

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

Ораз Диана Хамидиновна

«Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін
механотерапиялық экзоскелет жасау»

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7М07107 - Робототехника және мехатроника

Алматы 2026

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Қолжазба құқығында

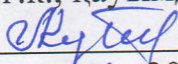
Магистр академиялық дәрежесін алу үшін

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ (ЖОБА)

Диссертацияның атауы: Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру
үшін механотерапиялық экзоскелет жасау
Дайындау бағыты: 7М07107 - Робототехника және мехатроника

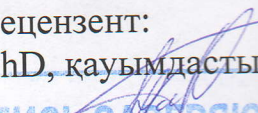
Ғылыми жетекші:

Т.ғ.к., қауымдастырылған профессор

 Курманғалиева Л.А.
«12» 01 2026 ж.

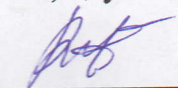
Рецензент:

PhD, қауымдастырылған профессор

 Карымсакова Н.Т.
«12» 01 2026 ж.

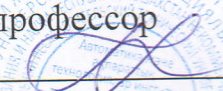
Нормобақылаушы:

PhD, қауымдастырылған профессор

 Рахметова П. М.
«12» 01 2026 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі РТЖАТҚ
техника ғылымының кандидаты,
профессор

 Қ.Ә. Өжікенов
«12» 01 2026 ж.

Алматы 2026

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

7M07107 - Робототехника және мехатроника

БЕКІТЕМІН
Кафедра меңгерушісі
РТЖАТҚ
техника ғылымының
кандидаты
Қ.Ә. Өжікенов
«12» 01 2026 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант: Ораз Диана Хамидиновна

Тақырыбы: Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін
механотерапиялық экзоскелет жасау

Университет ректорының 2024 ж. «03» 28 № 133-1/04 бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі: «30» 12 2025 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері:

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын мәселелер тізімі:

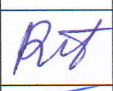
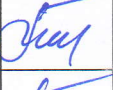
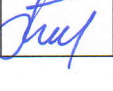
- а) Аяқтың қозғалыс функцияларын қалпына келтіруге арналған ортездердің қолданыстағы түрлеріне талдау жүргізу.
 - б) Механотерапиялық ортездің құрылымдық сұлбасын және негізгі конструкциялық элементтерін жобалау.
 - в) Ортездің кинематикалық және конструкциялық параметрлерін есептеу.
 - г) Ортездің үшөлшемді моделін CAD жүйесінде (SolidWorks) әзірлеу.
 - д) Ортездің тәжірибелік үлгісін құрастыру және жинақтау.
 - е) Әзірленген ортездің реабилитациялық процестегі тиімділігін бағалау.
- Графикалық материалдың тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):
жұмыс презентациясы 15 слайдтарда көрсетілген.

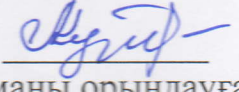
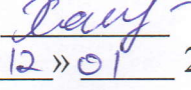
Ұсынылатын негізгі әдебиеттер: 40 әдебиеттер тізімі.

**Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, әзірленетін сұрақтар тізбесі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Аяқтың қозғалыс функцияларын қалпына келтіруге арналған ортездердің қолданыстағы түрлеріне талдау жүргізу, механотерапиялық ортездің құрылымдық сұлбасын және негізгі конструкциялық элементтерін жобалау.	01.09 - 20.09.2025 ж.	Орындалды
Ортездің кинематикалық және конструкциялық параметрлерін есептеу. Ортездің үшөлшемді моделін CAD жүйесінде (SolidWorks) әзірлеу.	21.09 – 18.10.2025 ж.	Орындалды
Ортездің тәжірибелік үлгісін құрастыру және жинақтау. Әзірленген ортездің реабилитациялық процестегі тиімділігін бағалау.	19.10 – 15.11.2025 ж.	Орындалды
Ортез тиімділігін бағалау	16.11 – 28.11.2025 ж.	Орындалды
Қорытынды бөлім	01.12 – 22.12.2025 ж.	Орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертациялар кеңесшілері мен қалып бақылаушының қолдары:

Бөлімдердің атауы	Кеңесшілер (тегі, аты, әкесінің аты, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қол
Норма бақылаушы	Рахметова П.М., PhD, қауымдастырылған профессор	12.01.26	
Негізгі бөлім	Курмангалиева Л.А., т.ғ.к., қауымдастырылған профессор	18.10.25	
Есептеу бөлім	Курмангалиева Л.А., т.ғ.к., қауымдастырылған профессор	19.10.25	

Ғылыми жетекші:  Курмангалиева Л.А.
 Білім алушы тапсырманы орындауға алды:  Ораз Д.Х.
 Күні: «12» 01 2026 ж.

Аңдатпа

Бұл диссертациялық жұмыста аяқтың қозғалысын қалпына келтіру мен оңалту үшін жасалатын механотерапиялық экзоскелетті жобалау қарастырылды. Негізгі мақсат – аяқтың белсенділігін, қозғалысын реттеуге арналған механотерапиялық экзоскелетті модельдеп, құрылымын әзірлеу. Кинематикалық параметрлерді анықтау.

Жұмыс барысында құрылғының құрылымдық сұлбасы жасалды. Аяқты оңға және солға бұруды мүмкін ететін механизмнің жұмыс жасау принциптері қарастырылды. Қозғалу бұрыштары және амплитуда мәндері есептерді. Нәтижесі үшөлшемді модельдеу ортасында көрсетілді. Жасалған құрылғының басты ерекшелігі оның қарапайымдылығы, тиімділігі және оңалту процессін автоматтандыруы.

Нәтижесінде аяқ қозғалыс функциясын оңалтуға арналған механотерапиялық құрылғы жобалау мен жетілдіру үдерісінде практикалық тұрғыда қолданысқа ұсынылады.

Аннотация

В данной диссертационной работе рассмотрена разработка механотерапевтического экзоскелета, который будет создан для восстановления и реабилитации движений ног. Основная цель – смоделировать и разработать структуру механотерапевтического экзоскелета для регулирования активности, движений ног. Определение кинематических параметров.

В ходе работ была разработана структурная схема устройства. Рассмотрены принципы работы механизма, делающего возможным поворот ноги вправо и влево. Углы движения и значения амплитуды. Результат был продемонстрирован в среде трехмерного моделирования. Главной особенностью созданного устройства является его простота, эффективность и автоматизация процесса реабилитации.

В результате механотерапевтическое устройство для реабилитации двигательной функции стопы предлагается к практическому применению в процессе проектирования и совершенствования.

Abstract

In this thesis, the development of a mechanotherapeutic exoskeleton, which will be created for the restoration and rehabilitation of leg movements, is considered. The main goal is to model and develop the structure of a mechanotherapeutic exoskeleton for regulating activity and leg movements. Determination of kinematic parameters.

During the work, a block diagram of the device was developed. The principles of operation of the mechanism that makes it possible to turn the foot to the right and left are considered. Angles of motion and amplitude values. The result was demonstrated in a three-dimensional modeling environment. The main feature of the created device is its simplicity, efficiency and automation of the rehabilitation process.

As a result, a mechanotherapeutic device for rehabilitation of the motor function of the foot is proposed for practical use in the design and improvement process.

РЕФЕРАТ

Магистрлік диссертация 74 беттен тұрады, 40 сурет, 3 кесте және 40 әдеби дереккөзді қамтиды.

Магистрлік диссертация табан функцияларын қалпына келтіруге арналған механотерапиялық құрылғыны жобалау және әзірлеуге бағытталған. Жұмыста тірек-қимыл аппаратының бұзылыстары кезінде қолданылатын заманауи реабилитациялық технологиялар, табан мен тобық буынының анатомо-биомеханикалық ерекшеліктері, сондай-ақ механотерапия әдістерінің тиімділігі қарастырылған.

Зерттеу жұмысының негізгі мақсаты – табанның инверсия және эверсия қозғалыстарын орындауға арналған, қауіпсіз және басқарылатын механотерапиялық құрылғыны жобалау және модельдеу. Аталған мақсатқа жету үшін табан қозғалыстарының биомеханикасына талдау жүргізілді, қолданыстағы реабилитациялық құрылғыларға шолу жасалды, құрылғының конструкциялық шешімдері мен электрондық басқару жүйесі әзірленді.

Диссертациялық жұмыста SolidWorks автоматтандырылған жобалау жүйесін қолдану арқылы механотерапиялық құрылғының үшөлшемді моделі жасалды. Электрондық басқару жүйесі Arduino Nano микроконтроллері негізінде жүзеге асырылып, сервожетек пен дисплей арқылы құрылғының жұмыс режимдерін басқару және визуализациялау қамтамасыз етілді. Құрылымдық тұрғыдан барлық электрондық компоненттер бір корпус ішінде орналастырылып, бұл құрылғының ықшамдылығын, қауіпсіздігін және пайдалануға ыңғайлылығын арттырды.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы ұсынылған механотерапиялық құрылғыны табан функцияларын қалпына келтіру мақсатында реабилитациялық орталықтарда, медициналық мекемелерде және оқу-зертханалық жағдайларда қолдану мүмкіндігімен сипатталады. Зерттеу нәтижелері табан қозғалыстарын қалпына келтіру тиімділігін арттыруға және реабилитациялық техниканы дамытуға үлес қоса алады.

Мазмұны

Аңдатпа	1
КІРІСПЕ	4
1. Экзоскелеттерге шолу	7
1.1 Экзоскелеттің даму кезеңдері	7
1.2 «ЭкзоАтлет» оңалтуға арналған медициналық экзоскелет.....	8
1.3 Нарықтағы экзоскелеттердің құрылымдары	9
1.4 Механотерапия ұғымы мен оның оңалтудағы маңызы.....	12
1.5 Экзоскелеттердің жұмыс істеуінің негізгі принциптері.....	14
1.6 Механотерапиялық экзоскелеттің басты артықшылықтары	16
1.7 Қазіргі экзоскелеттердің кемшіліктері.....	18
1.8 Нарықтағы ғылыми жаңалықтар	19
1.8.1 Аяқтың функцияларын қалпына келтіру және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау	20
1.9 Қолданыстағы шешімдерді талдау	29
1.9.1 Экзоскелет жүйесіне қойылатын міндеттер мен талаптар	30
2 Құрылғылардың негізгі функционалдық міндеттері.....	32
2.1 Экзоскелет дизайнына қойылатын талаптар	35
2.2 Экзоскелет құрамдарының басты элементтері мен конструкциясы.....	37
2.3 Жасалған құрылғының айрықша белгілері және техникалық сипаттамалары	38
2.4 Сервокозғалтқышқа шолу	40
2.5 Микроконтроллерге шолу	43
2.6 Оңалтуға арналған роботтың бағдарламалық баптауы	48
2.7 Жүйенің функционалды бөлімі	50
2.8 Аяқтың функцияларын қалпына келтіруге арналған механотерапиялық экзоскелеттің кинематикалық және күштік есептеулері.....	52
2.9 Құрылғының 3D моделі	56
3 Механотерапиялық құрылғыны жинақтау және дайындау	59
3.1 Экзоскелеттің конструкциясын дайындау және жинау	59
ҚОРЫТЫНДЫ.....	67
Қысқартулар мен терминдері тізімі	69
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	70
А Қосымша.....	73
Қосымша Б	75

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда тірек қимыл жүйесінің зақымдануы, инсульт салдары, сонымен қатар түрлі жарақат пен неврологиялық аурулар қозғалысқа зиян келтіріп, медицина мен инженерия салаларында күрделі тақырып ретінде зерттелуде. Айтылған жағдайлар адамның еркін қозғалысын шектеп, өмір сапасына айтарлықтай кері әсер береді. Қоғамдағы орнына бейімделуіне, еңбек ету мүмкіндігінің кемуіне себеп. Осы проблемаларды шешу мақсатында аяқ және қолдың қозғалысын оңалтып, қалпына келтіруге арналған инновациялық механотерапиялық жұмыстарды әзірлеу өзекті міндет болып тұр.

Оңалту барысында кеңінен қолданыстағы дәстүрлі физиотерапиялық тәсілдер және қолмен орындалатын жаттығулар көп уақытты қажет етеді. Әрі көбіне маманның физикалық мүмкіндіктеріне тиесілі болады. Сол себепті бұл процесс қозғалыс мүмкіндіктерінің керекті дәлдігі мен жаттығулардың тұрақты түрде жасалуын толықтай бақылауға мүмкіндік туғызбайды. Адам факторына байланысты жаттығулар толық, біркелкі орындалмай, реттілігі бұзылуы мүмкін. Атап өтілген мәселелерді шешу үшін соңғы уақыттарда экзоскелеттік жүйелерді пайдалану үлкен қызығушылық тудыруда. Құрылғылар аяқтың қозғалыс функциясын, бағытын, бұрылу бұрышы мен ауырлық деңгейін нақты дәлдікпен басқаруды мүмкін етеді. Оңалту процессінің көмегін арттыруға жағдай жасайды.

Бұл диссертациялық жұмыстың мақсаты – аяқтың қозғалысын оңалту мен қалпына келтіруетін механотерапиялық экзоскелетті модельдеу. Оның негізгі кинематикалық баптауларын инженерлік есептеулер арқылы анықтау. Мақсатқа жету үшін экзоскелеттің құрылымдық сқлбасын жасау, құрылғының қозғалыс бұрышы мен амплитудасын есептеу. Үшөлшемді модельдеу ортасында қарастыру болып табылады.

Диссертациялық жұмыстың өзектілігі – бүгінде оңалту орталықтарындағы қолданыстағы шетелдік құрылғылардың қымбат болуы, қызмет көрсетуінің күрделілігі мен науқастың жеке анатомиялық ерекшеліктеріне бейімделуі төмен болуына қатысты. Сол себепті, отандық құрылғылардың аяқ қозғалысын қалпына келтіре отырып, қолжетімді және тиімді болуына сұраныс артуда. Ұсынылып отырған экзоскелет осы мәселерді реттеуге бағытталған өзекті инженерлік құрылғы деп есептеледі.

Көрсетілген мақсаттарға жету үшін орындалатын негізгі міндеттер:

- Аяқ функцияларын оңалту үшін механотерапиялық экзоскелеттерге жалпы талдау жасау;
- Оңалтуға арналған құрылғының аяқты оңға, солға бұруын іске асыратын құрылымдық сызбасын жасау;
- Негізгі кинематикалық параметрлерін анықтап, инженерлік есептеулер жүргізу;
- Құрылғының үшөлшемді моделін құрыстыру;

– Жобаланған құрылғының тиімділігін инженерлік көзқараспен бағалау.

Диссертациялық жұмыстағы кемшіліктер:

– Экзоскелет моделін клиникалық сынақтардан өткізілмеуі;
– Бұлшықет тонусы, шаршау деңгейі, жүйке импульстарының әсері және т.с.с. факторлардың толық ескерілмеуі;

– Басқару жүйесінің бастапқы деңгейде болуы.

Дегенмен бұл кемшіліктер инженерлік деңгейде қарастырылып, жұмыстың жобалық кезеңде орындалуы арқылы ескеріледі.

Магистрлік диссертациялық жұмыстың тиімділігі құрылғының құрылымы қарапайым, кинематикалық параметрлердің нақты болуы. Яғни, аяқтың бұрылу бұрыштарының амплитудасын өзгерте алып, оңалту барысын автоматтандыру қабілетінің болуы. Жасалған механотерапиялық экзоскелет жаттығулардың сапасын көбейтіп, маманның қимыл-қозғалысын, міндеттерін кемітуге мүмкіндік береді. Оңалту процессінің уақытын тиімді түрде азайтады.

Нарықта экзоскелеттік жүйелерді құрудың бірнеше түрлері әдебиеттерде көрсетілген. Атап айтқанда, ReWalk, HAL, Ekso Bionics экзоскелеттері қолданыстағы коммерциялық жұмыстар ретінде танымал.

Толық немесе жартылай аяқта сал ауруы бар адамдар үшін жасалынған Израиль жүйсі - ReWalk. Ол балдаққа сүйене отырып қозғалуға мүмкіндік береді. Корпус қисаю кезінде жауап беретін қимыл датчиктері арқылы басқарылып жұмыс істейді.

HAL (Hybrid Assistive Limb) қолданушының табиғи қозғалысын қолдауға ЭМГ сигналдарды пайдаланады. Ол жапондық Cyberdyne компаниясының экзоскелеті болып табылады.

Ekso Bionics әскери және клиникалық қолданыстағы экзоскелеттерді шығаратын АҚШ-тық компания. Ол құрылғылар инсульт салдары және жұлын зақымданулары бар науқастарға дәрігер бақылауымен жүру процесстерін қалпына келтіреді.

Сонымен қоса, Robot-Assisted Gait Training үшін Lower limb Exoskeleton бақылау зеттеруі жасанды бұлшықетті (Pam) пневматикалық жетек ретінде қолданатын дизайн сипатталды. Жоғарыдағы технологиялар экзоскелеттердің адам баптауларына барынша жақындастырады. Сонымен қатар біркелкі тегіс күш береді. Бұл шешім оңалу зерттеулерінде жұмсақ жетектердің болашағын көрсетеді. Қолданушымен өзара жұмыс кезде қауіпсіз қозғалыс пен еркін бейімделуге мүмкіндік береді.

Дегенмен, қолданыстағы экзоскелеттер жетістіктерге қарамастан әлі де жоғарғы бағада. Конструкциясы көлемді, баптаулары күрделі болып келеді. Қызмет көрсету техникалық тұрғыдан қиыншылықтар туғызады. Алайда жетістіктерге қарамастан қолданыстағы экзоскелеттік жүйелер басым бөлігі жоғары бағада, конструкциясы көлемді, жеке баптауды қажет ету күрделілігі және техникалық қызмет көрсетудің қиындығымен ерекшелінеді. Осыған байланысты құрастырылған жұмыс биомеханика, мехатроника және

медициналық инженерия салаларындағы өзекті ғылыми-практикалық мәселені реттейді.

1. Экзоскелеттерге шолу

1.1 Экзоскелеттің даму кезеңдері

Жалпы адам бұрыннан ауыр көтере алмайтыны, ауыр соққылар мен аса қатты төзімділікке ие еместігі анық. Алайда, дамыған техника арқасында адамдар өздеріне қосымша күш қоса алады. Яғни, осы мәселенің шешімі, экзоскелеттер пайда болды. Олар сыртқы жақтау арқылы адамға қосымша күш-қуат бере алатын арнайы костюмдер.

Экзоскелет тиімділігі, оның жеңілдігі мен адам жасаған барлық қимыл-қозғалысты қайталауы. Ол медицинада, әскери қызметтерде, радиациялық қауіпі бар маңайда, құрылыс және өнеркәсіпте қолданыстағы басты жетістіктердің бірі болып есептеледі.

Әскери жағдайда құрылғы арқасында сарбаз өзімен ауыр қару-жарақтарды көтере алады. Әдетте сарбаздар шапшаң, белсенді және жау оғынан қорғана алуы керек. Костюмдер осындай жағдайда негізгі ауырлықты өзіне алуынан, адам артық ауыртпалықтан сақтанады. Денсаулығына зиян келмейді. Сол себепті экзоскелеттер пайдалы болып саналады. Медицинада өз бетінше жүре алмайтын адамдар үшін экзоскелет таптырмас құрал. Сал ауруымен аяқ немесе қолын қозғалта алмай қалған науқастар осы құрылғылардың арқасында қимыл-қозғалысын қалпына келтіре алады.

Экзоскелеттер әртүрлі салада қолданылуда. Олар күннен күнге даму барысында. Алайда, олар жетілдіру мен төмен бағаны қажет етеді. Экзоскелеттер пайда болғаннан, қазіргі күнге дейін көп өзгерістерге түсіп жатыр. [1]

Ең алғаш экзоскелетті тапқан ресейлік инженер Николай Ягн. Ол АҚШ-та тұрып, жұмыс істеген. Ол адамның жүріп, тұруы, жүгіруі мен секіруіне көмектесетін бірнеше технологияларды 1890 жылы патенттеген. Ол көптеген жұмысын әскери көмекке бағыттады.

General Electric 1960 жылы әлемге әйгілі Hardiman костюм дизайнын көрсетті. Ол 110 кг дейінгі заттарды көтеріп, суда да, құрылыста да жұмыс істей алатынын көрсетті. Тіпті ғарышта да жұмыс істейді делінді. Алайда, құрылғы тым ауыр және өте баяу жұмыс істейтін болған соң дамуы тоқтап, сәтсіз болды.

Миомир Вукобратович - Югославия ғалымы. Ол 1970 жылдары сал ауруымен науқастарға аяққа тұруға көмек беретін пневматикалық экзоскелет дайындады. Вукобратовичтың жобасына Ресей және Еуропа ғалымдары көңіл бөліп, өз жұмыстарына негіз қылып алды.

180 жылдары Н.Н.Приоров атындағы Орталық Травматология және Ортопедия институтында мүгедектерге арналған экзоскелет жасалды.

Қосымша ғылымдардың өсуі мен энергия тасымалдаушылардың тапшылығы, техникалық жұмыстардың баяу қозғалуы экзоскелеттердің дамуын тежеді. Тек 2000 жылдары осы бағытта нақты жетістіктер көріне бастады.

2007 жылы америкалық Darpa ғылыми-әскери ұйым ғалымдары Lady Warrior жобасын жасады. Ол қарусыз, бронды қорғаусыз, артық салмақты адамның аяқ-қолдарын күшейтітін костюм болды. [2]

2008 жылы Cyberdyne компаниясы HAL экзоскелетін әлемге ұсынды. Құрылғы көптеген артықшылықтарға ие болды. Оның корпусы жеңіл, ұзақ уақыт кідірмей жұмыс жасай алатын заряды бар автономды батареялармен жұмыс істейді. Басты мақсаты - сал ауруы бар науқастар мен мүгедек адамдарға көмек беру.

Бүгінде экзоскелеттер жақсы дамуда. Компаниялар жыл сайын жаңа құрылғыларды көрмелерге шығарып, өнімділігі және технологиялық жаңалықтарын жариялауда. Мысалы Ekso Bionics, Lockheed Martin, DARPA т.с.с.

