

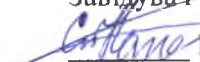
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«12» 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

на тему: «Роботизована долоня з використанням шарнірних механізмів»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ПБ-22

Словінський Петро



Керівник:

Доцент, кандидат технічних наук,

Вонсевич Костянтин Петрович



Рецензент:

Професор, доктор технічних наук

Микитенко Володимир Іванович



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

Студент 

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2		
2	A4	ДПБ.ПБ-22.10.1720.ПЗ	Пояснювальна записка	70		
3	A1	ДПБ.ПБ-22.10.1720.000 СК	Складальне креслення роботизованої долоні	1		
4	A4	ДПБ.ПБ-22.17.1720.00	Специфікація до Складального креслення	3		
5	A3	ДПБ.ПБ-22.10.1720.100 СХ	Структурна схема складання	1		
6	A2	ДПБ.ПБ-22.10.1720.200 СХ	Технологічна схема складання	1		
7	A3	ДПБ.ПБ-22.10.1720.300 СХ	Схема структурна	1		
8	A3	ДПБ.ПБ-22.10.1720.400 СХ	Схема електрична принципова	1		
9	A3	ДПБ.ПБ-22.10.1720.500 СХ	Блок-схема алгоритму контуру адаптивного керування	1		
10	A4	ДПБ.ПБ-22.10.1720.600 КЗ	Кінематична схема шарнірно-важільного механізму пальця	1		
11	A3	ДПБ.ПБ-22.17.1720.001	Основа долоні	1		
12	A4	ДПБ.ПБ-22.17.1720.003	МСР суглоб основного пальця	1		
13	A4	ДПБ.ПБ-22.17.1720.004	Фаланга проксимальна Основного пальця	1		
14	A4	ДПБ.ПБ-22.17.1720.005	Фаланга дистальна Основного пальця	1		
15	A4	ДПБ.ПБ-22.17.1720.006	Шатун	1		
			ДПБ.ПБ-22.10.1720.ПЗ			
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Словінський П.				Лист	Листів
Керівн.	Вонсевич К.П.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-22	
Н/контр.						
Зав.каф.						
Відомість дипломного проєкту						

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ
« 12 » 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Словінському Петру

1. Тема проєкту «Роботизована долоня з використанням шарнірних механізмів», керівник проєкту Вонсевич Костянтин Петрович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від « 26 » 05 2026 р. № 1995-с

2. Термін подання студентом проєкту « 05 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: Модуль керування на основі мікроконтролера, живлення логіки 5В, живлення виконавчих механізмів 12В, двигуни постійного струму, шарнірні механізми, датчики тиску FSR, здатність розробленого механізму піднімати вагу до 2,5 кг.

4. Зміст пояснювальної записки: Перелік умовних позначень, анотація, вступ. Розділ 1. Аналітичні передумови створення роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів: 1.1. Біомеханічні особливості долоні людини; 1.2. Огляд сучасних зразків роботизованих долонь; 1.3. Обґрунтування вибору механічної передачі для реалізації функції згинання фаланг; 1.4. Особливості розміщення привідних механізмів та забезпечення багато осевого руху великого пальця; 1.5. Формування вимог до контуру адаптивного керування зусиллям хвату. Розділ 2. Розроблення конструкції роботизованої долоні; 2.1. Розроблення кінематичної схеми важільного механізму пальця; 2.2. Розрахунок зусиль та навантажень у ланках механізму пальця; 2.3. Розроблення механізму пальця; 2.4. Розроблення механізму

великого пальця; 2.5. Створення загального вигляду роботизованої долоні; 2.6 Розроблення структурної та технологічної схеми складання; Розділ 3. Програмно-апаратна реалізація контуру адаптивного керування зусиллям хвату; 3.1. Структурна схема системи роботизованої долоні; 3.2. Вибір та обґрунтування електронної компонентної бази; 3.3. Розроблення електричної принципової схеми; 3.4. Розроблення алгоритму функціонування контуру адаптивного керування. Висновки. Перелік використаних літературних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу: Загальний вигляд роботизованої долоні (A1); Кінематична схема (A4); Структурна схема (A2); Електрична схема (A3); Блок-схеми алгоритмів керування (A3); Складальне креслення (A1); CCC (A3); TCC (A2).

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Постановка задачі. Огляд та аналіз літературних джерел	14.04.2026 – 21.04.2026	
	Формування вимог до контуру адаптивного керування зусиллям хвату	22.04.2026 – 30.04.2026	
	Розроблення кінематичної схеми, розрахунок зусиль та навантажень	31.04.2026 – 03.05.2026	
	Розроблення механізму пальця, проектування модуля для розміщення двигунів	04.05.2026 – 17.05.2026	
	Складання прототипу та тестування розробленої системи	18.05.2026 – 20.05.2026	
	Розроблення структурної та електричної схеми, розрахунок та вибір основних компонентів системи	18.05.2026 – 22.05.2026	
	Розроблення алгоритму функціонування контуру адаптивного керування	23.05.2026 – 26.05.2026	
	Оформлення пояснювальної записки та презентації	27.05.2026 – 05.06.2026	

Студент



Петро СЛОВІНСЬКИЙ

Керівник



Костянтин ВОНСЕВИЧ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробленню роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів та замкнутого контуру адаптивного керування зусиллям хвату. У роботі розглянуто біомеханічні особливості кисті людини, проаналізовано сучасні зразки роботизованих і протезних кистей, а також обґрунтовано доцільність застосування спрощеної двофалангової схеми пальця з шарнірно-важільним механізмом згинання.

У конструкторській частині розроблено кінематичну схему пальця, визначено геометричні параметри ланок, виконано розрахунок зусиль і навантажень у шарнірних з'єднаннях, а також встановлено залежність сили на кінці пальця від положення штока лінійного двигуна. На основі отриманих результатів створено 3D-модель роботизованої долоні в САПР SolidWorks, що включає механізми основних пальців, окремий механізм великого пальця, долонну частину з розміщенням приводів, редуктора, електронних компонентів і датчиків тиску.

У програмно-апаратній частині розроблено структурну схему системи, обґрунтовано вибір електронної компонентної бази та сформовано алгоритм функціонування контуру адаптивного керування. Алгоритм передбачає обробку сигналів від FSR-датчиків, визначення моменту контакту пальців з об'єктом і коригування роботи приводів відповідно до фактичного зусилля хвату.

Практичне значення роботи полягає у створенні конструктивно простої та технологічної роботизованої долоні, яка може бути використана як основа для подальшого вдосконалення активних протезів верхніх кінцівок.

Робота містить 87 сторінок, включає 34 рисунків, 2 таблиць та 42 літературних джерела.

Ключові слова: роботизована долоня, шарнірно-важільний механізм, протез кисті, лінійний двигун, FSR-датчик, адаптивне керування, зусилля хвату, мікроконтролер.

ABSTRACT

This bachelor's degree project is dedicated to the development of a robotic hand utilizing linkage mechanisms and a closed-loop adaptive grip force control system. The work examines the biomechanical characteristics of the human hand, analyzes modern examples of robotic and prosthetic hands, and justifies the use of a simplified two-phalanx finger design with a linkage-driven finger mechanism.

During mechanical design, a kinematic scheme of the finger was developed, the geometric parameters of the links were determined, the forces and loads in the hinge joints were calculated, and the dependence of the fingertip force on the linear actuator rod position was established. Based on the obtained results, a 3D model of the robotic palm was created in SolidWorks CAD. The model includes the mechanisms of the main fingers, a separate thumb mechanism, the palm base with the placement of actuators, a reducer, electronic components, and pressure sensors.

In the hardware and software part, a structural system diagram was developed, the selection of the electronic component base was substantiated, and the operating algorithm of the adaptive control loop was formed. The algorithm provides processing of signals from FSR sensors, detection of the moment of finger contact with an object, and correction of actuator operation according to the actual grip force.

The practical significance of the work lies in the creation of a structurally simple and technologically feasible robotic palm, which can be used as a basis for further improvement of active upper-limb prostheses.

The work contains 87 pages, includes 34 figures, 2 tables, and 42 references.

Keywords: robotic palm, linkage mechanism, hand prosthesis, linear actuator, FSR sensor, adaptive control, grip force, microcontroller.

Зміст

АНОТАЦІЯ.....	6
ABSTRACT.....	7
Зміст.....	8
Вступ.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ДОЛОНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШАРНІРНИХ МЕХАНІЗМІВ.....	11
1.1 Біомеханічні особливості долоні людини.....	11
1.2. Огляд сучасних зразків роботизованих долонь.....	18
1.3. Обґрунтування вибору механічної передачі для реалізації функції згинання фаланг.....	26
1.5. Формування вимог до контуру адаптивного керування зусиллям хвату.....	32
Висновки до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ДОЛОНІ.....	37
2.1. Розроблення кінематичної схеми важільного механізму пальця.....	37
2.2. Розрахунок зусиль та навантажень у ланках механізму пальця.....	40
2.3. Розроблення механізму пальця.....	46
2.4. Розроблення механізму великого пальця.....	47
2.5. Створення загального вигляду роботизованої долоні.....	49
2.6 Розроблення структурної та технологічної схеми складання.....	50
Висновки до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО–АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНТУРУ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЗУСИЛЛЯМ ХВАТУ	53
3.1. Структурна схема системи роботизованої долоні.....	53
3.2. Вибір та обґрунтування електронної компонентної бази.....	54
3.3. Розроблення електричної принципової схеми.....	59
3.4. Розроблення алгоритму функціонування контуру адаптивного керування.....	60
Висновки до розділу 3.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
Перелік використаних літературних джерел.....	66
Додаток А.....	71

Додаток Б.....	73
Додаток В.....	78
Додаток Г.....	80
Додаток Д.....	82
Додаток Е.....	86

Вступ

Сучасний розвиток протезування значною мірою пов'язаний із використанням комп'ютерно–інтегрованих технологій. Їх застосування дає змогу перейти від пасивних косметичних виробів до активних роботизованих конструкцій, здатних виконувати керовані рухи та частково відтворювати функції кисті. У межах такої концепції роботизована долоня може розглядатися як функціональний модуль протеза, у якому механічна система фаланг, передавальний механізм, привід і електронний блок керування працюють як єдина біомехатронна система. Створення функціональних протезів руки є актуальним напрямом, оскільки вони призначені не лише для відтворення зовнішнього вигляду кінцівки, а й для виконання корисних дій людиною, яка втратила верхню кінцівку.

Однією з важливих проблем активних протезів кисті є керування силою захвату. У природній руці цей процес відбувається завдяки пропрієнції, тоді як у протезі користувач часто змушений контролювати стискання предмета візуально. Тому доцільним є створення зворотного зв'язку на основі датчиків тиску, розміщених у зонах контакту пальців із предметом. Передача сигналів від таких датчиків до мікроконтролера дозволяє регулювати роботу приводу та обмежувати силу стискання залежно від фактичного навантаження на пальці. Подібний принцип використання сенсорів для контролю захвату розглядається у сучасних біонічних системах, де датчики допомагають визначати взаємодію протеза з предметом і коригувати стискання.

Отже, актуальність теми полягає в розробленні роботизованої долоні як порівняно недорогого, конструктивно простого та ефективного модуля протеза верхньої кінцівки. Поєднання шарнірного механізму згинання фаланг, електроприводів, датчиків тиску та мікроконтролера надає змогу реалізувати не лише рух пальців, а й адаптивне керування силою захвату. Таке рішення має практичне значення для підвищення функціональності протезів, зменшення їх вартості та покращення побутової самостійності людей з ампутаціями верхніх кінцівок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ДОЛОНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШАРНІРНИХ МЕХАНІЗМІВ

1.1 Біомеханічні особливості долоні людини

Долоня людини є складною функціональною структурою верхньої кінцівки, що забезпечує захоплення, утримання, переміщення та маніпулювання предметами різної форми, маси й розміру. З анатомічної точки зору долонею називають внутрішню поверхню кисті, кісткову основу якої формують п'ясткові кістки. У межах дипломного проєкту термін «роботизована долоня» доцільно розглядати як функціональний вузол роботизованої кисті, що включає основу долоні, пальці, великий палець, шарнірні з'єднання, привідні елементи та систему керування зусиллям хвату.

Скелет кисті людини має складну будову та складається з кісток зап'ястка, п'ясткових кісток, фаланг і сесамоподібних кісток. Кожна кисть містить 27 кісток, до складу яких входять кістки зап'ястка, п'ять п'ясткових кісток, чотирнадцять фаланг і сесамоподібні кістки [1]. Така будова забезпечує поєднання опорної функції долонної частини кисті та високої рухливості пальців. П'ясткові кістки виконують роль базових опорних елементів, до яких приєднуються фаланги пальців, тому для роботизованої долоні основа кисті має розглядатися як несуча частина для встановлення шарнірних механізмів і приводних вузлів.

Першій п'ястковій кістці відповідає великий палець, другій – вказівний, третій – середній, четвертій – безіменний, а п'ятій – мізинець. Другий, третій, четвертий і п'ятий пальці мають подібну анатомічну будову: кожен із них складається з трьох фаланг – проксимальної, середньої та дистальної. Проксимальна фаланга з'єднується з відповідною п'ястковою кісткою через п'ястково–фаланговий суглоб MCP. Між проксимальною та середньою фалангами розташований проксимальний міжфаланговий суглоб PIP, в свою чергу середньою та дистальною фалангами – дистальний міжфаланговий суглоб DIP [1]. Наочне розміщення фаланг і суглобів кисті людини подано на рисунку 1.1. На схемі показано кістки зап'ястка, п'ясткові

кістки, проксимальні, середні та дистальні фаланги, а також основні суглоби пальців кисті [2].

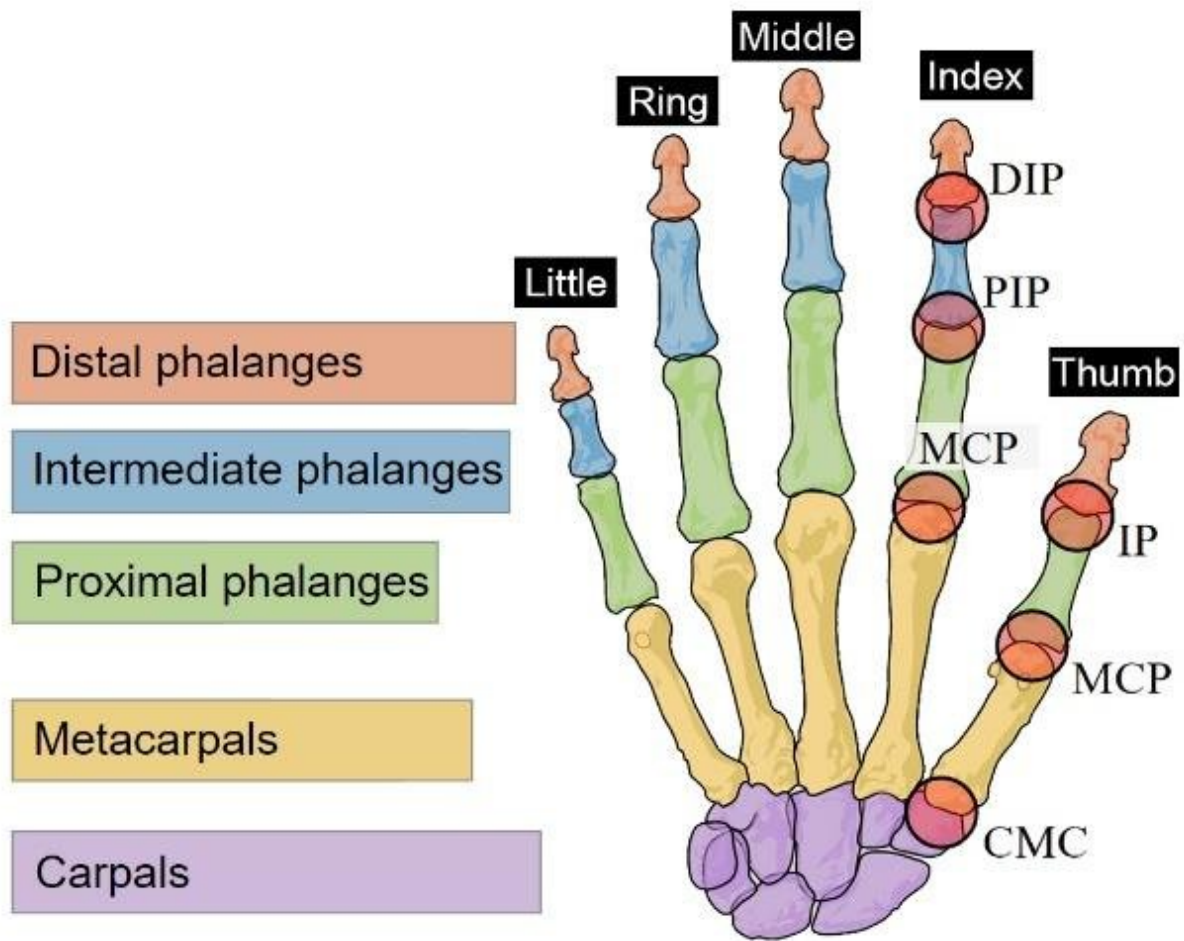


Рисунок 1.1 – Суглоби та фаланги кисті людини [2]

З біомеханічної точки зору фаланги пальців можна розглядати як послідовно з'єднані жорсткі ланки, а суглоби MCP, PIP і DIP – як рухомі кінематичні пари. П'ястково-фалангові суглоби MCP забезпечують згинання та розгинання пальців, а також певною мірою відведення і приведення. Міжфалангові суглоби PIP і DIP виконують згинання та розгинання навколо осі, що робить їх функціонально подібними до шарнірних з'єднань. Саме ця особливість є основою для застосування шарнірних механізмів у конструкції роботизованої долоні. На рисунку 1.2 зображено сегментну модель вказівного пальця, на якій розташовані під кутом відносно вісі долоні фаланги подаються у вигляді послідовних ланок, а суглоби у вигляді шарнірів.

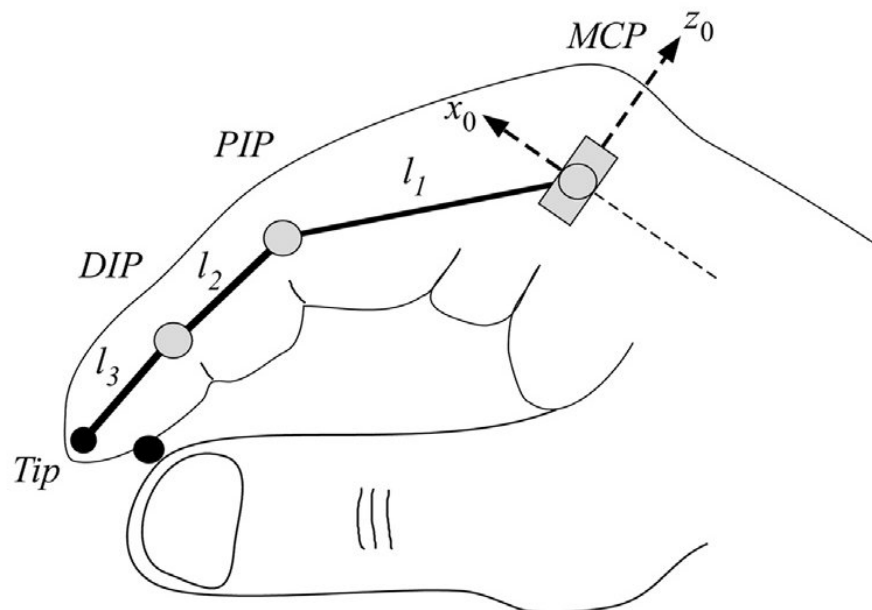


Рисунок 1.2 – Сегментна схема вказівного пальця [3]

Будова великого пальця відрізняється від інших. Він складається лише з двох фаланг – проксимальної та дистальної і не має середньої фаланги. Основа проксимальної фаланги великого пальця утворює п'ястково-фаланговий суглоб МСР з головкою першої п'ясткової кістки, а між проксимальною та дистальною фалангами розташований міжфаланговий суглоб ІР. Крім того, важливу роль відіграє перший зап'ястково-п'ястковий суглоб СМС, утворений трапецієподібною кісткою та основою першої п'ясткової кістки. На рисунку 1.3 зображено анатомічну будову та кінематичну модель великого пальця.

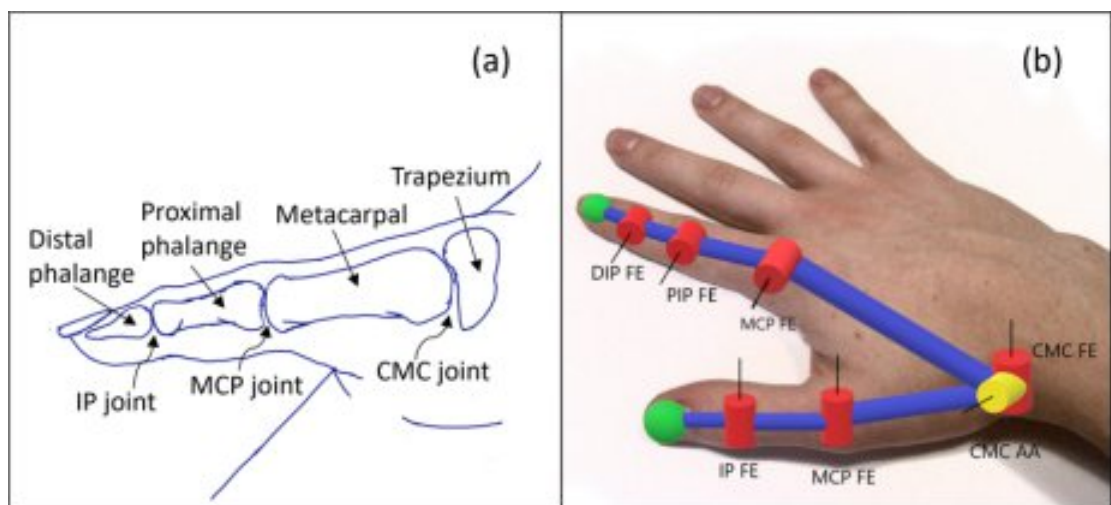


Рисунок 1.3 – Великий палець: а) анатомічна будова; б) кінематична модель [4]

Саме цей суглоб забезпечує просторове розміщення великого пальця відносно інших пальців, що є необхідною умовою для багатоосьового руху [4], який в свою чергу відіграє важливу роль у формуванні силового, щипкового та бокового хватів. Таким чином рух великого пальця зазвичай описують трьома складовими: згинанням–розгинанням, відведенням–приведенням та пронацією–супінацією. Водночас у спрощених моделях частина цих рухів може бути узгоджена або наближено подана меншою кількістю керованих ступенів свободи. На рисунку 1.4 зображено різницю між рухами великого пальця.

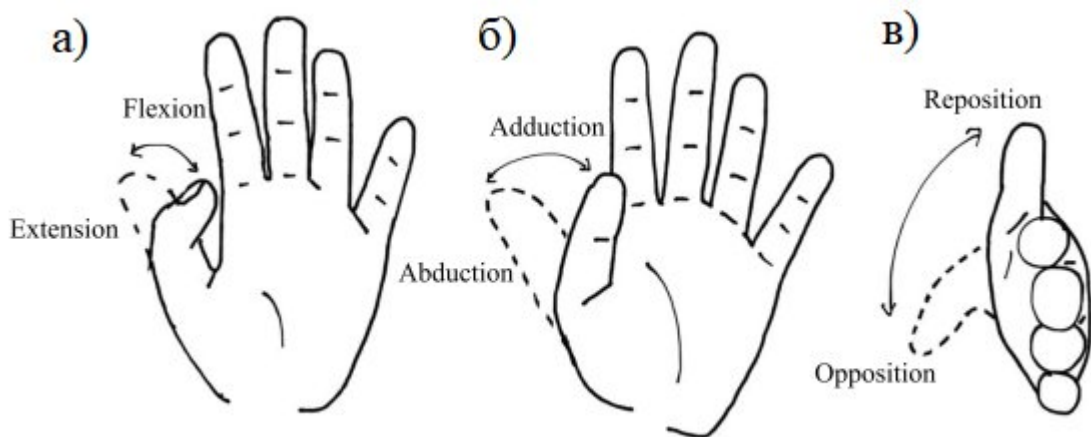


Рисунок 1.4 – Рухи великого пальця: а) згинання–розгинання; б) відведення–приведення в) пронація–супінація [5]

З погляду кінематичного моделювання великий палець можна подати як послідовний кінематичний ланцюг, який складається з двох перпендикулярних, обертальних суглобів, що відповідають рухам пронації–супінації та відведення–приведення. Далі в кінематичному ланцюзі розташовані MCP та IP–суглоби, які відповідають за його згинання. Звідси маємо, що великий палець можна описати як систему з чотирма обертальними суглобами, відповідно він не може бути реалізований за тією самою схемою, що й інші пальці. Якщо для основних пальців достатньо забезпечити переважно площинне згинання фаланг, то великий палець повинен мати можливість змінювати своє просторове положення відносно долоні. Це підтверджує відмінність великого пальця від інших пальців і обґрунтовує необхідність його окремого конструктивного опрацювання в роботизованій долоні.

Попри значну анатомічну складність, у природних рухах пальці людини не працюють як повністю незалежні механізми. За даними дослідження статистики природних рухів кисті, п'ять пальців містять близько 15 суглобів і забезпечують приблизно 20 ступенів свободи, однак ефективна розмірність реальних рухів є меншою. У цьому ж дослідженні показано, що перші дві головні компоненти руху реалізують близько 60% варіації, а великий палець є найбільш незалежним серед усіх пальців, тоді як вказівний – найбільш незалежним серед довгих пальців. Це свідчить про синергічний характер роботи кисті, коли кілька пальців і суглобів часто рухаються узгоджено [6].

