращення показників безпеки

балансирного засобу. Експерименти показали, що вдосконалена система керування має хорошу стабільність, високу швидкодію, сильний захист від перешкод і високий рівень безпеки.

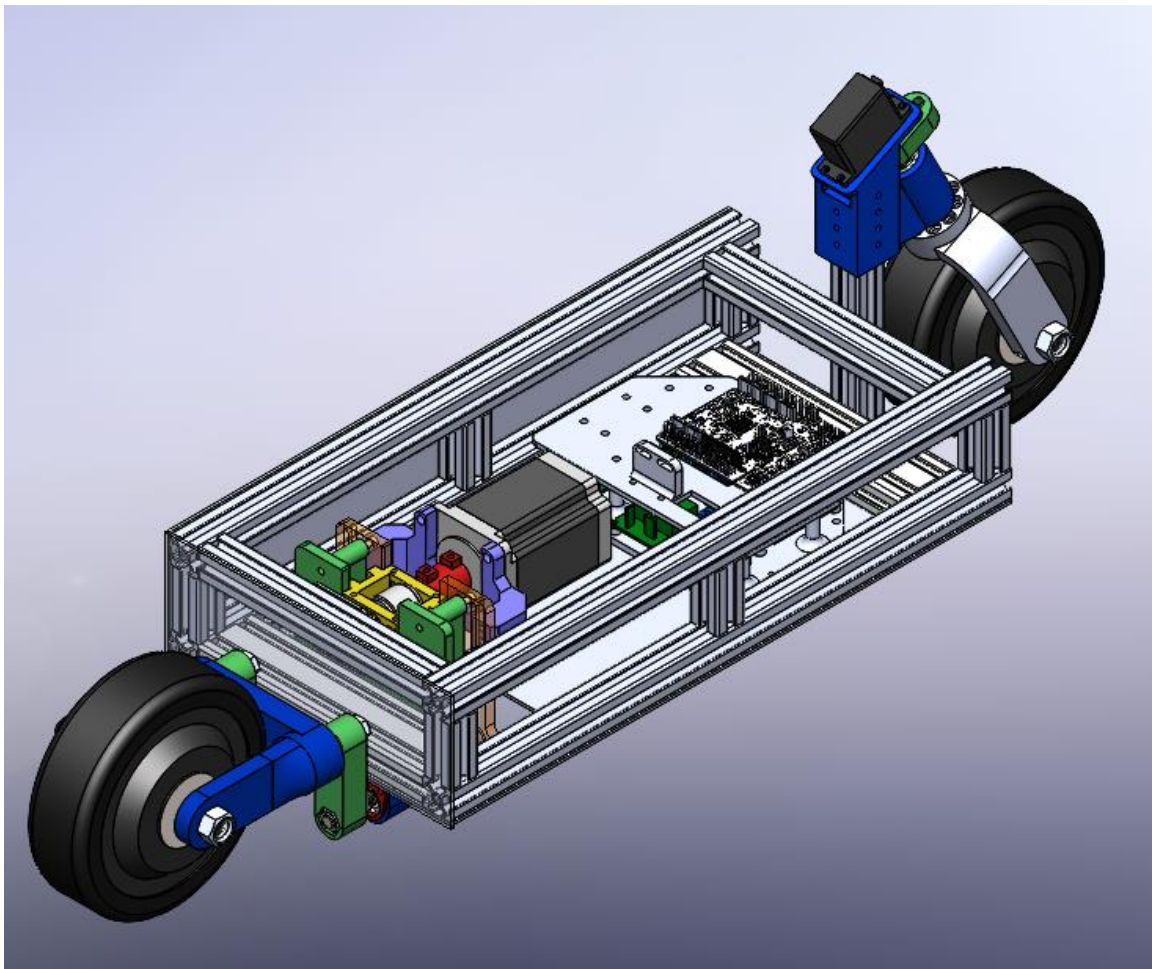
Дослідження [13] описує розробку керування прототипу мотоцикла, який автоматично самобалансується. Розробка та конструювання робота у формі велосипеда або так званого прототипу двоколісного транспортного засобу (TWPV), здатного їздити та балансувати без водія проведено у роботі. Керування стійкістю відбувається за допомогою ПД-регулятора. Система зчитує сигнал із датчика зворотного зв'язку, щоб підтримувати рівновагу, визначаючи кут нахилу. Ці дані подаються на систему керування, яка видає вихідний сигнал у вигляді крутного моменту на двигун для обертання реактивного колеса. Розроблений прототип може підтримувати рівновагу в стані початкового стану та утримувати себе від падіння, викликаного горизонтальним збуренням.

Загалом можна стверджувати, що існує досить широкий пул наукових досліджень, які спрямовані на вирішення задачі стабілізації нестійких систем, у тому числі транспортних засобів. Підходи, які використані у цих роботах, включають як класичні методи (теорію стійкості Ляпунова) так і новітні методи (штучні нейронні мережі тощо).

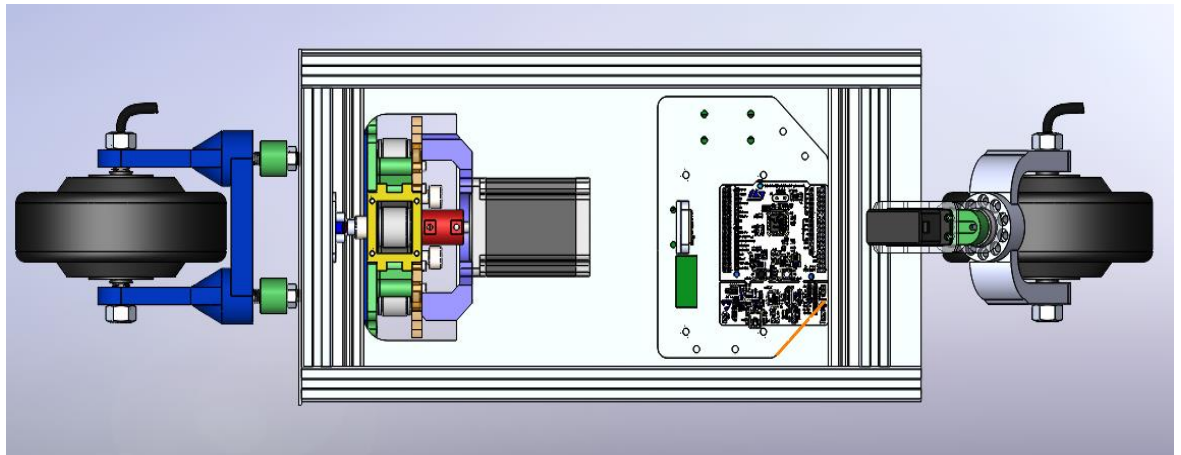
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЗАСОБУ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ

2.1 Опис об'єкта регулювання

Об'єктом керування є засіб для переміщення малогабаритних вантажів [14, 15] (рис. 2.1). Даний засіб розроблений Зарівним Олександром на кафедрі конструювання машин і обладнання у рамках виконання дисертаційного дослідження. При його конструюванні розробник використав доступні і стандартизовані деталі (підшипники, шпильки, болти, листові матеріали і алюмінієві профілі). Всі нестандартні деталі (кронштейни, корпуси, нестандартні муфти, шківни) були спроектовані та виготовлені за допомогою технології 3D-друку.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд САD моделі установки для транспортування малогабаритних вантажів: а) 3D-модель; б) вигляд зверху

В конструкції засобу входять силові приводи: 1) рушії засобу (мотор колеса); 2) для повороту переднього колеса; 3) для повороту механізму балансування засобу.

Загалом засіб включає наступні основні компоненти:

- 1) раму;
- 2) переднє та заднє приводні мотор-колеса;
- 3) механізм балансування;
- 4) плату керування;
- 5) акумуляторну батарею;
- 6) механізм повороту переднього колеса;
- 7) датчики для вимірювання кута нахилу засобу відносно вертикальної осі та датчик кута нахилу механізму балансування.

В таблиці 2.1 вказано основні компоненти засобу та їхні марки.

Таблиця 2.1 – Перелік компонентів засобу

Компонент	Марка / Тип / Характеристика
1	2
Привода механізму балансування (кроковий двигун)	NEMA 23 57BYGH2100-4004A-8

Продовження таблиці 2.1

1	2
Драйвера крокового двигуна	SH-750
Привод повороту переднього колеса (сервопривод)	DS3218MG
Регулятори обертів моток-коліс	Потужність 350 Вт, напруга живлення 24 В
Система керування (32-бітний мікроконтролер)	STM32F446RE (Arduino Nucleo)
Датчик кута нахилу засобу (гіро- акселерометр)	MPU9250
Датчик кута нахилу механізма балансування	Резистивний
Акумулятор	LiPo 6s1p (номінальна напруга 22,2 В; номінальна ємність 3,3 А·год)

Загалом основні характеристики засобу наступні:

- ✓ максимальна швидкість руху – 25 км/год;
- ✓ сумарна потужність мотор-коліс – 400 Вт;
- ✓ максимальна вантажопідйомність – не більше 15 кг.

2.2 Постановка задачі

Для опису динаміки стабілізації засобу для переміщення малогабаритних вантажів у статичному режимі (коли мотор-коліса засобу не обертаються) наведемо динамічну модель (рис. 2.2).

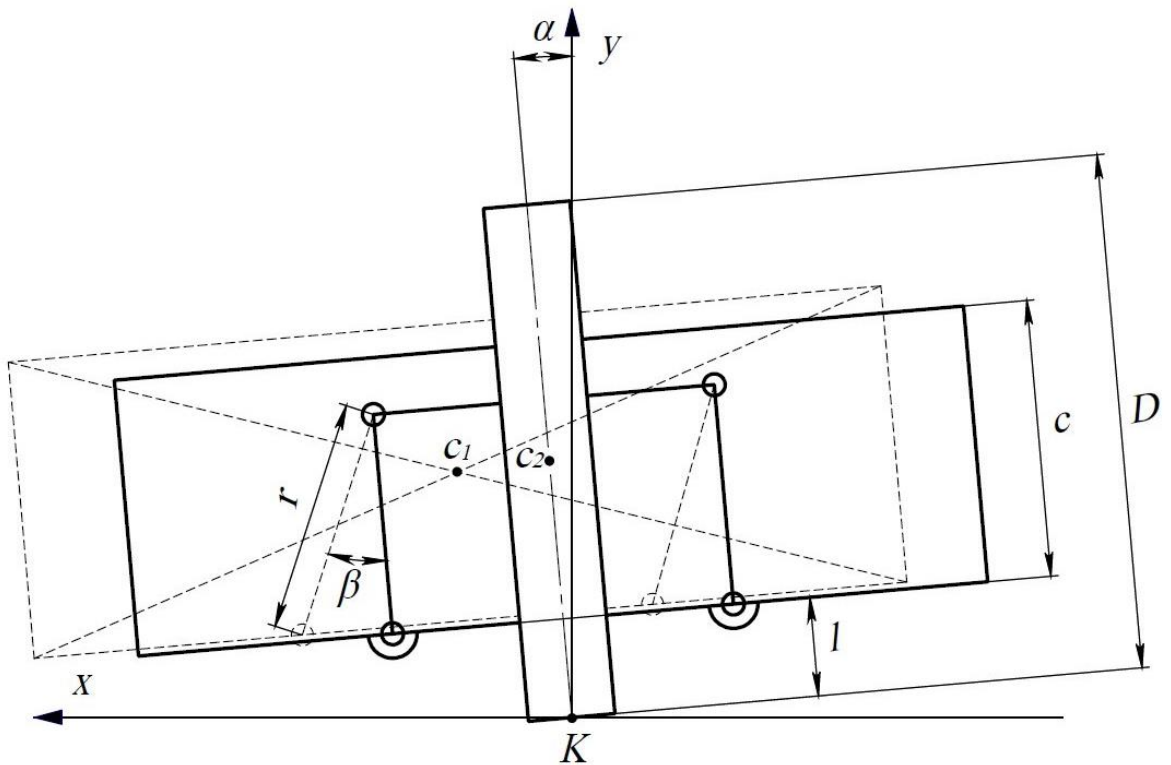


Рисунок 2.2 – Динамічна модель стабілізації засобу із позначенням кутів α (кут нахилу засобу) і β (кут нахилу важелів механізму стабілізації)

На рис. 2.2 використано наступні позначення: c_1 і c_2 – відповідно центри ваги рами і заднього колеса; r – радіус кривошипа; c – висота рами; D – висота колеса; l – відстань від рами до точки контакту K колеса з землею.