1.2 «ЭкзоАтлет» оңалтуға арналған медициналық экзоскелет

ЭкзоАтлет (ExoAtlet) – параплегия (аяқ қолды салдандыратын жұлынның зақымдану) бар адамдарды емдеу және қоғамға бейімдеуге арналған медициналық экзоскелет жасау жөнінде ресейлік жоба. Роботты ресейлік “ЭкзоАтлет” ЖШҚ компаниясы жасайды.

Экзоскелеттің негізі КСРО тұсында Югославиямен ынтымақтастық кезінде Н.Н.Приоров атындағы “Орталық травматология және ортопедия институты” Вукобратовичтің еңбектеріне сүйене отырып ресейлік экзоскелет жасау жұмыстары басталған. Қайта құру кезеңінде жоба қаржыландырусыз қалып, жұмыстар тоқтатылды. Ғылыми-технологиялық даму бағдарламасы (2007-2013ж.) арқасында 2011 жылы жоба жалғасын тапты.

Медициналық экзоскелеттің дамуы 2013 жылы желтоқсанда “ЭкзоАтлет” жоба барысында басталды (Сурет 1). Жобада 20 шақты қызметкер қызмет жасады. Жоба жетекшісі және негізін қалаушы - Екатерина Березий. Ғылыми жетекшісі - ММУ механика ҒЗИ аға ғылыми қызметкері Елена Валентиновна. [3]

Қазіргі кезде экзоскелет прототиптерінің бірнеше нұсқалары бар. ЭкзоАтлет командасы робототехникалық және медициналық бағытында түрлі іс шараларға және көрмелерге белсенді қатысады.

“ExoAtlet” жобасы 2015 жылы маусымда Францияның Лион қаласында өткен “Innovo 2015” ірі халықаралық робототехника көрмесінде Сколково стендінде ұсынылды.

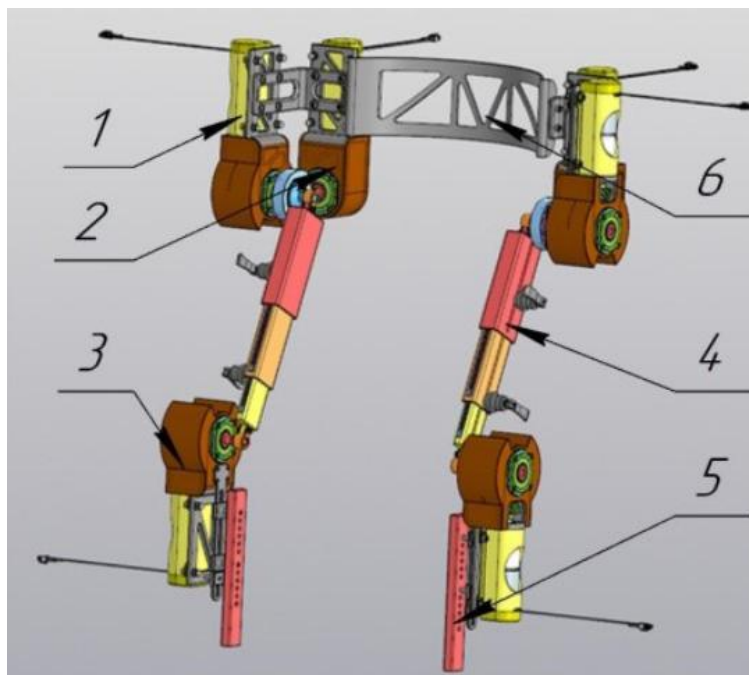


Сурет 1 – Экзоскелет «ЭкзоАтлет»

2021 жылдың 5 тамызында EXOATLET II Exoatlet Asia Co. Ltd. FDA 510k мақұлдауын алды. Баспасөз хабарламауында сертификаттау компанияға АҚШ-тың экзореабилитация нарығына шыққанын хабарлады. [4]

1.3 Нарықтағы экзоскелеттердің құрылымдары

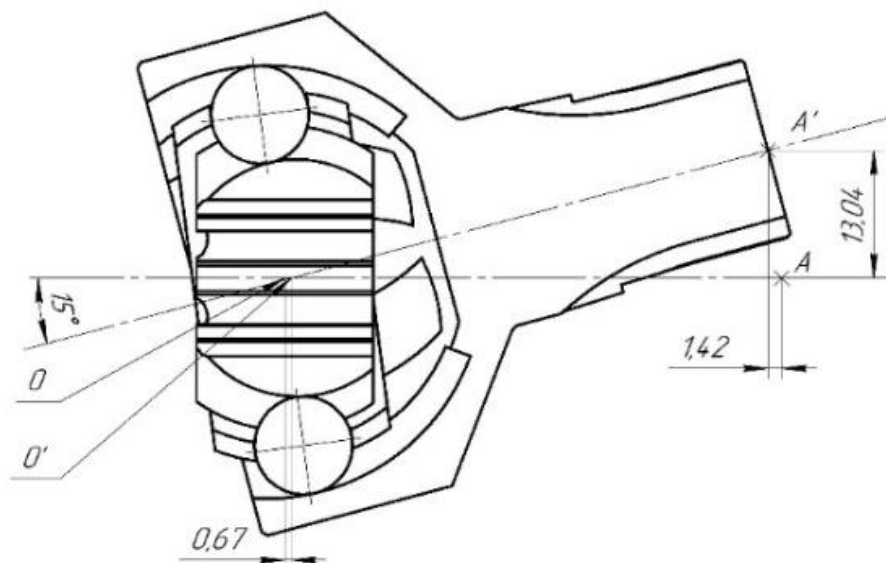
Экзоскелет жасалу процессінде қолданушының аяғына толықтай бекітілу керек деп болжады. Жобалау кезінде құрылғыға міндеттер қойылды. Олар құрылғының байланыстарының қарапайым болуы, құрылғының өзіндік инерциясының азайту жолдарын іздеу, әртүрлі жазықтықта қозғалысты басқарудың бірлестігі, қолданушының қауіпсіздігі үшін механикалық шектеулерін қамтамасыз ету деген сияқты міндеттер болды. Осы міндеттерге жету үшін әзірленген дизайн (сурет 2) аяқты механотерапиялық жүргізуге жасалды.



Сурет 2 – Жүйенің сыртқы түрі. (1, 2 — сәйкесінше жамбас буынының сагиттальды және фронтальды қозғалысының жетектері; 3-тізе буынының жетегі; 4-механизмнің жамбасы; 5-механизмнің аяғы; 6-бел ұстағышы)

Аталып өткен проблемаларды жою үшін қабылданған конструкторлық шешімдер:

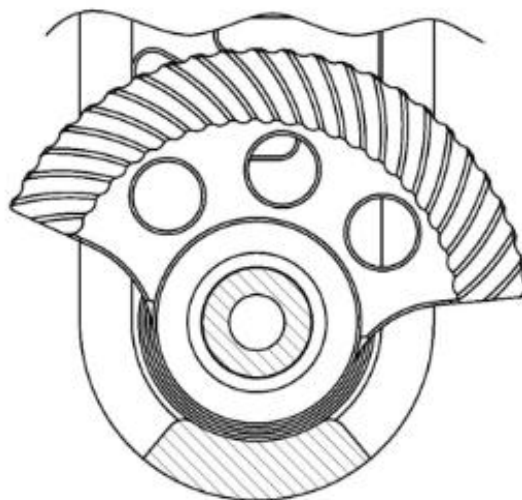
- Жамбас буынының айналу жетегіне буындардағы инерция азайту үшін арқа ұстағышына қозғалмайтындай жетек орналастырды;
- “Бирфильд” типіндегі тең бұрыштық жылдамдықтардың топсасн жобалауға механизмнің сагиттальды және фронтальды жамбас айналу жетектерінің бірлескен жұмысы туралы шешім қабылданды (сурет. 2,3), ол моментті 45-ке дейінгі бұрышта қозғалтады [5];
- Құрылымдық кеңістікті оңтайлдыру мақсатында жабастың сагиталь жазықтығы қозғалысына жауап беретін магистральдың осі бойымен орналастырған. Конустық беріліс арқылы айналу моментін беру 90 градусқа өзгереді.



Сурет 3 - "Бирфильд" типіндегі тең бұрыштық жылдамдықтардың 15° осьтер арасындағы бұрышпен қимадағы топсасы

– Қолданушы қауіпсіздігін қамтамасыз ететін механикалық шектеулер енгізілді. Ол тісті доңғалақтың жарты шеңберін анатомиялық деңгейде рұқсат етілген бұрышқа дейін қозғайды; Корпуста қарастырылған жетектердегі шеттерге доңғалақ шеттері тоқтайды. Бұл оңай процесс 3 суретте сипатталған. Клиникалық сынақтарда алынған зерттеу нәтижелерінің диапазоны 1 кестеде ұсынылған;

– Әр қолданушыға тез әрі жеңіл түрде буын ұзындығын қою үшін қолайлы эксцентриктік механизмдерді қолданысқа кіргізді. Яғни, белгілі бір орында тұрақталған шарды бағыттағыш қосылған телескопиялық дизайн құрастырылды. Оның ұзындығы 326-684 мм реттей алды. Бұл 120-220 см дейінгі аяқ қзындығына сай келеді.



Сурет 4 – Бұрамды беріліс механизмі

Энергетикалық есептер бастапқы даму кезеңінде қарастырылды. Есеп кезінде жетектегі керекті қуат көзі, макс. моменттер мен бұрыштық жылдамдық және үдеу есептелді. Шығысында сәуле нәтижелері бойынша тұрақты ток қозғалтқыштары, яғни Махон ЕС-і 52 пайдаланды. Ол 180 Вт тұрақты береді. Жамбас буынының сагитальды айналу жетегі GP планетарлық редуктор негізінде құрастырылды. Ол 52С бөлек есептелген беріліс болып табылды.

Сурет 4-те бұрамды беріліс жұбының сұлбасы бейнеленген. Ол айнымалы қозғалысты беруге пайдаланылады. Ол бұрамды білік және оған ілінетін бұрамды дөнгелектен тұрады. Айналу кезінде бұрамды білік тістері әрекеттеседі. Сол қозғалыс арқасында бір бөліктен екінші бөлікке беріледі.

1.4 Механотерапия ұғымы мен оның оңалтудағы маңызы

Механотерапия дегеніміз дене функцияларын орнына келтіруге арналған физикалық терапия түрі. Ол дене тіндеріне әсер ету арқылы жүзеге асады. Оны сал ауруы бар науқастарға, жарақаттары бар науқастар, остеоартрит және т.с.с ауруларды емдеу мен қалпына келтіру үшін практикада кеңінен қолданылады.

Механотерапия сіңір мен сүйекті, тіндерді механикалық әсер етуге арналған. Атап айтқанда оған буын, бұлшықет кіреді. Ынталандыруды массаж, созу, қолдан жасалатын терапия, қарсы жаттығулар арқылы жасауға болады. Қосымша механотерапиялық құрылғылар, яғни экзоскелеттерді пайдаланып, түрлі әдістер қолданылады. [6]

Қалпына келтірудегі механотерапия маңызына тіндерді регенерациялау істерін ынталандыру мен дененің іс әрекетін арттыру қабілеті болып табылады. Ол төмендегі әдістерге әсер етеді:

- Бұлшықетті қатыру мен оның күш-қуатын арттыру, төзімділі қылу;
- Буын қозғалуы мен икемділікті арттыру;
- Буындағы ауыру мен бұлшықеттердегі қабынуды кеміту;
- Ота және жарақаттардан кейінгі кезеңдегі қалпына келтіруді жеңілдеті;
- Жүйке жүйелерінде ақауы бар, паралич бұзылулары бар науқастарда жүйке жүйесін сауықтыру;

Механотерапия науқастарды кешенді емдеу мен сауықтыру үдерісінде маңызды. Науқастардың қарапайым өмірлеріне оралуы мен денсаулығын жақсартуда біршама көмек береді.

Одан ары маңыздылықтарының бірі асқынуларды тоқтату мен науқастардың жалпы жағдайын қалпына келтіру болып табылады. Механотерапияны қолданудың маңызды тараптарының бірі науқастың жағдайын реттеп, жасы мен физикалық мүмкіндіктеріне қарай отырып әр науқасқа жол табу.

Механикалық негіздегі терапияның артықшылықтарына оның қауіпсіздігі мен емдік жүктеме деңгейін бақылауға мүмкіндік беретінін қоса аламыз. Ол емдеу кезеңін науқастың нақты керектілігі және деңгейін ескеретіндігі. Бүгінде медицина саласында практикада механикалық терапия өз-өзін емдеу әдісі, физиотерапия мен фармакотерапия, хирургия (сурет 5) секілді басқа да салалармен біркелкі қоданыста



Сурет 5 – Медициналық өзін өзі емдеу әдістері

Көсетілген артықшылықтарға мән бергенмен, механикалық терапия көмегі маман тәжірибесі мен біліктілігіне байланысты екенін ұмытпаған жөн. Сонымен қатар, ол емдеу түрі науқастың жеке ерекшеліктеріне пайдасын нақтылау керек.

Қимыл-тірек жүйесіндегі біршама аурулар мен жарақаттары бар науқастар үшін механотерапия оңалтудың маңызды көмекшісі. Ол науқастың жылдам оңалуына және өмір сипатын арттыруға көмектеседі.

Механикалық терапияда қалыпқа келтірудің жеке және инновациялық тәсілдер бар. Дамыған технологияда көмекші құралдар және сенсорлық элементтер дамуымен механотерапиялық ем әр науқасқа жеке икемделеді.

Механотерапиядағы инновациялық қолданыстағы заттың бірі - механотерапиялық экзоскелет. Ол құрылғы науқастың дене бітіміне сәйкес келеді. Сонымен қатар, қозғалыс кезінде механикалық қолданыс пен талпындыруды арттыратын құрылғы. Қозғалуы нашарлаған, бұлшықеттері әсіз науқастар үшін механотерапиялық экзоскелет өте пайдалы. Ол оларға қарапайым күндері қимыл қозғалыс пен еркіндікті орнына келтіруге көмектеседі.

Механикалық терапияның пайдасы және қауіпсіздігі мүмкін болатын асқынуларды кеміту үшін тоқтамастан клиникалық және ғылыми зерттеулерді қажет ететінін ұмытпау қажет.

Механикалық оңалту науқастардың емі және өмір салтын жақсартуда жаңа технологияларды шығару мен зерттеуді қалыптастыратын маңызды сала [7], [8], [9].

1.5 Экзоскелеттердің жұмыс істеуінің негізгі принциптері

Экзоскелеттердің функционалдық негізі - адам денесіне қозғалыс кезінде механикалық қолдау және оның физикалық мүмкіндіктерін арттыру. Экзоскелеттердің жұмыс істеуінің негізгі принциптері:

- Биомиметика – экзоскелеттер адамның ішкі құрылысы мен мүшелерінің жұмыс істеу принциптерін негізге ала отырып жасалады. Адам денесінің табиғи функцияларын имитациялайды. Бұл дизайн мен қозғалыс үйлесімі адамдардың қозғалыс қабілетін оңалтуға маңызды рөл атқарады.

- Экзоскелеттер қозғалысты анықтау және күшейту үшін сенсорлармен (гироскоп, акселерометр, электромиография) және актуаторлармен жабдықталады.

- Басқару алгоритмдері – сенсор мәліметтерін талдап, экзоскелеттің қауіпсіз әрі ыңғайлы қозғалысын қамтамасыз етеді.

- Пайдаланушы интерфейсі – экзоскелеттерде пациенттерге құрылғыны оңай басқаруға және пайдаланушының мұқтажына қарай жылдам икемдеуге мүмкіндік беретін интуитивті басқару интерфейстері.

- Энергия тұтыну - энергияны тиімді қолдану экзоскелет жұмысының негізгі шарты. Қуатты тиімді қолдану экзоскелеттің автономдығын арттыруға және пайдаланушының күшін үнемдеуге мүмкіндік береді.

- Бейімделу және жекелендіру – экзоскелетті әр пайдаланушының дене бітімі мен ауру ерекшелігіне қарай жеке бейімдеуге болады. Бұл құрылғы өлшемдерін реттеу мен қозғалыс параметрлерін бағдарламауды қамтиды.

Бұл принциптер экзоскелеттердің жұмысының негізі. Олар пациенттерді оңалтуға және олардың өмір сүру сапасын жақсартуға көмектесу қабілетін анықтайды. [10]

Құрылғыларды түрлі көмектесу деңгейлері мен пайдалануын қамтамасыздандыратын жетек пен механизмдердің түрлісін пайдалану арқылы істеуге болады. Экзоскелеттер емдеу мақсатында бірнеше түрге бөлінеді. Олар пассивті, белсенді және гибриді. Пассивті құрылғылар емшараға белсенді қатыспайды. Жанама қолдау беріп, тұрақтандырады. Белсенді түрі қозғалысқа белсенді қатысады. Оны сол іске арнайы жетектері мен қозғалтқыштары бар. Жанма күшпен көмектеседі. Экзоскелеттің гибриді түрлері белсенді де, пассивті де бола алады. Ол тұрақтылық пен қозғалыс күшейтуді тең алып жүреді.

Модульді құрылғылар икемділік және жеке баптауларды қарастыра алады. Қолданушының сұранысына қарай баптауларды жеңіл қосып, өшіре алады. Экзоскелеттердің көптеген түрі бар. Олардың әрқайсысы әртүрлі дертке көмек береді. Науқастың өмір сапасын арттыруда маңызды құрал болып табылады.

Экзоскелеттердің келесі түрі - жүгіруге арналған экзоскелет. Ол табиғи түрдегі жүгіру кезінде ауыртпалықты азайтып, шаршағанды басады. Қолданушының аяқ және қолдарындағы буын қимыл-қозғалысын өзгертеді.

Жүгіруге көмектесетін экзоскелет медицинада қолданылатын экзоскелеттерден біршама өзгеше. Ол мотор қызметтерінің жарақат, кездейсоқ дерттерден кейін орнына келтіреді. Бұл экзоскелет түрлерін көбінесе курьер, пошташы және әскери қызметтегі адамдар қолдануға ыңғайлы [11].

Медициналық экзоскелеттерді (сурет 6) де бірнеше түрге бөледі. Олар: өндіріс модельдері, активті және пассивті, стационарлы және портативті.



Сурет 6 – Медициналық экзоскелет

Протездеуді портативті экзоскелеттер жасайды. Жоғалған іс-қимылдарды жасанды түрде шешу, яғни көмекші құрылғы орнату. Дененің табиғи іс-қимылдарын қалпына келтіруді стационарлық экзоскелеттер орындайды.

Аяққа арналған аккумуляторлы қозғалтқышы бар экзоскелеттер бар. Олар туылмалы сал дерті немесе травматикалық дерттері бар адамдарға арналған. Осы құрылғы арқасында параплегия ауруы бар емделушілер өз күшімен тұрып жатады. Яғни олар көмексіз, өздігінен қимылдарын қалпына келтірген.

Мүгедек жандар үшін белсенді құрылғылардың жұмыс жасау барысы барлығына бірдей. Яғни, тізме мен жамбас буындары созылып, бүгіледі.

Теңдікті сақтап, адам салмағын көтере алу үшін балдақ қолданылады. Басқаруда әр қадамды баяулатуға немесе тездетуге арналған түймелері болады. [12], [13]

1.6 Механотерапиялық экзоскелеттің басты артықшылықтары

Экзоскелет медициналық ем мен әдеттегі тұрмыста ауқымды түрде пайдаланылады. Экзоскелеттегі көптеген инновациялық артықшылықтар оны маңызды құралға айналдырады. Оның басты артықшылықтарына:

- Қозғалыс функцияларын дамыту. Яғни қозғалысы шектеулі адамзатқа жеңіл қимылдауға, оның алдында істеуге мүмкіндігі болмаған іс-қимылдарды жасап көмектеседі. Мысалы: жаяу жүру мен баспалдақпен көтерілу/түсу. Кеңістікте қимылдау мен жүйелі түрде істелінетін жұмыстарды жасау.

- Еркіндікті көбейту. Яғни, экзоскелеттерді қолдану мобильдік көрсеткіштері төмен емделушілерге еркіндікті арттыруына көмектеседі. Ол адамға көптеген міндеттерді ешкімнің көмегінсіз істеуіне көмектеседі. Адамдардың өмір сүру қасиетін күшейту мен бөгде біреуге тәуелділігін кемітеді.

- Емдеу процессінің пайдасын арттыру. Яғни жарақат, инсульт салдары т.с.с медициналық жағдайлардан соң қимыл қозғалысты орнына келтіру үшін көп пайдаланылады. Экзоскелеттер бұлшықеттердің қимыл қозғалысын орнына келтіру үшін практикада көп пайдаланылады. Активті түрде жұмыс жасауын дамытып, қимыл қозғалысты зерттеуді арттырады. Емделу деңгейі соның арқасында орнына тез келеді [14].

Айтылған артықшылықтар құрылғыларды өмір қасиетін арттыру мен икемділікті үлкейтту, қимылы шектеулі, физикалық қимылдары көп адамдар үшін емдеуін тездететінін күшті құрылғыға теңдейді.

Экзоскелеттер - медициналық оңалтуда және күнделікті өмірде кең қолданылатын құралға айналдыратын бірқатар маңызды артықшылықтары бар инновациялық құрылғылар. Олар қозғалысы шектеулі адамдардың жаяу жүру, баспалдақпен көтерілу және кеңістікте қозғалу сияқты әртүрлі әрекеттерді орындауға мүмкіндік беріп, ұтқырлық пен тәуелсіздікті жақсартуға ықпал етеді. Бұл адамдардың өмір сүру сапасы жақсарып, сыртқы көмекке тәуелділігі азаяды.

Құрылғылар медициналық емде жоғарғы қызметті атқарады. Адамдардың инсульт салдарынан алған сырқаттары, сыртқы жарақаттар мен т.с.с. медициналық жағдайдан соң мотор қимылдарын орнына келтіруге көмек береді. Ол бұлшықетті нығайтып, оның іс-әрекетке қабілеттілігін көбейтеді. Сонымен қатар зерттеу нәтижелерін жақсартады. Жылдам емделуіне көмектеседі. Олар ауыр жұмыс жасайтындар мен шамадан көп жүктеменің алдын алуға пайдасын береді.