Для проектування роботизованої долоні ця особливість є принциповою. Повне копіювання всіх анатомічних ступенів свободи кисті призвело б до значного ускладнення конструкції, збільшення кількості приводів, маси, габаритів і складності алгоритмів керування. Синергічний характер природних рухів дозволяє створювати функціонально придатні роботизовані кисті з меншою кількістю керованих ступенів свободи, за умови якщо їхня кінематика забезпечує основні типи хватів: найбільш важливими є силовий, точний і боковий хвати, оскільки саме вони охоплюють основні сценарії утримання та маніпулювання предметами [7].

Важливим параметром для проектування є функціональний діапазон руху суглобів пальців. Відповідно до дослідження, у якому було проаналізовано діапазони руху для виконання побутових дій, значення становили приблизно 19° – 71° для MCP–суглоба, 23° – 87° для PIP–суглоба та 10° – 64° для DIP–суглоба. Таким чином, для створення функціональної роботизованої долоні не обов'язково відтворювати повний анатомічний діапазон руху кожного суглоба, достатнім є забезпечення руху, необхідного для основних побутових і маніпуляційних дій [8].

Динамічні дослідження рухів кисті також підтверджують особливу роль PIP–суглоба. Під час аналізу руху 14 суглобів кисті у здорових осіб було встановлено, що у довгих пальцях PIP–суглоб має найбільший динамічний діапазон руху, крім того, під час згинання PIP–суглоб зазвичай починає рух раніше, ніж MCP або DIP [9]. З урахуванням цього у роботизованій долоні основний згинальний шарнір пальця доцільно функціонально наблизити до PIP–суглоба та прийняти спрощену

двофалангову конструкцію. Вона передбачає наявність проксимальної ланки та об'єднаної дистальної ланки, яка функціонально замінює середню та дистальну фаланги анатомічного пальця. Відповідно до проведеного огляду шарнірних протезів можна вважати, що трифаланговий палець підвищує антропоморфність і може покращувати функцію захоплення, проте збільшення кількості ступенів свободи та фаланг погіршує компактність механізму [10]. Тому доцільно застосувати простішу схему, яка забезпечує основну функцію згинання без надмірного ускладнення механіки.

Окреме функціональне значення має стадія попереднього формування хвату. У процесі захоплення кисть спочатку наближається до предмета, потім пальці формують попередню конфігурацію відповідно до очікуваної форми та розміру об'єкта, і лише після цього відбувається остаточне замикання пальців навколо предмета. У дослідженні функціонального діапазону рухів пальців попереднє формування хвату розглядається як окрема стадія підготовки кисті до захоплення, а її втрата пов'язується з труднощами у формуванні хвату [8]. Таким чином, природному положенню спокою пальці людини зазвичай не є абсолютно прямими, а мають незначне попереднє згинання. Таке положення є більш природним візуально та скорочує шлях до формування хвату. Для роботизованої долоні у цій роботі доцільно прийняти положення спокою з невеликим попереднім згинанням, підбір значення якого буде розглянуто у подальших розділах. На Рисунку 1.5 показано відмінність механіки між протезним пальцем без цієї властивості та пальцем із попереднім формуванням: у першому випадку ланки пальця не формують попередню конфігурацію, тоді як у другому палець заздалегідь згинається відповідно до очікуваного положення об'єкта.

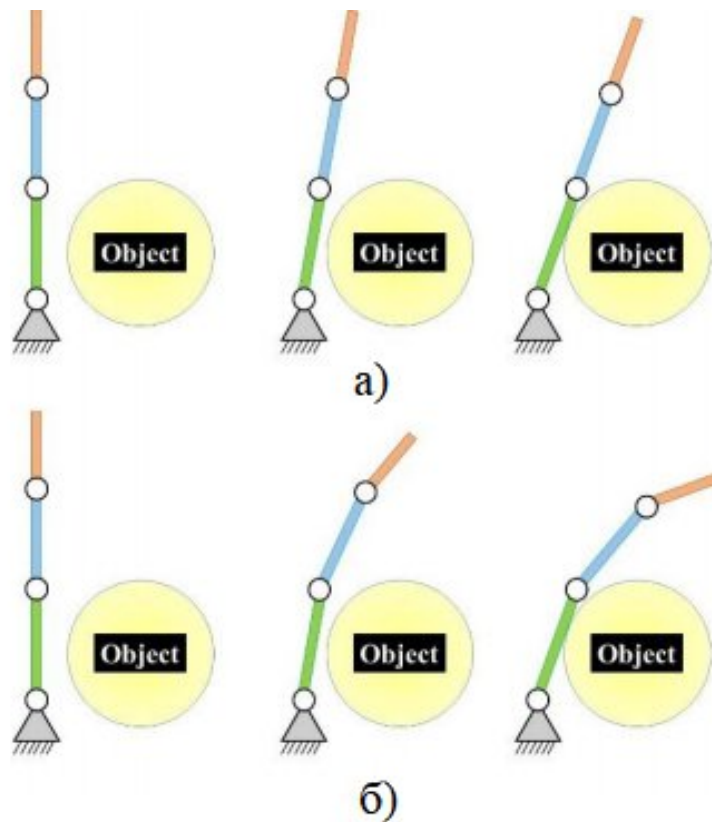


Рисунок 1.5 – Протез пальця: а) без попереднього формування хвату; б) з попереднім формуванням хвату [2]

Кисть також має складну систему іннервації – пронизаність органів і тканин нервами [11], що забезпечують їхній зв'язок з центральною нервовою системою, яка забезпечується серединним, ліктьовим і променевим нервами. Для розуміння функціонування кисті важливими є пропріоцепція – здатність організму сприймати положення власного тіла в просторі, рухи кінцівок та напруженість м'язів без візуального контролю [12]. Завдяки цьому здійснюється не лише керування рухами пальців, а й сприйняття положення окремих фаланг, взаємодії з предметом та величини прикладеного зусилля. Для роботизованої долоні відтворення такої біологічної функції можливе лише за умови використання зворотного зв'язку. Тому в конструкції доцільно передбачити датчики положення або сили контакту, сигнали з яких можуть бути використані для автоматизованого керування приводами та обмеженням надмірного стискання предмета. Тому в подальшому доцільно виокремити вимоги до контуру адаптивного керування зусиллям хвату, які будуть розглянуті у наступних розділах.

Підсумовуючи, біомеханічні особливості долоні людини визначаються поєднанням опорної функції п'ясткових кісток, рухливості фаланг, роботи суглобів, м'язово–сухожильної системи та сенсорного зворотного зв'язку. Основні пальці доцільно розглядати як систему послідовно з'єднаних ланок, рух яких забезпечується шарнірними з'єднаннями. При цьому найбільше значення для згинання та формування хвату має PIP–суглоб. Для створення функціональної роботизованої долоні не обов'язково повністю відтворювати всі анатомічні ступені свободи кисті. З урахуванням компактності, маси та простоти керування доцільним є застосування спрощеної двофалангової схеми для основних пальців, також під час проєктування слід приділити увагу попередньому формуванню хвату, оскільки “pre–shaping” дозволяє пальцям заздалегідь набувати положення, наближеного до майбутнього контакту з об'єктом. Водночас, великий палець через наявність СМС–суглоба слід розглядати як окремий конструктивний вузол, необхідний для реалізації протиставлення та базових типів хвату. Отже, проведений аналіз є основою для подальшого конструювання основних пальців з шарнірних механізмів за спрощеною кінематикою, окремого проєктування механізму великого пальця та формування вимог до системи адаптивного керування зусиллям хвату, що буде розглянуто у наступних підрозділах.

1.2. Огляд сучасних зразків роботизованих долонь

Перед безпосереднім конструюванням роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів необхідно здійснити огляд сучасних зразків, як комерційних так і експериментальних. Розуміння їх принципу роботи, реалізації біомеханіки та конструктивних особливостей відіграє ключову роль під час здійснення розробки, тому доцільно розглянути такі комерційні зразки, представлені в роботі [13] з оглядом конструктивних особливостей та характеристик. Вони відрізняються компонованням приводів, способом передавання руху на фаланги, однак мають спільну мету – забезпечення основних побутових хватів при обмежених габаритах і масі загальної конструкції. На рисунку 1.6 представлено розглянуті комерційні зразки антропоморфних протезів долоні.



Рисунок 1.6 – Комерційні зразки антропоморфних протезів долоні: (а) Vincent hand від компанії Vincent Systems, (б) iLimb hand у виконанні Touch Bionics, (в) iLimb Pulse від Touch Bionics, (г) Bebionic hand від RSL Steeper, (д) Bebionic hand v2 від RSL Steeper, and (е) Michelangelo hand від Otto Bock [13]

Провівши аналітичний огляд, можна дійти до висновку, що більшість розглянутих приладів, а саме: Vincent Hand, iLimb, iLimb Pulse, Bebionic і Bebionic v2, мають і містять по 11 суглобів і 6 ступенів свободи. При цьому кількість приводів у них становить від 5 до 6, що свідчить про наявність кінематичного зв'язку між окремими суглобами. Водночас, аналіз будови пальців показує, що більшість комерційних протезних кистей не відтворює повну анатомічну структуру людського пальця з трьома незалежними фалангами. У п'яти з шести досліджених зразків використовується спрощена двофалангова система: проксимальний сегмент, який відповідає руху в метакарпофаланговому суглобі та дистальний сегмент, який

поєднує функції проксимального і дистального міжфалангових суглобів, що відповідає рішення спрощення конструкції в межах дипломного проєкту.

Слід зазначити, що характерною особливістю розглянутих конструкцій є попередньо заданий кінематичний зв'язок між проксимальною та дистальною фалангами. Згинання одного сегмента механічно визначає положення іншого, тому рух пальця відбувається за наперед заданою траєкторією. З одного боку, це забезпечує повторюваність і прогнозованість руху, що є важливим для точних захватів. Проте, така схема обмежує пасивну адаптацію пальця до об'єктів складної форми, оскільки фаланги не можуть незалежно змінювати своє положення після контакту з поверхнею предмета.

У різних зразках застосовуються різні типи передач. У Vincent Hand використано важільний механізм, який зв'язує рух MCP– і PIP–подібних суглобів. У конструкціях iLimb та iLimb Pulse передавання руху між фалангами здійснюється за допомогою тросової системи, що імітує принцип роботи біологічних сухожилів. У Bebionic і Bebionic v2 застосовано лінійні приводи, розміщені в долонній частині, які через шарнірно–важільний механізм забезпечують згинання пальців. Для Vincent, iLimb та iLimb Pulse також характерне використання черв'ячних передач у привідних вузлах, що дозволяє збільшити крутний момент і сприяє утриманню положення пальця без значного енергоспоживання.

Зважаючи на подібність до теми дипломного проєкту, більш детального огляду потребує комерційний протез Bebionic v2. Конструктивна схема пальця Bebionic v2 базується на двофаланговій структурі. Проксимальна фаланга з'єднана з долонею через шарнір, що відповідає метакарпофаланговому суглобу, а дистальна фаланга з'єднана з проксимальною через шарнір, який відповідає проксимальному міжфаланговому суглобу. Рух між MCP– та PIP–з'єднаннями кінематично пов'язаний за допомогою чотириланкового механізму. Така схема дає змогу забезпечити узгоджене згинання фаланг під час закривання пальця без необхідності встановлення окремого приводу на кожен суглоб. На рисунку 1.7 зображено будову та кінематику вказівного пальця Bebionic v2.

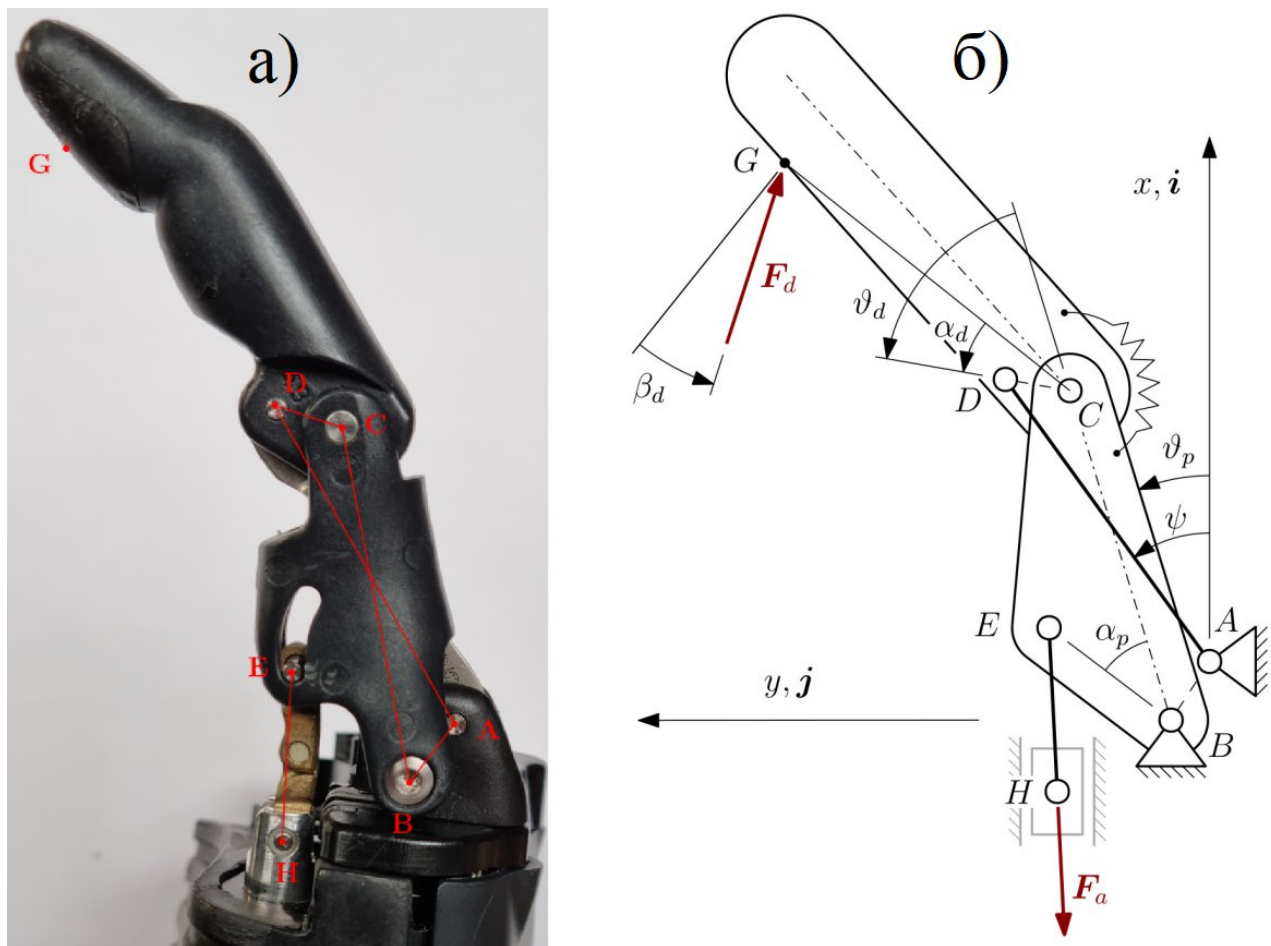


Рисунок 1.7 – Вказівний палець Bebionic v2: а) оригінальне зображення; б) кінематична схема [14]

Лінійний привід через гвинтову передачу створює тягове зусилля, яке передається на проксимальну фалангу та далі через систему важелів визначає положення дистальної фаланги. У цьому випадку палець фактично має один керований ступінь руху, оскільки обертання двох фаланг жорстко пов'язані між собою кінематичним механізмом. Саме тому траєкторія руху пальця є наперед заданою, а адаптація до форми об'єкта відбувається менш виражено, ніж у інших механізмах.

З погляду кінематики Bebionic v2 можна розглядати, як приклад конструкції з перевагою керованої повторюваності руху над пасивною адаптивністю. Наперед визначена траєкторія фаланг є корисною для точних захватів, оскільки положення кінчика пальця добре прогнозується під час закривання кисті. Це важливо для захоплення малих предметів, виконання щипкового захвату та маніпуляцій, де

необхідна стабільна геометрія контакту між пальцем і об'єктом. У порівняльному дослідженні зазначено, що Bebionic має змінний силовий профіль: сила на кінчику пальця зростає зі збільшенням згинання, що більше наближено до поведінки людської долоні при стисканні об'єкта. Водночас така конструктивна схема має і певні обмеження. Оскільки фаланги пальця Bebionic v2 жорстко пов'язані між собою чотириланковим механізмом, палець менш здатний пасивно охоплювати предмети складної або нерегулярної форми. У разі контакту однієї фаланги з об'єктом подальший рух іншої фаланги визначається не стільки формою предмета, скільки заданою кінематичною залежністю. Тому порівняно з адаптивними пальцями така конструкція краще підходить для контрольованих і повторюваних хватів, але може поступатися за здатністю природно пристосовуватися до різних геометричних форм об'єктів.

Також важливо розглянути піддатливість механізму пальця у напрямку згинання. Ця властивість має важливе значення, оскільки під час побутового використання палець може зазнавати зовнішнього навантаження або випадкового натискання в напрямку закривання. За відсутності піддатливості це може призвести до механічного пошкодження елементів конструкції. Так як фаланги Bebionic V2 мають жорстко заданий кінематичний зв'язок, привод спеціально з'єднаний із проксимальною ланкою через штифт, який переміщується у пазу. Якщо на палець діє зовнішня сила у напрямку згинання, штифт зміщується вздовж паза, що дозволяє MCP– та DIP–подібним суглобам додатково зігнутися без пошкодження приводу або важільного механізму. На рисунку 1.8 показано пазове з'єднання для досягнення піддатливості між проксимальною фалангою та лінійним приводом в Bebionic v2. Отже, Bebionic v2 є одним з основних зразків, кінематику та конструктивні рішення якого необхідно буде взяти до уваги при проектуванні роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів.

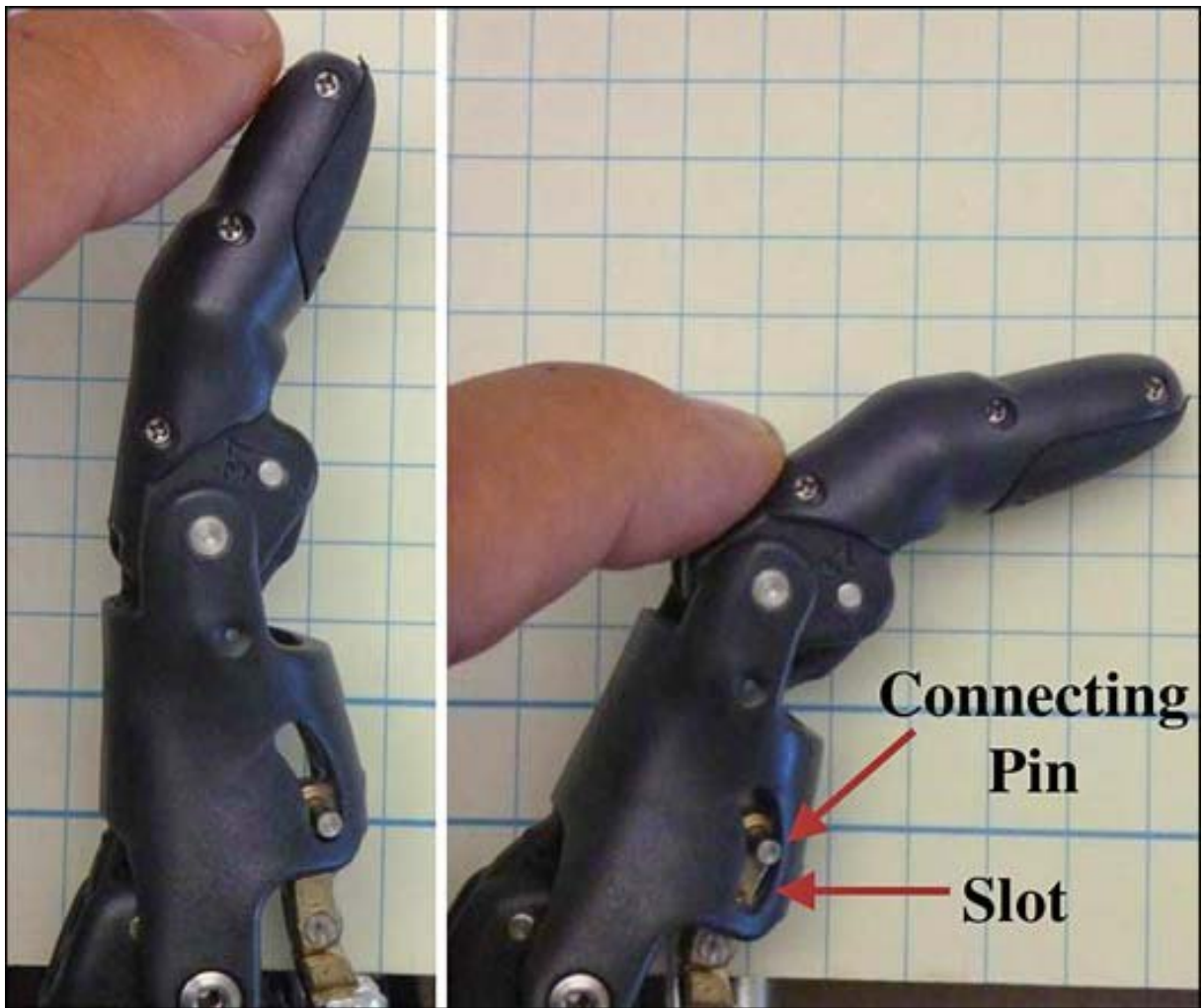


Рисунок 1.8 – Пазове з'єднання для досягнення піддатливості між проксимальною фалангою та лінійним приводом в Vebionic v2 [13]

Ще одним зразком, який варто взяти до уваги є долоня BIT Hand C, яка була розроблена для реалізації адаптивного захоплення об'єктів різної форми та розміру [15]. Аналогічно до Vebionic V2 вона має 5 пальців, 11 суглобів і 6 ступенів свободи. Привідна система складається з п'яти електродвигунів: чотири лінійні актуатори керують пальцями, а окремий лінійний актуатор забезпечує рух великого пальця, усі двигуни розміщені в долоні. Основною особливістю BIT Hand C є використання 5 ланкового шарнірно-важільного механізму пальців. Чотири пальці кисті приводяться в рух через систему шарнірних тяг, яка забезпечує згинання фаланг при переміщенні штока лінійного приводу. На рисунку 1.9 зображено будову BIT Hand C: Двофалангові пальці та їх ступені свободи, лінійні актуатори розміщені в долоні, окремий двигун для великого пальця.

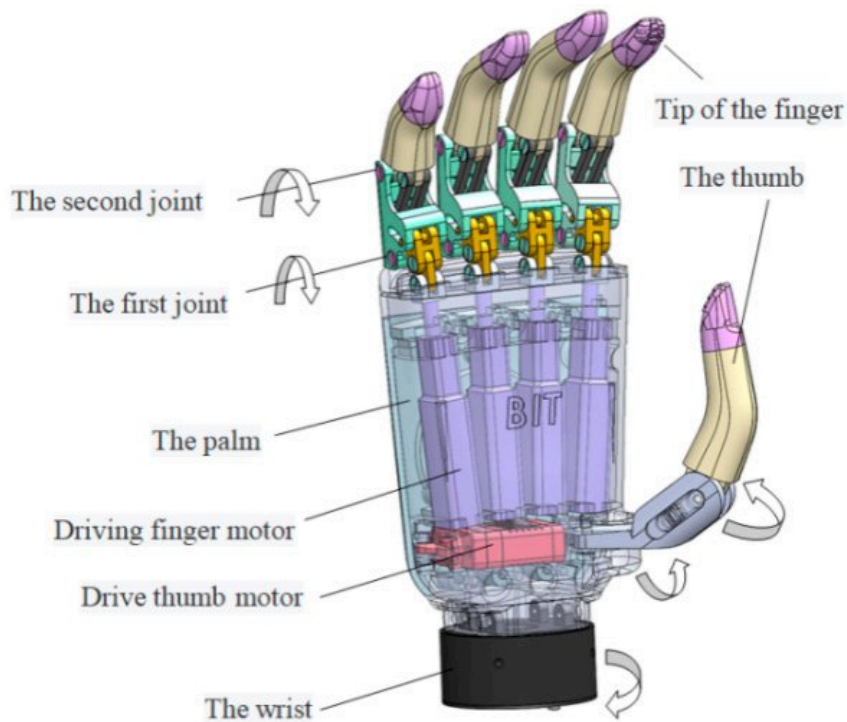


Рисунок 1.9 – Будова протезу долоні BIT Hand C [15]

Палець складається з проксимальної та дистальної фаланг, гумового наконечника, з'єднувальної тяги, пружного елемента та осей. Слід зазначити, що в проксимальній фаланзі наявне аналогічне до Bebionic V2 пазове з'єднання для досягнення піддатливості. На рисунку 1.10 зображена будова вказівного пальця.