Модель об'єкта регулювання можна представити наступною системою диференціальних рівнянь [14]:

$$\begin{cases} I_{зв} \cdot \ddot{\beta} + m_1 \cdot \left(\ddot{x}_{c1} \cdot \frac{\partial x_{c1}}{\partial \beta} + \ddot{y}_{c1} \cdot \frac{\partial y_{c1}}{\partial \beta} \right) = M_u \cdot \eta - \left(m_1 \frac{\partial y_{c1}}{\partial \beta} + m_k \frac{\partial y_{c2}}{\partial \beta} \right) \cdot g; \\ (I_{lk} + I_{kk}) \cdot \ddot{\alpha} + m_1 \cdot \left(\ddot{x}_{c1} \cdot \frac{\partial x_{c1}}{\partial \alpha} + \ddot{y}_{c1} \cdot \frac{\partial y_{c1}}{\partial \alpha} \right) = - \left(m_1 \frac{\partial y_{c1}}{\partial \alpha} + m_k \frac{\partial y_{c2}}{\partial \alpha} \right) \cdot g; \end{cases} \quad (2.1)$$

де $I_{зв}$ – зведений момент інерції засобу відносно точки контакту з землею K , який включає моменти інерції двигуна, шків та колеса.

Окремі складові з рівнянь (2.1) знаходились наступним чином:

$$\begin{aligned}
 x_{c1} &= r \cdot \sin(\beta) + \alpha \cdot \left(e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right); \\
 y_{c1} &= e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)); \\
 \frac{\partial x_{c1}}{\partial \alpha} &= e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)); \\
 \frac{\partial y_{c1}}{\partial \alpha} &= -\alpha \cdot \left(e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right); \\
 \frac{\partial y_{c2}}{\partial \alpha} &= \frac{D_1}{2} \cdot \alpha;
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Виконавши математичні перетворення отримаємо рівняння, яке дає змогу побудувати керування рухом засобу і яке буде використано у подальших дослідженнях

$$\begin{aligned}
 (I_{lk} + I_{kk}) \cdot \ddot{\alpha} + m_1 \cdot \left(\ddot{x}_{c1} \cdot \left(e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right) - \left(r \cdot (1 - \cos(\beta)) + e + \frac{c}{2} \right) \cdot \right. \\
 \left. - \alpha \cdot \left(r \cdot (1 - \cos(\beta)) + e + \frac{c}{2} \right) \right) = - \left(m_1 \cdot \left(-\alpha \cdot \left(e + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right) \right) + m_k \cdot \frac{D_1}{2} \cdot \alpha \right) \cdot g;
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Параметри об'єкта регулювання (засобу для переміщення малогабаритних вантажів) наведено у табл. 2.2 [14, 15].

Таблиця 2.2

Чисельні значення параметрів динамічної системи

Назва параметра	Одиниця вимірювання	Умовне позначення	Числове значення
1	2	3	4
Маса рами	кг	m_1	9,5
Радіус кривошипа	м	r	0,047

1	2	3	4
Відстань від землі до рами	м	l	0,040
Висота рами	м	c	0,080
Діаметр колеса	м	D	0,136
Момент інерції колеса	кг·м ²	I_{kk}	$5,52 \cdot 10^{-4}$
Момент інерції рами	кг·м ²	I_{Ik}	$2,75 \cdot 10^{-3}$
Маса колеса	кг	m_k	$3,31 \cdot 10^{-1}$

У процесі виконання розрахунків використано метод чисельного інтегрування диференціальних рівнянь «StiffnessSwitching» [17]. В результаті отримали залежність кута нахилу засобу α від часу t .

У даній роботі для розв'язання задачі стабілізації обрано пропорційно-інтегральний регулятор [18]. Керуванням було обрано кут повороту механізму балансування β :

$$\beta = k_1 \cdot \alpha(t) + k_2 \cdot \int \alpha(t) dt, \quad (2.4)$$

де k_1 і k_2 – пропорційний та інтегральний коефіцієнти регулятора відповідно, які необхідно визначити.

Початкові умови руху засобу наступні:

$$\begin{cases} \alpha(0) = \alpha_0; \\ \dot{\alpha}(0) = \dot{\alpha}_0, \end{cases} \quad (2.5)$$

де α_0 і $\dot{\alpha}_0$ – початкові значення кута нахилу засобу та його кутової швидкості. За умови стійкості керування отримаємо бажані кінцеві умови руху засобу:

$$\begin{cases} |\alpha(T)| \leq \Delta_\alpha; \\ |\dot{\alpha}(T)| \leq \Delta_{\dot{\alpha}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де T – проміжок часу, за який засіб має досягти стану рівноваги (у даній роботі прийнято $T=0,5$ с; Δ_α та $\Delta_{\dot{\alpha}}$ – допустимі відхилення кута нахилу засобу від вертикалі та його кутової швидкості, які забезпечують потрапляння у окіл стійкості (у даному дослідженні прийнято $\Delta_\alpha=0,001$ рад та $\Delta_{\dot{\alpha}}=0,001$ рад/с).

Крім того, вводиться умова повернення механізму стабілізації у початкове положення:

$$\begin{cases} |\beta(T)| \leq \Delta_\beta; \\ |\dot{\beta}(T)| \leq \Delta_{\dot{\beta}}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де Δ_β та $\Delta_{\dot{\beta}}$ – допустимі відхилення кута нахилу механізму балансування від вертикалі та його кутової швидкості, які забезпечують потрапляння у окіл початкового нульового положення (у даному дослідженні прийнято $\Delta_\beta=0,001$ рад та $\Delta_{\dot{\beta}}=0,001$ рад/с). Досягнути вказаних умов можна безліччю способів. Тому введемо критерій якості регулювання:

$$J_\tau = \tau, \quad |\alpha(\tau)| \leq \Delta_\alpha \wedge |\dot{\alpha}(\tau)| \leq \Delta_{\dot{\alpha}} \wedge |\beta(\tau)| \leq \Delta_\beta \wedge |\dot{\beta}(\tau)| \leq \Delta_{\dot{\beta}}, \quad (2.7)$$

де τ – тривалість регулювання (проміжок часу, за який система із початкового стану, що визначений початковими умовами, перейде у стан, який забезпечує виконання умов (2.5) та (2.6)). Крім того, розглянемо також інший критерій якості регулювання:

$$J_o = \frac{|\max(\alpha) - \alpha_0|}{\alpha_0} 100\%, \quad (2.8)$$

де $\max(\alpha)$ – максимальне значення кута нахилу засобу. Критерій (2.8) означає перегулювання кута нахилу засобу. Обидва критерії (2.7) та (2.8) є небажаними і тому повинні бути мінімізовані.

2.3 Розв’язання задачі оптимального керування

2.3.1 Методика розв’язання задачі

Для того, щоб розв’язати поставлену задачу необхідно звести її до задачі безумовної оптимізації. Для цього розробимо термінальний критерій, який показуватиме ступінь виконання кінцевих умов (2.5), (2.6):

$$Ter = \begin{cases} 0, \text{ якщо } |\alpha(T)| \leq \Delta_\alpha \wedge |\dot{\alpha}(T)| \leq \Delta_{\dot{\alpha}} \wedge |\beta(T)| \leq \Delta_\beta \wedge |\dot{\beta}(T)| \leq \Delta_{\dot{\beta}}; \\ \left(|\alpha(T)| + |\dot{\alpha}(T)| + |\beta(T)| + |\dot{\beta}(T)| \right) 10^8, \text{ якщо} \\ |\alpha(T)| \leq \Delta_\alpha \vee |\dot{\alpha}(T)| \leq \Delta_{\dot{\alpha}} \vee |\beta(T)| \leq \Delta_\beta \vee |\dot{\beta}(T)| \leq \Delta_{\dot{\beta}}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Критерій (2.9) набуває значний величин, якщо хоча б одна із умов (2.5), (2.6) не виконується і він рівний нулю, якщо всі умови (2.5), (2.6) виконуються.

Отже, маємо узагальнений критерій, який необхідно мінімізувати:

$$\begin{aligned} Cr &= J + Ter \rightarrow \min, \\ J &= J_\tau \text{ або } J = J_o. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Для того, щоб виконати мінімізацію функціонала (2.10) розробимо цільову функцію, умовне зображення якої представлено на рис. 2.3.

$$\begin{matrix} k_1 \\ k_2 \end{matrix} \rightarrow \text{цільова функція} \rightarrow Cr$$

Рисунок 2.3 – Умовне зображення цільової функції для мінімізації

Цільова функція працює наступним чином:

- 1) на вхід отримує чисельні значення коефіцієнтів k_1 та k_2 ;
- 2) виконує підстановку цих значень у вираз (2.4);
- 3) проводить чисельне інтегрування диференціального рівняння (2.3);
- 4) розраховує кінцеві значення кута нахилу засобу та механізму балансування, а також їхні кутові швидкості;
- 5) на основі отриманих даних розраховує термінальний критерій (2.10);
- 6) розраховує критерій якості регулювання (2.7) або (2.8);
- 7) розраховує чисельне значення узагальненого критерію (2.10) та видає його.

Код, який реалізує роботу цільової функції наведено у Додатку А.

Для мінімізації отриманої цільової функції застосовано метод чисельної оптимізації VCT-PSO [19], параметри якого наведено у табл. 2.3.

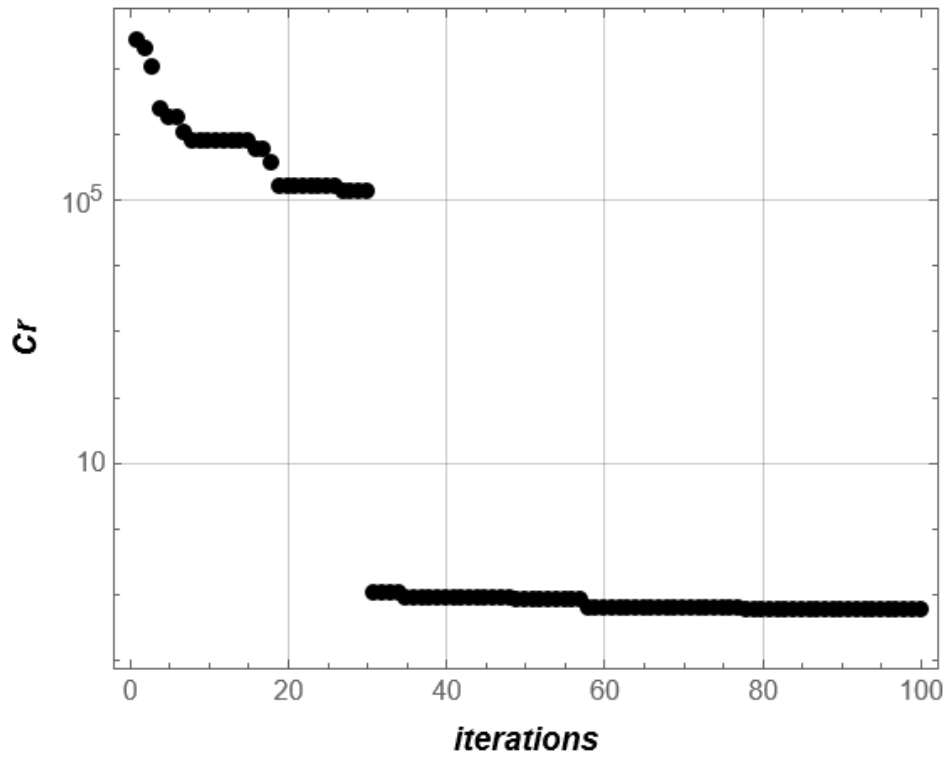
Таблиця 2.3 – Чисельні значення параметрів оптимізатора VCT-PSO

Параметр	Значення
Кількість ітерацій	100
Популяція рою	25
Назва коефіцієнта c_1	1,19
Назва коефіцієнта c_2	1,19
Назва коефіцієнта w	0,72
Назва параметра RC	5
Діапазон пошуку k_1, k_2	-5...5