Технологияның дамуымен экзоскелеттер барған сайын инновациялық және бейімделгіш болып келеді. Оларға жетілдірілген басқару жүйелері,

қозғалысты бақылау сенсорлары және пайдаланушының жеке қажеттіліктеріне бейімделу алгоритмдері кіреді. Бұл артықшылықтар экзоскелеттерді өмір сапасын жақсартуға, ұтқырлықты арттыруға және қозғалғыштығы шектеулі, физикалық белсенділігі жоғары адамдарда оңалту процесін жеделдетуге арналған қуатты құрылғының бірі.

HAL экзоскелеті (сурет 7) дәл осы жағдайда төменгі аяқтың бұлшықеттерінде сақталған әлсіз биопотенциалды импульстарды тіркеп, оларды күшейту арқылы қозғалысты белсендіреді және қолдайды. Қозғалысты орындау жамбас және тізе буындарына орнатылған арнайы жетектердің көмегімен жүзеге асырылады. Осылайша, қозғалыс процесі пациенттің өз ниеті мен оның денесінің физиологиялық сигналдары негізінде бақыланады, бұл HAL экзоскелетін басқа өндірушілердің ұқсас жүйелерінен айтарлықтай ерекшелендіреді.



Сурет 7 – HAL-терапия

Егер қаңқа бұлшықеттерінің қозғалыс механизмін қарапайым түрде сипаттайтын болсақ, онда қалыпты жағдайда бұлшықеттің жиырылуы орталық және перифериялық жүйке жүйесі арқылы ми жіберетін сигналдардың берілуінен болады. Бірақ, белгілі бір ауруларға немесе жарақаттарға байланысты бұл сигналдардың берілуі бұзылуы мүмкін және адамның қозғалысты өздігінен орындауы үшін жеткіліксіз. [15]

HAL терапиясын оңалтуда қолданудың негізгі шарты-төменгі аяқтарда қалдық мотор функцияларының немесе кем дегенде құрылғы жұмыс атқаратын импульстардың болуы. Экзоскелетті әр жағдайда қолдану

мүмкіндігі туралы алдын-ала бағалаудан кейін бұл әдісті жұлын жарақаты, , б склероз, нейродегенеративті аурулар, инсульт бұлшықет дистрофиясы, ас миының жарақаты, жүйке-бұлшықет ауруларымен ауыратын науқастардың пайдасына тиімді қолдануға болады [16].

1.7 Қазіргі экзоскелеттердің кемшіліктері

Қазіргі экзоскелеттерде олардың соғыс жағдайында кеңінен қолданылуына кедергі келтіретін бірқатар маңызды кемшіліктер бар. Олардың негізгісі - қиын жерлерде қозғалу кезінде жауынгердің шаршау деңгейінің едәуір артуы. Мұндай ортада адам тиімді қозғалу үшін стандартты емес, бейімделгіш қозғалыстарды жиі орындайды. Алайда, экзоскелеттердің көпшілігі мұндай қозғалыс үлгілерін толық қолдай алмайды, керісінше қозғалыс еркіндігін шектейді және белгілі бір әрекеттерді орындауға кедергі келтіреді. Нәтижесінде жауынгер экзоскелетке бейімделу үшін қосымша күш салуы керек.

Тегіс және қатты беттерде экзоскелеттер жоғары тиімділікті көрсетеді және пайдаланушыға жүктемені айтарлықтай азайтады. Осыған байланысты қазіргі уақытта экзоскелет модельдері әзірленуде, олар негізінен ауыр жүктерді тасымалдауға арналған. Толық жауынгерлік экзоскелетті құру әлдеқайда күрделі инженерлік және технологиялық шешімдерді қажет етеді.

АҚШ-та Lockheed Martin әзірлеген Onyx аяқтарының экзоскелеті сынақтан өтуде. Бұл экзоскелет күрделі рельефте қозғалуға арналған, бірақ тегіс беткейде қозғалғанда ол өшеді [17].

Onyx белсенді экзоскелеті жұмыс жағдайларына бейімделеді. Ол жауынгердің жүк көтеретінін немесе жеңіл жүретінін анықтайды және қозғалыс жүретін жердің түрін, жауынгердің жоғары немесе тегіс беткейде жүретінін анықтайды. Onyx массасы 6.4 кг, сонымен қоса 2.7 немесе 5,4 кг батарея 5.4 кг батареямен экзоскелеті 16 сағатқа дейін жұмыс атқара алады.

Onyx экзоскелеті бар адам қажетті уақытта тауға көтерілуді жеңілдету үшін қосымша 11.8 кг сүйреп апаруы керек. Бұл әдістің орташа бейімделу және күмәнді перспективалары бар.

Қазіргі уақытта белсенді экзоскелетті құрудың техникалық мүмкіндігі жоқ. Олар өте күрделі рельефке бейімделетін және өте қымбат экзоскелет жасайды, бірақ оның салмағы, құны оның барлық артықшылықтарын жоққа шығарады. Бұл салада серпіліс жасау үшін қуатты энергия көзі немесе жасанды бұлшықетті дамыту саласындағы серпілісті қажет етеді.

Экзоскелеттер перспективалы және инновациялық технология болғанымен, олардың кейбір шектеулері мен кемшіліктері бар:

- Жоғары шығындар – экзоскелеттер өндіруде, сатып алуда да қымбат. Бұл оларды көптеген пайдаланушылар үшін қол жетімсіз, әсіресе табысы төмен елді мекендерге ауыр тиеді;

– Шектеулі ұтқырлық пен икемділік: кейбір экзоскелеттерді пайдалану қиын және ыңғайсыз. Бұл кемшілік пайдаланушының қозғалысын шектейді және олардың қозғалғыштығын нашарлатуы мүмкін;

– Сыртқы энергия қажеттілігі: көптеген экзоскелеттер батареялар сияқты сыртқы энергия көзін қажет етеді, бұл олардың тәуелсіздігі мен пайдалану ұзақтығына шектеу жасайд;

– Басқарудың күрделілігі: кейбір экзоскелеттер күрделі конфигурация мен калибрлеуді, пайдаланушыны тиімді пайдалану үшін оқытуды қажет етеді, бұл қиындықтар тудыруы және олардың кең таралуына кедергі келтіреді;

– Жарақат алу және ыңғайсыздық қаупі: экзоскелеттерді дұрыс пайдаланбаған немесе дұрыс таңдамаған жағдайда, пайдаланушы үшін жарақат пен ыңғайсыздық қаупі болуы мүмкін;

– Шектеулі клиникалық дәлелдер: көптеген зерттеулерге қарамастан, экзоскелеттердің тиімділігі туралы клиникалық дәлелдер әлі де шектеулі және әртүрлі медициналық сценарийлерде олардың артықшылықтары мен тиімділігін растау үшін қосымша зерттеулер қажет [18].

Осы шектеулерге қарай отырып, экзоскелеттік технологияларды олардың кемшіліктерін жою және медициналық оңалту және басқа қолдану салаларында олардың әлеуетін кеңейту үшін дамытуды жалғастыру қажет.

Шектеулерге қарамастан, экзоскелеттер үлкен әлеуеті бар маңызды құрал болып табылады. Олар дизайнын, функционалдығын және қолжетімділігін жақсарту үшін жұмыс істейтін зерттеушілердің, инженерлердің және медицина мамандарының назарында.

Дамудың перспективалы бағыттарының бірі - экзоскелеттердің автономиясын арттыру, олардың мөлшері мен салмағын азайту және пайдаланушының жайлылық деңгейін арттыру жұмыстары. Жасанды интеллект, биоинженерия және нейротехнология сияқты озық технологиялардың интеграциясы экзоскелеттердің функционалдығы мен тиімділігін айтарлықтай жақсарты алатын мәлім.

Экзоскелеттердің болашағы олардың әртүрлі шектеулері бар адамдарға өмір сапасын жақсартуға және үлкен тәуелсіздікке қол жеткізуге көмектесетін қол жетімді, ыңғайлы және тиімді құрылғыларды құру бағытында одан әрі дамуына әкеледі.

1.8 Нарықтағы ғылыми жаңалықтар

Инсульттан кейінгі оңалту өзекті Медициналық және әлеуметтік мәселе болып табылады, өйткені ол жоғалған мотор функцияларын қалпына келтіруге және пациенттерді тәуелсіз өмірге қайта бейімдеуге бағытталған ұзақ және қаржылық шығынды процестерді қамтиды. Қазақстанда да, әлемнің көптеген елдерінде де инсульт алған пациенттердің басым бөлігі тиімді және қолжетімді оңалту қызметтеріне толық қол жеткізе алмайды.

Қозғалтқыш функцияларын қалпына келтіру тиімділігін едәуір арттыруға және оңалту мерзімдерін қысқартуға мүмкіндік беретін экзоскелеттік технологияларды енгізу әлі де дамудың бастапқы сатысында. Қазіргі нарықтағы көптеген техникалық шешімдер қозғалыс бұзылыстары бар науқастардың жеке физиологиялық және функционалдық ерекшеліктеріне жеткілікті түрде бейімделмеген, бұл олардың клиникалық тиімділігін шектейді.

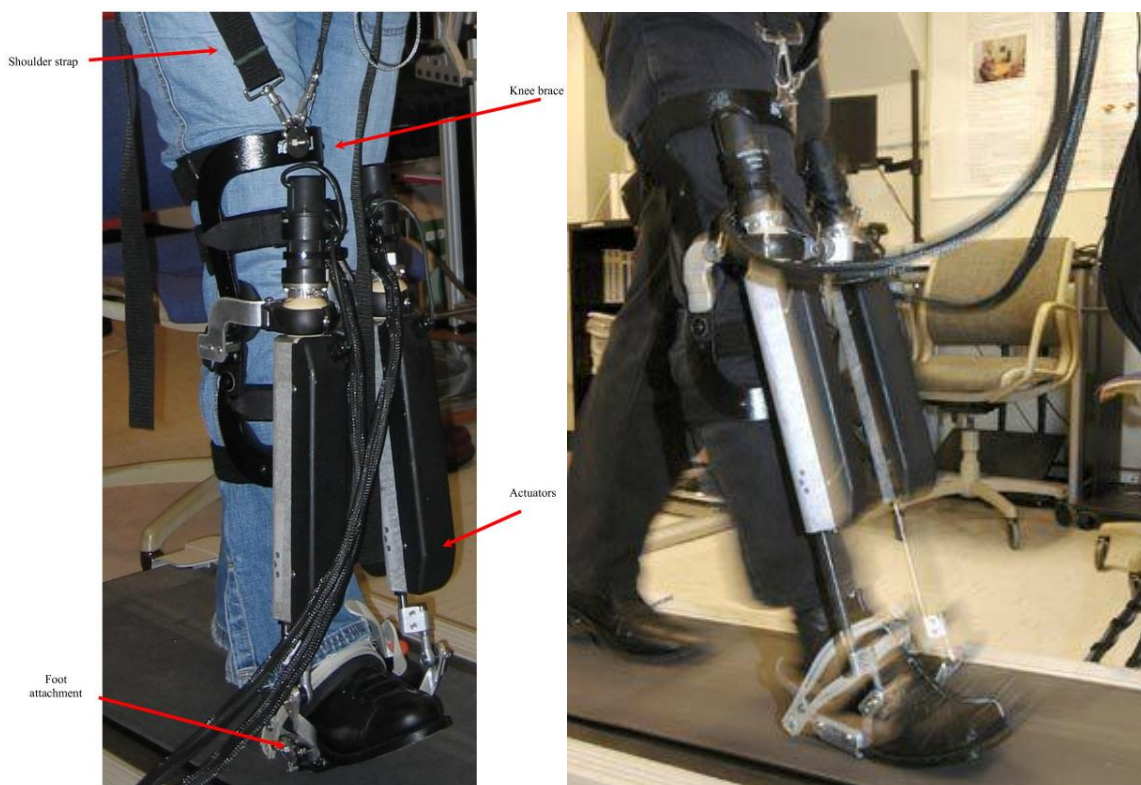
1.8.1 Аяқтың функцияларын қалпына келтіру және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау

8-суретте MIT Anklebot – MIT ғалымдары тобық қозғалысы мен оңалтуды қолдау үшін әзірлеген роботты құрылғы көрсетілген. Бұл құрылғы адамның табиғи қозғалысын қалпына келтіру және зерттеу мақсатында жасалды. Ол жарақаттан немесе инсульттан кейін қалпына келтіру үшін және сал ауруы бар науқастарда мотор қызметін жақсарту үшін қолданылады.

MIT Anklebot дизайны жоғары дәлдіктегі сервоарды, қозғалысты бақылау датчиктерін және үш өлшемді қозғалыстарды (иілу/кеңейту, инверсия, айналу) қамтамасыз ететін механизмдерді қамтиды. Құрылғы адамның қозғалысын пассивті немесе белсенді режимде қолдайды. Бұлшықет күші мен үйлестіруді қалпына келтіруге ықпал етеді. Бұл тобық қозғалысының көлемін біртіндеп арттыруға, қозғалыс үйлесімділігін жақсартуға және нейропластикалық қайта құруды жеңілдетуге мүмкіндік береді.

MIT Anklebot медициналық робототехникада, сондай-ақ биомеханикалық зерттеулерде және экзоскелеттік технологияларды әзірлеуде кеңінен қолданылады. Оның тиімділігі клиникалық зерттеулермен дәлелденген және оңалту орталықтарында сәтті қолданылады.

Бірақ, аналогтардың көпшілігі пациенттің жеке биомеханикалық ерекшеліктеріне және оның бұлшықеттері мен буындарының күйіне бейімделу қажеттілігі ескерілмейді. Қазақстанда мұндай зерттеулер іс жүзінде жүргізілген жоқ және жоба Ұлттық медициналық робототехника үшін жаңа кезеңді ұсынады [19].



Сурет 8 - MIT Anklebot

Моториканы қалпына келтіруді жеңілдету үшін дәстүрлі тәсілдерге нейродаму терапиясы [20], бруннстромның мотор терапиясы [21], проприоцептивті нейромаскулярлық фасилитация [22], моториканы қайта оқыту бағдарламалары [23] және Руда әдісін теріні ынталандыру әдістері [24] кіреді. Бұл оңалту бағдарламаларын физиотерапевтер ондаған жылдар бойы қолданылып келеді. Алайда, 2016 жылы инсульт бойынша маңызды нұсқауларға сәйкес, осы дәстүрлі тәсілдердің емдік әсерін әлі анықтау мүмкін емес [25]. Керісінше, инсульттан кейін жүрісі шектеулі науқастарға қарқынды және қайталанатын жаттығулар жасау ұсынылады [26], бұл терапевттер үшін физикалық белсенділікті қажет етеді. Сондықтан бұл өте пайдалы оқыту әдістемесінің ұзақтығы көбінесе терапевттердің физикалық дайындығына байланысты. Бұл мәселені шешудің ұсынылған құралдарының бірі-жоғарыда аталған нұсқауларға сәйкес роботты қозғалыс жаттығулары [26]. Роботты серуендеу жаттығулары барған сайын көбірек назар аударады, өйткені олар қайталанатын және қарқынды жаттығуларды қамтамасыз етеді және терапевттердің физикалық қолдауына деген қажеттілікті азайтады [27]. Кейбір роботты құрылғылар жаттығу кезінде науқастың физикалық өнімділігі мен жүру параметрлерін дәл және объективті түрде өлшей алады. Физиотерапиямен бірге бұл құрылғылар инсульттан аман қалған адамдарға тек физиотерапия немесе стандартты көмек алатындарға қарағанда өздігінен жүруге көмектеседі деп саналады [27]. Соңғы дәлелдер инсульттан кейінгі алғашқы үш айдағы пациенттер немесе бастапқыда жүре алмайтындар роботты серуендеу жаттығуларынан көп пайда көретінін көрсетілген [27].

Роботты серуендеу жаттығулары экзоскелеттік және соңғы эффекторлық әр түрлі жағдайларға сәйкес келетін типтерден тұрады [28].

Экзоскелеттік түрі терең әлсіздігі бар науқастар үшін жиі қолданылады, ал соңғы эффекторлық түрі жеңіл әлсіздігі бар науқастар үшін жиі қолданылады (сурет 9) [28].



Сурет 9 - Экзоскелет түрі Ekso Bionics

Соңғы эффекторлар (сурет 10) тек аяқтың дистальды бөліктеріне бекітіледі, ал экзоскелеттер екі жақты бүтін аяқтарға бекітіледі [29].



Сурет 10 - Инсульттің соңғы эффекторлары оңалту

Инсультті қалпына келтіруге арналған соңғы эффекторлар мен экзоскелеттердің жалпы мақсаты бар - жоғалған мотор функцияларын қалпына келтіру болып табылады. Бірақ дизайны, жұмыс принципі және қолдану аясы бойынша ерекшеленеді. Соңғы эффекторлар - бұл қолға немесе аяққа бекіту сияқты бір немесе бірнеше байланыс нүктелері арқылы аяққа әсер

ететін роботты құрылғылар. Олар шынтақты бұғу немесе қолды айналдыру сияқты жеке қозғалыстарды жаттықтыру үшін қолданылады. Әдетте оңалтудың бастапқы кезеңдерінде жиі қолданылады. Бұл құрылғылар қол немесе аяқ сияқты жергілікті әсер ету аймағымен шектеледі және стационарлық жұмыс істейді.

Экзоскелеттер, өз кезегінде, адамның биомеханикасын имитациялайтын, дененің бүкіл сегментін қамтитын роботты құрылымдар. IMU сияқты сенсорлармен және жетектермен жабдықталған экзоскелеттер қозғалысқа қолдау көрсетеді немесе оларды толығымен орындай алады. Олар жаяу жүру немесе тепе-теңдік сияқты күрделі моториканы қалпына келтіру қажет болған кезде оңалтудың кейінгі кезеңдеріне жарамды. Экзоскелеттер бүкіл буын-бұлшықет сегментін қамтиды және әртүрлі режимдерде жұмыс істей алады, соның ішінде белсенді және белсенді-ассистивті режимде де жұмыс атқарады.

Бұл құрылғылардың басты айырмашылығы - әсер ету аймағы: соңғы эффекторлар дененің жергілікті аймақтарына әсер етеді. Экзоскелеттер бүкіл денеге немесе оның үлкен сегменттеріне қолдау көрсетеді. Олардың арасындағы таңдау оңалту кезеңіне және науқастың қажеттіліктеріне байланысты.

Экзоскелет түрі одан әрі екі ішкі санатқа бөлінеді: жүгіру жолына негізделген экзоскелеттік робот және ортопедиялық экзоскелет.

Жүгіру жолына негізделген роботты құрылғы қозғалысты тек бір сагиттальды жазықтықта жаттықтыруға мүмкіндік береді, осылайша оның дене тепе-теңдігіне терапевтік жаттығу әсерін шектейді. Науқастарды ерікті жүрудің орнына алдын ала белгіленген жүру жолымен ғана бағыттауға болады. Екінші жағынан, ортопедиялық экзоскелет пациенттерге жерде жүру, отыру, орнынан тұру, баспалдақпен тұру, орнынан көтерілу сияқты күнделікті тұрмыстық әрекеттерді орындауға мүмкіндік береді [19, 20]. Дегенмен, физиотерапевт пациенттің тепе-теңдігін сақтау үшін жаттығу сеансы кезінде тереңірек қатысуы керек. Осылайша, роботты жаяу жүргіншінің осы түрін пайдалану кезінде қауіпсіздік мәселесі үлкен мәселе болып табылады. Бұл зерттеуде роботты экзоскелетпен жүруді үйрету үшін ортопедиялық экзоскелетті қолданылатын болады.

Бұрын роботты серуендеу жаттығуларының емдік әсерлері туралы жүргізілген әртүрлі зерттеулерге қарамастан [19], олардың ешқайсысы инсульттің басталуы 6 ай ішінде болған науқастар үшін айтарлықтай жақсартуды болжау факторларын әлі зерттеле қойған жоқ.

Жоба инсультті қалпына келтірудегі маңызды жаңалық болып табылатын озық сенсорлар мен нейрондық желілерді пайдалануға негізделеді. Инерциялық өлшеу блоктарының технологиялары (мысалы, IMU BMI160) науқастың қозғалыс деректерін дәл оқуды қамтамасыз етіп, жүйеге науқастың физикалық белсенділігі мен жағдайының әртүрлі деңгейлеріне бейімделуге мүмкіндік береді.

Аяқтың экзоскелетіндегі IMU BMI160 (сурет 11) пайдаланушының дене қимылдары мен орналасуын бақылау үшін қолданылады. Бұл сенсор гироскоп пен акселерометрді біріктіреді. Бұл сызықтық үдеулер мен бұрыштық жылдамдықтар туралы мәліметтер жинауға мүмкіндік береді. Мұндай модульмен жабдықталған экзоскелет жүрісті талдай алады, қозғалыс фазаларын анықтай алады (мысалы, аяқ бетіне тірелгенде немесе ауада болғанда) және өз жұмысын пайдаланушының әрекеттеріне бейімдей алады.