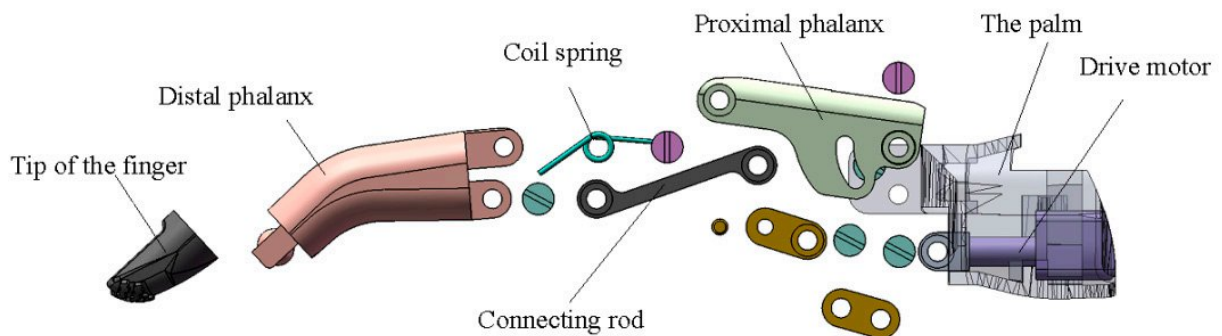


Рисунок 1.10 – Будова вказівного пальця BIT Hand C [15]

Кінематична модель пальця BIT Hand C подана у вигляді системи ланок, для якої складено замкнені векторні рівняння. На рисунку 1.11 наведено конструкцію шарнірно-важільного механізму пальця та опис його кінематики системою векторних рівнянь. Завдяки цьому можна описати положення фаланг через геометричні

параметри ланок і кути їх повороту. Після розкладання векторних рівнянь на проекції за осями X та Y отримується система скалярних рівнянь, яка може бути розв’язана чисельно, зокрема в середовищі MATLAB, для визначення положення пальця в різних фазах згинання, що буде корисним під час проектування власної кінематичної схеми, яке буде здійснено в наступних розділах.

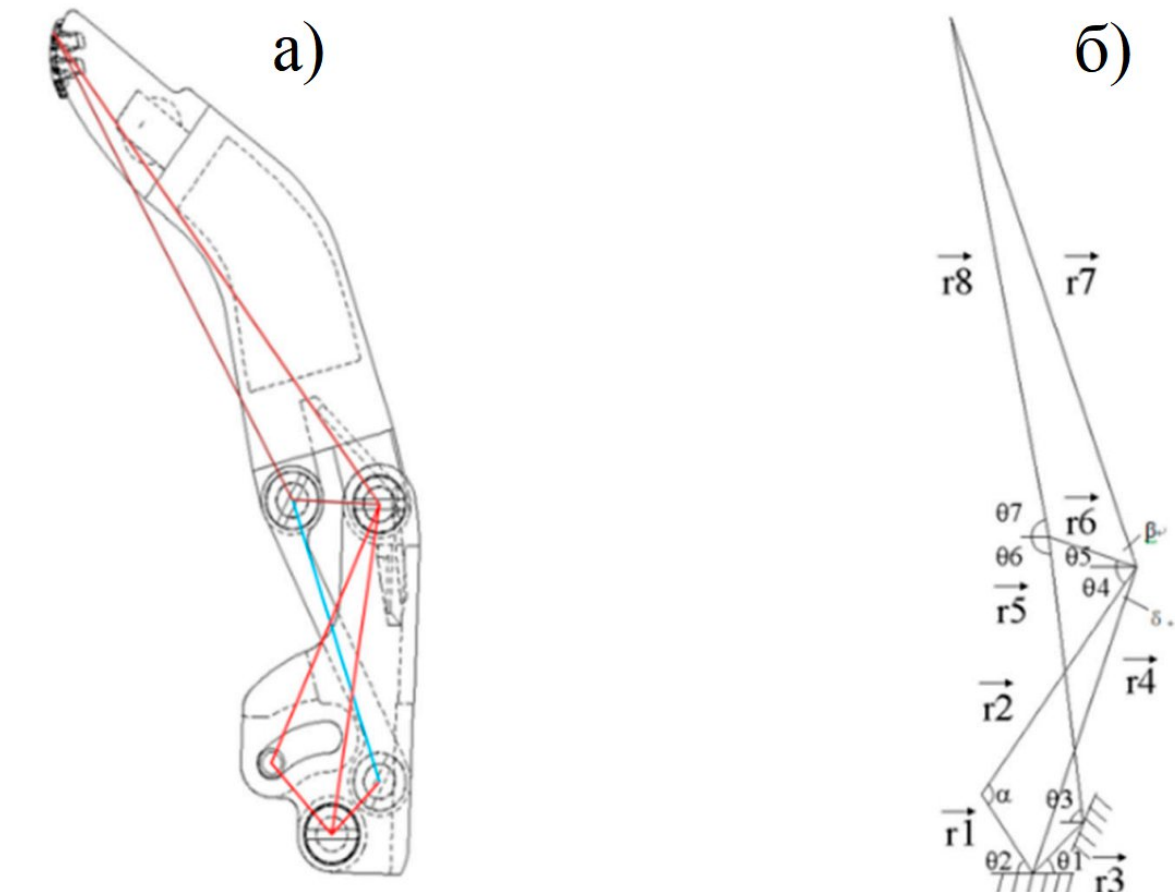


Рисунок 1.11 – Палець BIT Hand C: а) будова шарнірно–важільного механізму пальця; б) кінематична схема, подана у вигляді системи векторних рівнянь [15]

Підсумовуючи здійснення патентного огляду та аналізу сучасних зразків, можна дійти до висновку, що сучасні роботизовані долоні дозволяють створювати антропоморфні протези з меншою кількістю ступенів свободи, ніж у руки людини, проте без втрати функціональності. У комерційних зразках використовують спрощену двофалангову схему з кінематично пов’язаним рухом проксимальної та дистальної частин, застосовуються різні типи механічних передач: тросові, черв’ячні, конічні, гвинтові та шарнірно–важільні. Обґрунтування вибору механічної передачі

для дипломного проєкту буде представлено в наступному розділі. В результаті більш детального огляду Bebionic V2 та BIT Hand C було розглянуто принцип роботи шарнірно–важільних механізмів, їх кінематику а також конструктивні особливості, що є необхідним для подальшого виконання конструкторського розділу дипломного проєкту.

1.3. Обґрунтування вибору механічної передачі для реалізації функції згинання фаланг

Після аналізу біомеханічних особливостей кисті людини та огляду наявних технічних рішень можна зробити висновок, що вибір механічної передачі є одним із визначальних етапів проектування протезного пальця. Саме передавальний механізм визначає, яким чином рух від приводу буде перетворюватися у згинання фаланг, наскільки узгодженим буде цей рух, якими будуть габарити конструкції, її надійність, маса та складність виготовлення.

Для реалізації згинання пальців у протезах можуть застосовуватися різні типи передач: тросові, зубчасті механізми, гвинтові передачі, а також шарнірні [13]. Кожне з цих рішень має свої переваги, однак у межах проєкту основним критерієм є не лише забезпечення руху фаланги, а й отримання компактної, технологічної та передбачуваної конструкції, яку можна розрахувати й реалізувати в межах заданих габаритів протезної кисті.

У багатьох антропоморфних кистях використовуються гнучкі елементи, що імітують роботу сухожиль людини. Такі системи мають очевидну біомеханічну подібність до природної кисті, оскільки дозволяють передавати зусилля від приводу до фаланги через трос або нитку. Подібний підхід характерний для низки роботизованих і протезних систем, де важливо зменшити кількість жорстких елементів у середині пальця. Проте для розроблюваної конструкції такий варіант має певні недоліки. Зокрема, тросова передача потребує точного налаштування натягу, використання напрямних каналів або роликів, а також може змінювати свої характеристики внаслідок розтягування чи зношування гнучкого елемента. Це ускладнює як розрахунок, так і подальшу експлуатацію механізму.

Іншим можливим рішенням є застосування зубчастих передач. Вони дозволяють достатньо точно передавати обертальний рух і забезпечувати визначене передатне відношення між ланками. Однак у випадку протезного пальця зубчаста передача не завжди є доцільною, оскільки потребує підвищеної точності виготовлення, займає додатковий простір у зоні шарнірів і збільшує кількість деталей. Крім того, при використанні малогабаритних зубчастих коліс необхідно враховувати зношування, люфти та складність монтажу. Для конструкції, де основною метою є отримання простої та надійної кінематичної схеми, ці фактори є суттєвими обмеженнями.

Гвинтові та черв'ячні механізми мають перевагу у випадках, коли необхідно отримати велике передатне відношення або забезпечити самогальмування. Водночас такі передачі менш придатні для безпосереднього формування координованого руху фаланг. Вони зазвичай мають більші втрати на тертя, потребують більшої довжини і об'єму для розміщення та ускладнюють швидке циклічне згинання пальця. Тому їх доцільніше застосовувати як частину приводу або редуктора, а не як основний механізм зв'язку між фалангами.

З урахуванням наведених обмежень для побудови конструкції доцільним є застосування чотириланкового шарнірно–важільного механізму. Така схема дозволяє перетворити рух вхідної ланки в обертання вихідної ланки за наперед заданою геометричною залежністю. Іншими словами, характер згинання пальця визначається не складною системою керування, а підібраними довжинами ланок і положенням шарнірів. Це є суттєвою перевагою для протезного пальця, оскільки дає змогу механічно узгодити рух фаланг і зменшити кількість необхідних приводів.

Доцільність використання шарнірно–важільних схем підтверджується також результатами аналітичного огляду. Зокрема, у конструкції BIT Hand C згинання пальця реалізується за допомогою системи ланок, яка забезпечує передавання руху від приводу до фаланг. Такий підхід демонструє, що важільний механізм може бути ефективним рішенням для компактного протезного пальця, оскільки дозволяє розміщувати привід поза рухомою частиною фаланги та передавати рух через систему шарнірів.

Таким чином, вибір чотириланкового шарнірно–важільного механізму для реалізації згинання фаланг є обґрунтованим як з конструктивної, так і з функціональної точки зору. У порівнянні з тросовими, зубчастими та гвинтовими передачами він забезпечує краще співвідношення між компактністю, надійністю, простотою виготовлення та можливістю формування заданої кінематики пальця. Крім того, аналогічні принципи побудови механізмів згинання простежуються у розглянутих під час аналітичного огляду рішеннях, зокрема BIT Hand C та Bebionic V2, що підтверджує практичну доцільність використання важільної схеми в конструкції протезного пальця.

1.4 Особливості розміщення привідних механізмів та забезпечення багатоосевого руху великого пальця

У процесі проектування роботизованої долоні з використанням шарнірно–важільних механізмів важливо не лише обрати тип приводу та спосіб передачі руху, а й раціонально розмістити ці елементи в межах конструкції. Для вказівного, середнього, безіменного пальців і мізинця доцільним є розташування лінійних двигунів уздовж долонної частини протеза, у напрямку від зап'ясткової зони до основи пальців. Таке компонування дозволяє використати внутрішній простір долоні для встановлення основних привідних елементів, не ускладнюючи конструкцію фаланг і не збільшуючи їх масу.

Обране рішення є зручним для реалізації згинання пальців за допомогою чотириланкових механізмів. Лінійний двигун у такій схемі створює поступальний рух, який через систему шарнірних ланок перетворюється на обертання фаланг. Розміщення приводів саме в долонній частині дає змогу зберегти пальці відносно легкими та спростити передачу зусилля до механізмів згинання. Крім того, така схема краще відповідає загальній будові долоні людини, де силова дія формується не в самих фалангах, а передається до них через систему сухожиль і м'язово–зв'язкових структур.

Такий підхід наявний у конструкції BIT Hand C: кожен палець має окремий незалежний привід, а чотири пальці – вказівний, середній, безіменний і мізинець –

приводяться лінійними актуаторами типу LA10–21D, що можна побачити на рисунку 1.9. У роботі [19] зазначено, що сервоприводи розміщені всередині долоні, таке компонування робить конструкцію простішою та підвищує ефективність керування. Згинання пальця виконується через шарнірно–важільний механізм: під час переміщення штока приводу тяга діє на ланки пальця, внаслідок чого відбувається його згинання. Це підтверджує доцільність розміщення лінійних приводів у долонній частині протеза з подальшим перетворенням поступального руху в обертальний рух фаланг.

Аналогічна конструктивна логіка частково реалізована і в протезі Bebionic v2, для пальців використано двигуни, розміщені в долоні, а передача зусилля до фаланг здійснюється через лінійний привід із гвинтовою передачею, який діє на проксимальну фалангу. При цьому рух фаланг є кінематично зв'язаним, тобто траєкторія згинання визначається механізмом як єдина узгоджена система. Отже, Bebionic V2 можна розглядати як приклад компонування, у якому привідна частина пальців зосереджена в долонному модулі, а рух до фаланг передається через компактний механічний вузол.

З урахуванням наведених прикладів розміщення лінійних двигунів уздовж долоні в зоні п'ясткових кісток є конструктивно обґрунтованим рішенням. Метакарпальна зона має достатній внутрішній об'єм для встановлення приводів, забезпечує зручне підведення тяг або шарнірних ланок до основи пальців і дозволяє не перевантажувати самі фаланги. У результаті пальці залишаються переважно виконавчими рухомими ланками, тоді як долонна частина виконує роль несучої бази для приводів і передавальних механізмів.

З анатомічної точки зору така схема також є логічною. У природній кисті п'ясткова зона формує опорну основу для пальців, тоді як рух фаланг забезпечується через систему м'язів, сухожил'я і зв'язок, а не за рахунок силових елементів, розміщених безпосередньо у фалангах. Тому перенесення основних приводних елементів у метакарпальну частину протеза дозволяє зберегти конструктивну аналогію з природною кистю: силова дія формується в долонному модулі, а до фаланг передається через механічні ланки.

Окремого розгляду потребує великий палець, оскільки його функція не обмежується не тільки згинанням в одній площині, а й приведенням та відведенням. Для забезпечення багатоосевого руху великого пальця BIT Hand C має окремий привід, який забезпечує його поворот на 75 градусів. Його конструкція, зображена на рисунку 1.12, містить лінійний сервопривод, проксимальну фалангу, дистальну фалангу та наконечник. Проте згинання великого пальця в цьому рішенні є частково пасивним, тобто для зміни деяких положень користувач повинен допоміжно коригувати його положення здоровою рукою [13]. Це можна розглядати як конструктивне обмеження, оскільки великий палець відіграє ключову роль у формуванні більшості силових і точних захватів, тому в під час розробки доцільно розглядати інтеграцію лінійного актуатора в фалангу великого пальця.

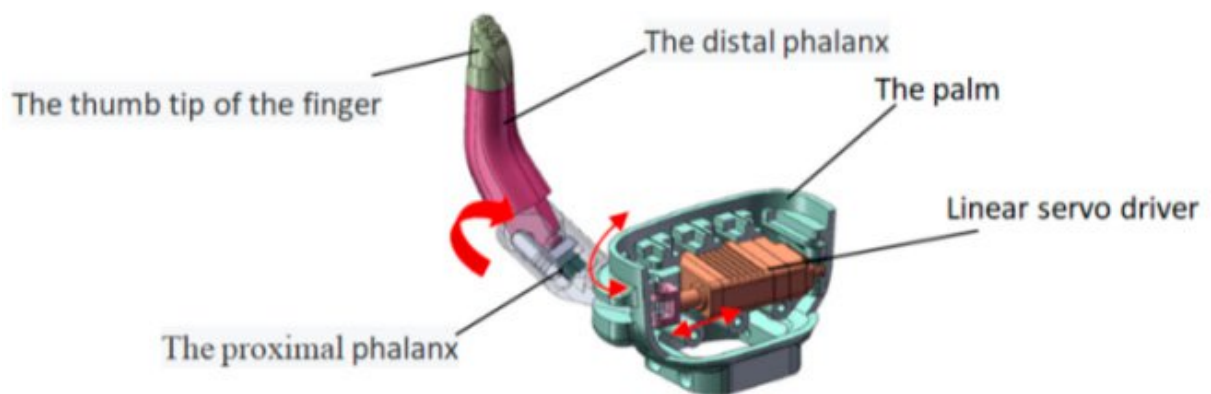


Рисунок 1.12 – Будова великого пальця BIT Hand C [15]

В свою чергу, у Vebionic v2 приведення та відведення великого пальця виконується пасивно, шляхом ручного встановлення у фіксовані положення, які визначають його орієнтацію відносно долоні та, відповідно, впливають на формування різних типів захвату.

На рисунку 1.13 показано основні положення приведення та відведення великого пальця. Великий палець здатен виконувати згинання у міжфаланговому IP суглобі, що забезпечує його участь у силових, точних і латеральних захватах. Реалізація згинального руху здійснюється за рахунок лінійного приводу, інтегрованого в проксимальну частину великого пальця.

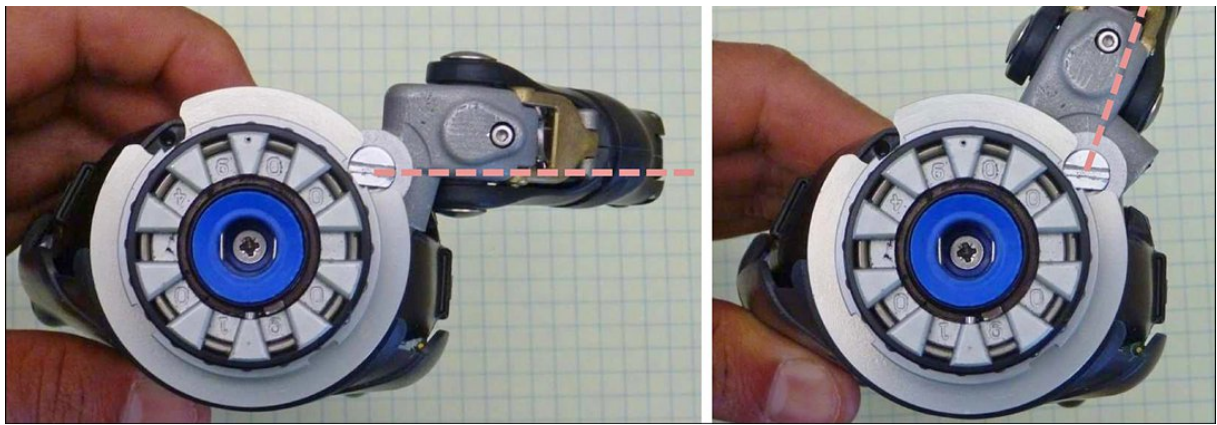


Рисунок 1.13 – Відведення та приведення великого пальця BeBionic V2 [13]

На рисунку 1.14 зображено великий палець BeBionic V2, у проксимальній фаланзі якого розміщено лінійний двигун.



Рисунок 1.14 – Великий палець BeBionic V2 з лінійним двигуном в проксимальній фаланзі [16]

Таким чином, для вказівного, середнього, безіменного пальців і мізинця доцільним є поздовжнє розміщення лінійних приводів у долонній частині протеза. Це рішення узгоджується з прикладами, наведеними під час огляду патентів, а саме: ВІТ

Hand C та Bebionic V2, забезпечує компактність конструкції, зменшує масу рухомих фаланг і створює зручні умови для застосування чотириланкових механізмів згинання пальців. Для великого пальця задача є більш складною: в розглянутих раніше зразках активною є одна вісь переміщення, тому одним з завдань під час конструювання є поєднання можливості приведення та відведення великого пальця за рахунок двигуна постійного струму зі згинанням його фаланг шляхом застосування лінійного двигуна, розміщеного в фалангах самого пальця. Зважаючи на те, що СМС суглоб великого пальця є ортогональним, що було висвітлено під час огляду біомеханічних особливостей долоні людини, доцільно використовувати конічні передачі, які дозволяють передати обертальний рух між перпендикулярними валами.

1.5. Формування вимог до контуру адаптивного керування зусиллям хвату

Однією з основних функціональних вимог до роботизованої долоні є забезпечення не лише згинання та розгинання пальців, а й контроль зусилля, з яким пальці взаємодіють з об'єктом. Під час захоплення об'єкта пальці протеза повинні переміщуватися до моменту контакту з його поверхнею, після чого подальший рух має коригуватися відповідно до величини прикладеного зусилля. Надмірне стискання може призвести до пошкодження крихких або м'яких предметів, а також до пошкодження механічних елементів пальця. Водночас недостатнє зусилля не забезпечує надійного утримання об'єкта та може спричинити його вислизання. Тому для підвищення функціональності роботизованої долоні доцільним є застосування замкненого контуру керування, у якому сигнал від датчиків сили використовується для регулювання переміщення штока лінійного двигуна.

Для реалізації такого контуру можуть бути використані датчики сили натискання типу FSR. Їх застосування в протезах кисті є доцільним через малі габарити, простоту інтеграції в конструкцію пальців. Прикладом використання подібного рішення є Dexterous Prosthetic Hand [17], зображена на рисунку 1.15, у якій датчики встановлені на дистальній фаланзі пальців для забезпечення зворотного зв'язку щодо стану хвату. Окремо зазначено, що два FSR–датчики розміщувалися на великому пальці: один на дистальній, інший – на проксимальній фаланзі.

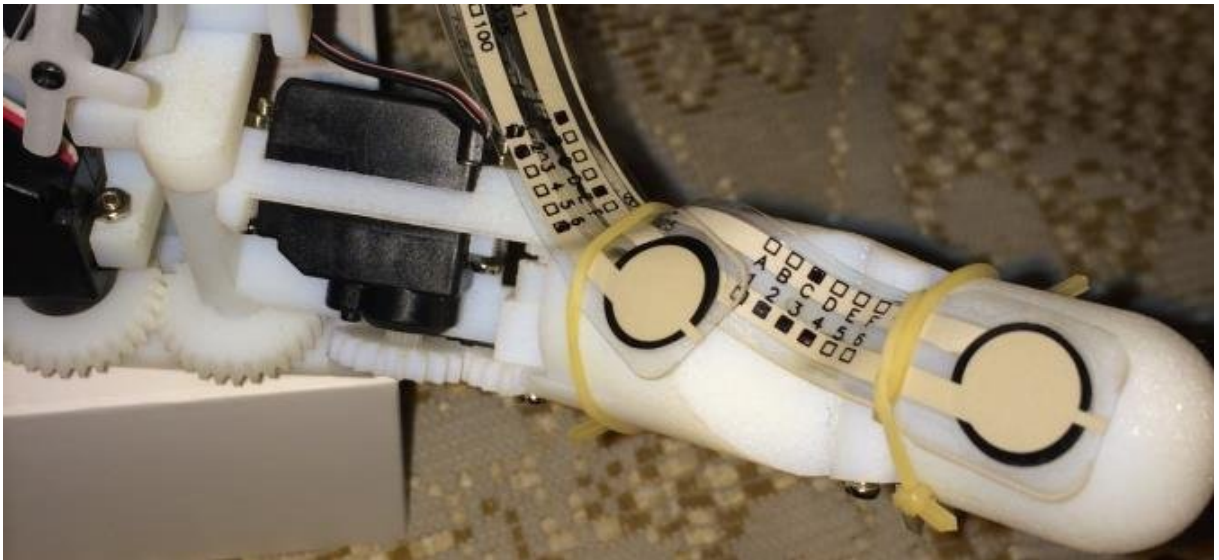


Рисунок 1.15 – Зображення великого пальця Dexterous Prosthetic Hand з встановленими FSR датчиками [17]

FSR–датчик змінює свій електричний опір залежно від прикладеного навантаження. З метою подальшої обробки цей сигнал може бути перетворений у зміну напруги за допомогою подільника напруги або мостової схеми та поданий на аналоговий вхід мікроконтролера. У роботі “Дослідження адаптивного захоплення протезною рукою на основі перцептивної інформації про твердість та шорсткість поверхні” [18] для цього було використано датчик FSR діаметром 10 мм, а зміна його опору відповідно до тиску який діє на датчик перетворювалась у зміну вихідної напруги.

Враховуючи вищезазначене, у роботизованій долоні яка проєктується у дипломному проєкті FSR–датчики доцільно використовувати як елемент зворотного зв’язку для формування адаптивного керування зусиллям хвату. Після подачі команди на захоплення мікроконтролер активує лінійний двигун, шток якого переміщується і через чотириланковий механізм забезпечує згинання пальця. Після появи сигналу з FSR–датчика система переходить до режиму контролю сили натискання. У цьому режимі мікроконтролер порівнює поточне значення сигналу датчика із заданим порогом. Якщо сигнал є нижчим за встановлене значення, це свідчить про недостатнє зусилля хвату, тому шток лінійного двигуна продовжує переміщення. Коли сигнал досягає заданого рівня, рух приводу зупиняється або

утримується в поточному положенні. Якщо ж сигнал перевищує допустиме значення, система може виконати незначне зворотне переміщення штока, зменшуючи тиск на об'єкт. Таким чином формується замкнений контур: FSR–датчик – мікроконтролер – драйвер двигуна – лінійний привід – механізм пальця. Приклад блок–схеми принципу роботи замкненого контуру адаптивного керування зусиллям хвату зображено на рисунку 1.16.