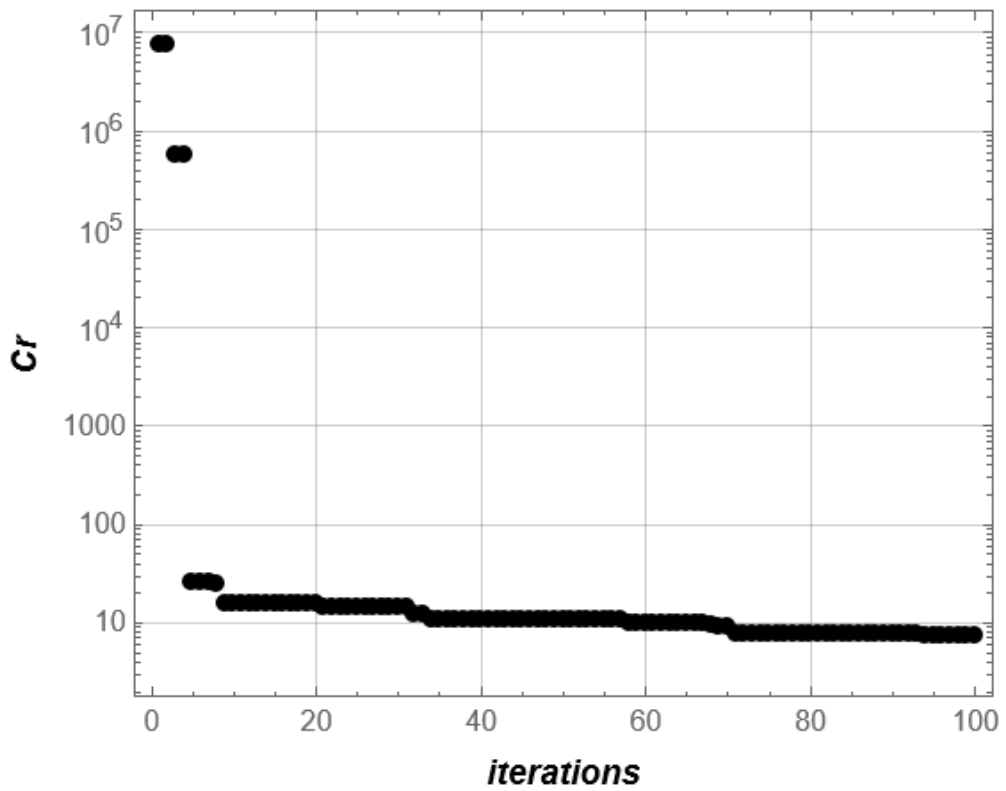
Метод VCT-PSO дає змогу визначити такі значення коефіцієнтів k_1, k_2 на яких цільова функція набуває мінімуму.

2.3.2 Варіанти розв'язання задачі

Процес розв'язання задач оптимального керування можна оцінити за графіками збіжності, які наведені на рис. 2.4.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Графіки збіжності критерію при застосуванні методу оптимізації VCT-PSO: а) для критерію тривалості регулювання; б) для критерію перерегулювання

З рис. 2.4 видно, що для першої задачі алгоритм знаходить розв'язок, який забезпечує стійкість регулювання вже на тридцятій ітерації. Для другої задачі для цього знадобилось лише чотири ітерації. У подальшому у обох випадках алгоритм використовувався для мінімізації критерію якості регулювання.

Можна сказати, що такий закон зміни величини узагальненого критерію оптимізації відповідає топології типу „ЯМА-В-ЯМІ” [20]. Верхня яма відповідає топології термінального критерію, а нижня – критерію якості регулювання (тривалості, або перерегулювання).

У результаті отримано значення коефіцієнтів регулятора, які наведено у табл. 2.4.

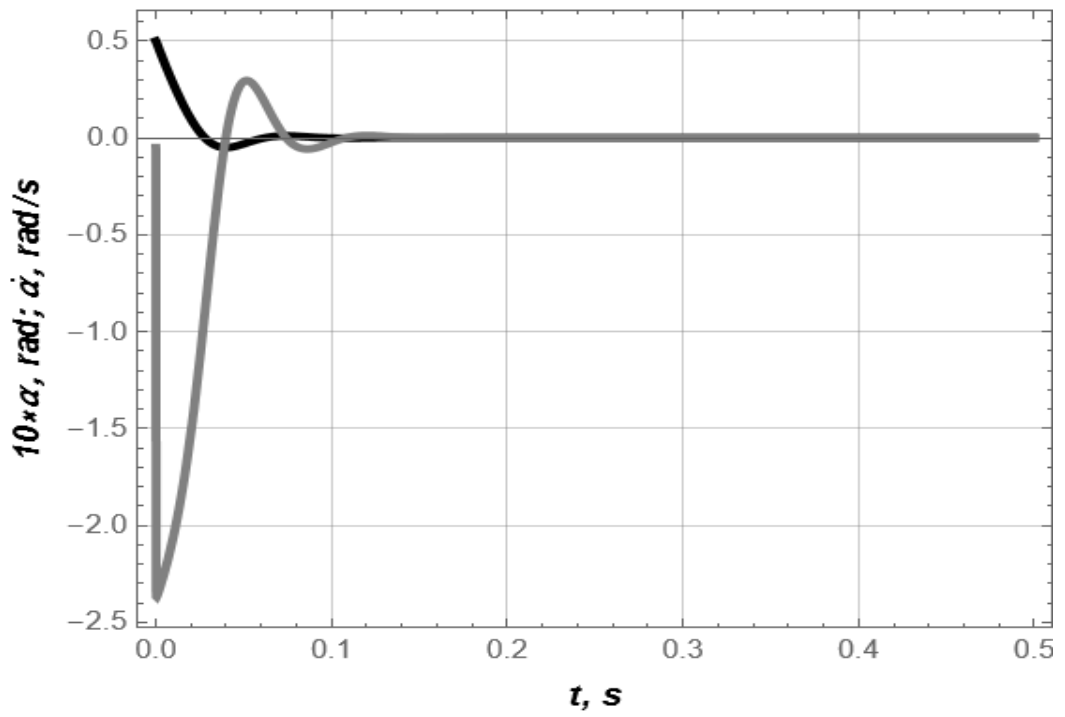
Таблиця 2.4 – Значення оптимальних за різни ми критеріями коефіцієнтів ПІ-регулятора

Критерій	Значення коефіцієнта	
	k_1	k_2
Тривалість стабілізації	-2.1120883541816924	-1.542663880085046
Перерегулювання	-2.1120122652552653	-1.7424839720350571

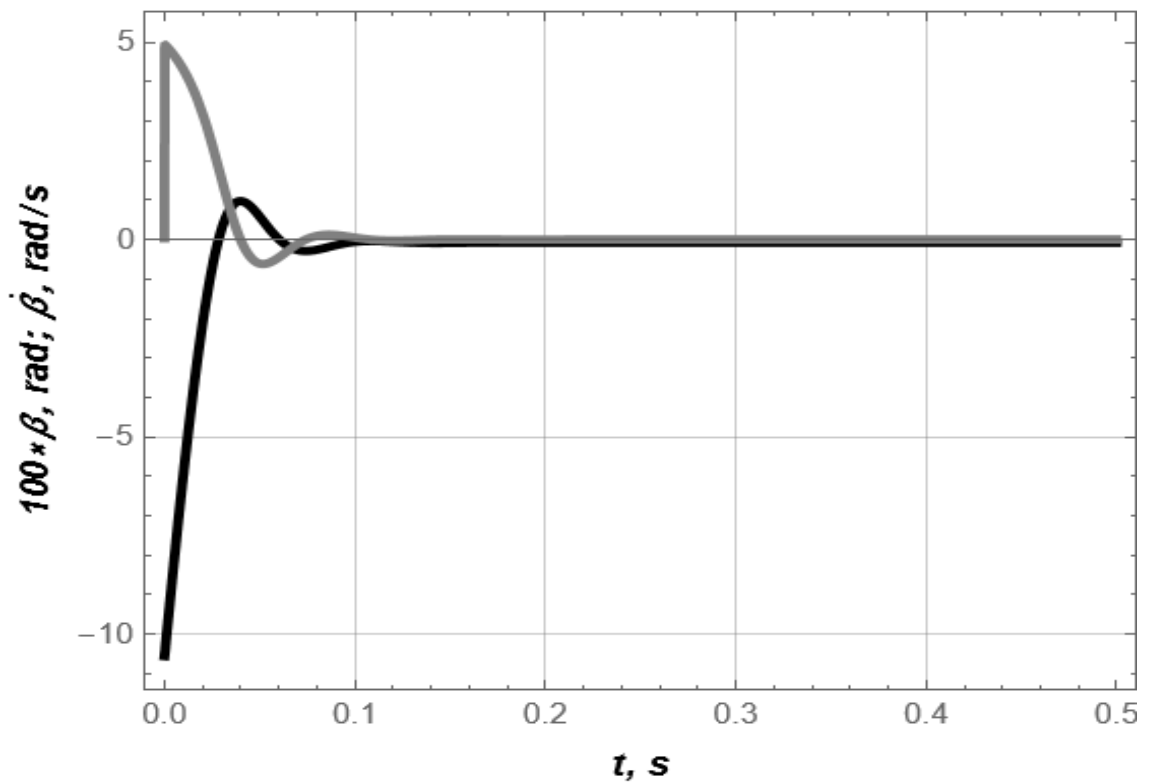
Як видно із наведеної таблиці значення коефіцієнтів є досить близькими. Особливо це стосується пропорційного коефіцієнта. Ці значення є від'ємними, що забезпечує стійкість регулювання.

2.4 Аналіз отриманих результатів

Для більш повного аналізу отриманих результатів проведемо їхню графічну інтерпретацію та також аналіз чисельних оціночних показників. На рис. 2.5 (для критерію (2.7)) та 2.6 (для критерію (2.8)) наведено графічні результати. Аналіз графічних залежностей які наведені на рис. 2.5 дає підстави стверджувати, що процес стабілізації положення засобу відбувається плавно. При цьому спостерігається незначне перерегулювання.



а)



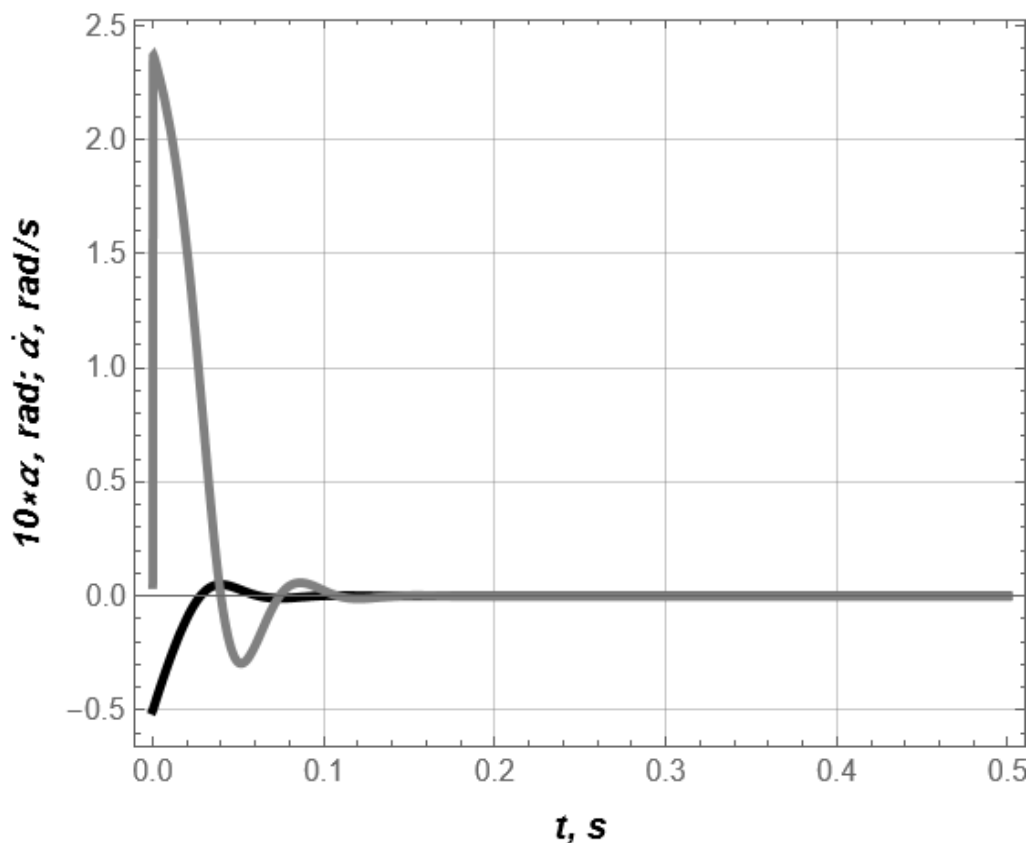
б)

Рисунок 2.5 – Графіки зміни: а) кута нахилу засобу (чорний графік) та його кутової швидкості (сірий графік); б) кута механізму балансування (чорний графік) та кутової швидкості (сірий графік)