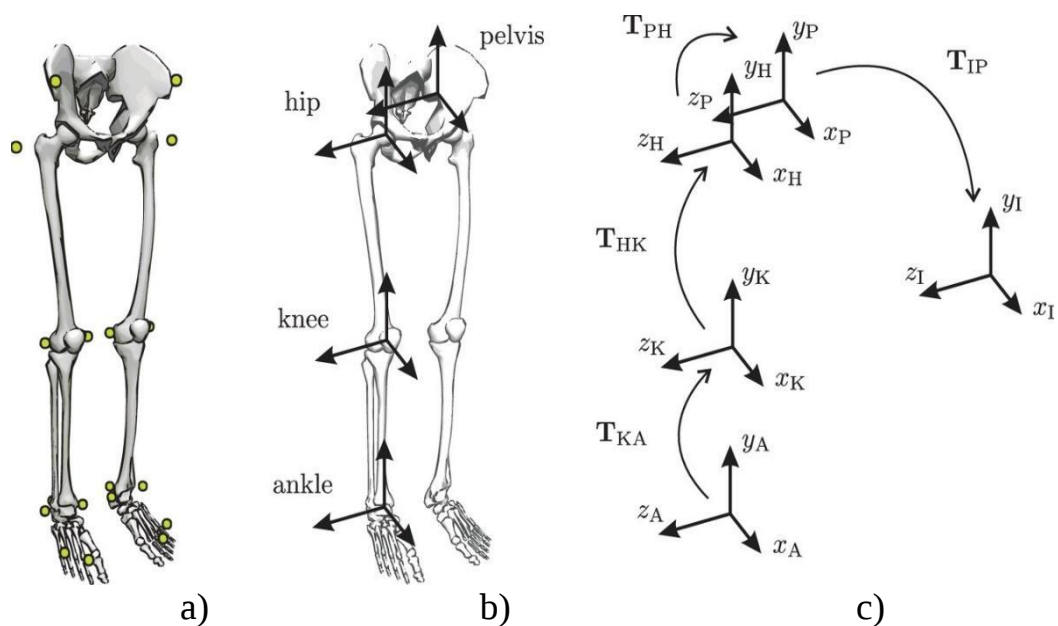


Сурет 11 - IMU BMI160

BMI160 сонымен қатар тік күйден ауытқуларды анықтау және деректерді экзоскелеттің басқару модуліне жіберу арқылы тепе-теңдікті сақтауға көмектеседі. Бұл әсіресе құлаудың алдын алу және тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Алынған мәліметтер экзоскелетке өз қозғалыстарын пайдаланушымен синхрондауға, қозғалыстардың амплитудасын, жылдамдығы мен бағытын реттеуге, физиологиялық ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік беретін кіріктірілген процессордың көмегімен нақты уақыт режимінде өңделеді [30].

Компакттылығы, төмен қуат тұтынуы және жоғары дәлдігі бар BMI160 роботты экзоскелеттерге біріктіру үшін өте қолайлы. Бұл сенсор сенімді кері байланысты қамтамасыз етеді, жүйені әртүрлі жағдайларға бейімдеуге көмектеседі және экзоскелеттің тиімді жұмыс істеуіне мүмкіндік береді, энергияны үнемдейді және пайдаланушының жайлылығын арттырырумен айналысады.

12-суретте адамның аяқтарының қозғалысын талдауға және модельдеуге арналған кинематикалық схема көрсетілген.



Сурет 12 - Аяқтардың кинематикалық құрылымы және қозғалыс трансформациясы

12a-суретте адам қаңқасының аяқтары суреттелген. Буындардың негізгі нүктелерін (жамбас, тізе және тобық) және сегменттердің геометриялық орналасуын көрсету үшін сары түспен белгіленген маркерлер немесе тірек нүктелері қолданылады. Бұл маркерлер көбінесе қозғалыс траекториясын зерттеу және есептеу үшін қолданылады.

12b суретте негізгі буындары мен сегменттері бар аяқтардың кинематикалық құрылымы көрсетілген. Әрбір буынға - жамбас (hip), тізе (knee) және тобық (ankle) - сәйкес координаталық осьтер қосылады. Бұл кинематикалық тізбектегі әр сегменттің бұрыштық және сызықтық қозғалыстарын сипаттауға мүмкіндік береді. Жамбас аймағының негізгі осьтері (pelvis) көрсетілген.

12c суретте трансформация матрицалары арқылы кинематикалық тізбектің моделін көрсететін схема көрсетілген [31].

— T_{PH} , T_{HK} , T_{KA} , T_{IP} — әр буын немесе сегмент арасындағы трансформация матрицаларының қысқартылған белгілері болып табылады. Мысалы, T_{PH} жамбас (pelvis) мен жамбас (hip) арасындағы трансформацияны көрсетеді.

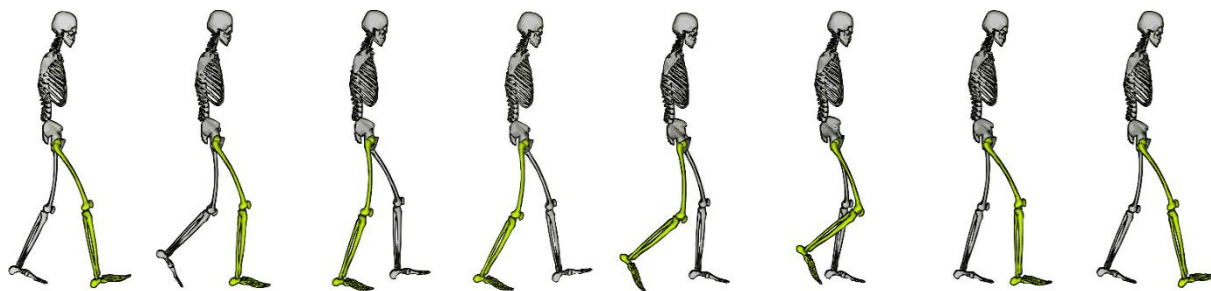
— Әрбір буын үшін жергілікті координаттар жүйесі көрсетілген: x , y , z

— Бұл диаграмма кинематикалық талдауда әр сегменттің қозғалыс параметрлерін анықтау үшін қолданылады.

Бұл сұлба аяқтардың қозғалысын сипаттайтын кинематикалық құрылым мен өзгерістерді талдауға бағытталған. Мұндай модельдер биомеханикада, экзоскелеттерді дамытуда және қозғалысты талдау жүйелерінде қолданыста қолданады.

13-суретте адамның жүру кезіндегі қозғалыстарды бейнелейтін қадам циклінің әртүрлі фазалары бейнеленген. Қаңқа құрылымында қозғалыстың әр кезеңінде олардың орналасуы мен иілуін көрсететін төменгі аяқтар ерекшеленеді. Сары түспен ерекшеленген аяқ-қолдардың қозғалысы нақты фазаларды ажыратуға мүмкіндік береді:

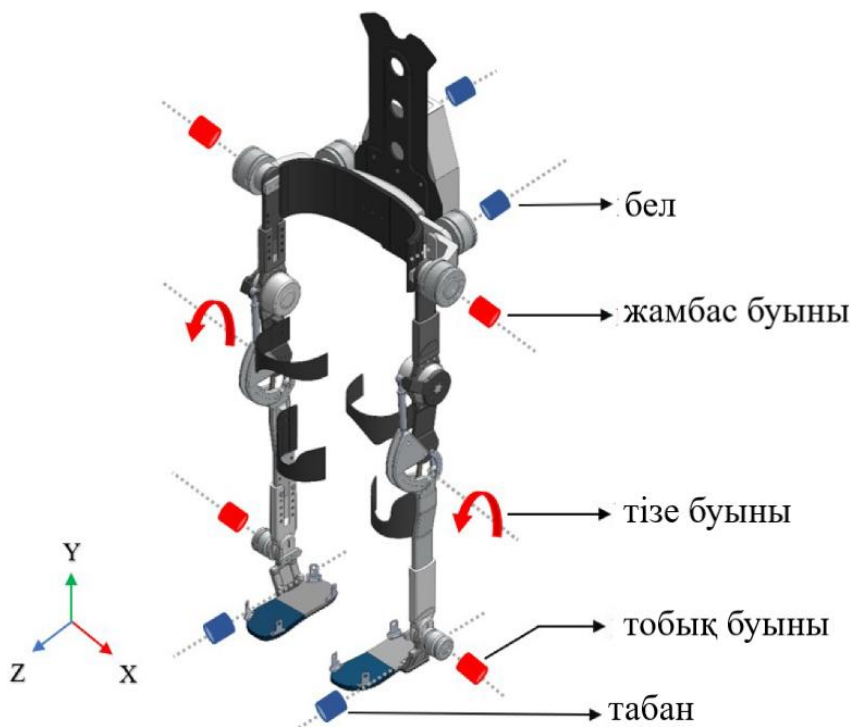
- Аяқтың алға жылжуы (swing phase).
- Байланыс нүктесінде аяқты қолдау (stance phase) [32].



Сурет 13- Адамның жүру циклінің кинематикалық фазалары

Бұл сурет адамның жүру процесін кинематикалық зерттеу үшін қолданылады. Бұл бұрыштық қозғалыс параметрлерін, қадам ұзындығын және қозғалыс координациясын талдауға көмектеседі. Мұндай кескіндер биомеханикада және экзоскелеттерді дамытуда жиі қолданылады.

14-суретте оңалтуға арналған экзоскелеттің тұжырымдамалық сұлбасы көрсетілген. Экзоскелет адамның төменгі аяқтарының қозғалысын қолдайды және оңалту мақсатында қолданылады.



Сурет 14 - Оңалту үшін әзірленіп жатқан экзоскелеттің тұжырымдамалық схемасы

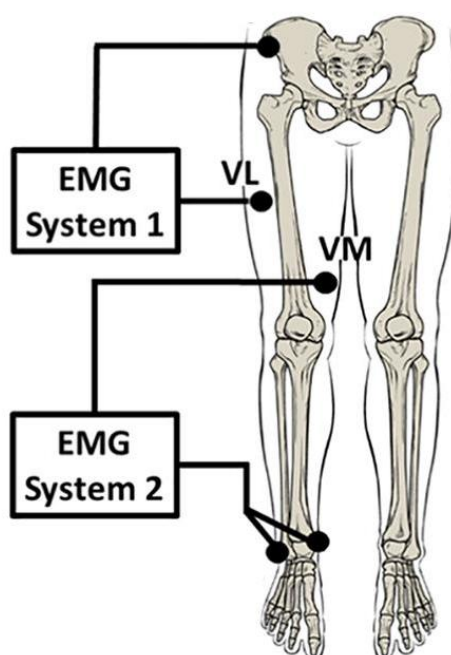
Негізгі элементтер:

- Бел: адамның беліне бекітілген экзоскелеттің жоғарғы тірегі.
- Жамбас буыны: экзоскелеттің жамбас аймағында орналасқан буын дененің төменгі бөлігін қозғалысқа келтіру үшін қолданылады.
- Тізе буыны: экзоскелеттің тізе аймағында орналасқан буын төменгі аяқтың бүгілуін және кеңеюін қамтамасыз етеді.
- Тобық буыны: экзоскелетті табанмен байланыстыратын буын, ол қозғалыс кезінде икемді бейімделеді.
- Табан: экзоскелеттің төменгі бөлігіндегі тірек, ол жерде тұрған кезде адамның тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Экзоскелетте әр буын үшін координаталық осьтер (X, Y, Z) көрсетілген, бұл үш өлшемді кеңістіктегі қозғалысты дәл басқаруға мүмкіндік береді. Экзоскелеттің қозғалысы әр сегменттің трансформациялық матрицалары арқылы басқарылады, бұл жүйенің әртүрлі фазаларындағы қозғалыстарды дәл бақылауға және реттеуге мүмкіндік береді. Бұл экзоскелет, даму аяқталғаннан кейін, адамның аяқ-қолының қозғалысын қолдайды. Бұл адамның қозғалуына көмектеседі, ең алдымен жүруде қиындықтары бар науқастар.

6-суретте көрсетілген құрылғыда қозғалыс бұрыштары мен үдеу бұрын айтылғандай IMU Sensor (инерциялық өлшеу құрылғысы) көмегімен нақты уақыт режимінде бекітіледі және өлшенеді. Бұл сенсор құрылғының кеңістіктегі орнын, оның үдеуін және бұрыштық жылдамдығын анықтауға мүмкіндік береді, бұл құрылғының қозғалысын дәл басқаруға негіз болады. Құрылғының адам ағзасымен өзара әрекеттесуі және бұлшықет күйін бақылау үшін 16-суретте көрсетілген EMG Sensor (электромиографиялық сенсор) қолданылады. Бұл сенсор адамның бұлшықет сигналдарын тіркейді және олардың белсенділігі туралы деректерді жібереді, бұл құрылғыны бұлшықет жұмысына бейімдейді және оңтайлы функционалдылықты қамтамасыз етеді. Осы екі сенсордың үйлесімді жұмысы құрылғының тиімділігін арттырады және оның ыңғайлылығын жақсартады.

15-суретте адамның аяғындағы EMG Sensor (электромиографиялық сенсор) орналасуы сурттелген. Негізгі сенсорлар бұлшықет белсенділігін дәл бақылау үшін төменгі аяқтың негізгі нүктелеріне бекітіледі. Датчиктердің бірі аяқтың аймағына бекітіледі, өйткені ол жүру кезінде қозғалысты бастайды, бұл бетке алғашқы жанасуды қамтамасыз етеді. Екінші сенсор тізе аймағына орналастырылған, бұл аяқтың иілу және экстензорлық қозғалыстарын бақылауды сақтай отырып, осы аймақтағы бұлшықет белсенділігінің өзгеруін түсіруге мүмкіндік береді.



Сурет 15 - Аяқтың бұлшықет белсенділігін бақылауға арналған EMG сенсорларының орналасуы

Жамбас және төменгі арқа бұлшықеттерінің жұмысын бақылау үшін EMG сенсорлары орнатылып, жамбас қозғалысы мен жүру кезінде дененің тұрақтануын бақылауды қарастырылады. Сенсорлардың бұл таралуы аяқтың барлық негізгі деңгейлерінде бұлшықет белсенділігі туралы егжей-тегжейлі ақпарат алуға мүмкіндік береді, бұл құрылғының дұрыс жұмыс істеуі, оның әрекеттерін пайдаланушының қимылымен синхрондау және жүру биомеханикасын талдау үшін маңызды.



Сурет 16 - EMG сенсоры (электромиографиялық сенсор)

1.9 Қолданыстағы шешімдерді талдау

Қазіргі таңда оңалту робототехникасы саласында төменгі аяқтың моторлық белсенділігін қалпына келтіруге арналған бірқатар коммерциялық қол жетімді экзоскелеттік жүйелер бар. Ең танымал және кең таралғандардың қатарына ReWalk, hal (Hybrid Assistive Limb) және Ekso Bionics жатады. Бұл жүйелерді талдау дизайнға, жұмыс принциптеріне, басқару әдістеріне жалпы көзқарастарды анықтауға және ұқсас құрылғыларды әзірлеу саласындағы ағымдағы тенденцияларды анықтауға мүмкіндік береді.

ReWalk Robotics-параплегиямен ауыратын адамдардың өзін-өзі пайдалануына арналған алғашқы сертификатталған экзоскелеттердің бірін жасаған израильдік компания. Жүйе аяққа бекітілген моторлы шиналардан, сондай-ақ рюкзактарды басқару блогынан және батареядан тұрады. Басқару дененің қисаюын бақылайтын сенсорлар арқылы жүзеге асырылады-Алға еңкейген кезде экзоскелет қадамды бастайды.

- Жетек түрі: тізе және жамбас буындарына орнатылған редукторлары бар электр қозғалтқыштары.

- Басқару әдісі: Басқару корпусының орналасуын өзгерту, балдақтардағы түймелер және кіріктірілген микроконтроллерлер арқылы жүзеге асырылады.

- Артықшылықтар: автономия, FDA сертификаты, үйде пайдалану мүмкіндігі.

- Кемшіліктері: жоғары құны (от 70,000 бастап), тұрақтылық үшін балдақтардың қажеттілігі, функцияларды ішінара жоғалту үшін бейімделу режимінің болмауы.

Жапондық cyberdyne компаниясы жасаған Hal экзоскелеті басқару үшін бұлшықет биосигналдарын қолданумен ерекшеленеді. Оны оңалту клиникаларында да, үйде де қолдануға болады. Hal теріден әлсіз электромиографиялық (EMG) сигналдарды оқиды, пайдаланушының ниетін түсіндіреді және тиісті қозғалтқыштарды іске қосады.

- Жетек түрі: дәл серво қозғалтқыштары бар электр жетектері.

- Басқару әдісі: гибридті басқару-EMG сигналдары және кіріктірілген инерциялық датчиктер (IMU).

- Артықшылығы: жоғары дәлдік, пайдаланушының ниетіне жауап береді, бүкіл әлемдегі клиникаларда қолданылады.

- Кемшіліктері: орнатудың күрделілігі, жоғары баға, мотор белсенділігінің толық жоғалуы бар науқастар үшін шектеулер.

Американдық Ekso Bionics компаниясы экзоскелеттерді клиникалық қолдану үшін де, өнеркәсіптік және әскери қолдану үшін де ұсынады. Ekso компаниясының құрылғылары негізінен пациент маманның бақылауында болатын медициналық мекемелерде қолданылады. Жүйе қолдаудың әртүрлі деңгейлерін ұсынады-толық автоматты жүруден бастап науқастың белсенді бұлшықет жаттығуларына дейін.

- Жетек түрі: буындарға орнатылған кері байланыс электр қозғалтқыштары.
- Басқару әдісі: қысым датчиктері мен инерциялық өлшеу модульдерін қолдана отырып, дененің орналасуына сәйкес.
- Артықшылықтары: бағдарламаланатын жаттығу режимдері, оңалтудың әртүрлі кезеңдеріне бейімделу.
- Кемшіліктері: жоғары құны (\$100,000+), қызметкерлерді оқыту қажеттілігі, құрылғының үлкен салмағы (~27 кг).

Кесте 1 - Жалпыланған салыстыру

Параметр	ReWalk	HAL	Ekso Bionics
Жетек түрі	Электр қозғалтқышы	Электр қозғалтқышы	Электр қозғалтқышы
Басқару әдісі	Корпустың көлбеуі	EMG сигналдары	Дене жағдайы
Жүйенің салмағы	~23 кг	~17 кг	~27 кг
Балдақ қажет етеді	Иә	Жоқ	Иә/Жоқ
Құны	Жоғары	Өте жоғары	Өте жоғары
Пайдалану	Үй / Емхана	Үй / Емхана	Емхана

ReWalk, HAL және Ekso Bionics сияқты заманауи экзоскелеттік жүйелердің жоғары өнімділігіне қарамастан, олардың бірқатар маңызды кемшіліктері бар. Ең алдымен, бұл пациенттердің көпшілігінде, әсіресе денсаулық сақтау ресурстары шектеулі елдерде мұндай құрылғыларды қол жетімді етпейтін жоғары шығындар. Құрылымдардың үлкен мөлшері мен едәуір массасы олардың қозғалғыштығын едәуір шектейді және ұзақ уақыт пайдалану кезінде жайлылықты төмендетеді. Жеке баптаудың күрделілігі, әсіресе білікті қызметкерлер мен қажетті техникалық жабдықтар әрдайым бола бермейтін аймақтық немесе бюджеті төмен клиникалар жағдайында маңызды факторы осы. Мұндай жүйелердің көпшілігі шетелдік стандарттарға сәйкес әзірленетінін және антропометриялық параметрлерге есептелетінін ескеру қажет, бұл әрдайым басқа елдердің пациенттерінің орташа көрсеткіштеріне сәйкес келмейді.

Осыған байланысты пайдаланушылардың жергілікті жағдайлары мен ерекшеліктеріне бағытталған жаңа экзоскелетті әзірлеу қажеттілігі туындайды. Бұл шешім жеңілдетілген дизайн мен отандық компоненттерді қолдану арқылы айтарлықтай қол жетімді болуы мүмкін. Модульдік тәсіл құрылғыны әртүрлі дәрежедегі қозғалыс бұзылыстарына бейімдеуге мүмкіндік береді, ал механотерапия элементтері мен автоматтандырылған қалпына келтіру сценарийлерін біріктіру тиімдірек оңалтуды қамтамасыз етеді және медицина қызметкерлеріне жүктемені азайтады. Мұндай құрылғыны құру медициналық робототехника саласындағы өзекті және әлеуметтік маңызды міндет болып табылады.

1.9.1 Экзоскелет жүйесіне қойылатын міндеттер мен талаптар

Бұл әзірленіп жатқан экзоскелет инсульт, паралич және жұлын жарақаттары сияқты неврологиялық аурулары бар жандарға оңалтуға арналған.

Экзоскелет пассивті және белсенді механотерапия арқылы моториканы қалпына келтіруге, қан айналымын жақсартып және буындардың қатып қалуын болдырмауға көмектеседі.

2 Құрылғылардың негізгі функционалды міндеттері

Экзоскелетті әзірлеудегі басты міндет - оңалтудың кез келген кезеңінде аяқ қозғалысын тиімді қолдайтын функционалды құрылғы жасау.

Басты міндеттердің бірі - жамбас пен тізе буындарының қозғалысын қамтамасыз ету. Экзоскелет қозғалыс амплитудасы мен жылдамдығын басқарып, науқас жанның жағдайына байланысты бейімделуі тиіс. Жарақаттың алдын алу мақсатында амплитуда норма шегінде бақыланады, ал қозғалыс қарқыны баяудан жылдамға дейін өзгертіледі.

Экзоскелет сенсорлар арқылы тепе-теңдікті бақылап, науқастың тік тұру (вертикализация) және жаттығу кезінде науқастың тұрақтылығын сақтауға тиіс.

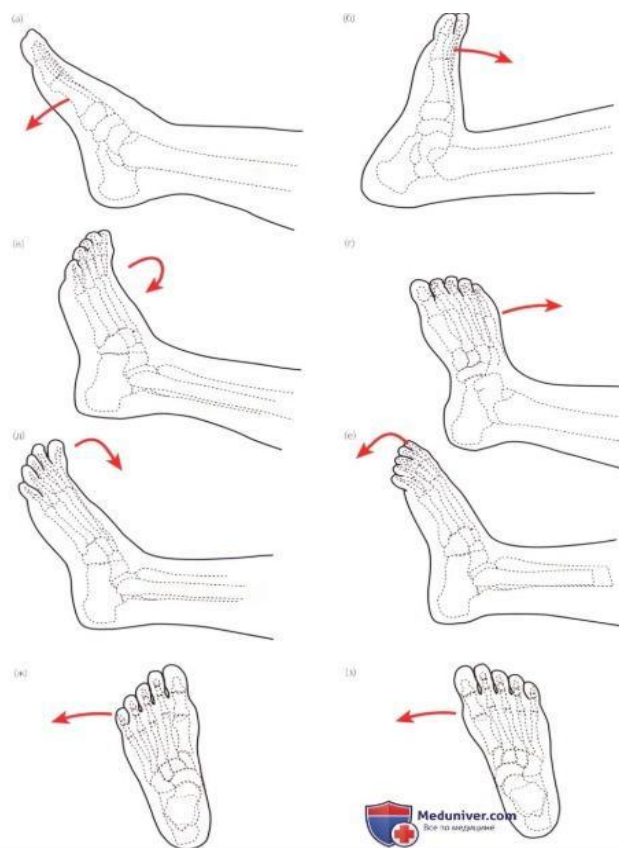
Табиғи жүрісті қалпына келтіру үшін экзоскелет қозғалыстары биомеханикалық тұрғыдан дәл болу керек. Құрылғы науқастың бұлшықет белсенділігімен үйлесе отырып, буындардың бүгілуі мен жазылуын адамның нақты қимылына барынша жақындатады.