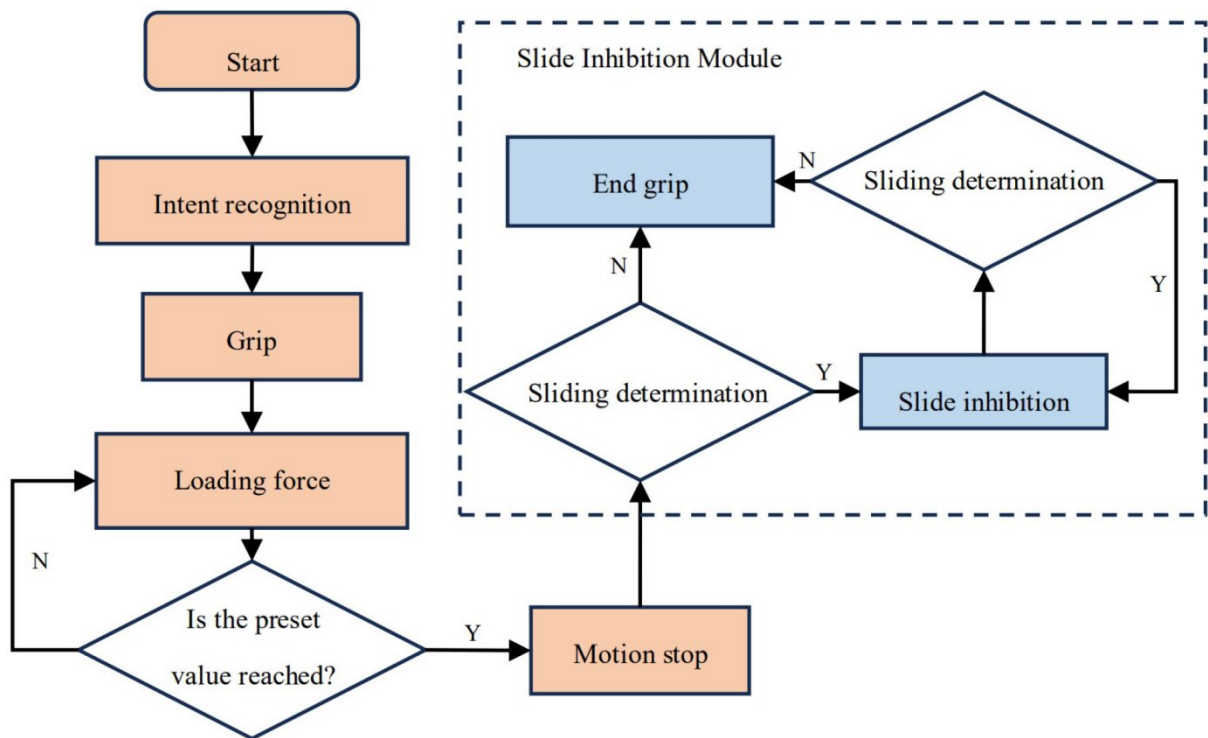


Рисунок 1.16 – Блок–схема замкненого контуру адаптивного керування зусиллям хвату [18]

Окремо слід врахувати можливість виявлення моменту вислизання предмета. Ковзання може бути зафіксоване шляхом різкої зміни або коливанням сигналу датчика сили. Наприклад, у дослідженні [18] як порогове значення для виявлення такого явища використовувалося коливання сигналу на рівні 0,1 В. Після виявлення ковзання система переходила на додаткове стискання об'єкта до моменту досягнення стабільного хвату. Для розроблюваної у дипломному проєкті моделі долоні цей принцип може бути використаний у спрощеному вигляді: при виявленні різкої зміни сигналу FSR, мікроконтролер формує команду на незначне додаткове переміщення штока, збільшуючи силу утримання предметів.

Важливим є також спосіб встановлення датчиків. Під час дослідження порівнювалися три варіанти монтажу: безпосереднє встановлення датчика на поверхню пальця, встановлення на м'яку силіконову основу та встановлення на жорстку платформу. Найкращий результат було отримано при використанні жорсткої платформи діаметром 10 мм і висотою 2 мм, розміщеної під FSR. Таким чином під час розробки посадкових місць для датчиків тиску необхідно використовувати спеціальні площадки. На рисунку 1.17 зображено способи встановлення датчиків.

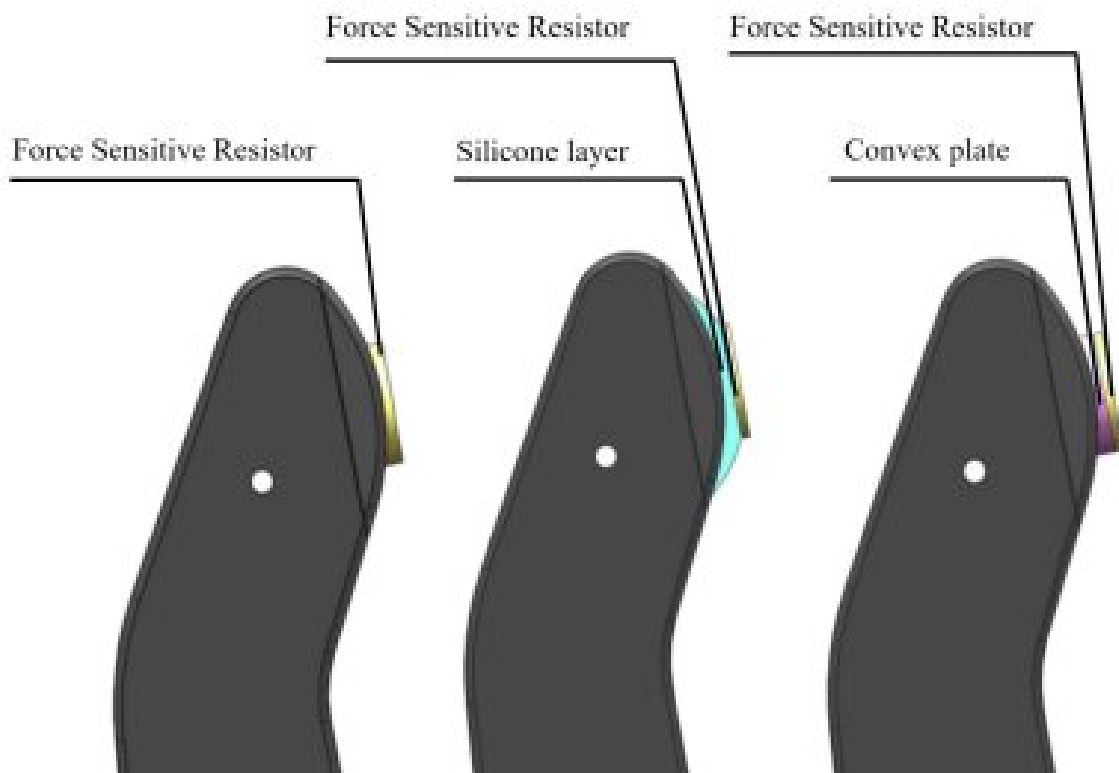


Рисунок 1.17 – Способи встановлення FSR датчиків [18]

Підсумовуючи, в результаті розгляду принципів адаптивного керування зусиллям хвату було сформовано основні вимоги до побудови відповідного контуру роботизованої долоні. У конструкції доцільно розмістити FSR-датчики в зонах контакту пальців із предметом для передавання сигналів до мікроконтролера, який після їх обробки та порівняння з пороговими значеннями формує команду драйверу двигуна для коригування переміщення штока лінійного приводу відповідно до фактичного зусилля хвату.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено аналіз передумов створення роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів. Розглянуто біомеханічні особливості долоні людини, зокрема будову основних пальців і великого пальця, функціональне значення суглобів, роль попереднього формування хвату. Встановлено, що для основних пальців доцільним є застосування спрощеної двофалангової схеми, яка дозволяє зменшити кількість рухомих елементів без суттєвої втрати функціональності, тоді як великий палець потребує окремого конструктивного проектування. Під час огляду сучасних зразків роботизованих долонь встановлено, що більшість конструкцій використовує обмежену кількість приводів і кінематично пов'язаний рух фаланг, детально було розглянуто протези Bebionic V2 та BIT Hand C, у яких реалізовано розміщення приводів у долонній частині та передавання руху до фаланг за допомогою шарнірно-важільних механізмів. Це підтвердило доцільність використання подібного підходу в межах дипломного проєкту. Окремо сформовано вимоги до контуру адаптивного керування зусиллям хвату. Встановлено, що для підвищення функціональності роботизованої долоні необхідно додати FSR-датчики в зонах контакту пальців із предметом, можливість оброблення їхніх сигналів мікроконтролером та подальше керування приводами через драйвер двигуна. Проведений аналітичний огляд є основою для подальшого розроблення кінематичної схеми, конструкції пальців, компонування роботизованої долоні та системи адаптивного керування.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ДОЛОНІ

2.1. Розроблення кінематичної схеми важільного механізму пальця

Кінематичною схемою називають умовне зображення механізму, побудоване в певному масштабі, на якому зберігаються лише ті розміри ланок, що визначають його кінематику [19]. Механізм розглядається як система твердих тіл, з'єднаних між собою кінематичними парами, що призначені для перетворення механічного руху. Водночас, ланкою механізму є тверде тіло що входить до його складу, а кінематична пара являє собою рухоме з'єднання двох ланок, яке обмежує їх відносний рух [20]. Таке трактування є доцільним для подальшого опису конструкції пальця роботизованої долоні, як сукупності шарнірно з'єднаних елементів.

Під час проектування роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів необхідно визначити не лише загальний принцип передачі руху, а й геометричні параметри ланок, що формують траєкторію згинання пальця. За конструктивною ознакою обраний механізм належить до шарнірно–важільних, оскільки передача руху здійснюється за допомогою твердих ланок, з'єднаних обертальними кінематичними парами. За характером руху ланок механізм є плоским, оскільки основне переміщення пальця відбувається в одній площині згинання.

У цьому проєкті для спрощення конструкції було визначено, що згинання пальця реалізується за допомогою одного шарнірно–важільного механізму, який приводиться в рух лінійним двигуном. При цьому проксимальна фаланга розглядається як основна вихідна ланка механізму, а середня та дистальна фаланги об'єднуються в одну умовну дистальну частину пальця. Таке спрощення дозволяє зменшити кількість рухомих елементів, зберігаючи при цьому загальний принцип згинання пальця в площині.

Основу кінематичної схеми становить замкнений чотириланковий контур A–B–C–D, який формує траєкторію руху проксимальної фаланги. Точка B відповідає осі обертання пальця відносно долонної частини протеза. Точка A є нерухомою опорою механізму, розміщеною на корпусі долоні. Ланка BC моделює проксимальну фалангу пальця, ланка AD є веденою ланкою, що обертається відносно точки A, а

ланка CD виконує роль з'єднувальної ланки. Приведення механізму в рух здійснюється за рахунок поступального переміщення штока лінійного двигуна. Основа двигуна розміщується в точці Н, а шток з'єднується з пальцем у точці Е. У такому випадку відстань ЕН визначає поточне положення штока: її зміна під час висування або втягування штока створює переміщення точки Е, що, у свою чергу, викликає поворот ланки ВС навколо шарніра В. Таким чином, зміна довжини ЕН є вхідним кінематичним параметром механізму, від якого залежить кутове положення проксимальної фаланги та ступінь згинання пальця.

В дипломному проєкті розроблення кінематичної схеми важільного пальця здійснювалось на основі аналізу розташування відповідних елементів пальця протезу Bebionic V2, розглянутого під час огляду сучасних зразків в попередньому розділі. Використовуючи можливість САПР SolidWorks розташовувати елементи за заданими координатами, було задано точку В (0;0). Відносно цієї точки задавалась ланка ВС довжиною 42 мм, у межах початкового положення проксимальна фаланга розташовується під кутом 10° відносно осі долоні. Від точки С далі відкладається ланка СG довжиною 45 мм, яка представляє дистальну частину пальця. Для неї початковий кут відносно вісі долоні приймається рівним 30° .

Положення нерухомої опори А задається через стояк АВ, довжина якого становить 8,5 мм, з кутом розміщення відносно осі долоні в 40° . Таким чином, ланка АВ формує нерухому основу чотириланкового механізму та визначає взаємне положення опорних шарнірів А і В. Положення лінійного приводу задається точкою Н(-13;-7), що відповідає початковому положенню основи штока, а точка Е визначає положення штока у крайньому положенні. Відрізок ЕВ під кутом 35° до ланки ВС задає плече прикладання зусилля від лінійного приводу відносно шарніра В, його довжина та кутове розташування впливають на перетворення поступального руху штока у обертання проксимальної фаланги.

Після визначення положення проксимальної фаланги від точки С будується з'єднувальна ланка CD довжиною 7,75 мм з кутом 65° відносно СG, яка забезпечує передачу руху між проксимальною фалангою та ведомою ланкою механізму. Далі через точку D формується ланка AD, що з'єднується з нерухомою опорою А та

виконує роль ведомої ланки–коромисла, а також ланка GD, яка замикає контур дистальної фаланги. На рисунку 2.1 представлено зображення розробленої в САПР SolidWorks кінематичної схеми з можливістю зміни параметрів.

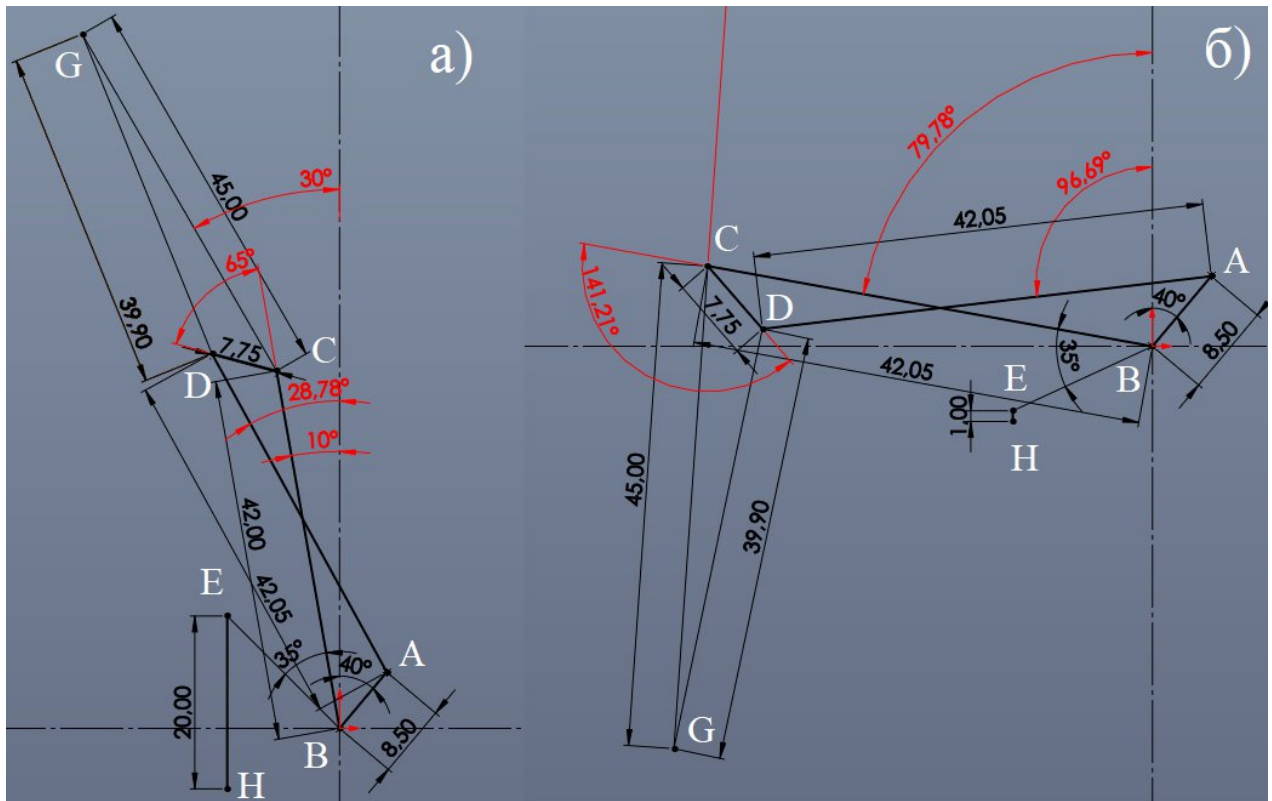


Рисунок 2.1 – Кінематична схема чотирьохланкового механізму пальця, розроблена в САПР SolidWorks з наступними параметрами: а) положення штока лінійного двигуна 20 мм; б) положення штока лінійного двигуна 1 мм

Таким чином, побудована кінематична схема визначає геометрію важільного механізму пальця та є основою для подальшого аналізу залежності між переміщенням штока лінійного приводу і кутом згинання фаланг, зусиль які діють на точки контакту. Графічне зображення розробленої кінематичної схеми наведено в додатку А, сталі значення геометричних параметрів кінематичної схеми наведені в таблиці 2.1, змінні значення за сталої початкової умови (повністю висунутого штока лінійного двигуна) представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Сталі значення геометричних параметрів кінематичної схеми

Параметр	Позначення	Значення
Довжина проксимальної фаланги	l_{BC}	42 мм
Довжина стояка (основи механізму)	l_{AB}	8,5 мм
Довжина з'єднувальної ланки	l_{CD}	7,75 мм
Довжина веденої ланки	l_{AD}	42,05 мм
Довжина дистальної фаланги	l_{CG}	45 мм
Довжина веденої ланки дистальної фаланги	l_{GD}	39,90 мм
Кут між напрямом дії штока лінійного двигуна та проксимальною фалангою	α_p	35°
Кут між дистальною фалангою CG та з'єднувальною ланкою CD	α_d	45°

Таблиця 2.2 – Змінні значення геометричних параметрів при сталій початковій умові

Положення штока лінійного двигуна	S	20 мм
Кут проксимальної фаланги відносно вісі долоні	ϑ_p	10°
Кут дистальної фаланги відносно проксимальної фаланги	ϑ_d	65°
Відстань від шарніра В до точки прикладання сили Е	l_{BE}	18,35 мм
Кут між веденою ланкою та віссю долоні	ψ	28,78°

2.2. Розрахунок зусиль та навантажень у ланках механізму пальця

Здійснення розрахунків зусиль та навантажень є важливою частиною розроблення роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів, так як отримана з розрахунків інформація безпосередньо впливає на реалізацію конструктивних особливостей, а також необхідні для розуміння експлуатаційних характеристик.

Відповідно до раніше зазначених параметрів, а саме довжини ходу штока, доцільно обрати лінійний двигун КТР–0905–20L з наступними параметрами: $F_a = 30 \text{ Н}$, $U_{\text{дв}} = 6 \text{ В}$, $I_{\text{дв}} = 0,25 \text{ А}$, який зображено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Лінійний двигун КТР–0905–20L

На першому етапі необхідно визначити крутні моменти відносно сили, з якою діє шток двигуна у основних шарнірних з'єднаннях, що виконують роль суглобів МСР та РІР для підбору діаметру валів. Значення крутного моменту відносно довільної точки O визначається за формулою 2.1:

$$\vec{M}_O = \vec{F} \cdot \vec{r}_{OE} \quad (2.1)$$

Де $\vec{M}_O$ – момент сили відносно точки O , $\text{Н} \cdot \text{мм}$;

$\vec{r}_{OE}$ – вектор від точки O до точки прикладання сили E , мм ;

$\vec{F}$ – прикладена сила, Н .

Для площинної задачі векторне рівняння зручно записати у скалярному вигляді:

$$M_O = x_{OE} \cdot F_y - y_{OE} \cdot F_x \quad (2.2)$$

Де x_{OE} , y_{OE} – координати вектора від точки O до точки прикладання сили, мм ;

Відповідно до координат точки $B(0;0)$ та $E(-13;13)$ маємо:

$$\vec{r}_{BE} = E - B = (-13;13)$$

Відповідно так як сила $\vec{F}_a$ діє вертикально вниз, маємо:

$$\begin{aligned} F_{ax} &= 0 \\ F_{ay} &= -30 \end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned}
M_{BE} &= x_{BE} \cdot F_{ay} - y_{BE} \cdot F_{ax} \\
M_{BE} &= (-13) \cdot (-30) - 13 \cdot 0 \\
M_{BE} &= 390 \text{ (Н} \cdot \text{мм)} \\
M_{BE} &= 0,39 \text{ (Н} \cdot \text{м)}
\end{aligned}$$

Аналогічним чином розраховуємо момент для точки C(-7,29;41,36):

$$\begin{aligned}
\vec{r}_{CE} &= E - C = (-5,71; -28,36) \\
M_{CE} &= x_{CE} \cdot F_{ay} - y_{CE} \cdot F_{ax} \\
M_{CE} &= (-5,71) \cdot (-30) - (-28,36) \cdot 0 \\
M_{CE} &= 171,3 \text{ (Н} \cdot \text{мм)} \\
M_{CE} &= 0,171 \text{ (Н} \cdot \text{м)}
\end{aligned}$$

На наступному етапі, здійснимо розрахунок діаметрів валів шарнірних з'єднань [21], виходячи з умови міцності при крученні за формулою 2.3 зі значенням $\sigma_k = 40 \text{ МПа}$:

$$d_{\text{вих}} \geq 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{\text{вих}}}{0,2 \cdot \sigma_k}} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}
d_B &= 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,39}{0,2 \cdot 40}} \approx 3,65 \text{ (мм)} \\
d_C &= 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,171}{0,2 \cdot 40}} \approx 2,77 \text{ (мм)}
\end{aligned}$$

Відповідно до отриманих значень призначимо діаметр валу шарніра B 4 мм, а шарніра C 3 мм.

Зважаючи на те, що розроблення кінематичної схеми важільного пальця здійснювалось на основі аналізу розташування відповідних елементів пальця протезу Bebionic V2, визначення експлуатаційних характеристик, а саме значення сили контакту на кінчику пальця, можна провести шляхом кінетостатичного моделювання [14], використовуючи геометричні параметри в залежності від різних положень штока лінійного двигуна, на основі розробленої в САПР SolidWorks кінематичної схеми. Для цього необхідно вирішити систему рівнянь рівноваги для проксимальної та дистальної фаланг, яка наведена у формулі 2.4:

$$\begin{cases}
\vec{R}_B + \vec{R}_C + \vec{F}_a = 0 \\
\vec{r}_{BE} \cdot \vec{F}_a + \vec{r}_{BC} \cdot \vec{R}_C + T_d = 0 \\
\vec{R}_D - \vec{R}_C + \vec{F}_d = 0 \\
\vec{r}_{CD} \cdot \vec{R}_D + \vec{r}_{CG} \cdot \vec{F}_D - T_d = 0
\end{cases} \quad (2.4)$$

Де $\vec{R}_B, \vec{R}_C, \vec{R}_D$ – реакції у шарнірних з'єднаннях;

$\vec{F}_a$ – сила штока;

$\vec{F}_d$ – сила на кінці пальця;

T_d – момент пружини кручення. В рамках дипломного проєкту його значенням вирішено знехтувати;

$\vec{r}$ – радіус–вектори відповідних точок;

Після розв’язання рівняння отримуємо формулу 2.5, яка описує відношення сили на кінці пальця від геометричних параметрів:

$$F_d = \frac{(a_1 + a_2)T_d + a_2 l_{BE} \cos \cos(\vartheta_p + \alpha_p) F_a}{a_3 l_{CD} \sin \sin(\vartheta_p + \vartheta_d - \psi) - a_1 l_{CG} \cos \cos(\beta_d + \alpha_d)} \quad (2.5)$$

Де β_d – кут між силою F_d та дистальною фалангою, значення якого для спрощення вирішено знехтувати;

$$a_1 = l_{BC} \sin \sin(\vartheta_p - \psi) \quad (2.6)$$

$$a_2 = l_{CD} \sin \sin(\vartheta_d + \vartheta_p - \psi) \quad (2.7)$$

$$a_3 = l_{BC} \cos \cos(\vartheta_d + \beta_d) \quad (2.8)$$

У результаті було виведено залежність сили на кінці пальця від положення штока двигуна, що дозволяє зрозуміти характер зміни контактного зусилля під час згинання фаланг. Отримані значення F_d у подальшому будуть необхідні для формування зворотного зв’язку за силою на основі FSR–датчика.

Водночас, для забезпечення багатоосьового руху пальця необхідно здійснити кінематичний розрахунок електроприводу, перевірити на міцність найбільш навантажені деталі та розрахувати розмір валу.

Для реалізації приведення та відведення великого пальця було обрано двигун постійного струму GA16–020, який зображено на рисунку 2.3. Двигун має наступні параметри роботи: $n_{дв} = 8$ об/хв, $U_{дв} = 6$ В, $I_{дв} = 45$ мА, $d_{вх} = 4$ мм.



Рисунок 2.3 – Двигун постійного струму GA16–020 [22]

Відповідно до вхідних даних, розрахуємо потужність двигуна за формулою 2.9:

$$N_{\text{дв}} = U_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \quad (2.9)$$

$$N_{\text{дв}} = 0,27 \text{ (Вт)}$$

У межах дипломного проєкту доцільно прийняти однакову вхідну та вихідну швидкості обертання валів, так як це спростить проектування редуктора, який буде здійснювати передачу обертання під кутом 90° та складатиметься з одноступінчатої конічної передачі.

$$n_{\text{дв}} = n_{\text{вих}}$$

Відповідно загальне передаточне відношення механізму розраховуємо за формулою 2.10:

$$I_{\text{сп}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{вих}}} \quad (2.10)$$

$$I_{\text{сп}} = 1$$

Отримане значення передаточного відношення вписується в допустимий діапазон для одного ступеня конічної пари (який становить від 1 до 4)

Знайдемо кутову швидкість за формулою 2.11:

$$\omega_{\text{вих}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{дв}}}{60} \quad (2.11)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2\pi \cdot 8}{60} \approx 0,837 \text{ (рад/с)}$$

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_{\text{вих}} = 0,837 \text{ (рад/с)}$$

Знайдемо вихідну потужність валу за формулою 2.12:

$$N_{дв} = \frac{N_{вих}}{\eta_{к.п.}} \quad (2.12)$$

Де ККД конічної передачі $\eta_{к.п.} = 0,95$

$$N_{вих} = N_{дв} \cdot \eta_{к.п.} = 0,2565$$

Знайдемо крутний момент на валу за формулою 2.13:

$$M_{вих} = \frac{N_{вих}}{\omega_{вих}} \quad (2.13)$$

$$M_{вих} = \frac{0,2565}{0,837} = 0,3064 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Здійснимо розрахунок валу, на який буде розміщуватися великий палець за формулою 2.3:

$$d_{вих} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,3064}{0,2 \cdot 40}} \approx 3,37 \text{ (мм)}$$

Таким чином діаметр вала, на якому буде розміщено великий палець доцільно прийняти за 4 мм.