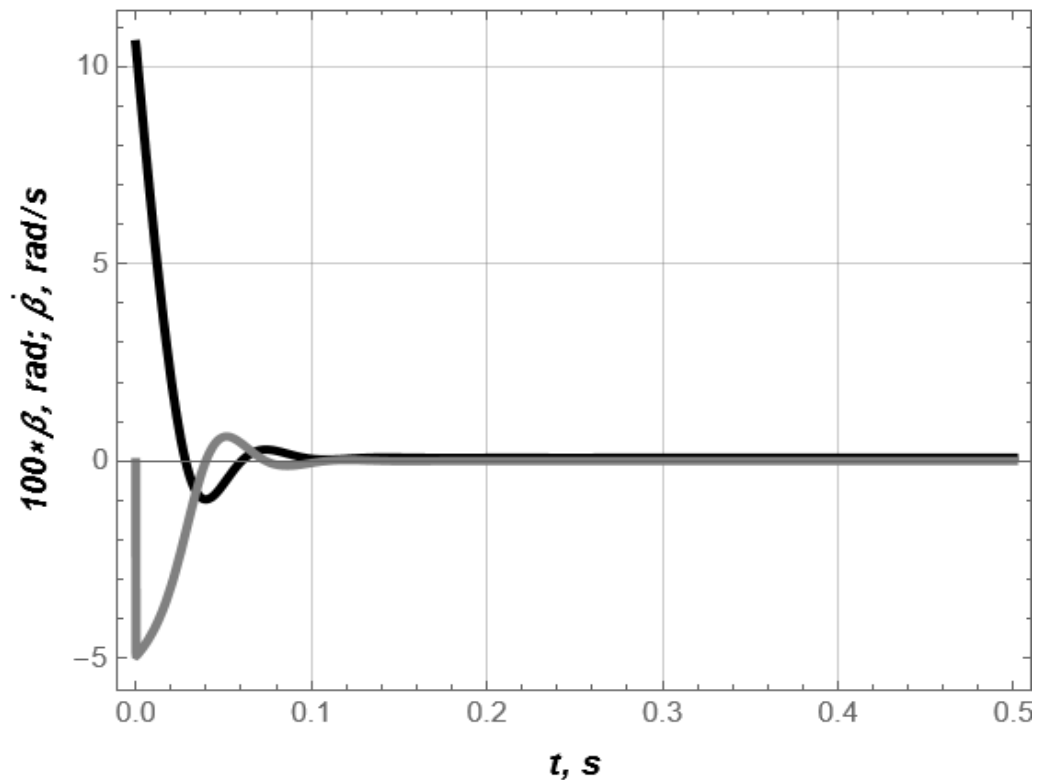
Найбільша інтенсивність регулювання спостерігається протягом першого етапу. При цьому можна вважати що процес регулювання триває лише 0,1 секунди. Це дає підстави стверджувати що знайдене регулювання забезпечує високу якість досягнення кінцевих умов. Таким чином будемо вважати що задача оптимального керування при забезпеченні мінімальної тривалості регулювання розв'язано.

Аналогічні графічні залежності можна спостерігати на рис. 2.6. Однак вони побудовані за протилежних крайових умов (коли знаки початкового кутового положення і початкової кутової швидкості замінені на протилежні). При цьому також спостерігається плавність регулювання а саме регулювання не триває досить довго.

Можна говорити про те що задача регулювання при мінімізації показника перерегулювання розв'язано.



a)



б)

Рисунок 2.6 – Графіки зміни: а) кута нахилу засобу (чорний графік) та його кутової швидкості (сірий графік); б) кута механізму балансування (чорний графік) та кутової швидкості (сірий графік)

Графіки на рис. 2.5 та 2.6 побудовані для симетричних початкових умов. Для рис. 2.4: $\alpha(0)=0,05$ рад; $\dot{\alpha}(0)=-0,05$ рад/с. Для рис. 2.5: $\alpha(0)=-0,05$ рад; $\dot{\alpha}(0)=0,05$ рад/с.

Крім того, були розраховані оціночні показники отриманого регулювання (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Величини оціночних показників якості регулювання

Показник	Одиниця вимірювання	Величина
1	2	3
Для критерію тривалості регулювання		
Максимальне кутове прискорення механізму стабілізації	рад/с ²	119921

Продовження таблиці 2.5

1	2	3
Максимальне кутове прискорення засобу	рад/с ²	56778
Середньоквадратичне кутове прискорення механізму стабілізації	рад/с ²	1699
Середньоквадратичне кутове прискорення засобу	рад/с ²	804
Тривалість регулювання	с	0,0574
Перерегулювання	%	7,26922
Для критерію перерегулювання		
Максимальне кутове прискорення механізму стабілізації	рад/с ²	234548
Максимальне кутове прискорення засобу	рад/с ²	111054
Середньоквадратичне кутове прискорення механізму стабілізації	рад/с ²	3316
Середньоквадратичне кутове прискорення засобу	рад/с ²	1570
Тривалість регулювання	с	0,0588
Перерегулювання	%	7,26922

Порівнюючи між собою дані які наведені у табл. 2.5 можна встановити що, максимальне та середньоквадратичне кутові прискорення механізму стабілізації засобу та самого засобу для першої оптимізаційної задачі вдвічі менші, ніж для другої оптимізаційної задачі. Тривалості регулювання та показник перерегулювання майже однакові.

Отже можемо зробити висновок, що критерії, які запропоновані в роботі, дозволяють отримати розв'язки які досить близькі. Це, однак, не стосується самих показників якості регулювання як то максимальних та середньоквадратичних величин максимальних прискорень механізму стабілізації засобу та самого засобу.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗАСОБОМ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ

3.1 Розробка структурної схеми системи керування

Для реалізації оптимального керування у процесі стабілізації засобу для переміщення малогабаритних вантажів була розроблена структурно-функціональна схема, що зображена на рис. 3.1.

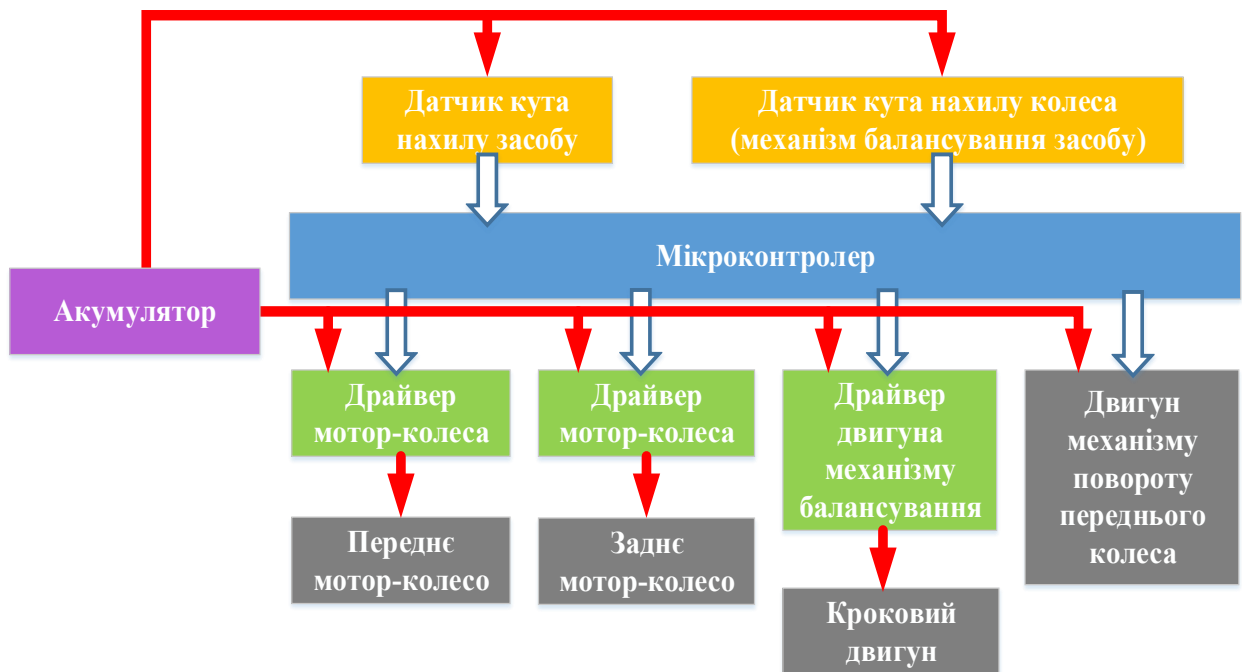


Рисунок 3.1 – Структурно-функціональна схема системи керування засобу для переміщення малогабаритних вантажів

Дамо опис роботі структурно-функціональної схеми системи керування засобу для переміщення малогабаритних вантажів. Центральною частиною такої системи є мікроконтролер. Даний пристрій отримує інформацію від датчика кута нахилу засобу та датчика кута нахилу колеса який знаходиться у складі механізму балансування засобу. Ці дані проходять цифрову обробку (фільтрацію з використанням комплементарного фільтру та інших цифрових фільтрів) і потім із врахуванням закону керування (пропорційно-інтегральний

регулятор коефіцієнти якого знайдені у попередньому розділі) визначається керування. Дане керування надходить на драйвер двигуна механізму балансування. У відповідності до отриманих сигналів драйвер подає імпульси керування кроковому двигуну. Це дає змогу повернути кроковий двигун на бажаний кут для того, щоб стабілізувати положення засобу для транспортування малогабаритних вантажів. Така робота відбувається безперервно оскільки сам засіб може бути нестійкий (випадок коли центр ваги засобу та вантажу, який на ньому знаходиться, розміщені не по геометричному центру самого пристрою). Тому відбувається постійний моніторинг кута нахилу засобу визначається кутова швидкість кута нахилу і відбуваються відповідні розрахунки для отримання керування, яке надходить на драйвер двигуна механізму балансування. Крім того, мікроконтролер керує драйверами мотор колеса переднього та заднього. Для того щоб засіб мав змогу повертати вліво та вправо мікроконтролер надсилає дані сигнали на двигун механізму повороту переднього колеса. Для живлення всієї системи використовується акумуляторна батарея. Силове електроживлення на рис. 3.1 показано стрілками червоного кольору. Інформаційні сигнали показані стрілками білого кольору із синіми контурами.

Для того, щоб впевнитись, що механізм балансування засобу правильно відпрацьовує задані команди в системі передбачено датчик кута нахилу колеса, який знаходиться в складі механізму балансування. Цей датчик є резистивним. Інформація, яка отримана з нього, надсилається на мікроконтролер. У подальшому, як і у випадку із датчиком кута нахилу засобу, ця інформація проходить цифрову обробку. При цьому забезпечується придушення перешкод та шумів і виокремлення корисного сигналу. У випадку коли кроковий двигун неправильно відпрацьовує заданий сигнал датчик кута нахилу колеса процес повістить мікроконтролер і будуть проведені заходи, які дозволять усунути цей ефект.

У подальшому дамо певні рекомендації стосовно раціонального вибору елементів даної системи які би могли працювати У реальних умовах експлуатації засобу для переміщення малогабаритних вантажів.

3.2 Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи (датчики, керовані приводи, мікроконтролери)

Для того, щоб забезпечити практичну реалізацію системи керування необхідно враховувати наступні дві умови:

- ❖ захищеність від дії навколишнього середовища;
- ❖ можливість реалізації певної функції у відповідності до схеми (рис. 3.1).