Экзоскелетте жүктемені, жылдамдықты және қозғалыс амплитудасын реттеу мүмкіндігі бар. Экзоскелеттің әр науқасқа жеке бейімделуі оңалтудың барлық кезеңінде маңызды. Басқару жүйесі арқылы амплитуда мен жүктемені өзгерту арқылы оңалту процесін барынша нәтижелі етуге болады.

Деректерді жинау жүйесі қадамдар санын, қозғалыс барысында буын бұрыштарын және бұлшықет белсенділігін бақылап отыруға мүмкіндік береді. Осы мәліметтерге жүгіне отырып дәрігерлер оңалту динамикасын зерттеп, емдеу режимін науқасқа жеке бейімдеп, жүктеме мен бағдарламаны дұрыстау мүмкіндігіне ие.

Механотерапиялық экзоскелет оңалту процесін кешенді түрде жүзеге асырып, науқастың аяқ қозғалысын қалпына келтірудің сенімді жоғары технологиялық құрылғы болып табылады.

Аяқ буынының бұрылу осьтері (сурет 17) табан қозғалыстарының биомеханикалық негізін құрайды. Аяқтың тұрақтылығы мен қозғалыс үйлесімділігін қамтамасыз етеді [33].



Сурет 17 – Аяқтың буындарының бұрылу осьтері

Негізгі бұрылу осьтері үш бағытта қарастырылады (сурет 18) [34]:

- сагитталды ось – табанның бүгілуі мен жазылуын (плантарлық және дорсальдық флексия) қамтамасыз етеді;
- фронталды ось – табанның ішке және сыртқа бұрылуын, яғни инверсия мен эверсия қозғалыстарын жүзеге асырады;
- вертикальды ось – табанның ішкі және сыртқы айналу (ротация) қозғалыстарына жауап береді [35].

Бұл осьтер негізінен тобық және подтаранды буындарда жүзеге асады және олардың өзара үйлесімді жұмысы жүру, тепе-теңдікті сақтау және тірек фазасының тұрақтылығын қамтамасыз етеді.



Сурет 18– Аяқ буынының бұрылу осьтері

Инверсия және эверсия – табанның кеңістіктегі бағытын өзгертуге мүмкіндік беретін негізгі биомеханикалық қозғалыстардың бірі және аяқтың тірек-қимыл функциясын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Бұл қозғалыстар адамның жүру, жүгіру және тепе-теңдікті сақтау процестерінде тұрақтылықты арттырады.

Инверсия – табанның медиальды бағытта, яғни ішке қарай бұрылу қозғалысы. Инверсия кезінде табанның медиальды жиегі жоғары көтеріліп, латеральды жиегі төмендейді. Аталған қозғалыс негізінен подтаранды буында жүзеге асады, тобық буынымен тығыз биомеханикалық байланыста орындалады. Инверсия табан доғасының тұрақтылығын сақтауға, тірек фазасында аяқтың жер бедеріне бейімделуіне және қозғалыс кезінде соққы жүктемесін азайтады. Бұл қозғалысты қамтамасыз ететін негізгі бұлшықеттерге *m. tibialis posterior* және *m. tibialis anterior* деп аталады [36].

Эверсия – табанның латеральды бағытта, яғни сыртқа қарай бұрылу қозғалысы. Бұл кезде табанның латеральды жиегі жоғары көтеріліп, медиальды жиегі төмендейді. Эверсия қозғалысы тірек алаңын кеңейтіп, аяқтың динамикалық тепе-теңдігін қамтамасыз етеді. Ол жүру барысында соққыны сіңіру және тірек фазасының бастапқы кезеңінде аяқтың бейімделуін жеңілдету функциясын атқарады. Эверсияға жауапты негізгі бұлшықеттер *m. peroneus longus* және *m. peroneus brevis* деп аталады [37].

Инверсия және эверсия қозғалыстарының амплитудасы физиологиялық шектермен шектеледі және олардың шамадан тыс орындалуы байламдардың созылуына, буындардың тұрақсыздығына және жарақат алу қаупінің артуына әкелуі мүмкін. Механотерапиялық құрылғыларды және реабилитациялық экзоскелеттерді жобалау барысында бұл қозғалыстардың бұрыштық диапазонын, жылдамдығын және жүктемелік сипаттамаларын қатаң түрде ескеру қажет.

Инверсия мен эверсия қозғалыстары табан биомеханикасының ажырамас бөлігі болып табылады. Оларды басқарылатын түрде қалпына келтіру тірек-қимыл аппараты бұзылыстары бар пациенттердің функционалдық мүмкіндіктерін арттыруда маңызды ғылыми-практикалық мәнге ие болады [38].

2.1 Экзоскелет дизайнына қойылатын талаптар

Механотерапиялық экзоскелеттің дизайны науқастың тиімді оңалтуын, максималды қауіпсіздігін, жайлылығы мен ыңғайлылығын қамтамасыз ету үшін бірқатар маңызды талаптарға сай болуы керек. Олардың негізгі талаптары:

– Салмағы мен өлшемдері

Экзоскелеттің дамуындағы маңызды аспектілердің бірі-оның массасы. Науқастың жүктемесін азайту үшін құрылғы 15–18 кг-нан аспауы керек, әсіресе физикалық мүмкіндіктері шектеулі адамдарға қатысты. Тым ауыр құрылғы пайдалану кезінде қосымша қиындықтар тудыруы, тепе-теңдікті бұзуы және шаршауды тудыруы мүмкін. Бұл оңалту процесін қиындатады. Бұған ең аз салмақта қажетті беріктікті қамтамасыз ететін көміртегі және алюминий қорытпалары сияқты жеңіл, бірақ берік материалдарды қолдану арқылы қол жеткізуге болады.

Дизайн жиналмалы және 160–190 см диапазонында пайдаланушының биіктігіне оңай бейімделуі керек. Құрылғыны мамандандырылған көмекті қажет етпестен белгілі бір науқасқа тез реттеуге және сәйкестендіруге болатындығы маңызды. Бұл ыңғайлылықты қамтамасыз етеді. Бұл экзоскелеттің науқастың денесіне жүктемені дұрыс бөлуін қамтамасыз етеді.

– Автономия деңгейі

Экзоскелет автономды болуы, бұл оны электр желісінің болуына қарамастан пайдалануға мүмкіндік береді. Батареяның жұмыс уақыты кемінде 1-2 сағат белсенді пайдалану болуы керек. Бұл уақыт бір сеанс шеңберінде оңалту жаттығуларын немесе жаттығуларды өткізуге жеткілікті. Ол үшін құрылғының салмағын тым арттырмайтын, бірақ ұзақ жұмыс істейтін жоғары сыйымдылықтағы батареяларды пайдалануға болады.

Маңызды функция - бұл стационарлық режимде (желіден) және офлайн режимде, портативті батареямен жұмыс істеу мүмкіндігіне ие. Бұл құрылғының әмбебаптығын арттырады, оны оңалту орталықтарында да, үйде де қолдануға мүмкіндік береді, ал пациент қозғалғыштығымен шектелмейді.

– Жайлылық және қауіпсіздік

Ыңғайлы кию үшін экзоскелет құрылғыны науқастың денесіне бекітетін эргономикалық жұмсақ қондырғылармен жабдықталуы керек. Бұл бекітпелер денеге артық қысым жасамауы керек, теріні ысқыламауы керек және ұзақ уақыт қолдануға ыңғайлы болуы керек. Жұмсақ материалдар мен реттелетін белдіктер құрылғыны науқастың дене пішініне дәл келтіруге мүмкіндік береді, бұл жайлылықты арттырады.

Макет тобық буынын оңалтуға арналған механотерапиялық экзоскелет ретінде жобаланып, екі негізгі бөліктен тұрады: табан платформасы және элементтер орнатылатын корпус. Құрылғының корпусы аяқтың артқы және бүйір беттерін қамтитын берік әрі жеңіл қаңқа ретінде жоғары сапалы пластиктен немесе композициялық материалдардан дайындалады, бұл конструкцияның массасын азайтып, механикалық беріктігін сақтауға мүмкіндік береді. Пайдаланушыға жайлылық беру және қысымның біркелкі таралуын қамтамасыз ету үшін корпус пен тірек аймақтарының ішкі беті жұмсақ төсеніш материалымен (көбік, EVA немесе неопрен типті төсем) қапталады. Табан платформасы анатомиялық пішінге бейімделіп жасалып, қозғалыс кезінде аяқтың сырғып кетпеуі үшін оның бетіне сырғанамайтын жабын (резеңке төсем немесе текстуралы антислип қабат) қарастырылады. Аяқты сенімді бекіту мақсатында жоғарғы және ортаңғы аймақтарда реттелетін белдіктер қолданылады, олардың бекіткіші ретінде Velcro (велкро) түріндегі ілмекті-жапсырмалы жүйе таңдалады. Қозғалысты беру үшін сервоқозғалтқыштан катушка арқылы жүзеге асатын беріліс қолданылады, ал беріліс элементі ретінде аз созылатын және тозуға төзімді жоғары берікті жіп немесе балық аулау сызығы (мысалы, Кевлар немесе берік синтетикалық талшық) пайдаланылады. Басқару бөлігінде Arduino Nano микроконтроллері, ақпаратты көрсету үшін I2C интерфейсті LCD 16x2 дисплейі, ал автономды қоректендіру үшін литий-ион/литий-полимер аккумуляторы және оның қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ететін BMS модулі мен зарядтау үшін TP4056 модулі қолданылады; барлық тораптар сенімді монтаж элементтерімен (бұранда, болт, шайба) бекітіліп, сымдар термоқаптама және стяжкалар арқылы қорғалып, жинақы түрде орналастырылады [39].

Қауіпсіздік жүйесі пациенттің жарақаттануына жол бермейтін бұрыштар мен күштерді шектейтін кіріктірілген механизмдерді қамтуы керек. Мысалы, буындардың шамадан тыс бүгілуі немесе кеңеюі кезінде немесе рұқсат етілген жүктемеден асып кетсе, жүйе зақымдану қаупін болдырмайтын әрі қарайғы қозғалысты блоктауы керек болады.

Экзоскелет төтенше жағдайда дискіні жылдам өшіру функциясымен жабдықталуы керек. Күтпеген жағдайлар кезінде, мысалы, тепе-теңдікті жоғалту немесе құрылғының дұрыс жұмыс істемеуі, экзоскелет жарақаттанудың алдын алу және жағдайды түзетуге уақыт беру үшін қозғалтқыш элементтерін дереу өшіруі керек.

Науқасты тік ұстау жүйесі қауіпсіздікті қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Құрылғының қатты қаңқасы науқасты тік ұстауы керек, құлау

қауіпін азайтады және жүру немесе тұру кезінде тепе-теңдікті сақтауға көмектеседі.

– Басқару және интерфейс

Экзоскелетті басқару интуитивті және әртүрлі болуы керек. Қолмен басқару мүмкіндігі (түймелер немесе қашықтан басқару пульті арқылы) пайдаланушы мен дәрігерге құрылғыны толық басқаруға мүмкіндік береді. Науқас немесе терапевт қажет болған жағдайда параметрлерді реттей алады, мысалы, қозғалыс жылдамдығын немесе амплитудасын реттеу арқылы.

Құрылғы алдын ала белгіленген бағдарлама бойынша қозғалыстарды орындайтын жартылай автоматты жұмыс режимі басқаруды жеңілдетуге, науқастың үлгеріміне байланысты жаттығуларды бейімдеуге мүмкіндік береді. Бағдарламаларға жеңіл жаттығулардан бастап қарқынды жаттығуларға дейінгі әр түрлі қиындық деңгейлері кіруі мүмкін, жүктеме біртіндеп артады.

Датчиктердің деректеріне негізделген автоматты жұмыс режимі құрылғыға науқастың нақты уақыттағы физикалық жағдайына бейімделуге көмектеседі. Мысалы, сенсорлар оңалтудың оңтайлы жағдайларын сақтау үшін экзоскелеттің күш-жігерін түзету арқылы буындардың қозғалысын, дене қалпын және тіпті науқастың шаршау деңгейін бақылай алады.

Дәрігерлер мен нұсқаушылар үшін экзоскелетте жаттығу бағдарламаларын таңдау, науқастың үлгерімін бақылау және нақты уақыттағы түзетулер енгізу мүмкіндігі бар интерфейс болуы керек. Бұл мамандарға қалпына келтіру процесін дәлірек бақылауға және емдеу тиімділігін арттыра отырып, оңалту бағдарламасына қажетті өзгерістерді уақытында енгізуге мүмкіндік береді.

Экзоскелет жоғары технологиялық және сонымен бірге ыңғайлы, қауіпсіз және әр пациенттің қажеттіліктеріне бейімделген болуы керек [39], [40].

2.2 Экзоскелет құрамдарының басты элементтері мен конструкциясы

Жасалынған сервопривод бар табан және тобық қозғалысын реттеуге арналған ортез жартылай автоматтандырылған. Ол табан астында орнатылған сервопривод арқылы аяқты оңға немесе солға бұрады.

Бұл механизм неврологиялық ақаулары бар, жүйке жүйесі дерттерінен кейінгі аяқтың, нақтылай кетсек тобық пен табанның инверсиялық қозғалуын орнына келтіреді. Құрылғыда төменде айтылған бөлшектер бар.

Табанды толықтай қоршайтын пластик, композиттік материалдан жасалған корпус. Ол қатты болып келеді, аяқ қозғалып кетпейтіндей орналасады. Ол қозғалмалы болып келеді. Белгілі бір бұрышқа, белгілі бір циклмен өз осында оңға және солға қозғалады. Бұл аяқтың инверсия және эверсия қозғалысы бағытында.

Басты элементтердің бірі сервоқозғалтқыш. Ол табанның астыңғы бөлігіне бекітілген. Жоғары айналу моментіне ие. Бұрылу мүмкіндігі 180° дейін жетеді, табанды қажетті бұрышқа бұрып береді.

Аяқты ортез платформасына сенімді түрде бекітуге раналған белдік (липучка) қолданылды.

Қосымша элементтер мен табан платформасын орналастыратын корпус. Ол элементтерді кездейсоқ сыртқы соққылардан сақтайды. Құрылғының ықшамдылығын реттейді.

Жасалынған құрылғының жұмыс істеу тәртібі өте жеңіл, әрі тиімді. Корпусқа орнатылған сервопривод сигнал арқылы белгіленген бұрышқа дейін бұрылып, орнына келеді.

Ішке бұрылыс кезінде табан инверсия қозғалысын орындайды. Бұл бұрыштық қозғалыс табанның өздігімен ішке немесе сыртқа қарай бұрылуын реттейді. Орталық жүйкеге зиян келген емделушілер үшін бұл маңызды емшара.

Сервоприводқа сигнал берілмеген жағдайда ол өз орнына, яғни бастапқы аяқ қалпына өздігінен қайта келеді. Яғни пассивті эверсия қозғалысы орындалады.

Ортез емделуші емінің қауіпсіз, тиімді болғанын қарастырады. Ол құрылғыны дұрыс басқару арқылы жүзеге асырылады. Осы жағдайда сервоқозғалтқыш емделу процесінің пайдасын арттырады. Механикалық қарапайым жүйе, дегенмен оңалту принциптерінде өте тиімді шешімдерді көрсетеді.

2.3 Жасалған құрылғының айрықша белгілері және техникалық сипаттамалары

Жасалған сервоқозғалтқышты құрылғының бірнеше артықшылықтары бар. Ол артықшылықтар емшара кезінде оңалту процессін өте нәтижелі қылады. Ыңғайлы ортезге айналдырады.

Ортездің басты артықшылықтарына басқару процессінің оңай болуы жатады. Құрылғының негізгі артықшылықтарының бірі оны басқарудың жеңілдігі. PWM сигналы сервоқозғалтқышқа беріледі. Бұл табан платформасының енгізілген амплитуда өзгаш, дәлдеуге мұрша береді. Сервоқозғалтқыштың нақты дәлденген бұрышы қарапайым микроконтроллер арқылы жұмыс істейді. Қосалқы қиындатылған электронды сызбаларды керек етпейді.

Ортездің толық қаңқасы жеңіл материалдардан жасалған. Ыңғайлы табан платформасы, бекіту белдіктері науқастың жеңіл түрде киіп, ұзақ уақыт процессті жүргізуіне арналады. Ортездің ауыр болмауы науқастың қимыл-қозғалысына кедергі келтірмей, артық ауыртпашылықты болдырмайды. Оңалту кезеңінде физикалық түрде шаршауды төмендетеді.

Қозғалатын бұрыш өлшемін, тарту күші мен жылдамдыған жеңіл түрде қолдануға мүмкіндік жасайтын сервожетек. Ол кез келген қажетті

параметрлерді бейімдейді. Ол өз кезегінде әр науқастың ерекшеліктерін ескеріп, жеке физиологиялық мүмкіндіктерін қарастыруға жағдай жасайды. Оңалту процесінде бастапқы кезде аз бұрыштық өлшем мен төменгі жыдамдықтағы қозғалыс жасалады. Кейіннен науқас жағдайы жақсарған сайын параметрлерін біртіндеп өсіруге болады.

19 суретте көріп отырғанымыздай, құрылғы шағын. Жеңіл компоненттері оны кез келген ортада науқасқа қолдануға жағдай жасайды. Құрылғыны үйде де, медицина орталықтарында да ұтымды қолдана алады. :й жайында пайдалану емдік шараны үздіксіз етеді. Нәтижесінде, науқас дертінен сауығу ықтималдылығы артады, жылдамдайды. Ортезді күнде кию мен шешу үшін, құрылғының белдемшесі жеңіл, қарапайым түрде жасалынған.



Сурет 19- Құрылғының бастапқы күйі

Құрастырылған құрылғы негізгі екі бөліктен жасалған. Біріншісі табан платформасы. Анатомиялық ерекшеліктерді ескерек отырып, адам аяғына ыңғайлы жасалған. Жоғарғы бетінде байлауышы бар. Ол кездейсоқ сырып кетуді болдырмай. Екінші бөлігі элементтер орнатылған корпус.

Құрылғы жүйесі 3Д ортасында SolidWorks бағдарламасында нақты өлшемдер мен пропорциялар арқылы жинақталды. Соны арқасында жұмысты визуалды түрде көріп, 3Д модельдеу мүмкін болды. Кейіннен практикада жасау үшін техникалық сұлбаларды ала алдық.

Табанның бүйір, өкше жағын қоршайтын платформа жеңіл және қатты материалдан жасалған құрылым. Материалы сапалы пластик пен композиттік құрамнан жасалған. Ол аяқ массасының біркелкі жайылуына, мықтылығына жауап береді. Ортездің табан платформасы екі қызметті атқарады. Ол науқас аяғын бекітіп, артық жылжуды тоқтады. Белсенді элементтерді, яғни сервоқозғалтқышты орнататын негізгі корпус ретінде болады. Корпустың ыңғайлы формасы науқас үшін жайлы және біркелкі жүктеменің болуы ыңғайсыздық тудырмайды (сурет 20).



Сурет 20 - Құрылғының инверсия күйі

Жетекке жалғанған платформа аяқтың инверсия қозғалысын іске асырады. Табанның бұрылуын модельдеп, оңға және солға бұрады. Жасалынған платформа табанның пішінін сақтаған. Аяқ қойылған кезде сырғымайды. Сервоқозғалтқыш арқылы қозғалып, кабель арқылы тартылады. Бұл процесс қозғалуды тегіс әрі дәл амплитудада жүргізеді.

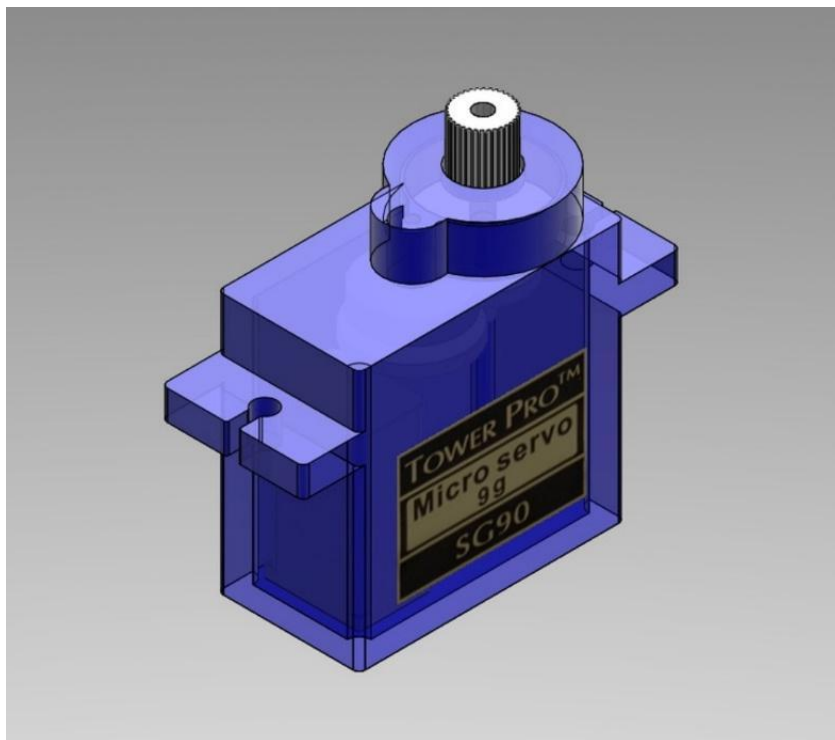
2.4 Сервоқозғалтқышқа шолу

Жасалынған жүйенің басты белсенді элементі SG сериядағы сервоқозғалтқыш. Ол жоғарғы айналу моментімен, орналасу ыңғайлылығымен қолайлы қозғалтқыш. Ол табан астына бекітіліп, катушка

ораған кабель арқылы айналдырады. Айналу бұрышы 180 градусқа дейін жетеді. Бұл емшара кезінде науқастың физикалық ерекшеліктеріне қарай дәлдеуге, қозғалыс амплитудасын жөндеуге мүмкіндік тудырады.