Рисунок 2.4 – Конічні шестерні з передаточним відношенням $I_{сп} = 1$ [23]

Водночас, здійснювати розрахунок геометричних розмірів зубчастих коліс недоцільно, оскільки будуть використані покупні конічні шестерні з передаточним відношенням $I_{сп} = 1$, зображені на рисунку 2.4.

2.3. Розроблення механізму пальця

У дипломному проєкті розроблення механізму пальця здійснювалося з використанням САПР Solidworks відповідно до розробленої кінематичної схеми, а також розрахованих навантажень. На основі визначених геометричних параметрів: розташування шарнірних з'єднань, довжин ланок, кутів між ними було побудовано тривимірну модель механізму пальця, яка складається з: основи, проксимальної фаланги, дистальної фаланги, коромисла, привідної тяги, валів та метизів.

З метою спрощення конструкції, а також підвищення технологічності, в межах проекту було вирішено використовувати однакові проксимальні та дистальні фаланги для всіх пальців. А відтворення антропоморфності (а саме різну довжину пальців) здійснювати шляхом розташування посадкових місць для пальців на різних довжинах від кінця долоні.

Під час проектування проксимальної фаланги було враховано властивість попереднього формування хвату, тобто вісь фаланги розташована під визначеним кутом $\vartheta_p = 10^\circ$. Було розроблено пазове з'єднання, яке необхідне для піддатливості пальця у напрямку згинання, посадкові місця під вали, які виконують роль MCP та PIP суглобів. У дистальній фаланзі було враховано початковий кут зовнішньої поверхні пальця відносно вісі долоні в 30° , а також кут дистальної фаланги CG відносно проксимальної фаланги $\vartheta_d = 65^\circ$. Також для подальшої інтеграції датчиків тиску було розроблено посадкові місця, які представляють з себе витягнуту платформу круглої форми.

Для замикання чотириланкового контуру було спроектовано коромисло, яке відповідає ланці AD . А для з'єднання штоку лінійного приводу з проксимальною фалангою було спроектовано привідну тягу. Проектування здійснювалося з урахуванням особливостей 3Д друку з технологією FDM. Як наслідок, було враховано: усадка пластику (і як наслідок відхилення дійсних розмірів від номінальних), необхідність мінімізації підтримок. Одну з ітерацій розробленого пальця з використанням шарнірного механізму зображено на рисунку 2.5.

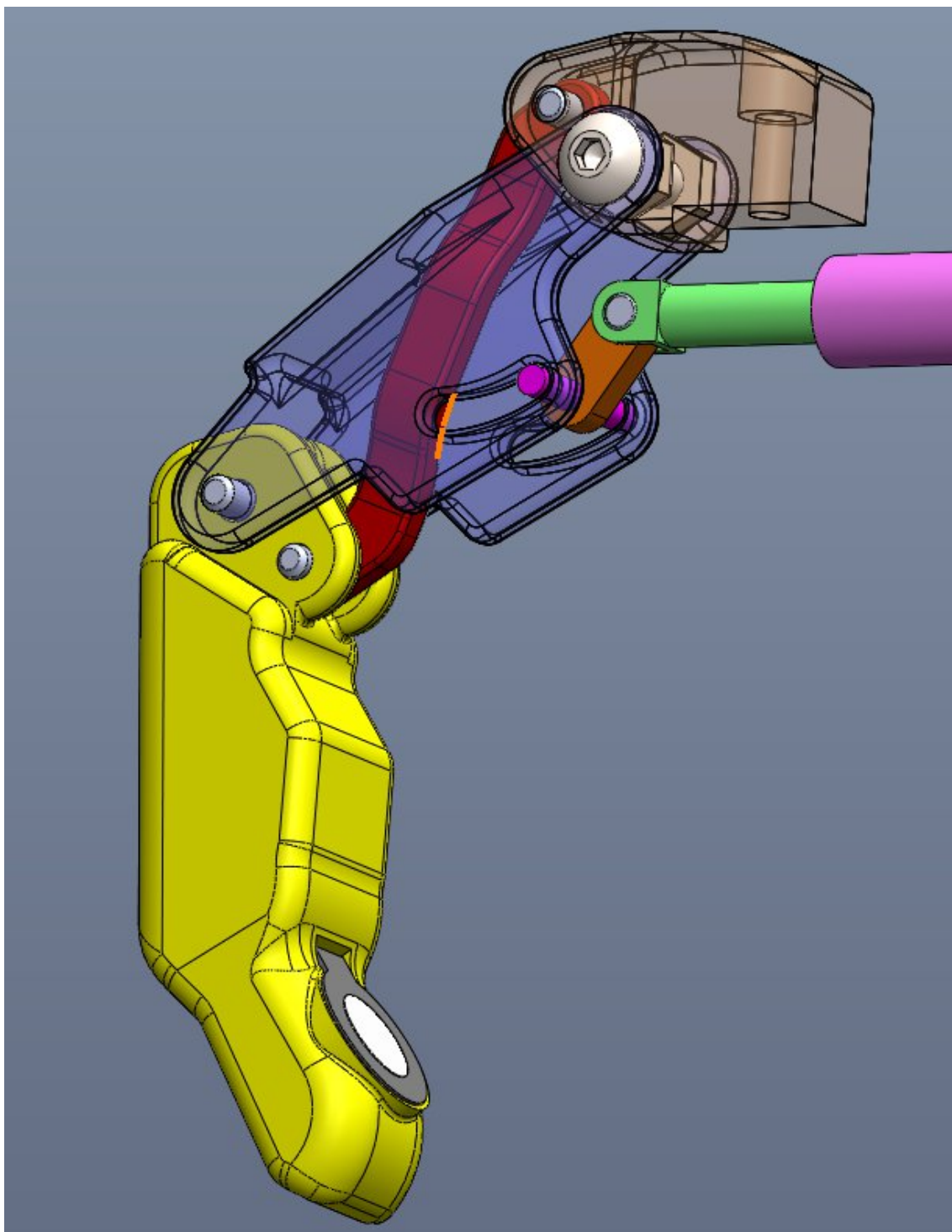


Рисунок 2.5 – Розроблена у САПР SolidWorks модель пальця з використанням шарнірного механізму

2.4. Розроблення механізму великого пальця

Розроблення механізму великого пальця виконувалось з урахуванням розглянутих у першому розділі біомеханічних особливостей. Для забезпечення відведення та приведення великого пальця було обрано вал з конічною передачею.

Такий вузол дозволяє передавати обертальний рух під кутом, що відповідає похилому розташуванню великого пальця та забезпечує його встановлення у положення, необхідне для формування захвату. Згинання великого пальця реалізується лише в ІР–суглобі, тобто між проксимальною та дистальною фалангами. Для цього передбачено обертальну пару, яка приводиться в рух лінійним двигуном з ходом штока 10 мм. Двигун розміщено в межах проксимальної фаланги та метакарпальної кістки, що дозволяє раціонально використати внутрішній простір конструкції. На відміну від механізмів інших пальців, важільна передача тут не використовується, що спрощує конструкцію та зменшує кількість рухомих елементів.

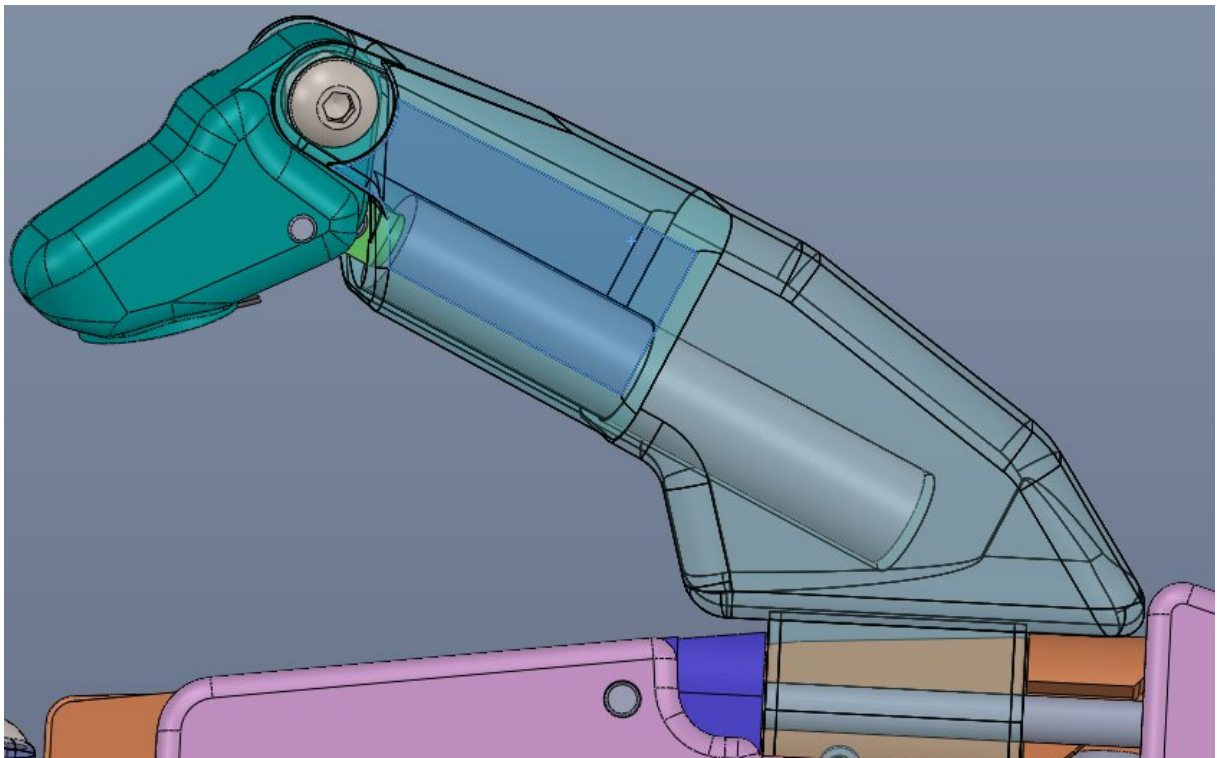


Рисунок 2.6 – Розроблення в САПР SolidWorks великого пальця

Оскільки деталі великого пальця виготовляються методом 3D–друку, під час проектування враховувались відповідні технологічні обмеження. Зокрема, були передбачені достатня товщина стінок у місцях встановлення шарніра, осі та кріплення двигуна, а також необхідні зазори в рухомих з'єднаннях для компенсації похибок друку. Одну з ітерацій розроблюваного пальця зображено на рисунку 2.6.

2.5. Створення загального вигляду роботизованої долоні

Після розроблення механізмів основних пальців і великого пальця було виконано створення загального вигляду роботизованої долоні. На цьому етапі основною задачею було поєднання окремих функціональних вузлів у єдину конструкцію, габаритні розміри якої наближені до розмірів кисті людини. Долонна частина в розроблюваній конструкції виконує роль основи, до якої приєднуються механізми пальців, привідні елементи, вузол великого пальця та електронна компонентна база системи керування. Також необхідно дотримуватися збереження антропоморфності конструкції. Для цього посадкові місця під вказівний, середній, безіменний пальці та мізинець розташовано не паралельно одне до одного, а під певними кутами відносно осі долоні. Оскільки в попередньому підрозділі було прийнято рішення використовувати однакові проксимальні та дистальні фаланги для всіх основних пальців, різниця у довжині пальців забезпечується за рахунок зміщення посадкових місць на долонній частині. Для згинання II–IV пальців у внутрішньому об'ємі долоні передбачено розміщення лінійних двигунів КТР–0905–20L, для великого пальця – окремий привідний вузол, який складається з лінійного двигуна КТР–0905–10L у фаланзі пальця, двигуна постійного струму GA16–020 та редуктора в який входять конічні передачі, вал, підшипники.

Крім механічних вузлів, у загальному вигляді роботизованої долоні було передбачено місце для встановлення електронної компонентної бази. Розміщення електронних компонентів виконувалось з урахуванням доступності для монтажу, підключення та подальшого обслуговування. Також у корпусі долоні доцільно передбачити канали для прокладання проводів від двигунів і датчиків тиску FSR до плати керування.

Під час проектування корпусу долоні було враховано особливості виготовлення деталей методом 3D–друку. З цією метою конструкцію доцільно розбити на декілька окремих деталей: основну частину долоні, кришку, посадкові елементи для приводів та допоміжні кріпильні елементи. На рисунку 2.7 зображено прототип основної частини долоні, складальне креслення – у Додатку Б.

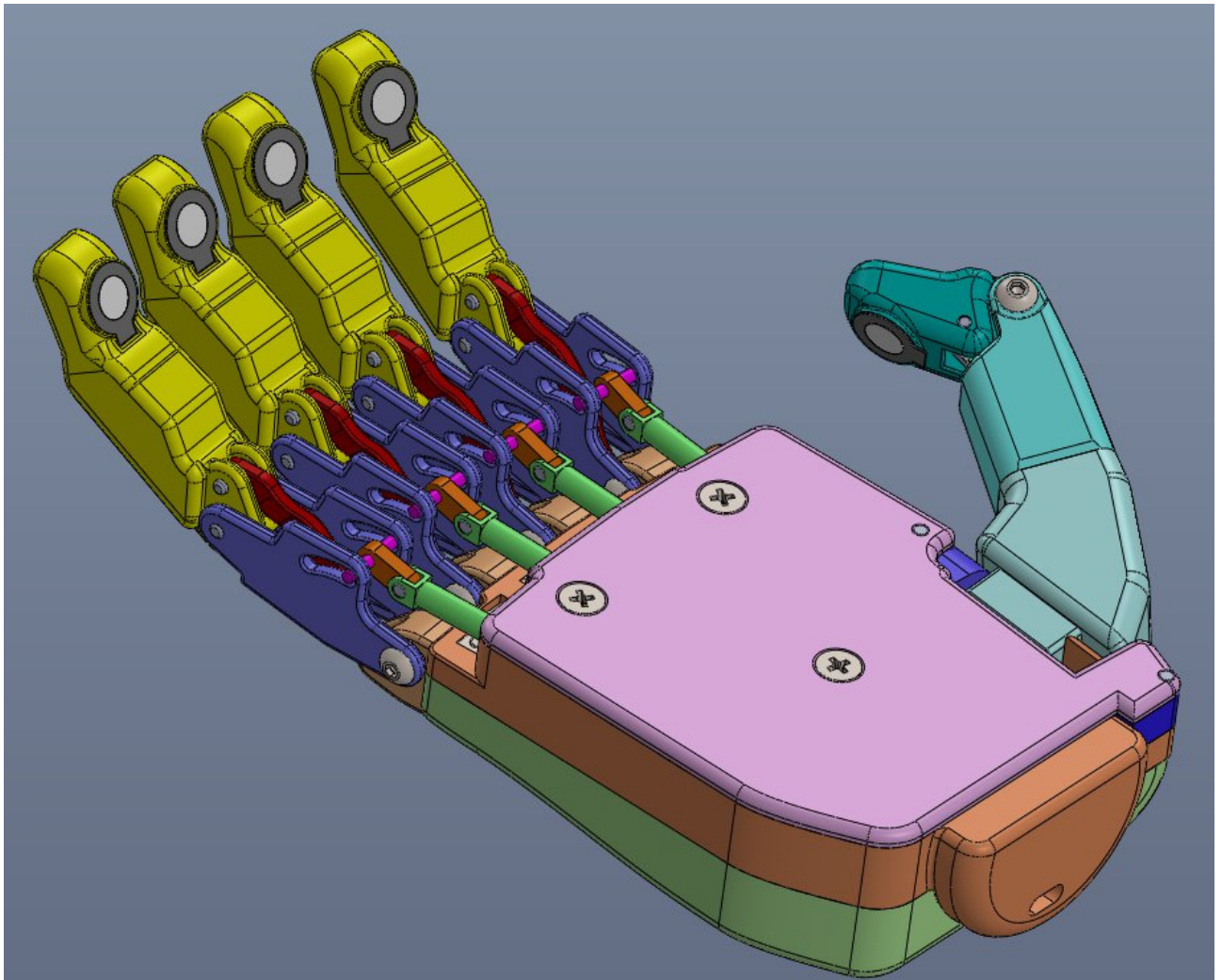


Рисунок 2.7 – Зображення загального виду роботизованої долоні спроектованої в САПР SolidWorks

2.6 Розроблення структурної та технологічної схеми складання

Складання є завершальним етапом виготовлення виробу, під час якого окремі деталі та складальні одиниці з'єднуються у визначеній послідовності з подальшим контролем, регулюванням і перевіркою працездатності [16]. Під час розроблення роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів цей етап є важливим, адже від правильності складання залежить плавність руху пальців, точність роботи механізмів і надійність виробу в цілому.

Під час розроблення структурної схеми складання роботизовану долоню було розділено на окремі деталі та складальні одиниці. До основних складальних одиниць можна віднести Палець II–V СК, Палець великий СК, Долоня СК, Плата СК. На нижньому рівні знаходяться окремі деталі: основа долоні, фаланги пальців, приводи,

осі шарнірів, приводи, електронні компоненти, кріпильні елементи (метизи). Розроблену схему структурного стану наведено в додатку В.

Технологічну схему складання спроектовано відповідно до послідовності встановлення складальних одиниць у базову деталь. На першому етапі виконується комплектування та вхідний контроль деталей: перевіряється якість 3D-друкованих елементів, відповідність розмірів деталей та геометричних форм посадкових місць. На наступному етапі, відносно базової деталі (долоні) виконується складання корпусно-привідного вузла. У внутрішній об'єм долоні встановлюються лінійні двигуни КТР-0905-20L для II-V пальців, а також двигун GA16-020 з редуктором для великого пальця.

Окремими гілками показано складання механізмів II-V пальців, великого пальця. Кріплення елементів здійснюється за допомогою стандартних метизів, що спрощує складання, регулювання та можливе обслуговування виробу. Завершальним етапом є монтаж електронних компонентів, встановлення механізмів пальців у корпус, підключення приводів і датчиків FSR, встановлення кришки та кріпильних елементів. Розроблену послідовність складання наведено в додатку Г.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розроблено конструкцію роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів. На основі попередньо сформованих вимог розроблено кінематичну схему пальця в САПР SolidWorks, визначено геометричні параметри ланок, положення шарнірів і залежність між переміщенням штока лінійного двигуна та згинанням фаланг. Проведені розрахунки зусиль і навантажень дали змогу оцінити роботу механізму, підібрати діаметри валів та визначити залежність сили на кінці пальця від положення штока, що надалі використовується для формування контуру адаптивного керування.

Також було розроблено механізми основних і великого пальця, створено загальний вигляд роботизованої долоні та передбачено розміщення приводів, редуктора, електронної компонентної бази й датчиків тиску. Для підвищення технологічності прийнято рішення використовувати однакові проксимальні та дистальні фаланги для

основних пальців, а антропоморфність конструкції забезпечувати шляхом відповідного розташування посадкових місць на долонній частині. Окремо було враховано і особливості виготовлення деталей методом 3D-друку, використання стандартних метизів, а також розроблено структурну й технологічну схеми складання роботизованої долоні.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО–АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНТУРУ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЗУСИЛЛЯМ ХВАТУ

3.1. Структурна схема системи роботизованої долоні

Для відображення принципу роботи роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів було розроблено структурну схему, яка відображає загальний принцип функціонування системи. Зовнішній вигляд структурної схеми представлено на рисунку 3.1 та показано на кресленні в додатку Д, яке представлено у додатку . Вона складається з наступних груп: джерела живлення, підсистеми керування, електромеханічної частини та підсистеми зворотного зв'язку.

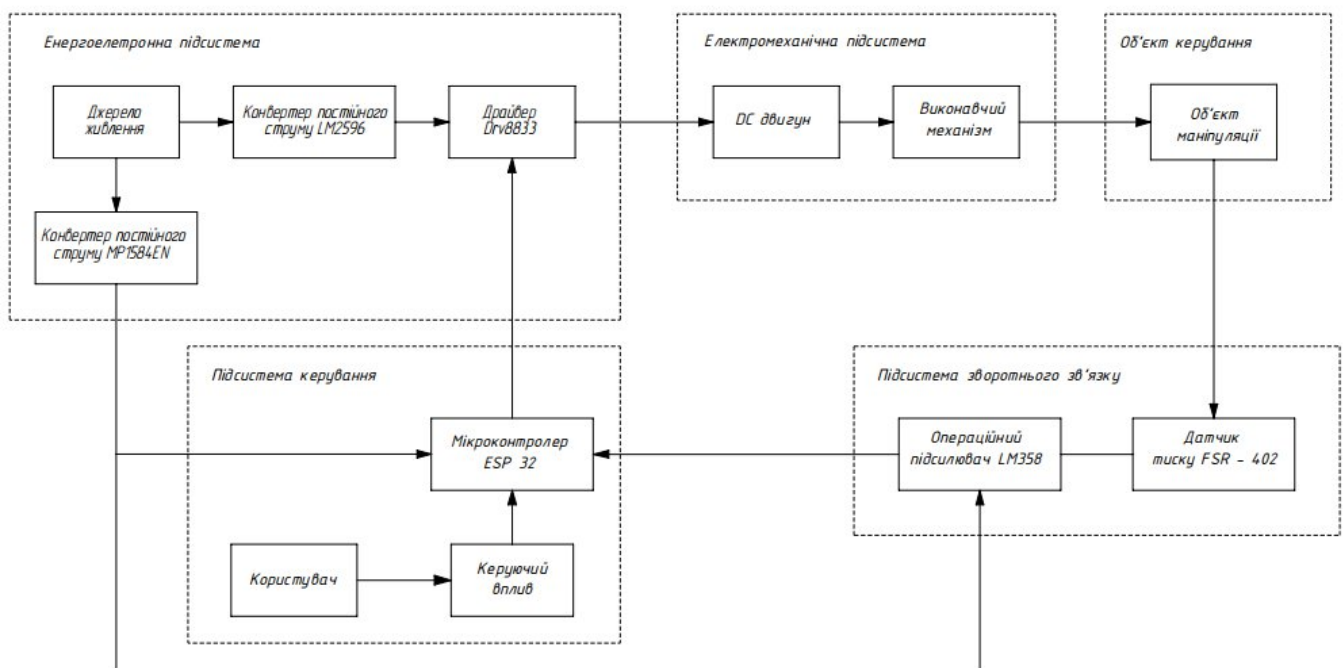


Рисунок 3.1 – Структурна схема роботизованої долоні з використанням шарнірних механізмів

Тут джерело живлення забезпечує енергією електронну та силову частини системи. DC–DC конвертер призначений для формування необхідного рівня напруги живлення мікроконтролера та двигунів. Мікроконтролер виконує функцію центрального керуючого пристрою. Він формує керуючі сигнали для драйвера

DRV8833, який забезпечує керування DC двигунами. Обертальний рух двигунів передається на виконавчий механізм роботизованої долоні, що реалізує згинання пальців і створення зусилля хвату під час взаємодії з об'єктом маніпуляції.

Для реалізації адаптивного керування в системі передбачено контур зворотного зв'язку за зусиллям. Контактна взаємодія пальців з об'єктом фіксується FSR–датчиками які змінюють свій електричний опір залежно від прикладеного навантаження. Сигнал із сенсорів надходить на операційний підсилювач, де здійснюється його попереднє підсилення та узгодження з вхідними рівнями мікроконтролера. Після обробки сигналу мікроконтролер коригує режим роботи приводів, що дозволяє підтримувати необхідне зусилля хвату та зменшити ризик надмірного стискання об'єкта або пошкодження механічної частини роботизованої долоні.

Таким чином, структурна схема наочно демонструє взаємодію функціональних частин та підсистем роботизованої долоні. Вона є основою для подальшого розроблення принципової електричної схеми, а також алгоритму роботи системи адаптивного керування.

3.2. Вибір та обґрунтування електронної компонентної бази

Вибір електронної компонентної бази є важливим етапом реалізації контуру адаптивного керування зусиллям хвату та забезпечення працездатності роботизованої долоні загалом. Компоненти системи повинні забезпечувати приймання сигналів від датчиків тиску, їх попередню обробку, формування керуючих сигналів для драйверів двигунів, а також живлення електронної та силової частин роботизованої долоні. З урахуванням розробленої структурної схеми до складу електронної компонентної бази входять: мікроконтролер ESP32, драйвер двигуна DRV8833, датчики тиску FSR 402 Short, операційний підсилювач LM358, DC–DC перетворювачі LM2596 і MP1584EN та акумуляторний блок 21700 5000 mAh 7,4 V 2S.

Основним елементом підсистеми керування обрано ESP32, який виконує функцію центрального керуючого пристрою. У створеній системі він приймає аналогові сигнали від датчиків тиску, виконує їх програмну обробку, порівнює

отримані значення із заданими порогами та формує PWM–сигнали для керування драйвером двигунів. Доцільність застосування ESP32 пояснюється наявністю достатньої кількості портів введення-виведення інформації, вбудованих аналогово–цифрових перетворювачів та достатньою продуктивністю для реалізації алгоритму адаптивного керування [25]. Зовнішній вигляд плати керування на основі мікроконтролера ESP32 зображено на рисунку 3.2.