Стосовно першої умови необхідно використати рекомендації захисту згідно маркування IP [21]. Це маркування показує ступінь захисту оболонки електрообладнання, яке показує дві цифри: перша з яких означає захист від попадання твердих предметів, друга – від проникнення води (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Маркування захисту електрообладнання

Рівень захисту	Від чого забезпечено захист	Опис
1	2	3
<i>Перша цифра (захист від сторонніх предметів, що мають діаметр)</i>		
0	-	Захист відсутній
1	≥ 50 мм	Великі поверхні тіла, відсутній захист від усвідомленого контакту
2	$\geq 12,5$ мм	Пальці та схожі об'єкти
3	$\geq 2,5$ мм	Інструменти, кабелі тощо
4	≥ 1 мм	Більшість дротів, болти тощо
5	Пилозахисний	Деяка кількість пилу може проникати всередину, однак це не порушує роботу

пристрою. Повний захист від контакту

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
6	Пилонепроникний	Пил не може потрапити у пристрій. Повний захист від контакту
<i>Друга цифра</i>		
0	-	Захист відсутній
1	Вертикальні краплі	Вода, що крапає вертикально не повинна порушувати роботу пристрою
2	Вертикальні краплі під кутом до 15°	Вода, що крапає вертикально не повинна порушувати роботу пристрою, якщо його відхилити від робочого положення на кут до 15°
3	Бризки, що падають	Захист від дощу. Вода ллється вертикально або під кутом до 60° до вертикалі.
4	Бризки	Захист від бризок, що падають у довільному напрямі.
5	Струмені	Захист від водяних струменів з довільного напрямку
6	Морські хвилі	Захист від морських хвиль або сильних водяних струменів. Вода, що потрапила всередину корпусу не повинна порушувати роботу пристрою.
7	Короткочасне занурення на глибину до 1м	При короткочасному зануренні вода не потрапляє у кількостях, що порушують роботу пристрою. Постійна робота у зануреному режимі не передбачається.
8	Тривале занурення на	Повна водонепроникність. Пристрій

	глибину понад 1м	може працювати у зануреному режимі
--	------------------	------------------------------------

У табл. 3.1 виділено ті рівні захисту, які відповідають умова експлуатації засобу для переміщення малогабаритних вантажів: IP55.

Для визначення кута нахилу механізму балансування рекомендується використати оптичний енкодер E38S6G5-360B-G24N (рис. 3.2) [22].



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд енкодера E38S6G5-360B-G24N

Основні технічні характеристики енкодера:

- ❖ живлення 8-30В;
- ❖ 1440 кількість імпульсів за оберт;
- ❖ максимальна механічна швидкість – 5000 об/хв;
- ❖ розміри валу (мм) 6x13;
- ❖ габаритні розміри енкодера (в мм) 38x35,5.

Для визначення кута нахилу пристрою рекомендується використати інклінометр INC 110 SERIES C (рис. 3.3) [23].



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд інклінометра INC 110 SERIES C

Технічні характеристики інклінометра наведено нижче:

- ❖ діапазон вимірювання до $\pm 90^\circ$;
- ❖ одинарна або подвійна вісь;
- ❖ CANopen вихід;
- ❖ аналоговий вихід 0-10 VDC, 4-20 mA;
- ❖ висока і стабільна точність $\pm 0,1^\circ$;
- ❖ стійкість до ударів/вібрації;
- ❖ низька чутливість до змін вологості та температури;
- ❖ ступінь захисту IP67;
- ❖ міцний і компактний металевий корпус.

Для реалізації повороту механізму балансування планується використовувати кроковий двигун NEMA17 (рис. 3.4) [24].



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд крокового двигуна NEMA17 (17HS4401)

Основні технічні характеристики крокового двигуна NEMA17 наведено нижче:

- ❖ номінальний струм 1,7 А;
- ❖ опір обмотки 1,5 Ом;
- ❖ індуктивність обмотки 2,8 мГн;
- ❖ момент утримання 4 кгсм;
- ❖ кут повороту на 1 крок 1,8 °.

Для того, щоб організувати керування крокового двигуна рекомендується використати драйвер ТВ6600 4А [25].



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд драйвера крокового двигуна ТВ6600 4А

Базові технічні характеристики крокового драйвера ТВ6600 4А крокового двигуна наведено нижче:

- ❖ рекомендована напруга 12В-36В;
- ❖ максимальний струм 4А;
- ❖ шість варіантів мікрокроку;
- ❖ максимальний поділ кроку до 32 сегментів;
- ❖ виконання у закритому корпусі;
- ❖ вбудований тепловий захист та захист від перевантажень по струму.

Для керування поворотом засобу необхідно використовувати сервопривод [26] (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд сервоприводу Dsservo DS3218

Технічні характеристики сервоприводу Dsservo DS3218 наведено нижче:

- ❖ максимальне зусилля 20 кг;
- ❖ робоча напруга 4,8...6,8 В;
- ❖ маса 60 г;
- ❖ тип шестерні: мідь і алюміній;
- ❖ робоча частота 50-333 Гц;
- ❖ кут 180° (ШИМ 500-2500 мкс);
- ❖ розмір: 40x20x40,5 мм.

При реалізації конструкції пристрою рекомендується використовувати мотор-колеса 8АМК2А (рис. 3.7) [27].



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд мотор-колеса

Технічні характеристики мотор-колеса 8AMK2A наведено нижче:

- ❖ безконтактний двигун;
- ❖ розмір колеса 200 x 50 мм;
- ❖ номінальна напруга 24 В
- ❖ номінальна потужність 250 Вт.

Для керування всіма процесами рекомендується використовувати мікроконтролер NUCLEO-F303RE (рис. 3.7) [28].

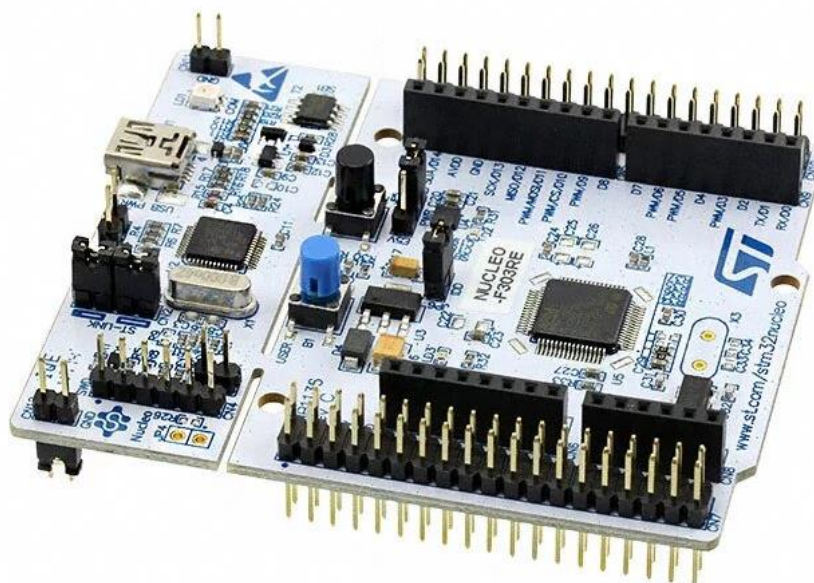


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд мікроконтролера Nucleo

Технічні характеристики мікроконтролера Nucleo наведено нижче:

- ❖ програматор інтегрований ST-LINK / V2-1 з SWD роз'ємом;
- ❖ режими програматора ST-LINK / V2-1;
- ❖ система живлення плати: USB VBUS або зовнішнє джерело (3,3В, 5В, 7-12В);
- ❖ підтримка віртуального COM порту;
- ❖ пристрій зберігання даних;
- ❖ відлагодочний порт;
- ❖ системи розробки: (IDEs) IAR™, ARM® Keil®, GCC-based IDEs.

Вказані елементи або їхні аналоги є основою для розробки системи керування, оскільки вони дозволяють виконувати функції керування рухом засобу у динамічному (коли засіб виконує рух у напрямку переміщення за траєкторією) та статичному режимах (при збереженні стійкості коли колеса засобу не обертаються).

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЕКТУ

4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання операцій по переміщенню малогабаритних вантажів

Для оцінки економічних показників проекту необхідно вказати фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання операцій по переміщенню малогабаритних вантажів. Можна навести декілька позитивних факторів які пов'язані із застосуванням цієї технології:

- енергоефективність;
- гнучкість до умов транспортування вантажів;
- висока продуктивність;
- масштабованість;
- відсутність необхідності побудови складної і дорогої інфраструктури.

Дамо пояснення кожному із цих факторів. Перший з них означає низькі питомі енерговитрати на переміщення вантажів. Це пов'язано із тим, що засоби для транспортування малогабаритних вантажів обладнуються електричним приводом. При транспортуванні вантажів відбувається споживання електричної енергії, яка запасена в акумуляторах засобу. Таким чином, відбувається споживання саме електричної енергії, яка, як відомо, є не такою дорогою як інші види енергії (наприклад, безнизу чи дизельного палива при використанні двигунів внутрішнього згорання або інших видів рушіїв).

Крім того, засоби для транспортування малогабаритних вантажів можуть бути пристосовані до різних умов транспортування вантажів. Тут мається на увазі різні маси об'єми та відстані транспортування. Це можуть бути транспортні засоби у рамках транспортування для певного житлового комплексу, між житловими комплексами (у одному кварталі), у торговельних розважальних центрах або інших об'єктах.

Необхідно сказати також те, що засіб для транспортування малогабаритних вантажів характеризується високою продуктивністю. Вона впливає із високої швидкості переміщення вантажів та повернення транспортного засобу на базову станцію. Оскільки швидкість переміщення вантажів характеризується обмеженнями на швидкість обертання електричних мотор-коліс, то можна досягнути досить високої продуктивності переміщення вантажів, при умові, що дотримуються всі вимоги безпеки переміщення вантажів.

Запропоновано технологію можна масштабувати (збільшувати кількість засобів для транспортування малогабаритних вантажів, центрів куди можуть звернутися споживачі даної послуги, або інших об'єктів, які пов'язані із наданням послуги транспортування вантажів).

Однією із головних переваг даної технології є відсутність необхідності побудови складної і дорогої інфраструктури, залучення значної кількості висококваліфікованих кадрів. Дана технологія може конкурувати із сервісними послугами, які надаються транспортними компаніями (Нова Пошта, Укрпошта та іншими) за умови що транспортування відбувається у межах одного населеного пункту та не на великій відстані.

4.2 Розрахунок економічної ефективності від застосування засобу для переміщення малогабаритних вантажів

Для того, щоб виконати розрахунок економічних показників проекту зосередимось на вартості переміщення вантажів у межах одного житлового комплексу. Для цього візьмемо приклад – житловий комплекс «Софія Клубний» [29], який знаходиться за адресою: Київська область, Бучанський р-н, с. Софіївська Борщагівка, вул. Соборна, 100. Для прикладу на рис. 2.1 показано маршрут переміщення товару з торговельного центра до під'їзду крайнього будинку. Ця відстань складає близько 3,2 км шляху.

швидкість руху 15 км/год ці тривалості будуть рівними: $t_1=t_2=12,8 \text{ хв}=6768 \text{ с}$. Підставивши всі величини будемо мати:

$$E = 1000(6768 + 6768 \cdot 0,6) = 10828800 \text{ Дж} \approx 3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Як відомо, тариф на електроенергію для підприємців складає 4,32 грн за кВт-год [29]. Це означає, що із врахуванням витрат, що пов'язані із втратами електроенергії при заряджанні акумулятора вартість електроенергії, яка буде витрачена на одну доставку складатиме:

$$E_{нов} = \frac{E}{\eta} T = \frac{3}{0,95} 4,32 = 13,65 \text{ грн} \quad (4.2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії апарату для заряджання акумулятора; $E_{нов}$ – вартість електроенергії, що витрачена із урахуванням втрат на заряджання акумулятора засобу.

Враховуючи те, що між доставками необхідно виконувати пакувальні роботи та закріплювати вантажа на засобі, кількість доставок за день (8 год) може складати не більше 12. Отже, за один день засіб може перевезти близько 180 кг вантажів (15 кг/доставка \cdot 12 доставок = 180 кг). При цьому вартість електроенергії на доставку цих вантажів становитиме 163,8 грн (13,65 грн/доставка \cdot 12 доставок = 163,8 грн). Таким чином, питома вартість доставки становитиме:

$$E_{\%} = \frac{E_{нов}}{m \cdot s} = \frac{163,8}{180 \cdot 3,2} = 0,284 \frac{\text{грн}}{\text{кг} \cdot \text{км}} \quad (4.2)$$

де s – довжина шляху для однієї (прийнятої у розрахунках) доставки, км. Виходячи з цього було проведено порівняльний розрахунок вартості доставки товару. Отримані результати наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати порівняльного розрахунку (при умові врахування лише поточних витрат на доставку, що враховують вартість енергії)

Показник	Одиниця вимірювання	Постачальник послуг доставки із технологією	
		Базовою*	Пропонованою
Питома вартість доставки	грн/кг м	0,700**	0,284
Кількість робочих днів з експлуатацією засобів доставки	-	365	350
Річні фінансові витрати на придбання енергії для виконання доставок	грн	146700	57330
Приблизний термін окупності засобу	років	-	0,85

* відомий на ринку України постачальник послуг доставки товарів;

** для визначення показника було застосовано інтерактивний калькулятор розрахунку вартості доставки на сайті постачальника послуг доставки (вантаж 15 кг, розмірів 25x15x20 см, адресне переміщення у межах Києва)

Як видно з табл. 4.1 пропонована технологія доставки вантажів має досить позитивні показники окупності. Таким чином, вона буде мати конкурентні переваги і може достатньо швидко бути проваджена у сервісні послуги по доставці малогабаритних вантажів саме у певній ніші: перевезення вантажів на невеликі відстані у межах міста.

РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ

5.1 Класифікація небезпечних факторів під час виконання технологічних операцій із переміщення засобу

Переміщення малогабаритних вантажів за допомогою засобу для переміщення може супроводжуватися небезпечними факторами. Ці фактори пов'язані з різними причинами тому у даному розділі проведемо їхню класифікацію. Необхідно сказати що вказані фактори можуть призвести до травмування працівників, пошкодження обладнання або зниження ефективності його використання. Надалі вкажемо класифікацію небезпечних факторів які можуть виникати при експлуатації засобу для переміщення малогабаритних вантажів.

Перший клас факторів - небезпечні фактори пов'язані з механізмами та обладнанням. При переміщенні малогабаритних вантажів часто можуть виникати механічні небезпеки. Зокрема, механічні удари. При неправильному або нерівномірному розподілі вантажу можливі удари в процесі його переміщення. Вони можуть призвести до травм працівників або обслуговуючого персоналу особливо це стосується тих людей які знаходяться в зоні безпосереднього контакту із засобом або вантажем. Часто при технологічних операціях з транспортування малогабаритних вантажів можуть використовуватися елементи які можуть зачепити працівника або оточуючих людей це може призвести до важких травм. Крім того вантажі можуть легко впасти з транспортованого засобу при умові неправильного закріплення вантажу (несправності або при неправильному розміщенні вантажу). Це створює загрозу для працівників які перебувають у безпосередній близькості від засобу для транспортування.

Крім того існує ризики які пов'язані із електричним обладнанням (електричні небезпеки). Засіб приводиться в рух від електричного приводу та

містить електричні пристрої (акумулятори драйвери та інше електричне обладнання), то може виникнути небезпека електричного удару. Це може відбутися при несправностях електроізоляції електричних проводів, короткому замиканні або порушеннях ізоляції інших елементів засобу (особливо високовольтних). Це може призвести до серйозних травм або електричних опіків які пов'язані з дією електричного струму на організм людини.

У процесі транспортування малогабаритних вантажів за допомогою розробленого засобу можуть виникати небезпечні фактори які пов'язані з **організацією роботи (другий клас факторів)**. У процесі транспортування малогабаритних вантажів можуть виникати небезпеки пов'язані з недотриманням технологічних регламентів та вимог безпеки як то недотримання інструкції та стандартів щодо транспортування вантажів. Відсутність чітких інструкцій з експлуатації засобів і недотримання стандартів може призвести до механічних або електричних поломок засобу що збільшує ймовірність аварійних ситуацій та створює ризики для обслуговуючого персоналу та робітників. Крім того надмірне навантаження засобу (понад нормовану вантажопідйомність) може призвести до поломки обладнання (механічних елементів, рами, передавальних механізмів, електричних двигунів) або порушення його стійкості і створення небезпеки для працівників. Одним із видом помилок є організаційні, які можуть бути пов'язані із невірним розподілом обов'язків на робочому місці (при експлуатації транспортного засобу неправильно і не чітко розподілені обов'язки між працівниками, що може викликати хаос під час виконання операцій із транспортування вантажів). Крім того може виникнути фактор, який пов'язаний із недостатнім контролем за технічним станом і справністю засобу, відсутністю регулярного технічного обслуговування та перевіркою засобу може призвести до його несправності, які пов'язані із зношеністю елементів та врешті-решт аварій, оскільки несправні або зношені механізми значно підвищують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Третій клас небезпечних факторів пов'язаний із фізичним та психоемоційним навантаженням працівників, які використовують даний засіб. Фізичні навантаження виникають при переміщенні малогабаритних вантажів, які вимагають певних фізичних зусиль працівників. Працівники зазнають фізичних навантаження, що є надмірними для їхнього здоров'я, якщо не використовуються відповідні механізми для полегшення їхньої роботи. Це може призвести до перевтоми та втрати фізичних сил при постійному підніманні та переміщенні вантажів без належних засобів механізації. У крайньому випадку це може викликати травми опорно-рухового апарату. Крім того, можуть виникати хронічні захворювання та болі в області спини та шиї при роботі з неправильними позами. При цьому збільшується навантаження на окремі ділянки тіла працівника.

Не варто забувати також про психоемоційне навантаження працівника. Часто операції із транспортування малогабаритних вантажів виконуються в умовах обмеженого часу і під високим психоемоційним навантаженням. Це призводить до стресу та зниження концентрації уваги. Психоемоційне перевантаження працівника може бути небезпечним оскільки знижується концентрація уваги працівника. Під впливом стресу працівник може неправильно оцінити ситуацію і допустити помилки що збільшує ймовірність завдання йому травм. Крім того, погіршення психоемоційного стану при довготривалому стресі або періоді в перевантаження може призвести до вигорання і втрати і що впливає на якість виконання завдань та безпеку праці загалом.

5.2 Заходи техніки безпеки

Для того щоб не допустити аварійних ситуацій, травмування персоналу та інших небезпечних сценаріїв були запропоновані різні заходи щодо техніки безпеки під час виконання технологічних операцій із переміщенням засобу для транспортування малогабаритних вантажів. Їх можна поділити на

організаційно-технічні заходи, заходи безпеки під час роботи з засобом та заходи безпеки при аварійних ситуаціях.

Організаційно-технічні заходи.

Можливо одним із головних елементів забезпечення безпеки при експлуатації засобу для транспортування малогабаритних вантажів є належне навчання та інструктаж працівників. До таких організаційних заходів належать: інструктажі з техніки безпеки та регулярне навчання працівників. Кожен працівник, що працює із засобом для транспортування вантажів, повинен пройти інструктаж з техніки безпеки перед початком експлуатації засобу. Цей інструктаж включає в себе ознайомлення з основними правилами безпеки, методами безпечного транспортування вантажів, а також діями працівника у разі виникнення аварійних ситуацій. Регулярне навчання працівників повинно проходити на курсах або тренінгах щодо технологій і вимог та безпеки експлуатації засобів і виконання правил техніки безпеки. Крім того, працівники повинні бути ознайомлені з інструкціями з експлуатації засобів. У вказаних інструкціях повинно бути чітко і однозначно прописані правила і умови безпечної експлуатації засобів.


Одним із важливих факторів для уникнення небезпечних умов експлуатації засобу є належна організація робочих місць працівників на вказаних місцях здійснюється технологічні операції із транспортування вантажів обслуговування малогабаритних транспортних засобів (зарядка акумуляторів, перевірка надійності механічних кріплень, відсутності люфтів у механічному обладнанні, відсутності пошкоджень ізоляції електричного обладнання тощо). Організація робочих місць включає планування робочих зон, наявність засобів захисту, частоту та порядок на робочому місці. Планування робочих зон означає, що на робочому місці повинно бути достатньо простору для робітника та для маневрування і транспортування засобів. Всі робочі зони повинні бути позначені, а доступ до них повинен бути обмежений для тих осіб, які не мають для цього повноважень. Наявність засобів захисту означає доступність індивідуального захисту (захисні каски,

рукавички, захисне взуття). Порядок на робочому місці повинен забезпечувати уникнення ковзання вантажу або працівників по підлозі. Всі інструменти та пристрої повинні зберігатись у спеціально відведених для цього місцях.

Одним із важливих факторів забезпечення відсутності аварійних ситуацій є регулярний технічний огляд і технічне обслуговування обладнання. Несправність обладнання є одною із основних причин травм під час виконання технологічних операцій транспортування. Для мінімізації цих ризиків необхідно проводити регулярне технічне обслуговування засобів для транспортування вантажів. При цьому необхідно виконувати перевірку технічного стану обладнання. Така перевірка повинна бути регулярною і повинна здійснюватися відповідно до графіків і регламентів технічного обслуговування. Всі несправності, зокрема знос частин механізмів, повинні бути своєчасно усунені. Крім того, необхідно забезпечити перевірку елементів системи безпеки. Зокрема це стосується кінцевих вимикачів, а також відповідальних вузлів засобу для транспортування малогабаритних вантажів.

Одним із головних заходів забезпечення безпеки експлуатації засобу є маркування небезпек [31]. На підприємстві, де буде організовано експлуатацію засобів для транспортування малогабаритних вантажів, необхідно використовувати знаки, які розміщені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Звід знаків безпеки, що використовуються на виробництві

Знак	Референт (значення знака)
1	2
<i>Категорія „Знаки пожежного обладнання”</i>	
	Вогнегасник




Продовження таблиці 5.1

1	2
	<p>Пожежний кран-комплект</p>
	<p>Переносний пристрій пінного пожежогасіння</p>
<i>Категорія „Знаки заборони”</i>	
	<p>Не курити</p>
	<p>Заборона відкритого полум'я; заборона вогню, відкритих джерел запалювання та паління</p>
	<p>Не торкатися</p>

1	2
	Не гасити водою
	Заборона важкого навантаження
	Не штовхати
	Вхід дітям заборонено
Категорія „Попереджувальні знаки”	
	Знак загальної застороги

1	2
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a person tripping over a low obstacle on the floor.	Засторога: перешкода на рівні підлоги
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a person falling backwards.	Засторога: падати (падіння)
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a lightning bolt with an arrow pointing downwards, symbolizing electric current.	Засторога: електричний струм
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a load being lifted by a crane hook.	Засторога: вантаж, що знаходиться у підвішеному стані
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a hand being crushed by a downward force.	Засторога: здавлювання рук
 A yellow triangular warning sign with a black border, depicting a battery with a lightning bolt symbol, indicating a charged battery.	Засторога: зарядження акумулятора

1	2
<i>Категорія „Знаки, що вказують на маршрут евакуації, місце розташування обладнання безпеки або об’єкта безпеки, або дію безпеки (знаки умов безпеки)”</i>	
	Перша допомога
	Кнопка аварійного зупинення
	Медична сумка
<i>Категорія „Знаки обов’язкової дії”</i>	
	З’єднати клему заземлення із землею
	Від’єднати штепсельну вилку від електричної розетки

1	2
	Одягнути засіб захисту обличчя
	Одягнути засіб захисту голови
	Носити антистатичне взуття

Заходи безпеки під час роботи з засобом.

Заходи безпеки під час роботи із засобом для транспортування малогабаритних вантажів включає раціональний вибір засобу відповідно до ваги і габаритів вантажу. Не можна використовувати транспортні засоби, які не відповідають розміру або масі вантажу оскільки це може призвести до перевантаження засобів і в подальшому до аварій. Важливо щоб транспортний засіб мав можливість регулювання навантаження, що дозволяє уникнути перевантаження механізмів. Крім того, необхідно дотримуватись чіткого плану операцій із транспортування вантажів. Це означає чітке планування операцій перед початком транспортування вантажів. Першим етапом є оцінка маршруту руху засобу, для уникнення перешкод і забезпечення вільного доступу до вантажу отримувача. Як було сказано вище, необхідно заборонити перевантаження засобів, оскільки це може викликати

аварію та несправність самого засобу. Крім того, перед відправкою транспортного засобу працівник повинен пересвідчитись у стійкості засобу із закріпленим на ньому вантажем. Вантаж повинен бути надійно закріплений не повинен ковзати або перевертатися. Для цього необхідно використовувати різноманітні кріпильні пристрої (ремені або обмежувачі).

Безпека працівників безпосередньо залежить від захистів індивідуального захисту. При цьому необхідно використовувати:

- захисне взуття із антиковзними підошвами для запобігання падіння;
- захисні рукавички, які дозволяють зменшити ризик травм під час роботи з вантажами і механізмами;
- захисні каски які дозволяють значно зменшити ризик пошкодження при можливому падінні вантажів предметів;
- захисні окуляри або маски в разі необхідності застосування їх для запобігання травм очей при переміщенні матеріалів, які можуть виплескуватися або переливатися.

У разі виконання робіт у обмеженому просторі важливо враховувати наступні фактори: оцінка безпеки простору перед початком роботи забезпечує достатній простір для маневру і переміщення вантажу; забезпечення відомості означає отримання інформації про вузькі місця роботи засобу і швидке реагування на будь-які небезпеки; координація дій персоналу забезпечує злагодженість роботи працівників і їхні скоординовані дії для мінімізації ризиків.

Заходи безпеки при аварійних ситуаціях.