Оны икемді микроконтроллер немесе басқарушы блок арқылы жүзеге асырамыз. таңдаған моделіміз Servo SG90. Бұл жоғарғы сападағы қозғалтқыш. Айналу бұрышы 180°-қа, тарту күші 20 см-ге дейін созылады. Сервоқозғалтқыш PWM сигналы арқылы басқарылады. Нақты дәлдікпен қозғалыс береді. Құрылғы корпусы мықты, температура және дірілге төзімді. Робототехникада еркін пайдалануды мүмкін етеді.

21 суретте көрсетілген сервомотор жоғарғы жүктемелердегі жобаларға арналған. Оның тарту күші ауыр салмақты қозғалтады. Дәс басқаруды қамтамасыз етеді. Көрсетілген құрылғы экзоскелет, оңалту аппаратурасында, өндірісті автоматтандыруда кеңінен пайдаланылады. Сенімді корпусы ұзақ мерзімді қолданысқа төзімді қылады.

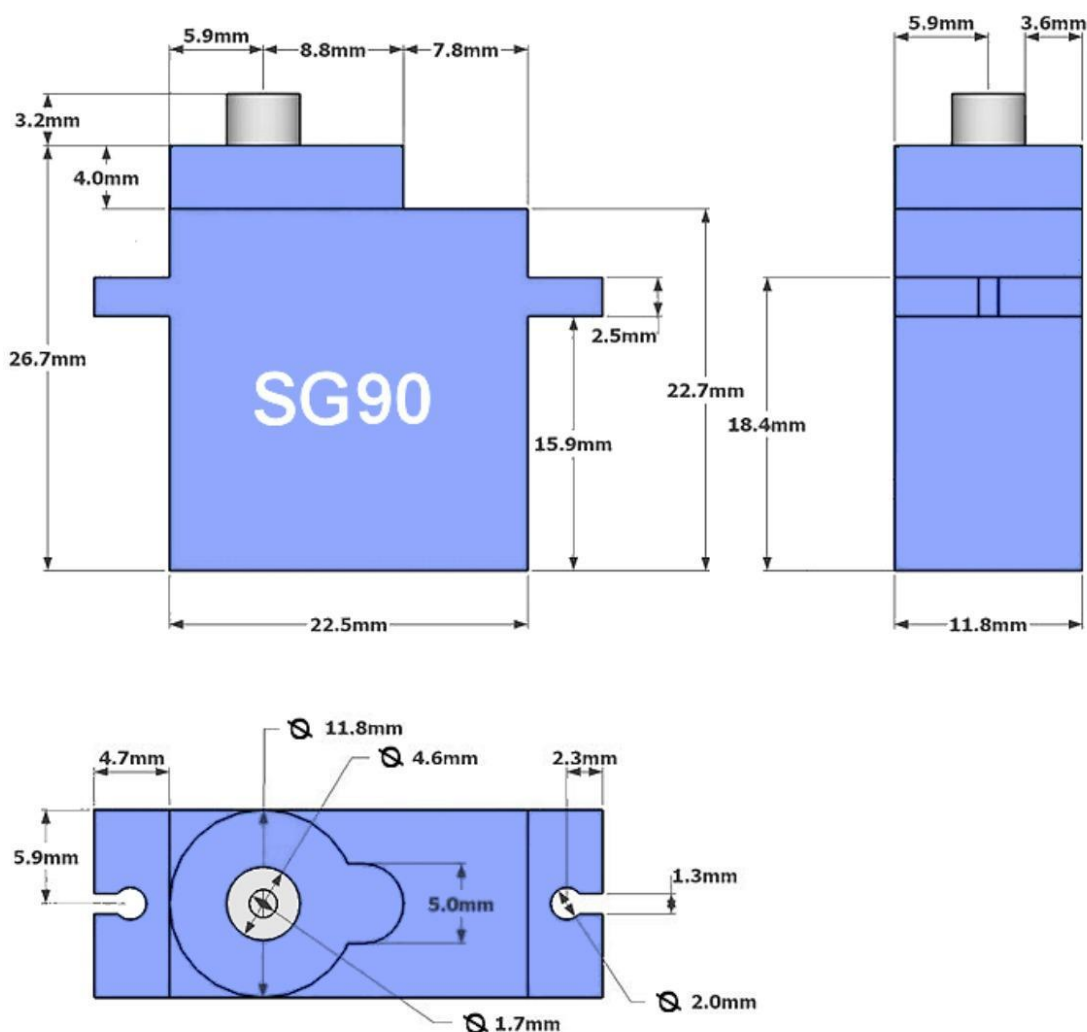


Сурет 21 – Сервоқозғалтқыш 3D моделі

SERVO SG90 (сурет 22) сервомоторы 3 сымды интерфейс арқасында жұмыс жасайды. Олар: Қуат, жер мен басқару сигналы. Сервоны Arduino, ESP32, STM32 секілді микроконтроллермен жеңіл байланысқа түсіре аламыз. Серво жұмыс істеуіне 6-7,4В тұрақты кернеу қажет. Яғни, қозғалтқыш қарапайым, қуаты мол. Құрылғыны әртүрлі техникалық жобаларда қолдана алатындай сенімді.

Қозғалтқыш сенімді, жоғарғы моментті құрылғы. Робототехника саласында, радиобасқару модельдері мен протездерде кеңінен қолданылады. Ауыр жүктемелерге төтеп береді. Көрсетілген бұрышты дәл орындайды. Ол

буындарды оналтуда маңызды. Жоғарғы момент артқасында қозғалтқыш басқа бөлшектерді де керекті бұрышқа қозғап бере алады.



Сурет 22 – Сервоқозғалтқыш өлшемдері

Құрылғының басты артықшылығы оның механизмінің тісті болуы. Ол құрылым ішінде ұзақ уақыт бойы тозуын болдырмайды. Цифрлі басқару негізінде ол дірілдемей, уақытылы реакция береді. бұл қасиет емдеуде адам қозғалысын тура қайталауда қолайлы. Бұл мүмкіндіктер механикада тиімділікті арттырып қана қоймай, емшараны да жеілдетеді.

SERVO SG90 сервоқозғалтқышты Arduino-мен біріктірдік. Олар алыстан басқаруды, тактильді жауап пен тракторияны бағдарламалау сияқты қиын функцияларды да жасайды. Оның ықшам түрі оңай өйдеуге мүмкіндік береді.

Жетек жүйесінде күшпен қозғауға төзімді жіп қолдандық. Ол кевлер талшығынан жасалған. Бұл тез тозуға қарсы және созылудың төмен деңгейін көрсетеді. Бұл шешім құрылғы массасын жеңілдетеді.

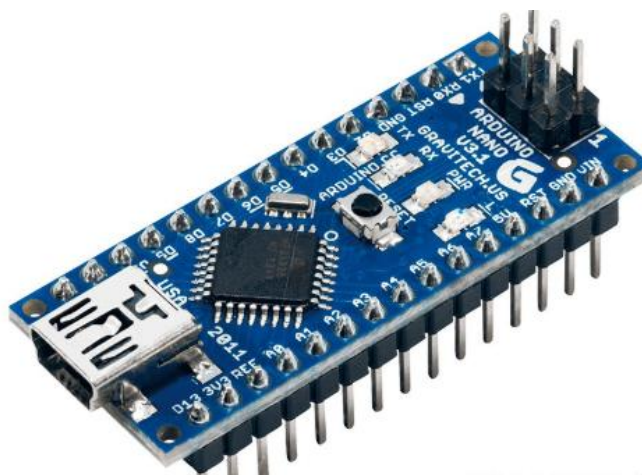
Экзоскелет механизмі ультракүлгін сәулесіне төзімді, сол себепті оны ұзақ уақыт бойы қолдануға болады.

Науқас жанның аяғын сенімді әрі қауіпсіз бекіту үшін "велкро" (Velcro) түрдегі бекіткіштермен жасалған реттелетін бекіткіш белдіктері қолданылады. Белдіктер білікке және аяққа да тағылады, бұл жұмсақ тіндерге қан ағымы мен қысымын шектемей сенімді бекітілуді қамтамасыз етеді. Механотерапия сеансы барысында аяқтың сырғып кетпеуіне және қозғалыс траекториясын дәл қайталау үшін маңызды рөл атқарады.

2.5 Микроконтроллерге шолу

Құрылғының негізгі басқару көзі 23 суретте көрсетілген Arduino Nano микроконтроллері. Микроконтроллер ерекшелігіне кішігірім өлшемі мен atmega328p чипі жатады. Ол микроконтроллерді жүйелер үшін жақсы шешім қылады. Сандық шығыс кірісі (14) және аналогтық кіріс (8) бар микроконтроллер әртүрлі сенсорлы жіне атқарушы элементтерді басқарады. Сервоқозғалтқыш, дисплей, пайдаланушы интерфейсын жалғауға мүмкіндік береді.

Бұл диссертациялық жұмыста Arduino Nano микроконтроллері табан платформасын бұруға жауапты. Сервоқозғалтқышқа басқару сигналын береді. Аяқтың қозғалу амплитудасына сәйкес сервоқозғалтқыш бұрышы PWM (импульстің ені модуляциясы) арқылы жүзеге асады. Микроконтроллер оның жылдамдық, кідіріс уақыты, цикл саны секілді баптауларды бағдарламалайды. Осының арқасында нақты оіалту процессін икемдей аламыз.



Сурет 23– Arduino Nano микроконтроллері

Arduino IDE программасы арқылы бағдарламаны қарапайым әрі кең кітапханалы базаны пайдаланамыз. Осының арқасында микроконтроллер функциясын тез баптап, функционалдығын кеңейте аламыз. Ол тиімді энергия және үйлесімді модульды жұмысқа тиімді орта береді.

Микроконтроллер шағын пішімімен, модульдік беййімделу жеңілділігімен, оңай интерфейспен инженерия мен медицина салаларында қолдануға өте ыңғайлы.

Өлшемі 4,5 см ұзындық пен 1,8 см ені көптеген жұмыстарда ыңғайлы. Мысалы: киіlmелі технология, ықшам оңалту құрылғылары, тест макеттер,

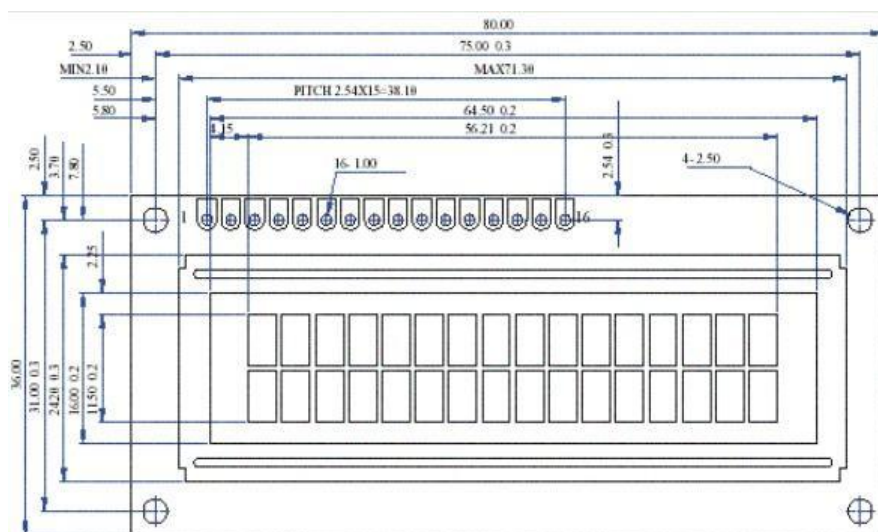
т.б. Arduino Nano-ны басқа элементтермен қосуға болады. Мысалы: сервоқозғалтқыштар, датчиктер, дисплейлер мен Bluetooth модульдері, т.с.с. Себебі пиндер стандартты. Барлығын бағдарламалауға кең кітапханалар таралған.

Экзоскелеттер, оңалту құрылғылары және сервоқозғалтқыштар үшін Arduino Nano жұмыс істеуге басқарылатын жүйе құруға ыңғайлы. Сандық және аналогтық пиндері көптеген датчиктер, батырмалар мен жетектерді, дисплейлерді жалғауға мүмкін етеді. Ол PWM сигналдарын генерациялайды. Сервоқозғалтқыштар тікелей байланысып, қолданылады. Arduino IDE платформасында бағдарлама енгізіліп, оңай жұмыс жасайды. Қолданушы оңай үйрене алады.

Келесі айта кетерлік артықшылыққа оның төмен кернеуде, яғни 5В жұмыс жасайтынын жатқыза аламыз. Ол қуатты үнемдеп, автономды түрде және батарея арқылы жұмыс жасай алады. Оңалту құрылғылары үшін бұл маңызды көрсеткіш болып табылады. Себебі, науқас денесіне орнатылғанда, үздіксіз қозғалыста керек баптау. Мысалы, табан құрылғысында Arduino Nano табан платформасындағы қозғалысты басқару, нәтижені дисплейде көрсету, басқару батырмасына реакция секілді бірнеше жұмысты бір мезгілде орындайды.

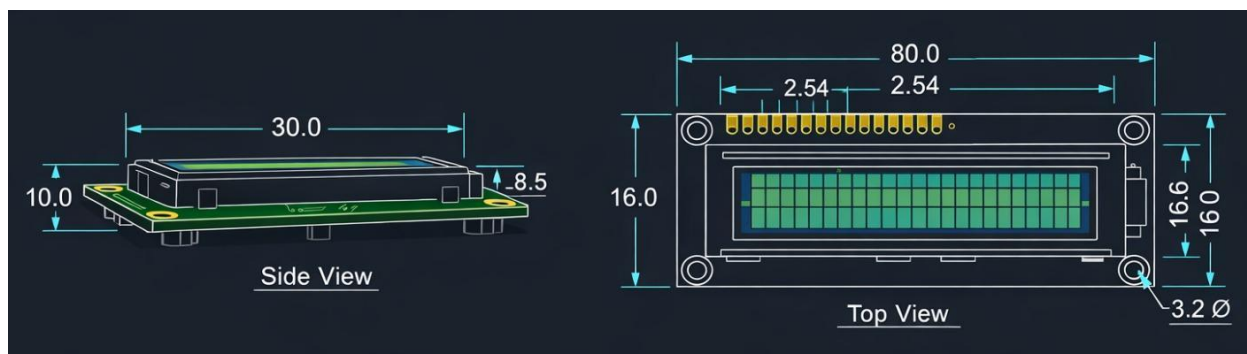
Ол ашық кодты, сол себепті қолданушы жұмысты еркін өзгерте алады. Өз керегіне қарай бейімдейді. Ғаламтор жүйелерінде дайын кітапханалар және сызбалар бар. Соларды пайдалана отырып, үй жайында да жеңіл бағдарламалай аламыз. Айтылған артықшылықтар микроконтроллерді оңалту технологиясы прототипінде ыңғайлы шешім екенін дәлелдейді.

Сурет-24ке қарасақ LCD 16x2 дисплейі Arduino қарапайым ақпараттық құрылғы көрсетілген. Ол 16 символдан 2 қатардан тұрғандықтан атауы 16x2. Бұл дисплей 32 таңбаға дейін мәтін көрсете алады.



Сурет 24 - LCD display 16x2

Мұндай дисплей реабилитациялық құрылғыларда, робототехника да, ауа райы станциялары және әртүрлі өлшеу құралдарында бар. Ал сурет-25ке қарасақ дисплей өлшемдерін көреміз.



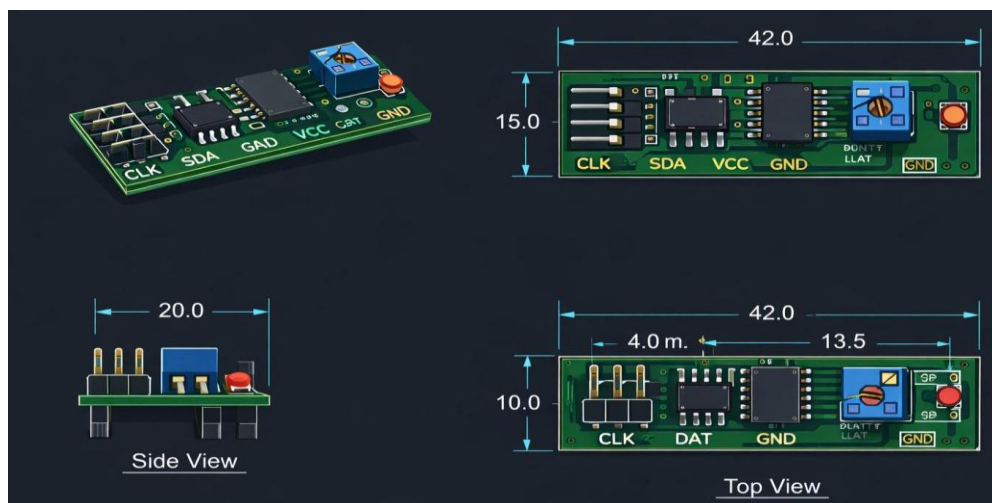
Сурет 25 – LCD 16x2 дисплейінің өлшемдері

Ақпаратты нақты әрі оқуға ыңғайлы түрде көрсетуі қызметі бұл дисплейдің артықшылығы. Реабилитациялық құрылғыда науқастың жаттығу уақыты, қозғалыс бұрышы, сеанс саны немесе бастау/тоқтату режимі сияқты мәліметтерді көрсетіп отыруға болады. Arduino-ға 4 сым қосылады LCD 16x2 дисплей I2C модулі (сурет 26) арқылы. Екі сым қуат үшін (VCC, GND), ал екеуі басқару үшін (SDA, SCL). Бұл көптеген сымдарды үнемдеп, дисплеймен жұмыс істеуді жеңілдетеді.



Сурет 26 - LCD 16x2

Бағдарламалау қарапайымдылығы LCD 16x2 дисплейінің артықшылығы. LiquidCrystal_I2C немесе LiquidCrystal -ларды Arduino IDE арқылы қолдану, дисплейге мәтінді бірнеше жол кодпен шығарып береді (сурет 27).



Сурет 27 – I2C интерфейсті модуль

I2C интерфейсті модулі микроконтроллер мен дисплей арасында ақпарат алмасуды қамтамасыз етеді. Бұл модуль басқару сигналдарын қабылдап, оларды дисплейге түсінікті форматқа түрлендіреді. Экран нақты мәліметтер мен мәтіндік ақпарат көрсетеді. Модуль дисплейдің жарықтығын, контрастын реттейді. Ықшамдылығы, төмен энергия тұтынуы және сенімділігі арқасында дисплейлер портативті медициналық құрылғыларда өолданылады.

Сурет-28ді қарасақ, BMS литий-ион, литий полимер аккумуляторларын пайдалануға арналған электрді басқару модулі. Плата оның кернеуін, тоқын, температурасын және заряд деңгейін бақылап, артық зарядтамайды. Және де толық разряд, қысқа тұйықталу, қызып кету сияқты жағдайлардан қорғайды.

Бұл құрылғыда BMS платасы міндетті компонент болып табылады. Плата ұшықтарды баланс жасап, әрбір ұяшық кернеін бір деңгейде ұстайды. Сол үшін аккумулятор ұзақ жұмыс істейді. Үш ұяшықты аккумуляторда (3S) әр ұяшықты жеке бақылайды. Барлық батарея блогы қауіпсіз болып табылады. BMS платаларлан кейбіреуі заряд, разряд, токтан шектеу, термодатчиктерді біріктіру, қосымша баланс жасау үшін сұлбаларда қолдану арқылы қауіпсіз.



Сурет 28- Аккумуляторды басқару жүйесі

BMS плата реабилитациялық экзоскелеттерде портативті медициналық құрылғыларда және моторлы жүйелерде кеңінен қолданылады. Бұл құрылғы үнемі адам денесімен байланыста болатынын ескерсек, қауіпсіздік талаптары жоғары болуы тиіс. BMS аккумуляторлардың тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Артық қызудан немесе шамадан тыс жүктемеден қорғайды. Батерияның ұзақ мерзімді және тиімді қызмет етуіне кепілдік береді.

BMS платасы аккумуляторлар нақты уақыт режимінде бақылау мүмкіндігімен ерекшелінеді. Ол әрбір ұяшықтағы кернеу, бүкіл батарея тізбегіндегі ток және температураны үнемі қадағалайды. Осы деректерге сүйенсек, плата қажет болған жағдайда зарядтау автоматты түрде тоқтатады немесе ауырлықты ажыратады. Бұл батареяны зақым алудың алдын алады. Қазіргі BMS жүйелерінде микроконтроллер орнатылып, Bluetooth немесе UART интерфейсі арқылы сыртқы құрылғылармен байланыса алады. Сол арқылы адамдар батареяның сапасын смартфон немесе компьютер арқылы бақылайды.

Кейбір BMS модульдер баланс ұстау функциясын орындайды, ірбір аккумулятор ұяшығы бірдей заряд деңгейіне ұстайды. Бұл өте маңызды, себебі бір ұяшық басқаларға қарағанда ертерек зарядталса немесе разрядталса, бүкіл батареяның сенімділігін жоққа шығарады. Баланс ұстау батареяға сыйымдылығын толық пайдалануға және жалпы өмірлік циклын ұзартуға мүмкіндік береді.

Сондықтан BMS плата медициналық, киілетін құрылғыларда қауіпсіз, әрі сенімді құат көзі. Онсыз литий-ионды аккумулятор шамадан тыс қызып, жарылу қаупіне ұшырауы мүмкін. Осылайша, BMS жүйесі жобаның қауіпсіздігін қамтамасыз етеді.