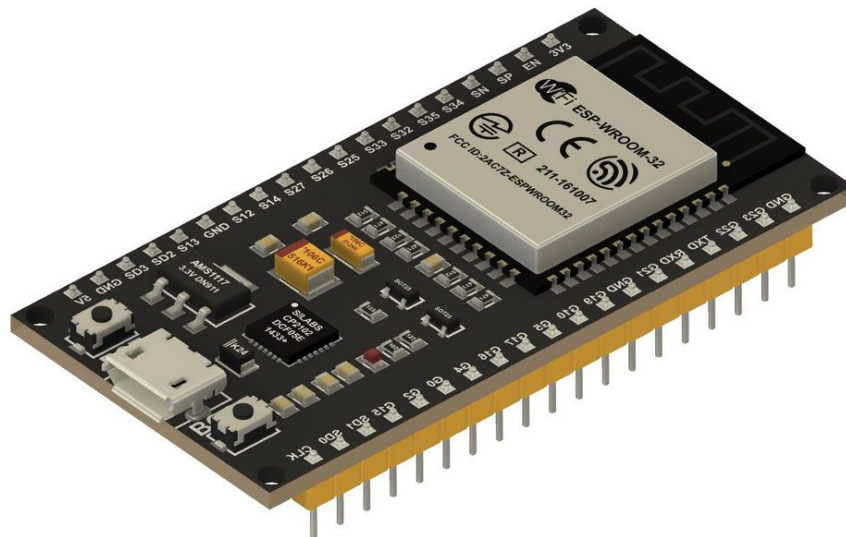


Рисунок 3.2 – Мікроконтролер ESP32 [26]

Для керування двигунами постійного струму обрано драйвер DRV8833. Він являє собою двоканальний Н–мостовий драйвер [27], який забезпечує зміну напрямку обертання двигунів та регулювання їх роботи за допомогою PWM–сигналів. Його використання дозволяє відокремити малопотужну логічну частину, що формується мікроконтролером ESP32, від силового навантаження приводів. Зовнішній вигляд драйвера DRV8833 зображено на рисунку 3.3.

Для реалізації зворотного зв’язку за зусиллям хвату обрано датчики тиску FSR 402 Short. Датчики типу FSR змінюють свій електричний опір залежно від сили [29], прикладеної до чутливої поверхні, що дає змогу визначати момент контакту пальця з об’єктом і зміну поточного навантаження.

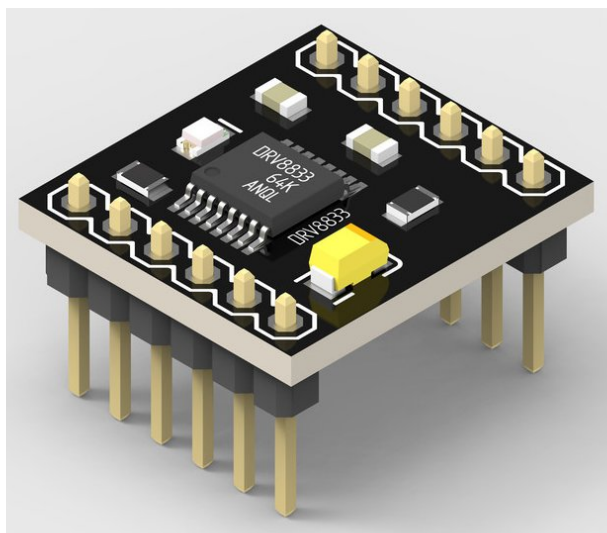


Рисунок 3.3 – Драйвер двигуна DRV8833 [28]

У конструкції роботизованої долоні такі датчики доцільно встановлювати на дистальних частинах пальців або на спеціально передбачених опорних площадках. Зовнішній вигляд датчика тиску FSR 402 Short зображено на рисунку 3.4.

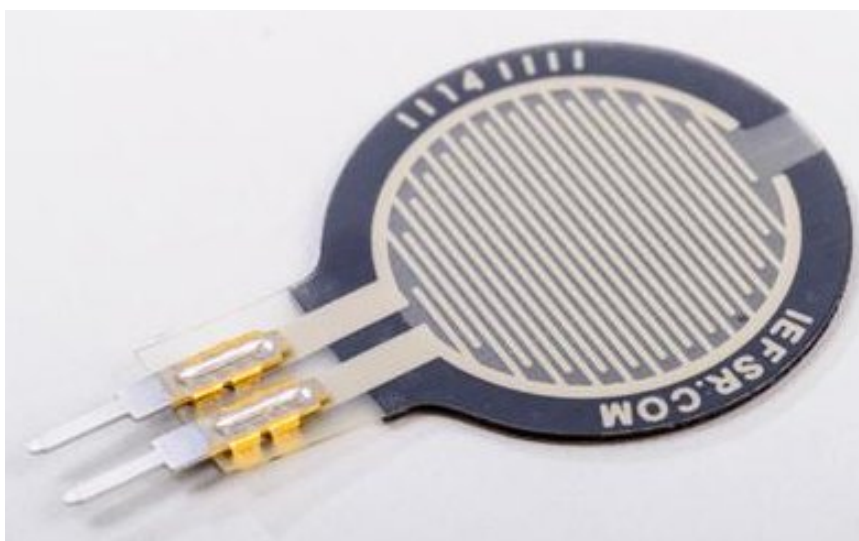


Рисунок 3.4 – Датчик тиску FSR 402 Short [30]

Для попередньої обробки сигналу з FSR–датчиків обрано операційний підсилювач LM358 [31]. Він може працювати від однополярного джерела живлення та містить два операційні підсилювачі в одному корпусі, що є зручним для обробки низькорівневих сигналів від датчиків. У розробленій системі LM358 використовується для підсилення та узгодження сигналу перед його подачею на аналоговий вхід мікроконтролера ESP32. Оскільки в системі передбачено

використання п'яти FSR-датчиків, для здійснення попередньої обробки сигналів необхідно забезпечити п'ять незалежних каналів підсилення. Операційний підсилювач LM358 містить два підсилювальні канали в одному корпусі, тому для обробки сигналів від п'яти датчиків доцільно використати три мікросхеми LM358. Зовнішній вигляд операційного підсилювача LM358 зображено на рисунку 3.5.

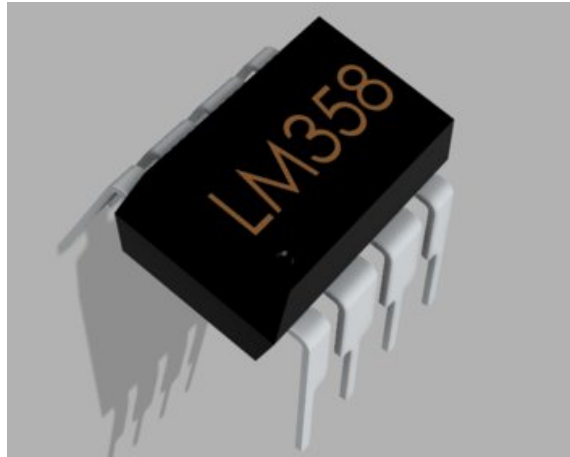


Рисунок 3.5 – Операційний підсилювач LM358 [32]

Джерелом живлення роботизованої долоні обрано акумуляторний блок 21700 5000 mAh 7,4 V 2S, який складається з двох послідовно з'єднаних Li-ion елементів формату 21700. Згідно з технічною специфікацією [33], акумулятор має номінальну напругу 7.4 В, ємність 5000 mAh та енергоємність 37 Wh, що дозволяє використовувати його як автономне джерело живлення для електронної та електромеханічної частин роботизованої долоні.



Рисунок 3.6 – Акумуляторний блок 21700 5000 mAh 7,4 V 2S [34]

Використання такого акумулятора є доцільним з огляду на його компактність, достатню енергоємність та можливість розміщення в межах конструкції. Акумуляторний блок 21700 5000 mAh 7,4 V 2S зображено на рисунку 3.6. Для узгодження напруги акумуляторного блока з робочими напругами електронних компонентів у системі передбачено два DC–DC перетворювачі. Для живлення силової частини використовується понижувальний перетворювач LM2596, налаштований на вихідну напругу 6 В, що дозволяє подавати стабілізовану напругу на драйвер двигунів та приводи [35]. DC–DC перетворювач LM2596 зображено на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – DC–DC перетворювач LM2596 [36]

Для живлення плати керування обрано MP1584EN [37], який формує стабілізовану напругу 3,3 В для мікроконтролера ESP32 та зменшує вплив просідань напруги від роботи двигунів на логічну частину системи. DC–DC перетворювач MP1584EN зображено на рисунку 3.8.

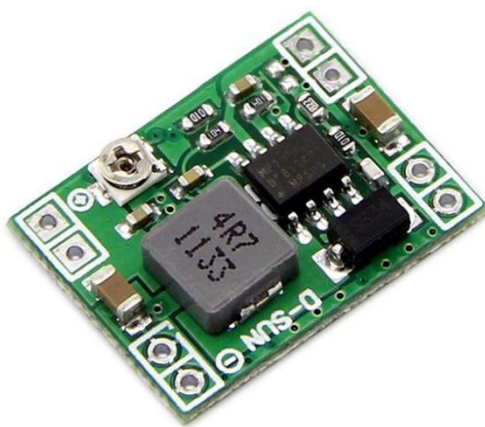


Рисунок 3.8 – DC–DC перетворювач MP1584EN [38]

Таким чином, обрана електронна компонентна база забезпечує реалізацію основних функцій роботизованої долоні: зчитування сигналів від датчиків тиску, їх попередню аналогову обробку, формування керуючих сигналів та керування двигунами постійного струму. Мікроконтролер ESP32 виконує роль центрального елемента керування, DRV8833 забезпечує силове керування приводами, FSR 402 Short формують зворотний зв'язок за контактним зусиллям, LM358 виконує підсилення сигналів датчиків, а акумуляторний блок 21700 5000 mAh 7,4 V 2S забезпечує автономне живлення системи. Обрані компоненти є достатніми для подальшого розроблення принципової електричної схеми та алгоритму роботи контуру адаптивного керування зусиллям хвату.

3.3. Розроблення електричної принципової схеми

Для повного уявлення про склад та принцип роботи виробу було здійснено розробку електричної принципової схеми. На ній зображені всі електричні з'єднання та елементи або пристрої, необхідні для реалізації в приладах заданих електричних процесів. Зовнішній вигляд схеми представлено на рисунку 3.9 та показано на кресленні, розміщеному в додатку Е.

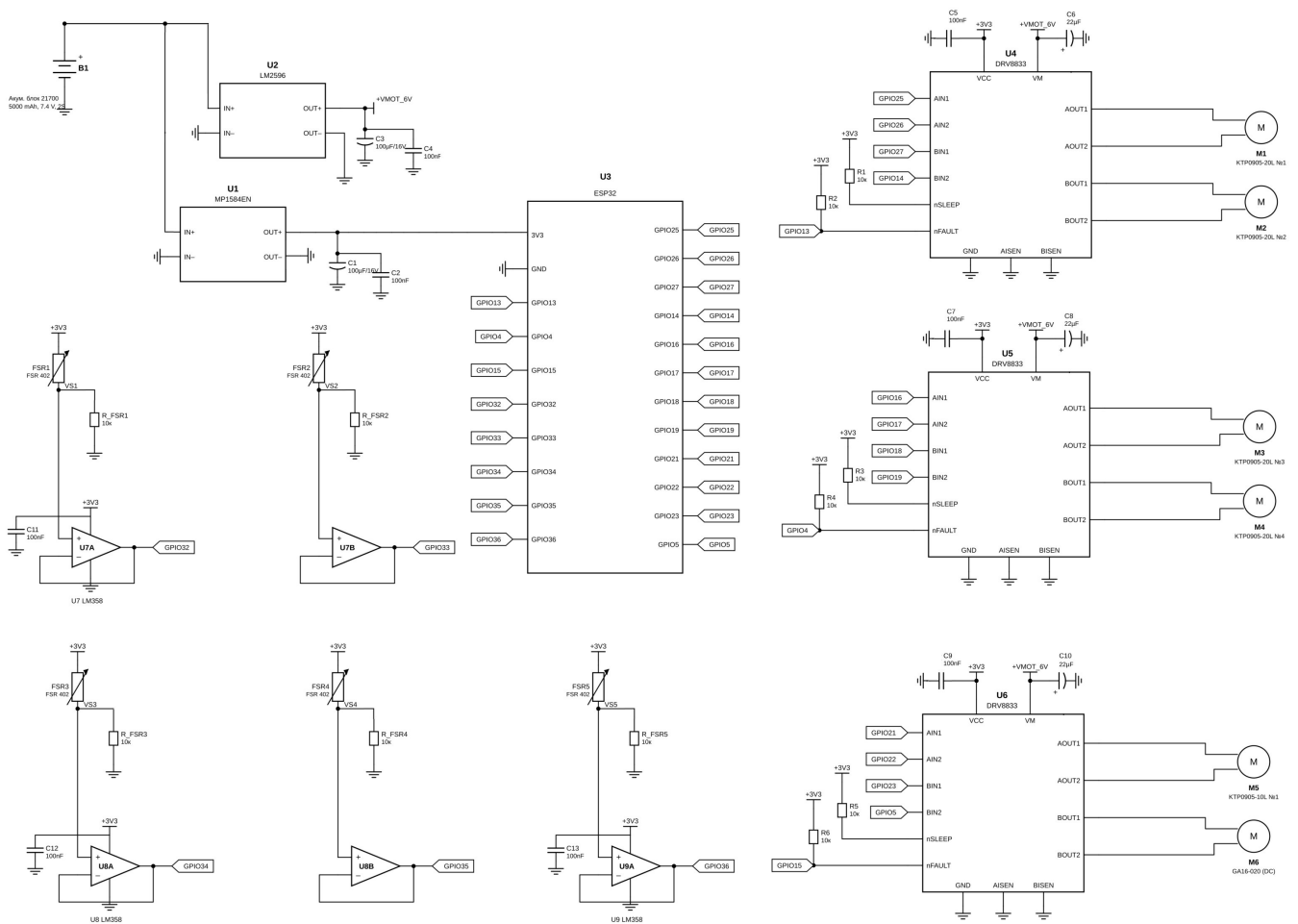


Рисунок 3.9 – Електрична принципова схема роботизованої долоні

3.4. Розроблення алгоритму функціонування контуру адаптивного керування

Проектування алгоритму функціонування контуру адаптивного керування є завершальним етапом створення роботизованої долоні. Його основне призначення полягає у поєднанні отриманих під час кінетостатичного моделювання даних з фактичними показами, отриманими від FSR–датчиків під час контакту з об’єктом. Оскільки в попередніх розділах було визначено залежність контактного зусилля F_d від положення штока лінійного двигуна S , ці дані будуть використані як основа для програмного керування приводом. При цьому сигнал з датчика тиску забезпечує зворотний зв’язок, за яким мікроконтролер визначає момент контакту, оцінює величину прикладеного зусилля та коригує подальше переміщення штока. Таким чином, алгоритм має забезпечувати перехід від простого позиційного керування пальцем до адаптивного керування силою хвату залежно від реальної взаємодії з

залежність $F_d = f(S)$, розраховані дані $\vartheta_p = f(S)$ $\vartheta_d = f(S)$, а також службові параметри алгоритму: мінімальний поріг виявлення контакту F_c , допустима зона нечутливості ϵ , крок корекції положення штока ΔS та граничне положення штока $S_{\min}$. Після отримання керуючого впливу u мікроконтролер обробляє вхідний сигнал і формує керуючий PWM-сигнал для драйвера двигуна. Драйвер, відповідно до цього сигналу, змінює режим живлення лінійного двигуна $U_{\text{кер}} = f(u)$, внаслідок чого відбувається переміщення штока. Таким чином, положення штока визначається керуючою напругою, що подається на двигун через драйвер $S = f(U_{\text{кер}}, t)$. Далі за поточним значенням переміщення штока S підбираються завчасно визначені кути згину фаланг $\vartheta_p = f(S)$ $\vartheta_d = f(S)$, після чого на основі розрахункової моделі обчислюється очікуване значення контактної сили $F_d = f(\vartheta)$.

Одночасно із цим сигнал від FSR-датчика, встановленого у зоні контакту пальця з предметом, передається на операційний підсилювач, де виконується його попередня обробка та узгодження з вхідними рівнями мікроконтролера. Після цього оброблений сигнал надходить на аналоговий вхід мікроконтролера, де визначається фактичне значення контактного зусилля F_{FSR} . Якщо значення F_{FSR} є меншим за експериментально заданий поріг F_c , система вважає, що контакт із предметом ще не відбувся, і продовжує переміщення штока до моменту виявлення контакту або досягнення граничного положення $S_{\min}$. У разі досягнення $S_{\min}$ без фіксації контакту привід зупиняється.

Після виявлення контакту система переходить у режим керування силою. У цьому режимі мікроконтролер порівнює розрахункове значення контактної сили з фактичним сигналом FSR-датчика та визначає похибку за силою у формулі 3.1:

$$e = F_d(S) - F_{FSR} \quad (3.1)$$

Якщо абсолютне значення похибки не перевищує допустиму зону нечутливості ϵ , фактичне зусилля вважається узгодженим з розрахунковим, а шток утримується в поточному положенні. Якщо $e > 0$, це означає, що фактичне зусилля є меншим за розрахункове, тому мікроконтролер формує команду на додаткове висування штока

на величину ΔS . Якщо $e < 0$ фактичне зусилля перевищує розрахункове значення, тому система припиняє подальше стискання.

У режимі утримання додатково контролюється можливе прослизання предмета. Для цього аналізується швидкість зміни сигналу FSR-датчика. Якщо виконується умова різкого зменшення сигналу, наведена у формулі 3.2:

$$\frac{d_{FSR}}{dt} < -\Delta F \quad (3.2)$$

Це може свідчити про втрату контакту або початок прослизання предмета. У такому випадку мікроконтролер формує короткочасну команду на додаткове дотискання пальця, після чого сигнал датчика знову зчитується і цикл корекції повторюється. Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє поєднати розрахункову модель механізму з фактичним зворотним зв'язком від FSR-датчика та забезпечити адаптивне керування зусиллям хвату роботизованої долоні.

Висновки до розділу 3

Під час програмно-апаратної реалізації контуру адаптивного керування зусиллям хвату було розроблено структурну схему роботизованої долоні, яка відображає принцип роботи системи. В процесі було виділено основні функціональні групи та їх елементи. Здійснено вибір компонентної бази, під час якого були визначені всі необхідні для реалізації задуму компоненти, які в подальшому були позначені на електричній принциповій схемі. Відповідно до цих компонентів, а також виведеної під час розрахунків залежності між зусиллям на кінці пальця та ходом штока двигуна було розроблено блок-схему і алгоритм функціонування контуру адаптивного керування, який передбачає коригування параметрів керуючого впливу і передачу сигналу для згину пальців на основі інформації з ланки зворотного зв'язку від датчиків тиску.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломного проекту було створено роботизовану долоню з використанням шарнірних механізмів та контуром адаптивного керування зусиллям хвату. Завдяки детальному огляду біомеханічних особливостей долоні людини вдалося сформувати розуміння її будови, функціонального призначення пальців та ролі суглобів, фаланг і елементарного зворотного зв'язку під час захоплення предметів. Проведений огляд сучасних зразків роботизованих протезів, зокрема Bebionic V2 та BIT Hand C, дав змогу визначити основні конструктивні рішення для подальшого проектування. А саме: використання шарнірно–важільних механізмів з двофаланговою схемою, розміщення приводів у долонній частині, окреме проектування конструкції великого пальця. Таким чином, детальне вивчення анатомії та аналіз наявних технічних рішень стали основою для реалізації поставленої задачі з урахуванням як конструктивних особливостей так і антропоморфічного загального вигляду системи.

На основі отриманих аналітичних даних було розроблено кінематичну схему пальця в САПР SolidWorks. У процесі моделювання було визначено геометричні параметри ланок, кути фаланг і залежність між переміщенням штока лінійного двигуна та згинанням пальця. Розроблена кінематична схема стала основою для створення конструкції механізму пальця, розміщення привідних елементів. Також було враховано особливості виготовлення деталей методом 3D–друку та використання стандартних метизів для підвищення технологічності виробу. Під час розрахунків підібрано діаметри валів з урахуванням умов міцності і встановлено залежність сили на кінці пальця від положення штока лінійного двигуна. Розраховані параметри стали основою для формування контуру адаптивного керування, оскільки дали змогу пов'язати переміщення виконавчого механізму з очікуваним контактним зусиллям. У результаті розрахунків та проектування було створено модель роботизованої долоні, що містить механізми основних пальців і окремий механізм великого пальця, долонню частину з розміщенням приводів, редуктора, електронної

компонентної бази та каналів для підключення датчиків. Окрему увагу було приділено створенню контуру адаптивного керування зусиллям хвату. Для цього сформовано структурну схему системи, обрано електронну компонентну базу та розроблено відповідний алгоритм функціонування. У результаті виконання дипломного проєкту вдалось розробити антропоморфну конструкцію роботизованої долоні з обґрунтованою кінематикою руху пальців та автоматизованим керуванням силою хвату шляхом впровадження контуру зворотного зв'язку.

Перелік використаних літературних джерел

1. Arias D. G., Black A. C., Varacallo M. A. Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Hand Bones. StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2026. Updated 2023 Jul 30. URL:
2. Gorjestani A., Cheraghpour Samavati F. ATLAS Finger: a Prosthetic Finger Mechanism for Robotic applications. International Journal of Robotics. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 1–10.
3. Arauz P., Sisto S. A., Kao I. Experimental study of the optimal angle for arthrodesis of fingers based on kinematic analysis with tip-pinch manipulation. Journal of Biomechanics. 2016. Vol. 49. P. 4009–4015. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2016.10.047.
4. Abdul Rahaman A. H., Shiakolas P. S. A Carpometacarpal Thumb Tracking Device for Telemanipulation of a Robotic Thumb: Development, Prototyping, and Evaluation. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 1301. DOI: 10.3390/app15031301.
5. Woods S. L., Fisher C. Development of a self-contained robotic hand with dexterous grasping capabilities for research applications. SAIEE Africa Research Journal. 2023. Vol. 114, No. 3. P. 87–92. DOI: 10.23919/SAIEE.2023.10214228.
6. Ingram J. N., Kording K. P., Howard I. S., Wolpert D. M. The statistics of natural hand movements. Experimental Brain Research. 2008. Vol. 188. P. 223–236. DOI: 10.1007/s00221-008-1355-3.
7. Feix T., Romero J., Schmiedmayer H.-B., Dollar A. M., Kragic D. The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types. IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2016. Vol. 46, No. 1. P. 66–77. DOI: 10.1109/THMS.2015.2470657.
8. Bain G. I., Polites N., Higgs B. G., Heptinstall R. J., McGrath A. M. The functional range of motion of the finger joints. The Journal of Hand Surgery: European Volume. 2015. Vol. 40, No. 4. P. 406–411. DOI: 10.1177/1753193414533754.
9. Li X., Wen R., Duanmu D., Huang W., Wan K., Hu Y. Finger Kinematics during Human Hand Grip and Release. Biomimetics. 2023. Vol. 8, No. 2. Article 244. DOI: 10.3390/biomimetics8020244.
10. Kashef S. R., Amini S., Akbarzadeh A. Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria. Mechanism

and Machine Theory. 2020. Vol. 145. Article 103677. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103677.

11. Іннервація [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Іннервація> (дата звернення: 20.04.2026).
12. Пропріоцепція [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Пропріоцепція> (дата звернення: 20.04.2026).
13. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618. DOI: 10.1682/JRRD.2011.10.0188.
14. Grazioso A., Potenza D. C., Zappatore G. A., Reina G. Performance Analysis of the Underactuated Finger for Adam's Hand. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 149492–149501. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3477249.
15. Wang Y., Tian Y., She H., Jiang Y., Yokoi H., Liu Y. Design of an Effective Prosthetic Hand System for Adaptive Grasping with the Control of Myoelectric Pattern Recognition Approach. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, No. 2. Article 219. DOI: 10.3390/mi13020219
16. Bebionic prosthetic hand, 2017. Science Photo Library. URL: <https://www.sciencephoto.com/media/1484267/view/bebionic-prosthetic-hand-2017> (дата звернення: 20.04.2026).
17. Owen M., Au C., Fowke A. Development of a Dexterous Prosthetic Hand. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2018. Vol. 18, No. 1. Article 010801. DOI: 10.1115/1.4038291.
18. Wang Y., Tian Y., Li Z., She H., Jiang Z. Research on Adaptive Grasping with a Prosthetic Hand Based on Perceptual Information on Hardness and Surface Roughness. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, No. 6. Article 675. DOI: 10.3390/mi15060675.
19. Заховайко О. П. Теорія механізмів і машин : курс лекцій для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин». Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 243 с.
20. Теорія механізмів і машин : конспект лекцій. Умань : Уманський національний університет садівництва, 2020. 102 с.

21. Павленко Ж. О., Богдан Г. А. Деталі та вузли приладів. Розділ «Опір матеріалів, загальні положення» : методичні вказівки до практичних занять для студентів приладобудівного факультету напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування» денної форми навчання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 70 с
22. Зображення мікродвигуна постійного струму GA16-020 з редуктором [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://m.media-amazon.com/images/I/61LILcWbuDL._SX522_.jpg (дата звернення: 15.05.2026).
23. Зображення набору конічних зубчастих коліс [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ae-pic-a1.aliexpress-media.com/kf/S2c8beccecc57f4c7293df43501b462c2e0.jpg> (дата звернення: 15.05.2026).
24. Тичков В. В., Трембовецька Р. В., Кісіль Т. Ю. Конструювання приладів. Вимоги та правила оформлення курсового проекту : навчальний посібник. Черкаси : ЧДТУ, 2015. 148 с.
25. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 5.2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 22.05.2026).
26. Зображення мікроконтролера ESP32 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grabcad.com/screenshots/pics/8c31b29aeb789b892fc334fb15bfe631/large.JPG> (дата звернення: 22.05.2026).
27. Texas Instruments. DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/gpn/DRV8833> (дата звернення: 22.05.2026).
28. Зображення драйвера двигуна DRV8833 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grabcad.com/screenshots/pics/a66b5a10a138d4b9453f956a9a04ed38/large.jpg> (дата звернення: 22.05.2026).
29. Interlink Electronics. FSR 400 Series Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.sparkfun.com/assets/8/a/1/2/0/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).