Заходи безпеки для при аварійних ситуаціях важливі в контексті розробки плану дій на випадок таких ситуацій. При цьому важливо мати чітко розроблений план дій, а кожен працівник повинен бути ознайомлений із діями в екстрених випадках, що включає:

- ✓ зупинку обладнання у разі виявлення несправностей засобів (це вимагає негайного зупинення обладнання і повідомлення відповідних ремонтних служб);

- ✓ надання першої допомоги при травмах має бути організовано шляхом навчання працівників основам надання першої домедичної допомоги.

У разі серйозної аварії або загрози для здоров'я працівників необхідно забезпечити швидку і безпечну евакуацію персоналу з небезпечних зон.

Заходи техніки безпеки під час виконання технологічних операцій із переміщення засобу для транспортування малогабаритних вантажів мають важливе значення для забезпечення безпеки праці та запобігання нещасним випадкам. Вони включають організаційно-технічні заходи, правильне використання обладнання, застосування засобів індивідуального захисту, а також розробку планів дій у випадку аварійних ситуацій. Дотримання цих заходів дозволяє знижувати ризики та забезпечує ефективну і безпечну роботу на підприємстві.

ВИСНОВКИ

1. Наведено загальні відомості про переміщення вантажів та механізовані засоби, які для цього використовуються. Вказано особливості експлуатації механізмів, які використовуються для переміщення малогабаритних вантажів. Для встановлення тенденцій у галузі наукових розробок було проаналізовано кількість наукових праць, які приіндексовані у базах даних Scopus, Web of Science та Google Scholar. Ці тенденції вказують на те, що загальна кількість наукових робіт які отримані за запитами „стійкість транспортного засобу”, „керування стійкістю транспортного засобу”, „керування коливаннями” та „оптимальне керування” має зростаючу тенденцію. Це показує актуальність даного напрямку науково-прикладних досліджень. Крім того, встановлено країни, автори яких найбільше публікують роботи за вказаними запитами. Серед них: США, Китай, Англія, Німеччина. Було проведено змістовний аналіз окремих публікацій, які стосуються розробки засобів для транспортування малогабаритних вантажів та встановлено основні підходи, які використовують науковці для розробки систем керування цими транспортними засобами.
2. Проведено математичний опис засобу для переміщення малогабаритних вантажів типу самокат. Виконано постановку задачі оптимальної стабілізації засобу, яка включала математичну модель процесу стабілізації, крайові умови, критерії оптимізації. Крім того, запропоновано для стабілізації положення засобу використовувати пропорційно-інтегральний регулятор. Задача оптимальної стабілізації зведена до відшукування коефіцієнтів пропорційного та інтегрального коефіцієнтів регулятора. Було запропоновано оптимізацію провести за критерієм тривалості регулювання та перерегулювання. Задачу оптимізації зведено до безумовної, яку розв'язано за допомогою модифікованого метаевристичного методу оптимізації VCT-PSO.

Отримані коефіцієнти ($k_1=-2,11$, $k_2=-1,54$ та $k_1=-2,11$, $k_2=-1,74$ – за різними критеріями якості процесу стабілізації) дають змогу забезпечити плавність процесу стабілізації. Кінцеві умови регулювання досягаються приблизно за 0,1 секунди. Аналіз результатів показав те, що даний тип регулювання може безпроблемно бути реалізованим за допомогою наявної системи керування.

3. Проведено розробку загальної схеми системи оптимального керування засобом для переміщення малогабаритних вантажів. До нього входять: система керування, яка включає мікроконтролер, драйвери та інші елементи, приводи (сервоприводи та крокові двигуни, мотор-колеса потужністю 400 Вт), система живлення, сенсорні пристрої. Вказано основні функціональні зв'язки між окремими елементами, які дозволяють організувати роботу системи оптимального керування.
4. Проведено розрахунок основних економічних показників проекту та встановлено фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання операцій по переміщенню малогабаритних вантажів. Вони дозволяють забезпечити високу енергоефективність, гнучкість до умов транспортування вантажів, високу продуктивність, масштабованість, відсутність необхідності побудови складної і дорогої інфраструктури. Проведений економічний розрахунок дозволив встановити, що приблизний термін окупності засобу становить 0,85 років. Розрахунок базується на зниженні енергоспоживання при переміщенні вантажів у межах міста на невеликій відстані.
5. Проведено класифікацію небезпечних факторів, які можуть виникнути під час виконання технологічної операції по переміщенню вантажів за допомогою розробленого засобу. До них належать небезпечні фактори пов'язані із механізмами та обладнанням, організацією роботи та фізичними та психоемоційними навантаженнями працівників. Розроблено заходи із техніки безпеки, які значно знижують ризик виникнення небезпечних ситуацій при транспортуванні вантажів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Del Rosso, V., Andreucci, A., Boria, S., Corradini, M. L., Giambo, R., & Ranalli, A. (2018). Self-balancing two-wheel drive electric motorcycle modelling and control: preliminary results. 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). doi:10.1109/codit.2018.8394871
2. Kim, H. W., & Jung, S. (2014). Control of a two-wheel robotic vehicle for personal transportation. *Robotica*, 34(05), 1186–1208. doi:10.1017/s0263574714002173
3. Shaw, D., & Chan, S. H. (2010). The Transmission Design of a Human Powered SAGWAY. *World Electric Vehicle Journal*, 4(2), 295–299. doi:10.3390/wevj4020295
4. Takita, Y., Date, H., & Shimazu, H. (2009). Competition of two-wheel inverted pendulum type robot vehicle on MCR course. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. doi:10.1109/iros.2009.5354553
5. Research on the Control System of Two-wheel Balance Vehicles on the Basis of Fuzzy Neural Network
6. Design of a Novel Self-Balancing Mechanism on AGV for Stable Stair Climbing
7. Teja, G. P., Dhabale, A., & Waghmare, T. (2020). Nonlinear Control of the Reaction Wheel Pendulum Using Passivity-based control And Backstepping Control. 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). <https://doi.org/10.1109/stpec49749.2>
8. Nguyen, C. X., Lukianov, A. D., Pham, T. D., & Nguyen, A. D. (2020). Synthesis of a nonlinear control law with efficiency energy for the self-balancing two wheeled vehicle. IOP Conference Series: Materials

- Science and Engineering, 900, 012002. doi:10.1088/1757-899x/900/1/012002
9. Chien, S.-Y., Wang, A.-S., & Wong, C.-C. (2020). Design and Implementation of Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle Based on Load Sensors. 2020 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). doi:10.1109/icsse50014.2020.9219320
 10. Tian, J., Ding, J., Tai, Y., & Ma, Z. (2020). Control of Different-Axis Two-Wheeled Self-Balancing Vehicles. IEEE Access, 8, 158839–158851. doi:10.1109/access.2020.3019538
 11. Vu, N. K., & Nguyen, H. Q. (2020). Balancing Control of Two-Wheel Bicycle Problems. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 1–12. doi:10.1155/2020/6724382
 12. Zhang, B., & Wu, G. (2019). Design of two-wheel self-balancing vehicle based on visual identification. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019(1). doi:10.1186/s13640-019-0434-7
 13. Kusumardana, R., Pitowarno, E., Darmawan, A., & Kusumawati, E. (2019). A Propose of PID Stability Control in A Gyro-Disc Actuator System. 2019 International Electronics Symposium (IES). doi:10.1109/elecsym.2019.8901609
 14. Loveikin, V., Romasevych, Yu., & Zarivny, O. (2024). Development of a mathematical model of stabilisation of device for small-sized cargo transportation. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 20(4),57-71. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.57>
 15. Zarivny, O., & Romasevych, Yu. (2023). Development of a physical model of the device for transporting small loads. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 19(6). [https://doi.org/10.31548/dopovidi6\(106\).2023.024](https://doi.org/10.31548/dopovidi6(106).2023.024)

16. Зарівний О.Ю., Ромасевич Ю.О. Розробка фізичної моделі пристрою для транспортування малогабаритних вантажів. № 6/106, 2023 Наукові доповіді нубіп україни. DOI: 10.31548/dopovidi6(106).2023.024
17. "StiffnessSwitching" Method for NDSolve. URL: <https://reference.wolfram.com/language/tutorial/NDSolveStiffnessSwitching.html> (дата звернення 05.10.2024)
18. Мехатроніка: підручник / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, В. В. Крушельницький. - К.: ЦП „КОМПІНТ”, 2020. - 405 с.
19. Romasevych, Y., Loveikin, V., & Loveikin, Y. (2022). Development of a PSO modification with varying cognitive term. In 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (pp. 1-5). Kharkiv: IEEE. doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916413.
20. Розроблення оптимальних автоматичних регуляторів. Монографія / Ю.О. Ромасевич, В.С. Ловейкін, А.П. Ляшко, О.Г. Шевчук, В.В. Макарець. – К.: ЦП „КОМПІНТ”, 2021. – 250 с.
21. IP (ступінь захисту оболонки). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/IP_\(%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D1%96%D0%BD%D1%8C_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%83_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B8\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/IP_(%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D1%96%D0%BD%D1%8C_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%83_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B8)) (дата звернення 22.10.2024)
22. Оптичний енкодер 360. URL: <https://uamper.com/Rotary-Encoder-360-pulses?srsltid=AfmBOoqV0ohKPctG61MpkWGMHRFjoMxOnpOzyWo05F7VyZY7dQuVXR-h> (дата звернення 29.10.2024)
23. Інклінометр, датчик кута нахилу серії INC 110. URL: https://asutp.shop/ua/p1463840105-inklinometr-datchik-ugla.html?srsltid=AfmBOopPas9Cd4qwT1GoZlODmczKimZqsqpp1w8hCXHLTAI3LqmqPm_p (дата звернення 29.10.2024)
24. Кроковий двигун NEMA 17 17HS4401. URL: <https://www.minitech.com.ua/ua/17hs4401-nema17-shagoviy-motor> (дата звернення 29.10.2024)

25. Драйвер крокового двигуна ТВ6600 4А. URL: https://prom.ua/p1563948721-drajver-shagovogo-dvigatelya.html?utm_source=google_product&utm_medium=cpc&utm_content=pla&utm_campaign=КТ_cpc_1_5297199152&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA0MG5BhD1ARIsAEcZtwRSqQjHQrakZjz6LAn-ksXCDDcXf6SOpUYjqwyxUGF_EllE-Xk4dmIaAh8lEALw_wcB (дата звернення 29.10.2024)
26. Сервопривод DS3218 20 кг. URL: <https://greenchip.com.ua/0-0-1169-0.html> (дата звернення 29.10.2024)
27. Електродвигун Мотор - колесо 8АМК2А безщітковий 24V250w. URL: <https://prom.ua/ua/p1401420255-elektrodvigatel-motor-koleso.html> (дата звернення 29.10.2024)
28. Плата розробника NUCLEO-F303RE. URL: <https://arduino.ua/prod1847-plata-rozrobnika-nucleo-f303re> (дата звернення 29.10.2024)
29. ЖК Софія Клубний. URL: <https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-%D1%81%D0%BE%D1%84%D1%96%D1%8F-%D0%BA%D0%BB%D1%83%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D1%81%D0%BE%D1%84%D1%96%D1%97%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0-%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%B0%D0%B3%D1%96%D0%B2%D0%BA%D0%B0?srsltid=AfmBOor1rZVIIat76tRvh05YHn6dfW74zO8gMobzqnbKPcoXLcS8w6yg> (дата звернення 11.11.2024)
30. Тарифи на електроенергію для підприємств. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/> (дата звернення 11.11.2024)
31. НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ EN ISO 7010:2019 (EN ISO 7010:2012; A1:2014; A2:2014; A3:2014; A4:2014; A5:2015; A6:2016; A7:2017, IDT; ISO 7010:2011; Amd 1:2012; Amd 2:2012; Amd 3:2012; Amd 4:2013; Amd 5:2014; Amd 6:2014; Amd 7:2016, IDT)

Графічні символи. КОЛЬОРИ ТА ЗНАКИ БЕЗПЕКИ. Зареєстровані
знаки безпеки.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Лістинг коду Mathematica для розв'язування задач синтезу оптимального регулятора

```

In[137]:= ObjectiveFunction[k1_,k2_]:=
(
Jkk=0.002747112111735063;(*Момент інерції колеса*)
J1k=0.0005522178951808609;
Jzv=Jkk;

m1=2.5; (*Маса рами(кг)*)
mk=0.5; (*Маса колеса(кг)*)
r=0.047;(*Радіус кривошипа(м)*)
e=0.04;(*Відстань від землі до низа рами(м)*)
c=0.085;(*Висота рами*)
D1=0.136;(*висота колеса напевно?*)
g=9.81;
\[\Eta]=0.95;
u=1; (*змінити*)

T=0.5;

\[\Beta]min=-1.2;
\[\Beta]max=1.2;
\[\Beta]o=k1*\[\Alpha][t]+k2*\[Integral]\[\Alpha][t]\[DifferentialD]t;

\[\Beta]Calc=\[\Beta]o;