Сурет-29ға қарасақ, қазіргі заманауи протативті құрылғыларда литий-полимер (Li-Po) және литий-ион (Li-ion) аккумуляторлар кеңінен қолданылатын қуаттың көзі. Бұл аккумулятордың басты ерекшелігі жоғарғы

энергия тығыздығы, жеңіл салмағы және ықшам өлшемі. Бұл сипаттамалар құырғының ұзақ уақыт бойы автономды жұмыс істеуін қадағалайды. Бұл әсіресе адам баласына тікелей орнатылатын экзоскелетпен басқарылатын реабилитациялық жүйелер үшін маңызды.



Сурет 29- Литий-ионды аккумулятор

Стандартты кернеуі 3,7В ал аккумулятордың сыйымдылығы қолдану мақсатында ұрай таңдалады. Мысалы, қарапайым Arduino жобаларында 1100-2200мА-сағ сыйымдылық жеткілікті болып саналады. Бұл аккумуляторлар құрылғыны бірнеше сағат бойы үзіліссіз жұмыс істетеді. Сондай-ақ олар жоғарғы жүктемелерге төзімді, яғни серво қозғалтқыштар, датчиктер және дисплей бір уақытта жұмыс істесе де, тұрақты энергиямен қамтамасыз етеді.

Аккумуляторларды зарядтау үшін TP4056 модулі қолданылады. Бұл шағын модуль аккумуляторды арқылы қауіпсіз зарядтауға мүмкіндік береді, сондай-ақ шамадан тыс зарядтау мен толық разрядтан қорғайды. TP4056 модулінің артықшылығы оның қарапайым және арзан шешім болуы, сондықтан үйде немесе шағын жобаларда қолдануға ыңғайлы. Модуль арқылы құрылғынан USB порты немесе PowerBank арқылы қуаттандырып оңай жүзеге асады, ал батареяның жағдайын бақылау толықтай қауіпсіз түрде орындалады.

2.6 Оңалтуға арналған роботтың бағдарламалық баптауы

Arduino IDE бағдарламалық жабдықтамасы

Бұл тарауда Arduino Nano негізіндегі дербес басқару жүйесі сипатталған. Жүйе Серво қозғалтқышы арқылы аяқ платформасының қозғалысын орындайды, ал LCD ағымдағы бұрышты және орындалған циклдар санын көрсетеді. Басқару түймесі арқылы сеансты бастауға немесе тоқтатуға болады. Төмендегі кестеде негізгі компоненттердің сипаттамалары келтірілген. (Қосымша Б)

Кесте 2 - Экзоскелет басқару жүйесінің негізгі элементтері

№	Компонент	Рөлі	Түсіндірме
1	Arduino IDE	Бағдарламалық орталық	Arduino тақшасын бағдарламалау үшін қолданылады; код жазу, тексеру және тақшаға жүктеу мүмкіндігі бар. Интерфейсі қарапайым, жаңадан бастағандар да пайдалана алады. Бағдарламалау C/C++ тілдеріне ұқсас синтаксис арқылы жүзеге асады.
2	Arduino Nano	Басқарушы құрылғы	Сервоқозғалтқыштарды басқарады, дисплейге ақпарат жібереді. USB арқылы IDE-ге қосылады.
3	Сервомотор (Servo)	Қозғалысты орындаушы	Аяқ платформасын белгіленген бұрышқа бұрады (мысалы, 20° төменгі бұрыш, 90° ортаңғы). Реабилитациялық жаттығуларда қозғалысты имитациялайды.
4	LCD дисплей 16x2 (I2C)	Ақпарат көрсету	Бұрыштық позиция мен орындалған цикл санын нақты уақыт режимінде көрсетеді. I2C арқылы тек 2 сыммен қосылады, бұл жүйені ықшам етеді.
5	Басқару батырмасы	Сеансты басқару	Қолданушыға қозғалысты бастау немесе тоқтату мүмкіндігін береді. Кездейсоқ іске қосылмауға арналған логика қосылған.
6	Servo.h кітапханасы	Серво басқару	Серво бұрышын дәл орнатуға арналған командалар береді.
7	Wire.h кітапханасы	I2C байланыс	Arduino мен I2C құрылғылары (мысалы, дисплей) арасындағы тиімді байланысқа мүмкіндік береді.
8	LiquidCrystal_I2C.h кітапханасы	LCD басқару	16x2 дисплейге мәтін шығару, артқы жарықты қосу, курсорды орнату мүмкіндігін береді.
9	Бұрыш және цикл айнымалылары	Жұмыс мәндерін сақтау	angleLow (төменгі бұрыш), angleMid (ортаңғы бұрыш) – сервомотор бұрыштарын анықтайды. lifts – қозғалыстар санын санайды.
10	setup() функциясы	Бастапқы баптаулар	Arduino қосылған кезде бір рет орындалады. Сервомотор қосылады, дисплей іске қосылады, бастапқы хабарлама шығарылады.

2 кесте жалғасы

11	loop() функциясы	Қайталанатын цикл	Сервомотор төмен бұрышқа, кейін ортаңғы қалыпқа ауысады. Әр қозғалыстан кейін дисплей жаңарып, ағымдағы бұрыш пен көтерілім саны көрсетіледі. Цикл шексіз қайталанады.
12	updateLCD() функциясы	Дисплейді жаңарту	Бұрыш және қозғалыс саны параметрлерін экранға шығарады, пайдаланушыға құрылғының ағымдағы жұмыс күйін бақылауға мүмкіндік береді.

Құрылғы іске қосылған кезде сервомотор алдын ала орнатылған бұрышқа ауысады, ал әр қозғалыстан соң LCD дисплейде ағымдағы бұрыш пен орындалған цикл саны көрсетіледі. Бұл пайдаланушыға экзоскелеттің нақты жұмыс күйін бақылауға мүмкіндік береді. Қозғалыс параметрлері физиологиялық рұқсат етілген шектерден аспайтынына көз жеткізілгендіктен, қауіпсіздік деңгейі сақталады. Кестеде көрсетілген барлық компоненттер бірлесіп, экзоскелетті сенімді әрі қауіпсіз пайдалануға жағдай жасайды. Arduino Nano мен сервомотордың үйлесімі қозғалыстардың дәлдігін қамтамасыз етеді, ал LCD дисплей мен басқару батырмасы пайдаланушыға ыңғайлы интерфейс ұсынады.

Қосымша мәлімет: Arduino IDE бағдарламасы

Arduino IDE – Arduino тақшаларын бағдарламалау және тексеруге арналған ресми бағдарлама. Ол код жазуға, тексеруге және тақшаға тікелей жүктеуге мүмкіндік береді. Бағдарламаның интерфейсі қарапайым, жаңадан үйренушілер үшін де ыңғайлы. Кодтар C/C++ тілдеріне ұқсас синтаксиспен жазылады және көптеген дайын кітапханалар мен мысал жобалар қолжетімді. Бұл кітапханалар сервомоторларды басқаруға, I2C арқылы құрылғылармен байланыс орнатуға және LCD дисплейге ақпарат шығаруға көмектеседі. Arduino IDE ашық бастапқы кодқа ие болғандықтан Windows, macOS және Linux жүйелерінде жұмыс істей алады. Сонымен қатар, үлкен қолданушы қауымдастығы мен оқулықтар бағдарламаны меңгеруді жеңілдетеді.

2.7 Жүйенің функционалды бөлімі

Жалпы, инсульт қозғалыс функциясының бұзылуына алып келетін басты себептердің бірі болып келеді. Сол себепті мұндай науқастардың қозғалыс мүмкіндігін қалпына келтіруді уақытында бастау өте маңызды. Бірақ инсульттен кейін тізе, тобық айналасындағы бұлшықеттердің белсенділігі төмендеп, керек қозғалыс күшін бере алмайды. Бұл ерте оңалтуды қиындатады.

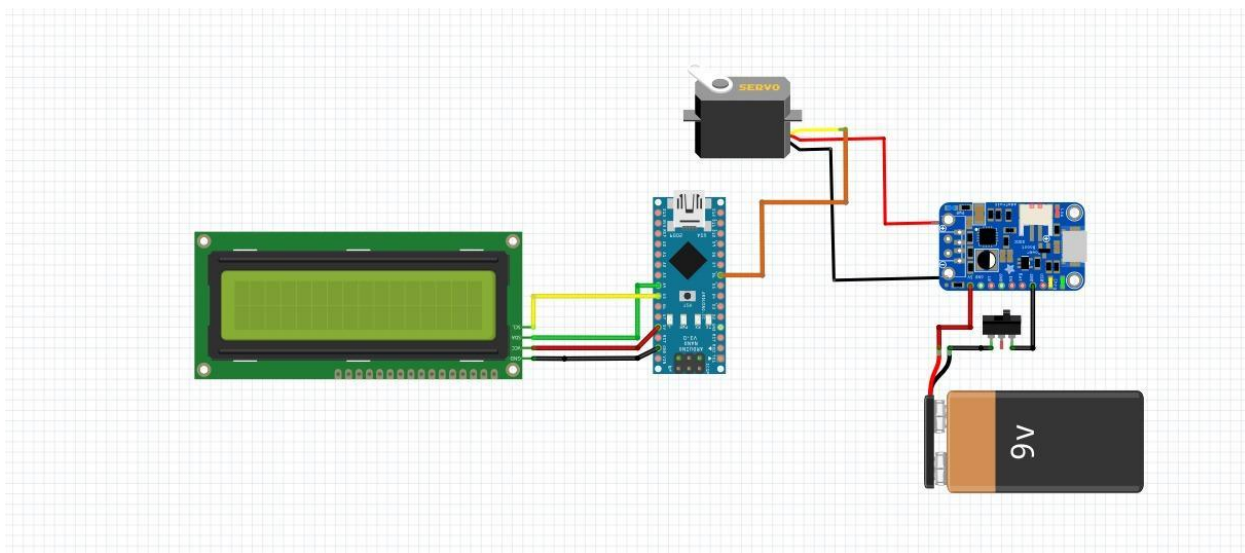
Осы мәселені шешу үшін экзоскелеттер ұсынылады. Құрылғыны үй жағдайында, маманның көмегінсіз пайдалану мүмкіндігі инсульт алған науқастарға оңалтудың бастапқы кезеңіндегі терапияның тиімділігі мен қарқындылығын айтарлықтай көбейтуге мүмкіндік береді. Жүруді қалпына келтіруге арналған роботтарды жақсарту үшін қалыпты жүрудің нейро-

механикалық динамикасы мен оны басқару тетіктерін терең түсіну аса маңызды болып табылады. Бұрын жүргізілген зерттеулер адамның жүруі белгілі бір ырғаққа бағынатынын, бұл қозғалыстар сыртқы механикалық әсерлермен үндесе алатынын айтқан. Осыған сүйене отырып, зерттеушілер аяққа арналған экзоскелетті пайдалана отырып, адамның қозғалыс ырғағын зерттеген. Экзоскелет арқылы жамбасқа периодты түрде сыртқы механикалық күштер әсер етіп, олар адамның табиғи жүріс ырғағына жақын етіп жасалған.

Зерттеу нәтижесінде адамдар бұл әсерлерге бейімделіп, өз жүріс ырғақтарын сол күштермен жақсартқандары байқалды. Айта кетерлік жайт бұл синхрондау екі түрлі қадам фазасында жүзеге асқан, ал бұрын тобық буынына қатысты жүргізілген зерттеулерде үйлесу тек бір фазада ғана өткізілген болатын.

Төменде Arduino Nano негізінде құрылған автономды басқару жүйесінің құрылымы көрсетілген. Жүйе серво қозғалтқыш, I2C интерфейсі арқылы қосылған LCD дисплей, қуат көзі, батырма және зарядтау модулін қамтиды. Негізгі басқару элементі ретінде Arduino Nano микроконтроллері таңдалған, ол серво қозғалтқыштарды басқара отырып, дисплейге қажетті ақпарат шығарады. LCD дисплей Arduino-ға екі сымды I2C интерфейсі (SDA және SCL) арқылы қосылған, бұл байланыс сымдарынның санын азайтып, жүйенің ықпал және жинақы болуына мүмкіндік береді. Сервоқозғалтқыш Arduino-ның сандық шығысына (мысалы, D9 пиніне) жалғанып, платформаның бұрыштық қозғалысын қамтамасыз етеді. Осы арқылы реабилитациялық құрылғының табан платформасы оңға немесе солға жылжып, науқастың қозғалыс сеансын басқара алады.

30-суретте басқару жүйесінің құрамындағы қолданушы әрекетін бақылайтын батырма көрсетілген.



Сурет 30 – Жүйенің функционалды схемасы

Бұл батырма арқылы оңалту сеансын бастау немесе тоқтату мүмкіндігі қарастырылған. Құрылғының басрлық компоненттері литий-полимерлі аккумулятордан қоректенеді, ал оның зарядталуы TP4056 модулі арқылы

жүзеге асып, тұрақты кернеу беріледі. Құатты қосу немесе өшіру үшін қарапайым қосқыш (тумблер) орнатылған, ол құрылғының автономды жұмыс режиміне басқаруға мүмкіндік береді.

Сервомоторлар мен LCD дисплей TP4056 модулінің VOUT+ және GND шығыстарына қосылғандықтан, жүйенің барлық элементтері аккумулятордан біртұтас түрде қоректенеді. Жүйе іске қосылған кезде Arduino Nano микроконтроллері белсенді болып, дисплейге бастапқы ақпарат көрініс табады. Қолданушы батырма арқылы пәрмен бергенде сервомотор қажетті қозғалысты дәл орындайды. Осындай басқару жеңілдігі құрылғыны портативті медициналық аппараттарда, атап айтқанда тобық немесе аяқ реалибитациясын автоматтандыруда тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

Экзоскелеттің негізгі қозғалтқыш элементтері ретінде үш электрлік сызықтық жетек пайдаланылды. Бұл жетектер тобық буынында дорсифлексия, плантарфлексия, инверсия және жверсия қозғалыстарын орындауға арналған. Әр жетек балтыр мен табан платормаларына сфералық және әмбебап шарнилер арқылы бекітілген, бұл конструкция қозғалыстың дәлдігі мен еркіндігін қамтамасыз етеді, сонлай-ақ науқасқа ыңғайлы және қауіпсіз оңалту тәтірибесін ұсынады.

2.8 Аяқтың функцияларын қалпына келтіруге арналған механотерапиялық экзоскелеттің кинематикалық және күштік есептеулері

Жобаланған механотерапиялық экзоскелет тобық буынының моторлық функцияларын қалпына келтіруге бағытталған, атап айтқанда аяқтың инверсия және эверсия қозғалыстарын орындауға мүмкіндік береді - оңға және солға бұрылу. Бұл қозғалыстар тепе-теңдікті сақтауға, жүру тұрақтылығын қамтамасыз етуге және аяқтың үйлесімді қозғалысын қамтамасыз етуге маңызды рөл атқарады.

Клиникалық биомеханиканың зерттеулер көрсеткендей, тобықтың физиологиялық рұқсат етілген бұрыштары келесідей:

- аяқтың инверсиясы: 20° - дан 30° - қа дейін;
- аяқтың эверсиясы: 10° - тан 15° - қа дейін.

Дегенмен, инсульт, жарақат немесе неврологиялық бұзылыстардан кейінгі ерте оңалту кезеңінде науқастардың шамадан тыс ауырсынуын болдырмау үшін бұрыштардың қауіпсіз және азайтылған диапазоны қолданылады. Осыған байланысты әзірленіп жатқан экзоскелетте аяқтың айналу бұрышы алдын ала шектелген мәнге дейін шектеледі:

$$\varphi_{max} = \pm 20^{\circ}$$

Қозғалыс диапазоны физиологиялық шектерде таңдалып, науқасқа қауіпсіз ортаны қамтамасыз етеді. Экзоскелетте сервомотор айналмалы қозғалысын кабельдік беріліс арқылы табан плафтомасының бұрыштық қозғалысына түрлендіреді. Кабель (Кевлар немес басқа берік синтетикалық

жіп) сервомоторға бекітілген катушкаға оралып, платформанының қозғалысын дәл басқарады.

Механизмнің негізгі геометриялық параметрлері:

- сервомотор катушкасының радиусы:

$$r=15 \text{ мм}=0,015\text{м}$$

- табанның айналу осінен платформадағы кабельді бекіту нүктесіне дейінгі қашықтық:

$$l=80\text{мм}=0,08\text{м}$$

Аяқтың белгілі бір бұрышқа айналуын қамтамасыз ету үшін кабельдің сызықтық қозғалысы есептелуі тиіс. Платформа бұрышы мен кабельдың сызықтық жылжуы арасындағы тәуелдік төмендегі өрнек арқылы анықталады:

$$s=l \cdot \varphi$$

мұндағы:

s - сызықтық кабель қозғалысы,

l -күш қолдану иығы,

φ -радианмен аяқтың айналу бұрышы.

Максималды бұрылу бұрышын радианға аударайық:

$$20^\circ=0,349\text{рад}$$

Сонда кабельдің сызықтық қозғалысы:

$$s=0,08 \cdot 0,349=0,028\text{м}=28\text{мм}$$

Осылайша, аяқты $\pm 20^\circ$ бұру үшін кабельдің 28 мм қозғалысын қамтамасыз ету қажет.

Кабельдің сызықтық қозғалысы сервомотор катушкасының айналу бұрышына келесі қатынаспен байланысты:

$$s=r \cdot \theta$$

мұндағы:

θ -сервомотордың радианмен айналу бұрышы. Содан:

$$\theta = \frac{s}{r} = \frac{0,028}{0,015} = 1,87 \text{ рад}$$

Алынған мәнді градусқа айналдыратын болсақ:

$$\theta = 1,87 \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 107^\circ$$

Демек, аяқтың максималды бұрылу бұрышын $\pm 20^\circ$ іске асыру үшін сервомоторды шамамен $\pm 107^\circ$ бұру керек, ол 180° айналу бұрышы бар стандартты серво жұмыс диапазонына толығымен сәйкес келеді.

Құырлығының жұмысын бағалау барысында оның массасы мен аяқ бұлшықет-байлам жүйесінің кедергісі ескеріліп, айналу үшін қажетті момент мөлшері анықталады.

Аяқтың және дистальды жіліншіктің тиімді массасын алайық:

$$m=2,5\text{кг}$$

Ауырлық күші:

$$F=m \cdot g=2,5 \cdot 9,81=24,5\text{Н}$$

Экзоскелет дизайны TIANKONGRC TD-8120MG сервомоторын пайдаланады, оның максималды айналу моменті төмендегідей:

$$M_{servo} = \frac{20\text{кг}}{\text{см}} \approx 1,96\text{Н}$$

Медициналық және оңалту құрылғылары үшін міндетті түрде қор коэффициенті енгізіледі. Олар:

- науқастың жеке ерекшеліктері;
- тіндердің кедергісі;
- динамикалық жүктемелер;
- механикалық элементтердің тозуы.

Қор коэффициентін қабылдсақ:

$$k=1,5$$

Содан кейін қажетті есептік сәт:

$$M_{req} = M_{ankle} \cdot k = 1.96 \cdot 1.5 = 2.94 \text{ Н/м}$$

Талдау жұмыстарының нәтижесі бойынша таңдалған сервомотор шекті мәндерге жақын жұмыс істесе де, бұрыштар мен қозғалыс жылдамдығы дұрыс реттеліп, редукциялық геометрия (катушка радиусын азайту) қолданылған жағдайда оны аңалту мақсатында тиімді пайдалану мүмкіндігі бар.

Қозғалыс параметрлерін нақты бақылау үшін аяқтың ағымдағы айналу бұрышын көрсететін LCD дисплей пайдаланылады. Сервомотор 0 градустен 180 градусқа дейін басқарылатындықтан, оның бұрышы бағдарламалық жолмен аяқтың айналу бұрышына түрлендіреді:

$$\varphi_{\text{аяқ}} = k \cdot (\theta_{\text{servo}} - \theta_0)$$

$\theta_0 = 90^\circ$ - бейтарап позиция

$k \approx 0.18$ - қайта есептеу коэффициенті.

Бұл дисплей нақты уақыт режимінде келесі ақпаратты көрсетуге мүмкіндік береді: қозғалыс бағыты оң немесе солға, ағымдағы бұрышы граудспен, орындалған циклдер саны. Жүргізілген кинематикалық және күштік есептеулер көрсеткендей, әзірленген механотерапиялық жүйе физиологиялық рұқсат етілген шектерде аяқтың инверсия эәне эверсия қозғалыстарын қауіпсіз әрі тиімді орындауға қабілетті. Таңдалған сервожетек қажет позициялау дәлдігі мен қозғалыстың тегістігін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, микроконтроллерді басқару және параметрлерді визуализациялау экзоскелеттің өолдану ыңғайлығын арттырып, оналту тәжірибесінде құрылғының функционалдығын жоғарылатады.

Кесте 3 - Аяқтың механотерапиялық экзоскелетінің негізгі есептік параметрлері

№	Параметр	Белгілеу	Мәні	Өлшем бірлігі	Ескерту
1	Аяқтың максималды айналу бұрышы	φ_{max}	± 20	град	Қауіпсіз оналту диапазоны
2	Аяқтың инверсия бұрышы	φ_{in}	до 20	град	Ішке бұрылу
3	Аяқтың эверсия бұрышы	φ_{ev}	до 20	град	Сыртқа бұрылу
4	Сервомотор катушкасының радиусы	r	15	мм	Беріліс қатынасын орнатады
5	Күш қолдану иығы	l	80	мм	Тобық осінен қашықтық
6	Сымның сызықтық қозғалысы	s	28	мм	$\varphi = 20^\circ$ болғанда
7	Сервомотордың айналу бұрышы	θ_{servo}	107	град	Бір бағыт үшін
8	Аяқ пен жіліншік бөліктерінің массасы	m	2.5	кг	Орташа мән
9	Ауырлық күші	F	24.5	Н	$F = m \cdot g$
10	Тобықтағы айнымалы сәт	M_{ankle}	1.96	Н·м	Қор коэффициенті жоқ
11	Қор коэффициенті	k	1.5	—	Медициналық құрылғылар
12	Қажетті сәт	M_{req}	2.94	Н·м	Қорды ескере отырып
13	Сервомотордың максималды моменті	M_{servo}	1.96	Н·м	TD-8120MG
14	Сервомотордың бейтарап позициясы	θ_0	90	град	Орташа позиция
15	Бұрыштарды қайта есептеу коэффициенті	k_{φ}	0.18	—	Экранда көрсету үшін

Кестеде келтірілген параметрлер SolidWorks бағдарламасында экзоскелеттің үшөлшемді моделін құрастыру барысында пайдаланылып, негізгі құрылымдық түйіндерінің геометриялық өлшемдерін қалыптастыруға негіз болды.