30. Зображення датчика тиску FSR 402 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://a.pololu-files.com/picture/0J5343.1200.jpg?5deeb1eef0f51fef0bc35d27731b5b1a> (дата звернення: 22.05.2026).
31. Texas Instruments. LM358 Industry-Standard Dual Operational Amplifiers Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).
32. Зображення операційного підсилювача LM358 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grabcad.com/screenshots/pics/c488ca671f730f9fad0faf966b92b7de/large.png> (дата звернення: 22.05.2026).
33. RadioMaster. 21700 5000mAh Battery for TX16S and TX12 MKII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiomasterrc.com/products/21700-5000mah-battery-for-tx16s-mkii> (дата звернення: 22.05.2026).
34. Зображення акумуляторного блока 21700 5000 mAh 7,4 V 2S [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://flymod.net/usr/img/shop_product_img/i18/17816/koe5ZJA3Ipzw_i3.jpg (дата звернення: 22.05.2026).
35. Texas Instruments. LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).
36. Зображення DC–DC перетворювача LM2596 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mini-tech.com.ua/image/cache/catalog/dc_dc_LM2596_1-550x550.jpg (дата звернення: 22.05.2026).
37. Monolithic Power Systems. MP1584: 3A, 1.5MHz, 28V Step-Down Converter Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kosmodrom.com.ua/pdf/MP1584EN.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).
38. Зображення DC–DC перетворювача MP1584EN [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

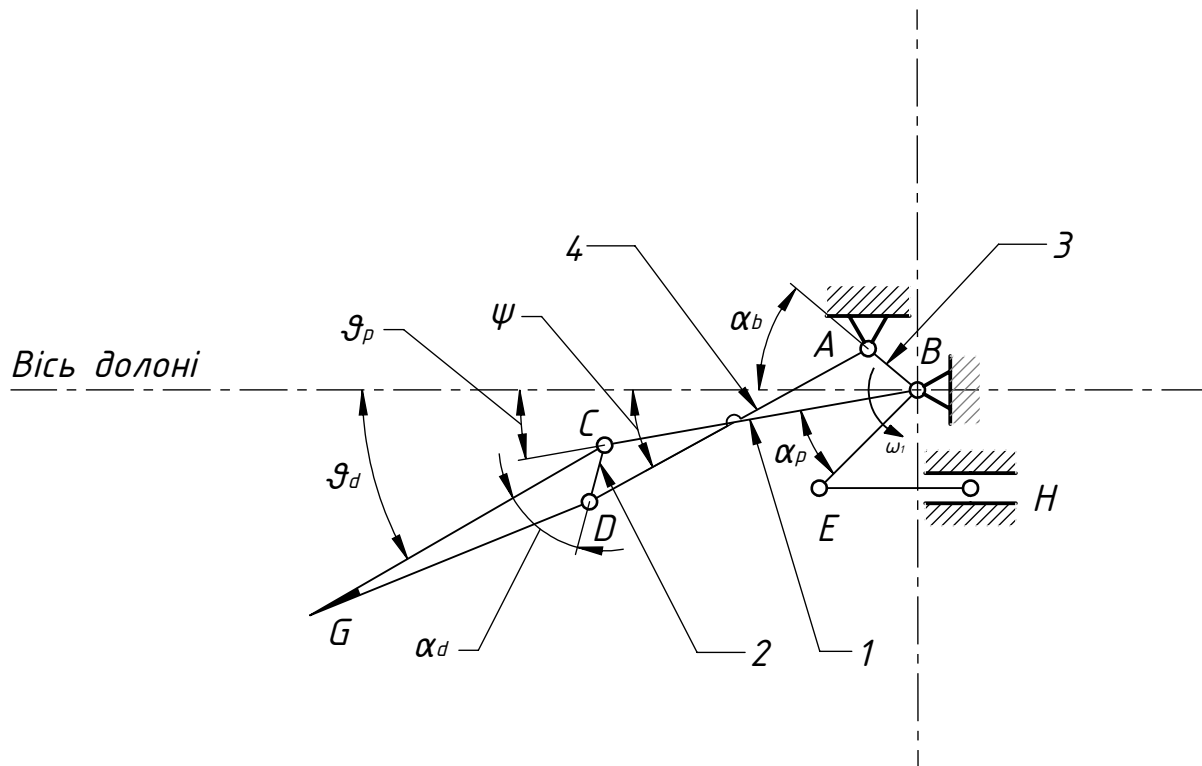
https://snapeda.s3.amazonaws.com/partpics/Seed%20Technology_106990005_30856.jpg (дата звернення: 22.05.2026).

39. Конструювання приладів. Вимоги та правила оформлення курсового проєкту : навчальний посібник / уклад.: В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька, Т. Ю. Кісіль. Черкаси : ЧДТУ, 2015. 148 с.
40. Вивчення правил оформлення конструкторської документації (схеми електричні принципів): методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» для студентів радіо- і електроспеціальностей / уклад. Н. М. Коломийчук. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 29 с.
41. ДСТУ ISO 5807:2016. Оброблення інформації. Символи та угоди щодо документації стосовно даних, програм та системних блок-схем, схем мережевих програм та схем системних ресурсів (ISO 5807:1985, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
42. ДСТУ ГОСТ 2.001:2006. Єдина система конструкторської документації. Загальні положення (ГОСТ 2.001-93, IDT).

Додаток А

КІНЕМАТИЧНА СХЕМА

ДПБ.ПБ-22.10.1720.006



Позначення:

1 - ланка BC = 42 мм, проксимальна фаланга

2 - ланка CD = 7.75 мм, з'єднувальна

3 - Ланка AB = 8.5 мм, основа механізму

4 - Ланка AD = 39.90 мм, ведена

5 - Ланка GC = 45 мм, дистальна фаланга

Шарнір B - МСР суглоб

Шарнір C - РІР суглоб

$\alpha_d = 45^\circ$ - кут між проксимальною та дистальною фалангами

$\alpha_p = 35^\circ$ - Кут між напрямом дії штока двигуна та проксимальною фалангою

$\alpha_b = 40^\circ$ - Кут між основою механізму та вісю долоні

ДПБ.ПБ-22.10.1720.006

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Словінський П.		
Перев.		Вонсевич К.П.		
Н. контр.				
Затв.		Вонсевич К.П.		

Шарнірно-важільний механізм пальця

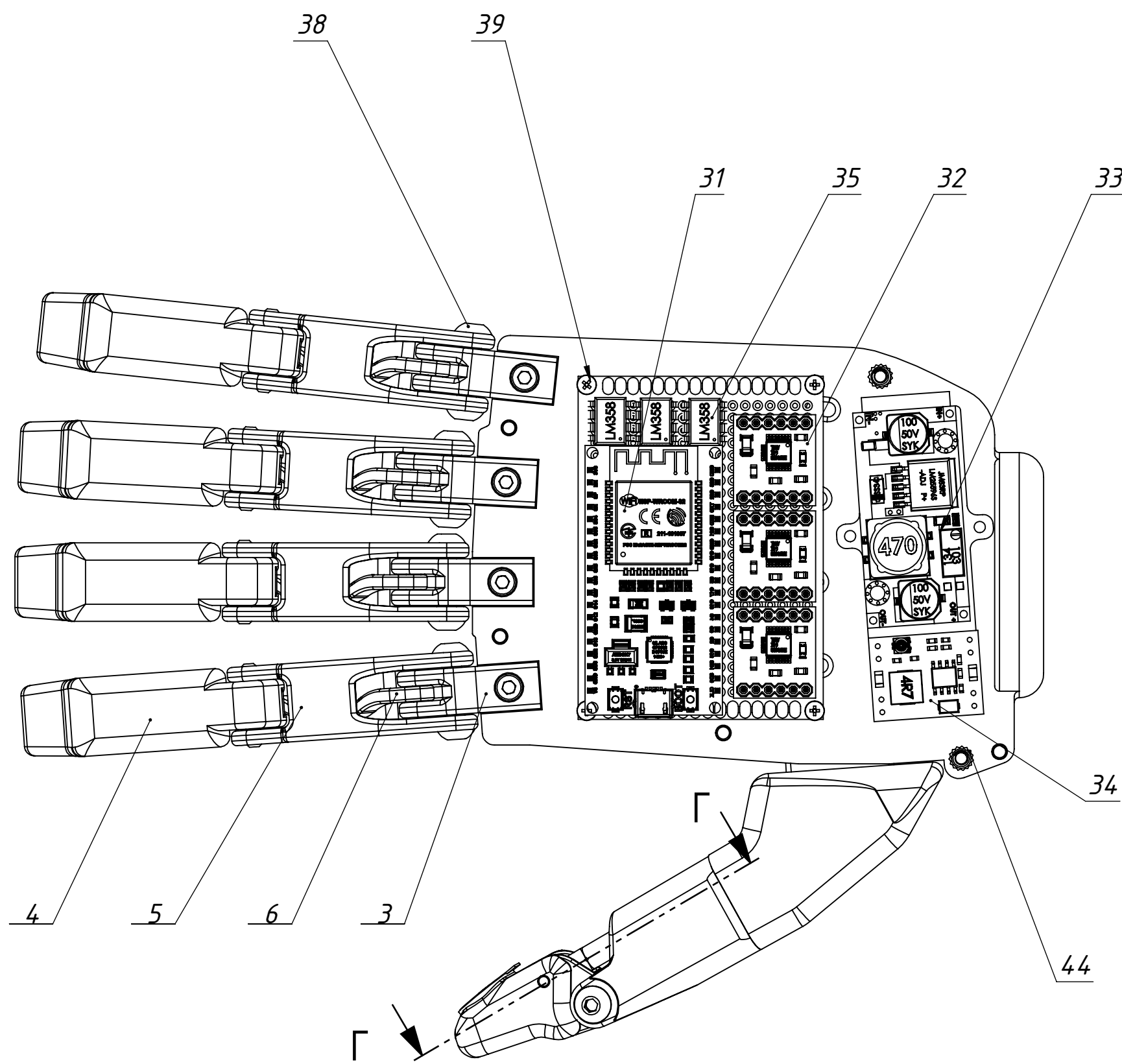
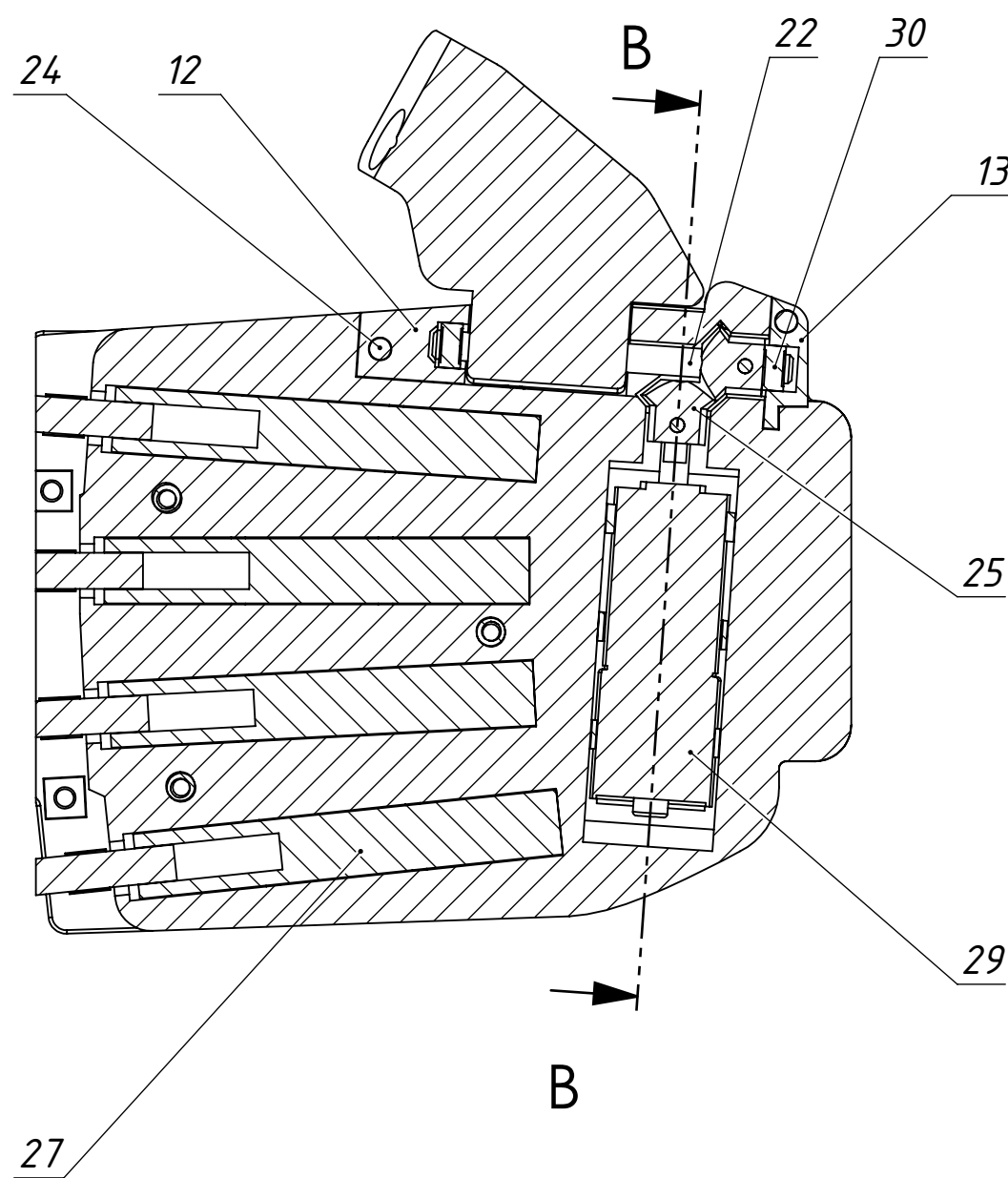
Кінематична схема

Літ.	Масштаб
	1:1
Аркуш	Аркушів
ФРП, КПІ ім. Ігоря Сікорського	

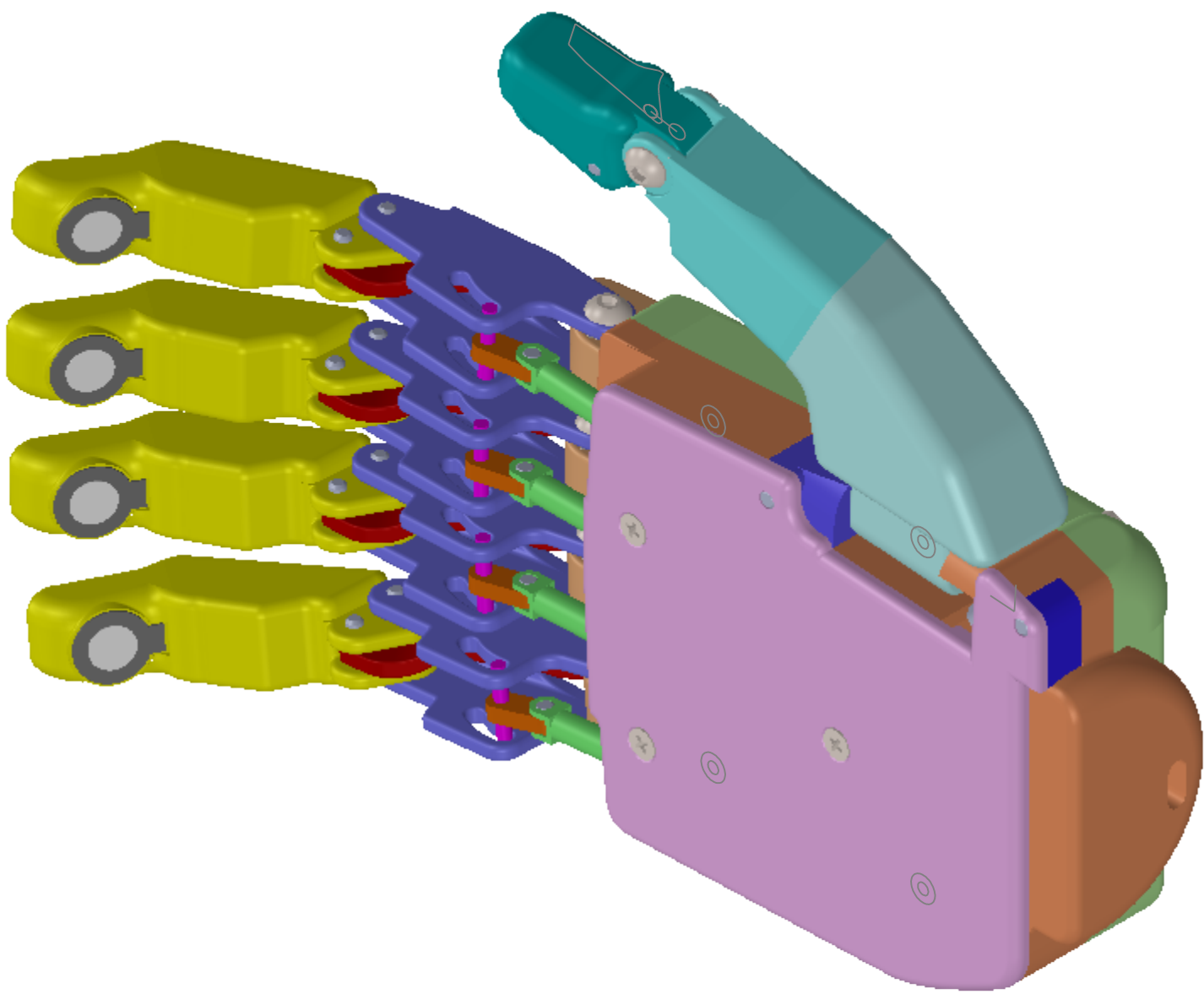
Додаток Б

СКЛАДАЛЬНИЙ КРЕСЛЕННИК

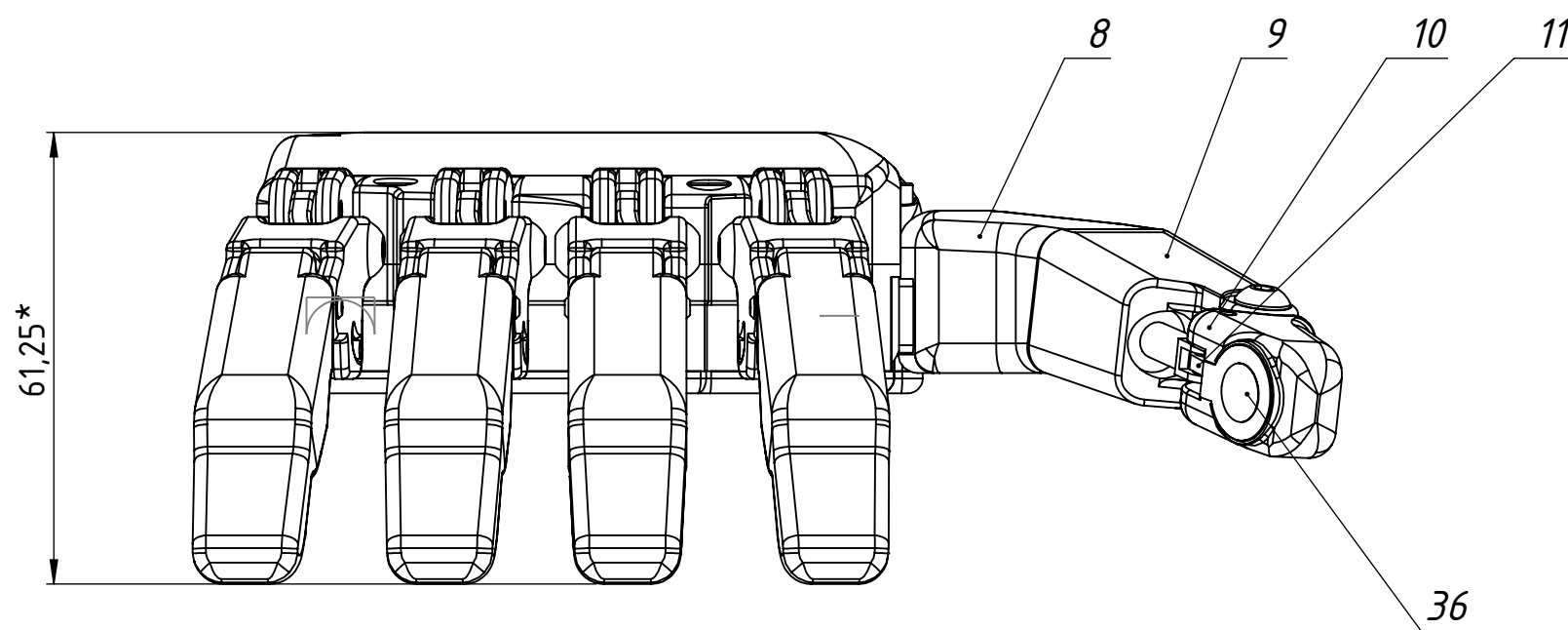
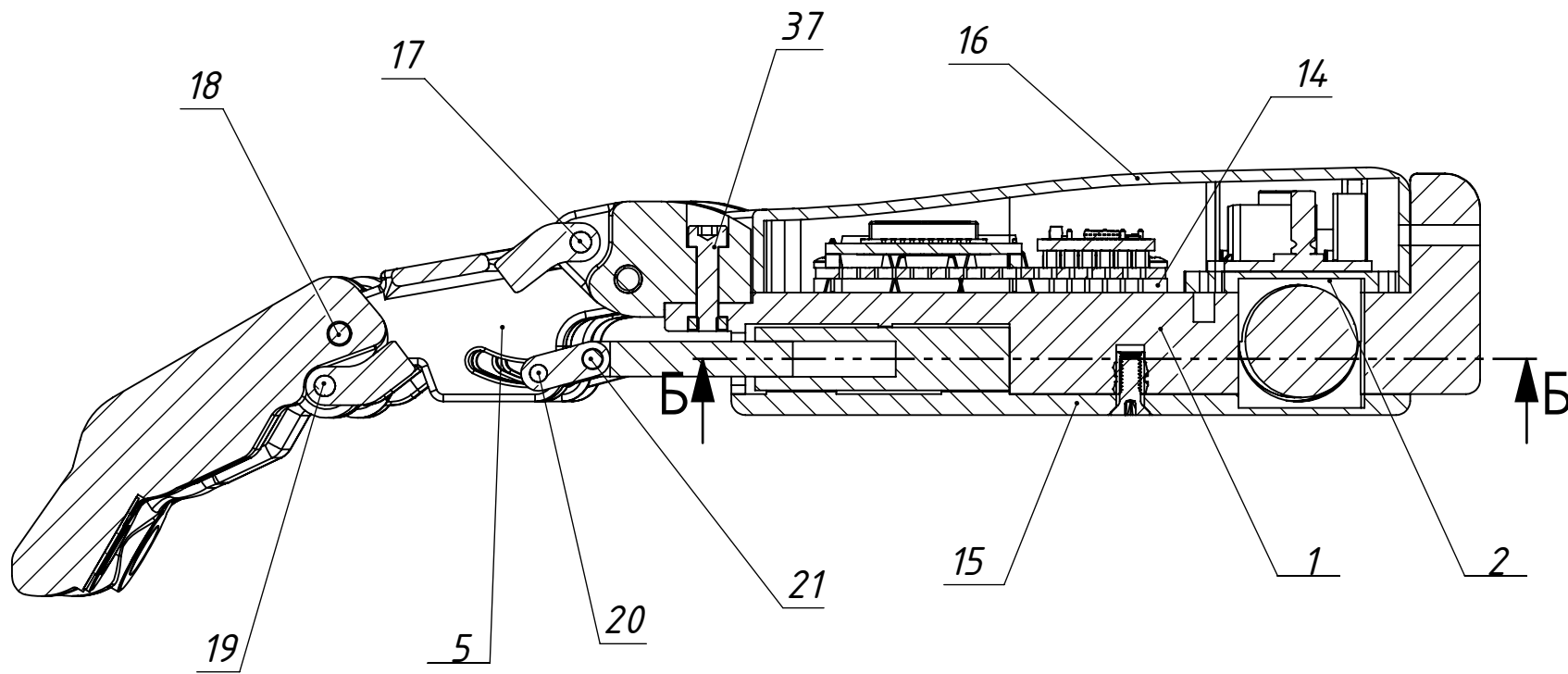
Б-Б