```

```
(*Piecewise[{{\[Beta]o,
                \[Beta]min<=\[Beta]o<=\[Beta]max},
{\[Beta]min,
                \[Beta]min>\[Beta]o},
                {\[Beta]max,
                \[Beta]o>\[Beta]max}}],*)
```

```
xc1=r*Sin\[Beta]Calc+\[Alpha][t]*(e+c/2+r*(1-Cos\[Beta]Calc));
yc1=e+c/2+r*(1-Cos\[Beta]Calc);
dxc1d\[Alpha]=e+c/2+r*(1-Cos\[Beta]Calc);
dyc1d\[Alpha]=-\[Alpha][t]*(e+c/2+r*(1-Cos\[Beta]Calc));
dyc2d\[Alpha]=D1/2*\[Alpha][t];
```

```
dxc1d\[Beta]=r*(Cos\[Beta]Calc+\[Alpha][t]*Sin\[Beta]Calc);
dyc1d\[Beta]=r*Sin\[Beta]Calc;
dyc2d\[Beta]=0;
```

```
\[Alpha]o=-0.05;
d\[Alpha]o=0.05;
```

```
sol=NDSolve[{{(J1k+Jkk)*\[Alpha]''[t]+m1*(D[xc1,
                {t,
                2}]*dxc1d\[Alpha]+D[yc1,
                {t,
                2}]*dyc1d\[Alpha])=-
(m1*dyc1d\[Alpha]+mk*dyc2d\[Alpha])*g,\[Alpha][o]==\[Alpha]o,
\[Alpha]'[o]==d\[Alpha]o}, {\[Alpha]}, {t, o, T}, Method-
>"StiffnessSwitching"];
(*, Method->"StiffnessSwitching"*)
```

```
d\[Beta]Calc=D\[Beta]Calc, t];
If[Abs[(\[Alpha][T]/.sol)[[1]]]>=0.001||
Abs[(\[Alpha]'[T]/.sol)[[1]]>=0.001||Abs[(\[Beta]Calc/.sol)/.t-
>T][[1]]>=0.001||Abs[(d\[Beta]Calc/.sol)/.t->T][[1]]>=0.001,
TerminalCriterion=(Abs[(\[Alpha][T]/.sol)[[1]]+
Abs[(\[Alpha]'[T]/.sol)[[1]]+Abs[(\[Beta]Calc/.sol)/.t-
```

```
>T)[[1]]]+Abs[((d\[Beta]Calc/.sol)/.t->T)[[1]])*10^8,
TerminalCriterion=0];
```

```
dd\[Beta]Calc=D\[Beta]Calc, {t, 2}];
dd\[Alpha]=D\[Alpha][t], {t, 2}];
```

```
(*IntegralCriterion=\[Sqrt](1/T(NIntegrate[[(Evaluate[dd\[Beta]Calc/.sol]
)^2], {t, 0, T}]]);*)
```

```
discreteAlpha=Table[[(\[Alpha][t]/.sol)/.t-> \[Tau]][[1]], {\[Tau], 0, T,
0.0001}];
```

```
If[Min[discreteAlpha]<0,
Overshoot=Abs[Min[discreteAlpha]]/\[Alpha]0*100, Overshoot=0];
```

```
i=1;
While[discreteAlpha[[-i]]<0.001, i++];
ControlDuration=(T-i*0.0001);
```

```
Return[(TerminalCriterion+ControlDuration)];
```

```
In[119]:= VCTPSO[ObjectiveFunction, {k1, k2}, {{-5,5}, {-5,5}}, 30, 100, 5]
Out[119]= {7.26922, {-2.11201, -
1.74248}, {7.53553*10^6, 7.53553*10^6, 555512., 555512., 25.2274, 25.2274, 2
5.2274, 24.3095, 15.395, 15.395, 15.395, 15.395, 15.395, 15.395, 15.395, 15
.395, 15.395, 15.395, 15.395, 14.5958, 14.5958, 14.5958, 14.5958, 14.595
8, 14.5958, 14.5958, 14.5958, 14.5958, 12.0311, 12.0311, 10.8446, 10.84
```



```

90999999999999986`,0.059099999999999986`,0.059099999999999986
`,0.059099999999999986`,0.059099999999999986`,0.059099999999
99986`,0.059099999999999986`,0.059099999999999986`,0.05909999
9999999986`,0.059099999999999986`,0.059099999999999986`,0.057
4999999999999996`,0.057499999999999996`,0.057499999999999996`,
0.057499999999999996`,0.057499999999999996`,0.057499999999999
996`,0.057499999999999996`,0.057499999999999996`,0.0574999999
99999996`,0.057499999999999996`,0.057499999999999996`,0.0574999
9999999996`,0.057499999999999996`,0.057499999999999996`,0.057
4999999999999996`,0.057499999999999996`,0.05739999999999995`,0.
057399999999999995`,0.057399999999999995`,0.057399999999999995`,0
.057399999999999995`,0.057399999999999995`,0.057399999999999995`];

```

```
Print["Критерій перерегулювання"]
```

```

overshootList=List[7.5355342884161025`*^6,7.5355342884161025`*^6,5
55511.5574579878`,555511.5574579878`,25.22744912040642`,25.2274491
2040642`,25.22744912040642`,24.309498808428344`,15.395018356233
464`,15.395018356233464`,15.395018356233464`,15.395018356233464`,
15.395018356233464`,15.395018356233464`,15.395018356233464`,15.39
5018356233464`,15.395018356233464`,15.395018356233464`,15.395018
356233464`,15.395018356233464`,14.595763339156347`,14.59576333915
6347`,14.595763339156347`,14.595763339156347`,14.595763339156347`,
14.595763339156347`,14.595763339156347`,14.595763339156347`,14.595
763339156347`,14.595763339156347`,14.595763339156347`,12.03114369
5051`,12.031143695051`,10.84462551861989`,10.84462551861989`,10.84
462551861989`,10.84462551861989`,10.84462551861989`,10.844625518
61989`,10.84462551861989`,10.84462551861989`,10.84462551861989`,1
0.84462551861989`,10.84462551861989`,10.84462551861989`,10.84462
551861989`,10.84462551861989`,10.545422524302985`,10.54542252430
2985`,10.545422524302985`,10.545422524302985`,10.54542252430298

```

```

5`,10.545422524302985`,10.545422524302985`,10.545422524302985`,1
0.545422524302985`,10.545422524302985`,9.710610005827613`,9.7106
10005827613`,9.710610005827613`,9.710610005827613`,9.71061000582
7613`,9.710610005827613`,9.710610005827613`,9.710610005827613`,9.7
10610005827613`,9.710610005827613`,9.549016165065382`,9.08417321
6021023`,9.084173216021023`,7.5089813404196155`,7.50898134041961
55`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.
5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089
813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.508981340
4196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.50898134041961
55`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.
5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089813404196155`,7.5089
813404196155`,7.5089813404196155`,7.337493711718556`,7.33749371171
8556`,7.337493711718556`,7.337493711718556`,7.26921925010581`,7.269
21925010581`,7.26921925010581`];

```

```

criterionDecrease=overshootList;

```

```

DurationSolution={-2.1120883541816924`,-1.542663880085046`};

```

```

OvershootSolution={-2.1120122652552653`,-1.7424839720350571`};

```

```

ListLogPlot[criterionDecrease,Frame->True,ImageSize->350, FrameLabel-
>{Text[Style["iterations",FontSize->12,Italic,Bold,
Black]],Text[Style["Cr",FontSize->12,Italic,Bold,
Black]]},AspectRatio-
>0.8, PlotStyle->{{PointSize[0.02], Black}},GridLines->Automatic,
PlotRange->All, AxesOrigin->{0,0}]

```

During evaluation of In[138]:= Критерій тривалості регулювання

During evaluation of In[138]:= Критерій перерегулювання

Out[145]=

In[146]:=

Apply[ObjectiveFunction, DurationSolution]

T=0.5;

```
p1=Plot[Evaluate[10*\[Alpha][t]/.sol], {t,0,T},Frame->True,ImageSize->350,
  FrameLabel->{Text[Style["t", s",FontSize->12,Italic,Bold,Black]],Text[Style["10\[Cross]\[Alpha], rad; Overscript\[Alpha], .],rad/s",FontSize->12,Italic,Bold, Black]]},AspectRatio->0.8, PlotStyle->{Thickness[0.01], Black},GridLines->Automatic, PlotRange->All,
  AxesOrigin->{0,0}};
```

```
p2=Plot[Evaluate[\[Alpha][t]/.sol], {t,0,T},Frame->True,ImageSize->350,
  FrameLabel->{Text[Style["t", s",FontSize->12,Italic,Bold,Black]],Text[Style["10\[Cross]\[Alpha], rad; Overscript\[Alpha], .],rad/s",FontSize->12,Italic,Bold, Black]]},AspectRatio->0.8, PlotStyle->{Thickness[0.01], Gray},GridLines->Automatic, PlotRange->All,
  AxesOrigin->{0,0}};
```

Show[p1, p2]

```
p1=Plot[Evaluate[100*\[Beta]Calc/.sol], {t,0,T},Frame->True,ImageSize->350,
  FrameLabel->{Text[Style["t", s",FontSize->12,Italic,Bold,Black]],Text[Style["100\[Cross]\[Beta], rad; Overscript\[Beta], .],rad/s",FontSize->12,Italic,Bold, Black]]},AspectRatio->0.8, PlotStyle->{Thickness[0.01], Black},GridLines->Automatic, PlotRange->All,
  AxesOrigin->{0,0}};
```

```
p2=Plot[Evaluate[D[\[Beta]Calc, t]/.sol], {t,0,T},Frame->True,ImageSize->350,
  FrameLabel->{Text[Style["t", s",FontSize->12,Italic,Bold,Black]],Text[Style["100\[Cross]\[Beta], rad; Overscript\[Beta], .],rad/s",FontSize->12,Italic,Bold, Black]]},AspectRatio->0.8, PlotStyle-
```

```
>{Thickness[0.01], Gray},GridLines->Automatic, PlotRange->All,
AxesOrigin->{0,0};
Show[p1, p2]
```

```
Out[146]= 0.0574
```

```
Out[150]=
```

```
Out[153]=
```

```
In[112]:= Print["Максимальне кутове прискорення бетта"]
```

```
Max[Abs[Table[((dd\[Beta]Calc/.sol)/.t-> \[Tau])[[1]], {\[Tau], 0, T,
0.0001}]]]
```

```
Print["Максимальне кутове прискорення альфа"]
```

```
Max[Abs[Table[((dd\[Alpha]/.sol)/.t->\[Tau])[[1]], {\[Tau], 0, T,
0.0001}]]]
```

```
Print["Середньоквадратичне кутове прискорення бетта"]
```

```
RootMeanSquare[Table[((dd\[Beta]Calc/.sol)/.t-> \[Tau])[[1]], {\[Tau], 0,
T, 0.0001}]]]
```

```
Print["Середньоквадратичне кутове прискорення альфа"]
```

```
RootMeanSquare[Table[((dd\[Alpha]/.sol)/.t->\[Tau])[[1]], {\[Tau], 0, T,
0.0001}]]]
```

```
discreteAlpha=Abs[Table[(\[Alpha][t]/.sol)/.t-> \[Tau])[[1]], {\[Tau], 0,
T, 0.0001}]]];
```

```
i=1;
```

```
While[discreteAlpha[[-i]]<0.001, i++];
```

```
Print["Тривалість регулювання"]
```

```
T-i*0.0001
```

Print["Величина критерію"]

ObjectiveFunction[-2.1120122652552653`,-1.7424839720350571`]

During evaluation of In[112]:= Максимальне кутове прискорення бетта

Out[113]= 119921.

During evaluation of In[112]:= Максимальне кутове прискорення альфа

Out[115]= 56778.5

During evaluation of In[112]:= Середньоквадратичне кутове прискорення бетта

Out[117]= 1699.55

During evaluation of In[112]:= Середньоквадратичне кутове прискорення альфа

Out[119]= 804.678

During evaluation of In[112]:= Тривалість регулювання

Out[124]= 0.0574

During evaluation of In[112]:= Величина критерію

Out[126]= 0.029