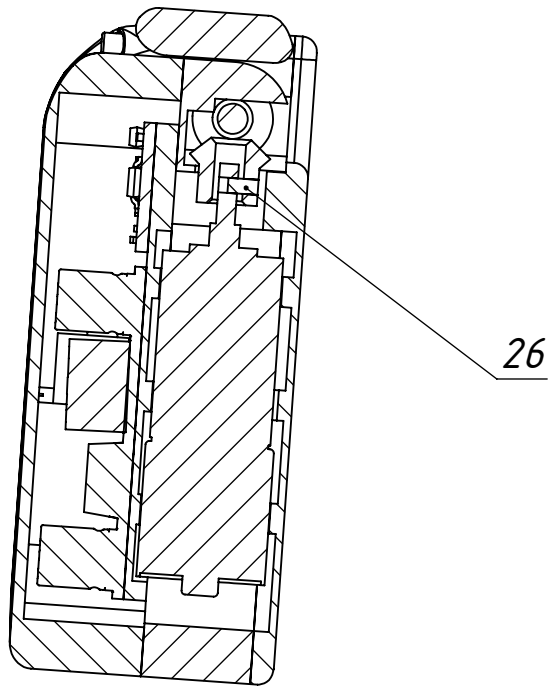
Аксонетрична проекція



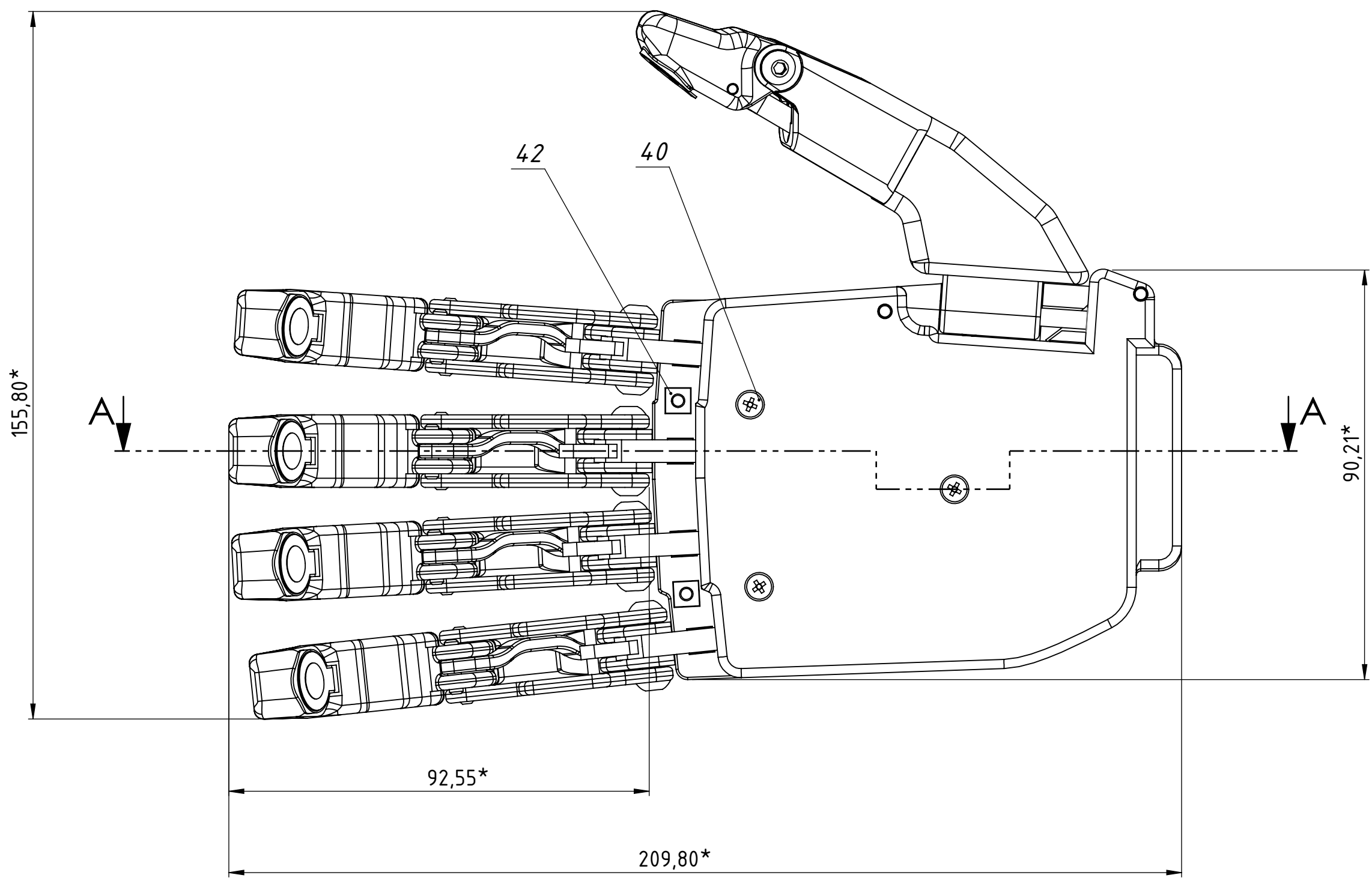
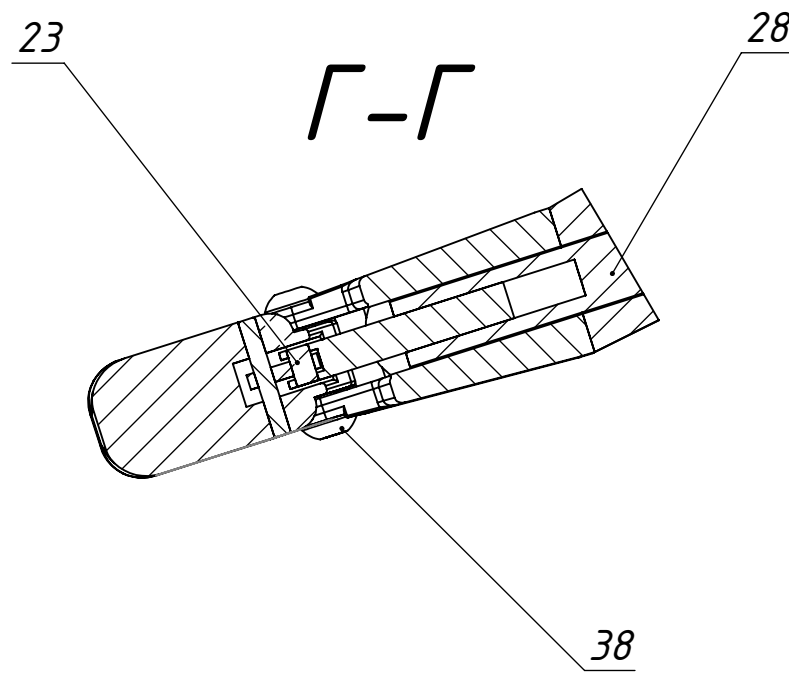
А-А



Б-Б



Г-Г



- Технічні вимоги:
- * Розміри для довідок
 - Деталі 1-16 виконати з PLA з використанням FDM друку
 - Деталі орієнтувати з опорою на найбільшу плоску базову поверхню
 - Друк виконати з висотою шару 0.2 мм
 - Друк виконати з заповненням 60 - 100 %
 - Вихідний контроль: перевірка відповідності розмірів згідно до 3Д моделей
 - Проводи електронних компонентів прокласти та зафіксувати так, щоб виключити їх потрапляння в зони руху шарнірних і важільних механізмів.
 - Гвинтові з'єднання затягувати з обмеженим зусиллям, не допускаючи деформації або руйнування деталей.
 - Шток лінійного двигуна з'єднувати з шарнірним механізмом у повністю висунутому положенні для забезпечення правильного початкового положення ланок механізму.

ДПБ.ПБ22.10.1702.000 СК

Роботизована долоня з використанням шарнірних механізмів

Літ. Маса Масштаб 1:1

Складальний кресленик

ФРП, КПІ ім. Ігоря Сікорського

1

Перв. застосув.

Довід. №

Підп. і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № ориг.

Формат

Зона

Поз.

Позначення

Найменування

Кілк.

Примітка

ДПБ.ПБ22.10.1720.000 СК

Складальний кресленик

Деталі

1

ДПБ.ПБ22.10.1720.001

Основа долоні

1

2

ДПБ.ПБ22.10.1720.002

Посадкове місце

1

двигуна БА16-020

3

ДПБ.ПБ22.10.1720.003

МСР суглоб основного

4

пальця

4

ДПБ.ПБ22.10.1720.004

Фаланга проксимальна

4

основного пальця

4

ДПБ.ПБ22.10.1720.005

Фаланга дистальна

4

основного пальця

4

ДПБ.ПБ22.10.1720.006

Шатун

4

ДПБ.ПБ22.10.1720.007

Тяга двигуна

4

КТР0905-20L

8

ДПБ.ПБ22.10.1720.008

П'ястнова кістка

1

великого пальця

9

ДПБ.ПБ22.10.1720.009

Фаланга проксимальна

1

великого пальця

10

ДПБ.ПБ22.10.1720.010

Фаланга дистальна

1

великого пальця

11

ДПБ.ПБ22.10.1720.011

Тяга двигуна

1

КТР0905-10L

12

ДПБ.ПБ22.10.1720.012

Посадкове місце №1

1

підшипника MR 84 ZZ

ДПБ.ПБ22.10.1720.000

Роботизована долоня з використанням шарніршних механізмів

Лім.

Масштаб

Зм.

Арк.

№ докум.

Підп.

Дата

Розробив

Словінський П.

Перев.

Вонсевич К.П.

Т. контр.

Н. контр.

Затв.

Вонсевич К.П.

Аркуш 1

Аркушів 3

ФРП, КПІ ім. Ігоря Сікорського

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

1

Копіював

Формат А4

[illegible]

[illegible]

Інв. № ориг.	Підп. і дата	Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

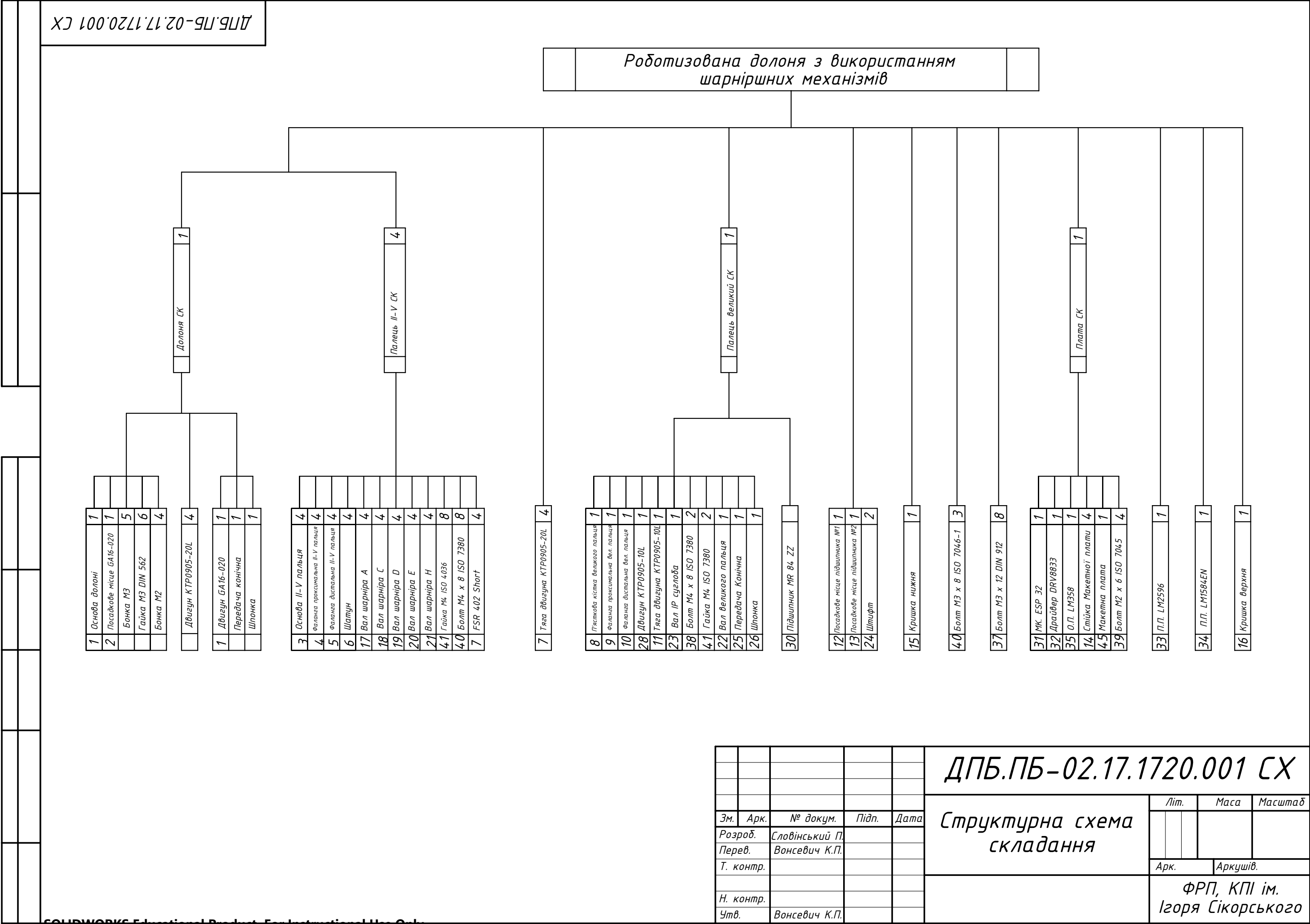
ДПБ.ПБ22.10.1720.000

Арк.

3

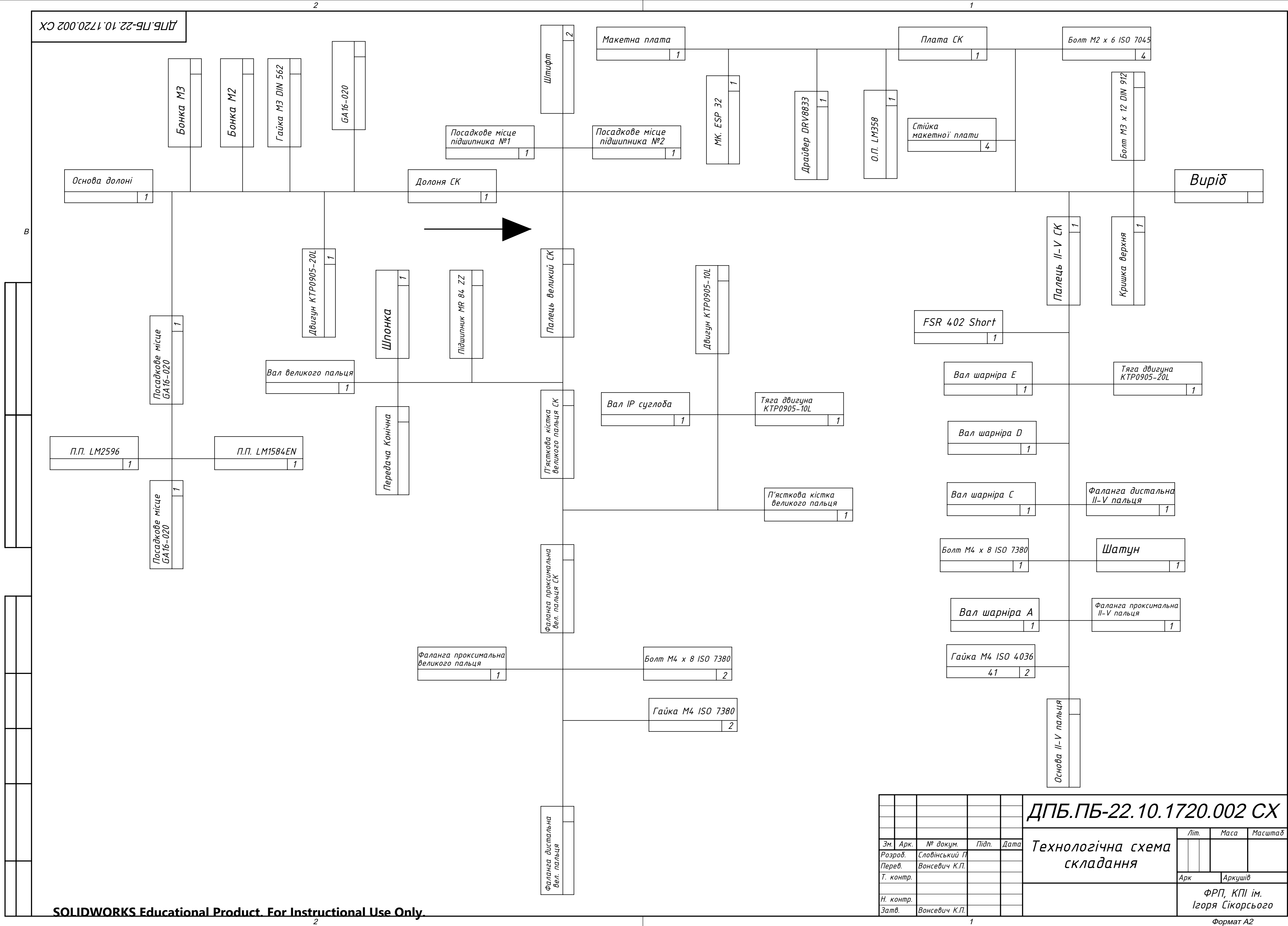
Додаток В

СТРУКТУРНА СХЕМА СКЛАДАННЯ



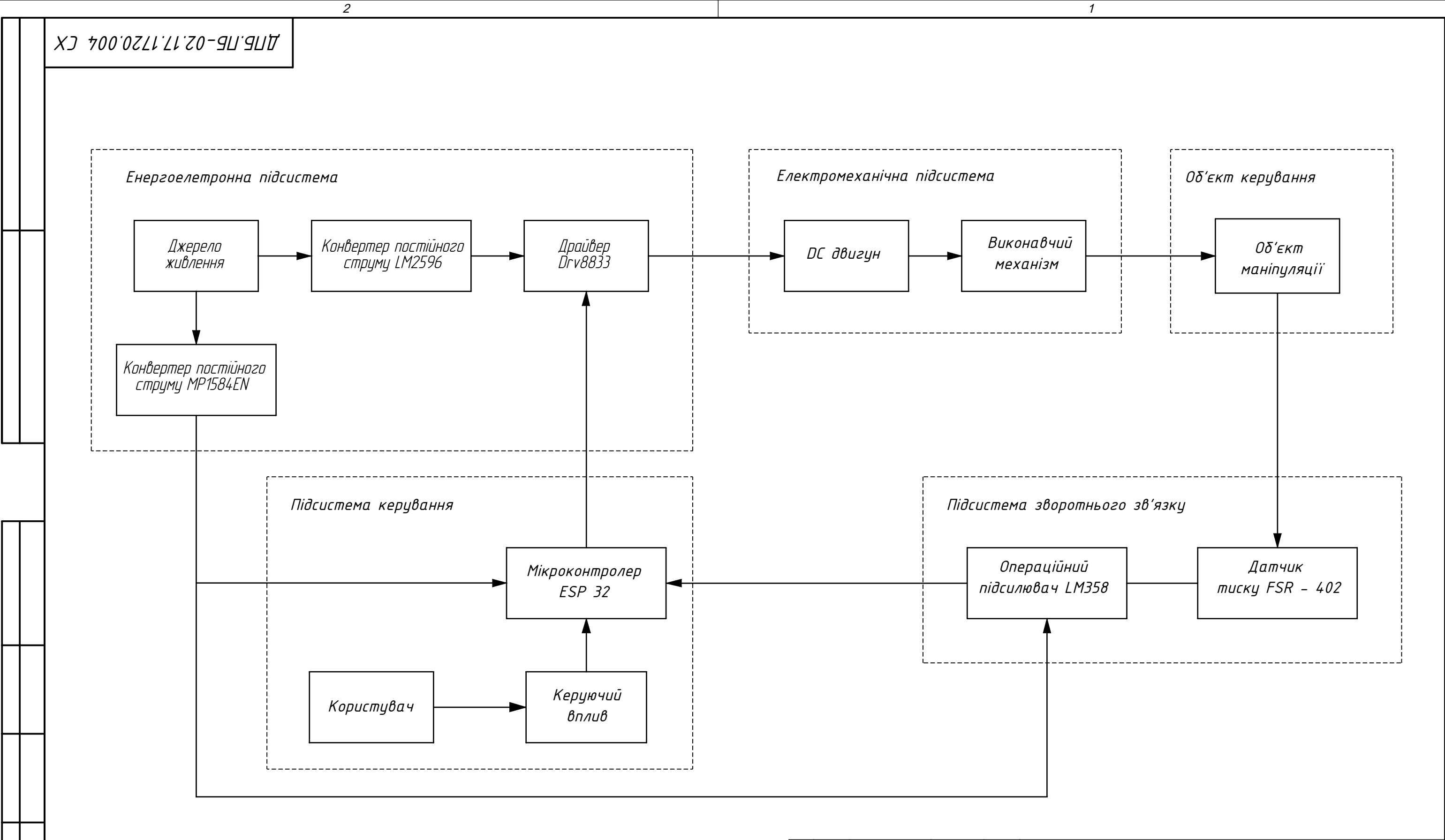
Додаток Г

ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА СКЛАДАННЯ



Додаток Д

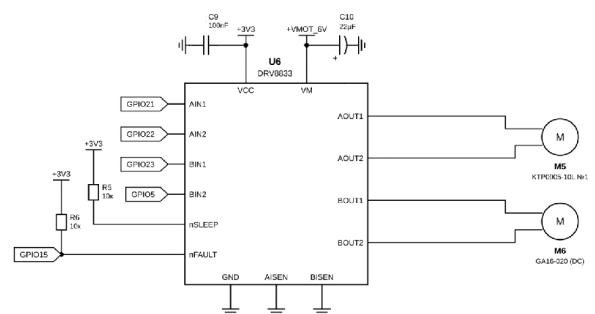
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА



						ДПБ.ПБ-02.17.1720.004 СХ							
						Схема електрична структурна	Лім.			Маса		Масштаб	
Зм.	Арк.	№ докум.		Підп.	Дата								
Розроб.		Словінський П.											
Перев.		Вонсевич К.П.											
Т. контр.													
							Арк.			Аркушів.			
Н. контр.							ФРП, КПІ ім. Ігоря Сікорського						
Утв.		Вонсевич К.П.											

Додаток Е

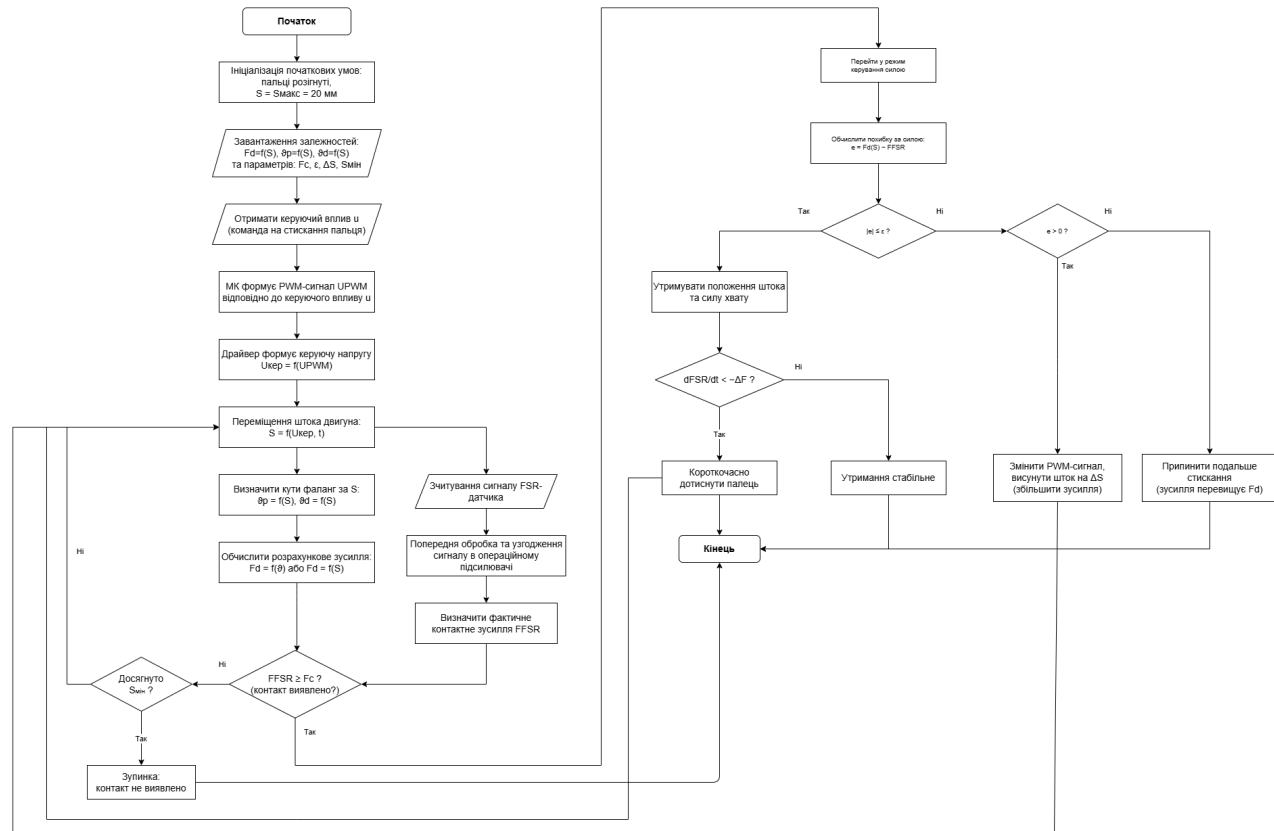
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Додаток Е

СХЕМА АЛГОРИТМУ ЗАМКНЕНОГО КОНТУРУ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ



						ДПБ.ПБ-02.17.1720.005 СХ							
						Схема алгоритму замкнутого контуру адаптивного керування				Літ.		Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата									
Розроб.	Словінський П.												
Перев.	Вонсевич К.П.												
Т. контр.									Арк.		Аркушів.		
Н. контр.									ФРП, КПІ ім. Ігоря Сікорського				
Утв.					Вонсевич К.П.								