Кинематикалық сұлбаның дұрыстығы SolidWorks бағдарламасындағы Motion Study модуліннің көмегімен расталды. Модельдеу нәтижелері сервожетектің қозғалысы кептеліссіз жүзеге асатын және табан платформасының айналу рұқсат етілген шектерден аспай, $\pm 20^\circ$ аяқ платформасының айналуын орындалатынын көрсетті.

2.9 Құрылғының 3D моделі

Құрылғының үшөлшемді макеттік сұлбасы SolidWorks автоматтындрылған жобалау ортасында әзірленді. Бұл модель механотерапиялық экзоскелеттің конструкциялық құрылымын тұтас түрде көрсетуге мүмкіндік береді. Сұлбада негізгі механикалық тораптар, бекіту элементтері және электрондық компоненттерді орналастыруға арналған аймақтар нақты геометриялық параметрлермен бейнеленген. Аталған модель жобалау сатысында құрылғының жалпы құрылымын бағалауға және қабылданған конструкциялық шешімдердің тиімділігін талдауға негіз болды.

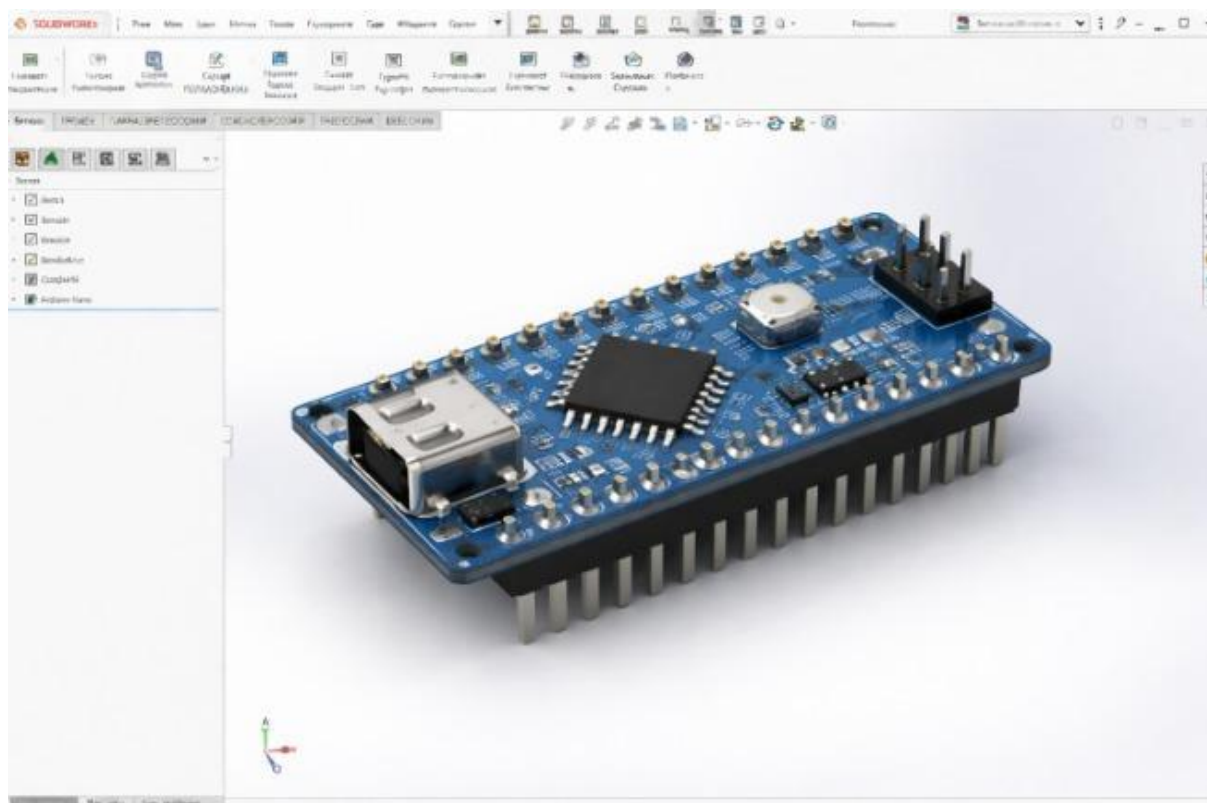
Үшөлшемді макет құрылғының модульдік қағида бойынша орындалғанын көрсетеді, яғни механикалық және электрондық бөліктер өзара үйлесімді орналасқан. Модельде табан платформасы, қозғалыс осі, сервожетекті бекіту түйіндері, сондай-ақ электрондық платалар орнатылатын корпус элементтері айқын бейленген. Мұнда құрылым жинақтау жұмыстарын жеңілдетіп, техникалық қызмет көрсету мен жетілдіру мүмкіндігін арттырады.

Сұлбада экзоскелеттің жұмыс принципін сипаттайтын динамикалық элементтер де қамтылған. Табанның инверсия және эверсия бағытындағы қозғалыстары, бұрылу осьтері және ықтимал қозғалыс амплитудасы көрсетілген. Бұл құрылғының функционалдық мүмкіндіктерін көрнекі түрде көрсетуге және реабилитациялық жаттығулардың орындалу логикасын түсіндіруге мүмкіндік береді. Макетті жобалау, жинақтау және кейінгі жетілдіру кезеңдерінде маңызды инженерлік құрал болып табылады. Ол экзоскелеттің конструкциялық және функционалдық ерекшеліктерін бағалауға, сондай-ақ механотерапиялық құрылғыны тәжірибелік үлгі ретінде іске асыруға негіз қалайды. 31-суретте құрылғының макеттік нұсқасының жалпы үшөлшемді көрінісі берілген.



Сурет 31 – Макеттің 3Д сұлбасы

Бұл модельде механотерапиялық экзоскелеттің негізгі конструкциялық топтары, олардың орналасуы және функционалдық байланыстары көрсетілген. Макет құрылғыны жинақтау ретін, габариттік өлшемдерін, сондай-ақ электрондық элементтерді орналастыру мүмкіндігін алдын ала бағалауға жағдай жасайды. 32- суретте Arduino NANO микроконтроллер 3Д сұлбасы көрсетілген.



Сурет 32 – Arduino NANO микроконтроллер 3Д сұлбасы

Басқару және атқарушы бөліктердің жұмысын қамтамасыз ету үшін электрондық компоненттер жеке-жеке модельденіп, олардың жалпы конструкциясымен үйлесуі алдын ала бағаланады. Осы талдау нәтижесінде басқару жүйесінің негізгі ретінде Arduino Nano микроконтроллер сервожетектің жұмыс режимін басқаруға, қозғалыс параметрлерін баптауға және дисплей мен ақпарат алмасуды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

SG90 типті сервожетек табанның басқарылатын қозғалысын жүзеге асыратын атқарушы механизм ретінде таңдалынды. Сервожетектің 3D сұлбасы 33-сурет көрсетілген.



Сурет 33 – SERVO SG90 сервожетектің 3Д сұлбасы

Микроконтроллерден түсетін басқару сигналдарының әсерінен сервожетек табан платформасының инверсия және эверсия қозғалыстарын орындайды. Бұл элемент экзоскелеттің механотерапиялық әсерін қамтамасыз ететін негізгі функцияналдық бөліктердің бірі болып саналады.

3 Механотерапиялық құрылғыны жинақтау және дайындау

3.1 Экзоскелеттің конструкциясын дайындау және жинау

Механотерапиялық құрылғыны дайындау әрі жинақтау бөлімдері құрылғының пайдалану кезеңінен жеткізуге кезеңіне дейін қажетті бүкіл өндірістік, монтаждық кезеңдерді қамтиды. Бұл кезеңдердің басты мақсаты экзоскелеттің механикалық түйіндерін тура құрастыру. Алғашқы кезеңде электрлік компоненттерді қауіпсіз түрде жалғау, құрылғының қозғалыс функцияларын науқастың жағдаына қарай бейімделуге арналған. Жинақтау барысында алдымен конструкциялық бөлшектер дайындалады. Содан кейін механикалық құрастыру жүргізіледі. Кейін электрлік интеграция жүзеге асырып, соңында функционалдық тексеріс орындалады. Мұндай кезеңмен орындалатын тәсілдер құрылғының қауіпсіздігін және сенімділігін арттырып, прототиптің жақсы жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Экзоскелетті дайындау және жинақтау барысында бастапқы кезеңі SolidWorks бағдарламасында жасалған 3D-модель негізінде корпус пен табан платформасының геометриялық өлшемдері жасалынады. Құрылымның анатомиялық сәйкестіктері толық қанды тексеріледі. Тобық аймағы науқастың аяғын сенімді түрде қамтуы үшін бұл бөлік жеңіл әрі қатты материалдан жасалады. Ішкі беті қысымның біркелкі таралуы үшін икемді етіп жобаланады. Қаңқа бекіту белдіктері өтетін және реттелетін аймақтар алдын ала қарастырылады. Барлық өткір қырлар, жанасу беттері тегістей өңделеді. Бұл өңдеулер құрылғының ұзақ уақыт пайдалану кезінде қолайсыздықты азайтады және теріге механикалық тітіркену қаупін төмендетеді. 34-суретте ортезді жасау барысы берілген.



Сурет 34 – Жасау процессі

Келесі кезеіде табан платформасы және платформаның айналу осінемен байланысқан шарнирлі түйін жиналады. Аталған платформа тобық қозғалысын модельдейтін негізгі динамикалық элемент болғанымен, шарнир механизмінің дәлдігіне ерекше назар аударылады. Платформаның механикалық жұмысы кептеліссіз әрі артық люфтсіз орындалуын талап етеді. Құрылғы белгіленген оңалту бұрышы $\pm 20^\circ$ аралығында қауіпсіз түрде қамтамасыз етуі тиіс. Конструкция бұрыштың физиологиялық шектен асуын болдырмайтын механикалық шектеуіш қойылады. Бұл шешім қозғалысты тек бағдарламалық емес, сонымен бірге физикалық деңгейде шектеу көмегімен науқастың құрылғымен пайдаланудың қауіпсіздігін арттырады.

Механикалық жұмыстар аяқталғаннан кейін сервожетек бөлік орнатылады. Servo SG90 типті цифрлық сервоқозғалтқыш жоғары момент мәніне ие құрылғы корпусқа бекітіледі. Оның осіне есептеулер көрсетілген мәндерге сәйкес радиусы 15 мм болатын катушка (шків) орналастырылды. Сервоның орналасу орны жұмыс барысында корпус элементтерімен соғылмайтындай, тартыу кабельінің бағыты платформаның бекіту нүктесіне дәл келетіндей етіп таңдалады. Бұл кезеңдегі негізгі міндет сервоның айналу бұрышы арқылы платформаның қажетті бұрыштық қозғалысын қамтамасыз ететін механикалық сәйкестікті дәл іске асыру болды.

Алты қырлы кілт 35 суретте, дрель 37 суретте, штангенциркул 38 суретте, терможелім 39 суретте көрсетілген. Бұлар ортездің конструкциясын дайындау барысында пайдаланатын негізгі құралдар болып табылады.



Сурет 35 – Алты қырлы

Сервомотор, табан платформаны байланыстыратын кабель беріліс элементі ретінде қатты созылмайтын, тез тозбайтын берік синтетикалық жіп қолданылады. Кабель катушкаға бекітілді, корпус ішінде қауіпсіз бағытпен жүргізілді де, табан платформасындағы бекітілген нүктеге жалғанды. Кабель жолы өткір қырлардан алыс болғаны дұрыс. Себебі бұл материалдың мерзімінен бұрын тез тозуымен мен қозғалыстың тұрақсыздануына әкелуі мүмкін. Келесі кезеңде жүйедегі алдын ала тартылу (преднатяг) дұрысталады: серво 90° бейтарап қалыпта тұрған кезде кабель салбырап қалмауы тиіс. Сонымен қатар, платформаны күшпен бұруға мүмкіндік бермеуі қажет. Нақты осы параметрлер платформаның қозғалыс жайлылығына, жұмыс цикліне және діріл деңгейін төмендетуге тікелей әсер етеді. 36 суретте корпус ішіндегі элементтердің орналасуы көрсетілді.



Сурет 36 – Корпус іші

Табан бөлігіндегі бекіту белдіктері орнатылған соң экзоскелет аяққа киіліп, эргономикалық тексерістен өтеді. Белдіктер құрылғыны және табанды сенімді бекітуі қажет. Бірақ жұмсақ тіндерге артық қысым түсірмеуі керек және қан айналымды шектемеуі қажет. Негізгі талап ортездің аяқта сырғып кетпеуі, ауқасқа дискомфорт туғызбауы және қозғалыс кезінде орнын өзгертпеуі болып саналады. Бұл тексеріс кезеңі практикалық қолданда жарақат немесе ауырсынудың алдын алады және реабилитациялық процесті жайлы етеді.

Жүйенің қозғалысы электроника қосылмастан бұрын қолмен тексерістен өтеді. Платформа еркін қозғалып, кабель катушкаға біркелкі оралған және созылған кезде кептеліс болмауы керек. Кабель дұрыс бағытталмаса немесе оралса, бағыттаушысы дұрыс таңдалмаса, сервоға қосымша жүктеме артып, қозғалыс дәлдігі төмендеуі мүмкін. Сол себепті бұл бағыттаушы элементтерді (қорғаныс қаптамасы, сақина, түтікше) қолданылып, кабельдің тұрақты жұмыс режимі қамтамасыз етілді. Нәтижесінде экзоскелет механикалық тұрғыдан дайын деп есептеледі, егер табан платформасы $\pm 20^\circ$ диапазонында тоқатамай қозғалып жұмыс істей алса, бекіту элементтері орнықты, серво-катушка-кабель жүйесі қозғалысты тегіс әрі қайталанғыш түрде жеткізеді.



Сурет 37 – Дрель

Құрылғыны толық жұмысқа дайындаудың маңызды кезеңдердің бірі – механикалық жинақтаудан кейін электрлік жүйелерді дұрыс орналастыру. Барлық сымдар қауіпсіз бағытпен жүргізілуі қажет. Себебі, ол экзоскелет киілетін құрылғы. Электрондық модульдер корпус ішінде немесе оған жақын

ықшам орналасуы қажет. Сымдардың қозғалыс кезінде тартылып қалмауы және науқастың терісіне үйкеленбеуі тиіс. Осы мақсатта Arduino Nano, қуатты тарату жүйесі (аккумулятор, BMS/қорғаныс, қосқыш), сервоқозғалтқыш пен LCD дисплей арасындағы қосылыстар алдын ала жүргізілетіні жоспарланады. Сымдар пластик стяжка, термоқаптама немесе арнайы кабельдік каналдар арқылы байланады. Мұндай тәсіл құрылғының сенімділігін арттырып, жөндеу, қызмет көрсету кезінде тораптарға қолжетімділікті қамтамасыз етеді.

Электрлік интеграция жасаған кезде сервоқозғалтқыштың қоректену талаптарына сай болу керек. SERVO SG90 сервосы жүктеме кезінде көп ток тұтынады. Сондықтан, оны Arduino Nano-ның 5V шығысынан зарядтауға болмайды. Сервомоторға жеке заряд желісі ұйымдастырылып, аккумулятор немесе тұрақтандырғыш модуль арқылы 6–7.4В тұрақты кернеу бөлінеді. Сонымен қатар, жүйе үшін барлық GND (жер) нүктелері біріктіріледі. Сервоның GND, Arduino GND мен дисплейдің GND бір ортақ нүктеге жалғанған кезде PWM басқару сигналы тұрақты болып тұрады. Басқару кезде діріл немесе кездейсоқ ауытқу ықтималдығы бірнеше есе азаяды. Қуат желісіне қосқыш (тумблер) орнату арқылы ортез автономды режимде қосылып, өшіріп басқаруға болады. Сақтандырғыш, ток шектеу элементі қосылған жағдайда қысқа тұйықталу қауіпі төмендейді.



Сурет 38 – Штангенциркуль

I2C модулі арқылы LCD 16x2 дисплейді қосқанда жүйенің ықшамдығы артады. Себебі дисплейге тек төрт сым қажет: VCC, GND, SDA және SCL. Дисплей корпусқа бекітіледі, бірақ аяқтың қозғалысына кедергі келтірмеуі соққылардан қорғалған болуы маңызды.



Сурет 39 – Терможелім

Қаңқаның бүйір бетіне дисплей орналастырылды. Бұл экранды кездейсоқ зақымнан қорғап, параметрлерді тура нақты уақыт режимінде көруге мүмкіндік береді.

Құрылғыға қолданушы батырмасын енгізілуі оңалту сеансын басқаруды жеңілдетеді. Құрылғыға қолданушы қауіпсіздігі артады. Батырма арқылы “бастау/тоқтату” режимі іске қосылады, науқас, маман қажет кезінде қозғалысты бірден тоқтата алады. Батырма корпусқа оңай басылатын етіп орнатылады. Дегенмен кездейсоқ басылып кетпейтін жерге орнату керек. Бағдарламада батырмаға логикасы антидребезг (debounce) енгізіліп, басқарудың сенімділігін артырып, құрылғы қажетсіз іске қосылып қалудан сақтайды.

Қуат көзі ретінде литий-ион немесе литий-полимер аккумулятор пайдаланылғанда, оның бар қауіпсіздігі BMS қорғаныс модулі арқылы өамтамасыз етіледі. BMS аккумуляторды толық разрядтау, артық зарядтау, артық ток немесе қысқа тұйықталудан қорғайды. Бұл киілетін медициналық ортезде қауіпті жағдайларды алдын алады. TP4056 модулі зарядтау үшін пайдаланады. Ол заряд процесін тұрақтандырады, ыңғайлы зарядтау үшін USB қолданады. Нақты конфигурацияда аккумулятор кернеуі серво мен Arduino талаптарына сәйкес келуі үшін кернеуді түрлендіру модульдері (төмендеткіш/көтергіш) қажет. Сол қуат жүйесі логикалық түрде екіге бөлінеді. Олар: серво желісі мен басқару электроникасы желісі. Бұл серво жүйелері жүктеменің күрт өзгерген кезде дисплейдің сөніп қалуын немесе микроконтроллердің қайта жүктелуін айтарлықтай азайтады.

Электрлік бөлік жинақталғаннан кейін бастапқы іске қосу мен калибрлеу кезеңі жүргізіледі. Алдымен жүйе серво ажыратылған күйде қосылып, Arduino мен LCD дисплейдің тұрақты жұмыс істейтінін тексереді. Кейін дисплейде алғашқы хабарлама көрсетілгеннен соң, батырма басылғанда

режимнің ауысатыны қарастырылды. Кейін серво қосылып, бейтарап позиция (әдетте 90°) орнатылды, платформаның бастапқы күйі нейтралға сәйкес болатындай кабель тартылысы дәл жөнделді. Осы кезде механикалық пен бағдарламалық шектер бірге қолданылады: бағдарлама сервоның бұрышы қауіпті аймаққа бармайтындай шектеген кезде, конструкцияда механикалық стопор болған жағдайда, соңғы қорғаныс ретінде жұмыс атқарады. Дұрыс калибрлеу кезінде, серво бұрылғанда платформа тегіс қозғалып, $\pm 20^\circ$ шегінен аспай, қайталанатын циклдердің саны артқан сайын қозғалыс траекториясы тұрақты болып тұрады.

Функционалдық сынақ бірнеше режимде өткізіледі. Алдымен құрылғы жүктемесіз(аяқсыз) көп цикл жүргізіліп, сынақтан өтіп, сервоның қызуы мен кабельдің оралуы шарнирдің кептеліссіздігі тексеріледі. Кейін экзоскелет науқастың аяғына киіледі, минималды амплитуда мен ең төмен жылдамдықта сынақ жүргізіледі. Бұл кезеңде науқастың субъективті қолайлығы, белдіктің сырғып кетуі, қысым нүктелері мен қозғалыс кезінде ауырсынудың болмауы тұрғысынан бағаланады. Бұрыш пен жылдамдық оңалту хаттамасына сәйкес ұлғайып, дисплей бұрыш, цикл саны және жұмыс күйінің дұрыстығы барынша тексеріледі. Егер серво шекті моментке таяса, катушка радиусын азайту, амплитуданы төмендету немесе жылдамдықты азайту арқылы жүктемені реттеу қарастырылады.

Құрылғыны жинау процесі толық аяқталған болып есептелуі үшін қабылдау критерийлері нақты анықталады. Прототип науқастың аяғында сенімді бекітіліп, белдік қан айналымды шектемей, тұрақты ұсталу керек. Платформа берілген диапазонда тегіс және қайталанғыш қозғалыс орындауы қажет. Серво, катушка, кабель жүйелері бос болмауы керек. Электрлік зарядтау кезінде Arduino қайта қосылып кетпей тұрақты жұмыс істеуі қажет. Қауіп туындаған жағдайда батырма арқылы процессті дереу тоқтату мүмкіндігі қарастырылады. Осы шарттар орындалған бойда экзоскелет прототипі үй жағдайында және реабилитациялық ортада механотерапиялық жаттығуларды қауіпсіз өткізуге дайын деп саналады. Дайын құрылғы 40 суретте көрсетілген.



Сурет 40 – Құрастырылған экзоскелет

ҚОРЫТЫНДЫ

Механотерапиялық экзоскелеттер моторикасы шектеулі адамдардың өмір сапасын арттыруға бағытталған заманауи медициналық технологиялардың маңызды саласы болып табылады. Біздің зерттеу барысында экзоскелеттердің жұмыс принциптері, технологиялық инновациялар, клиникалық зерттеулер және қолданудың артықшылықтары мен шектеулері қарастырылды.

Аяқ-қол жарақаттары бар науқастар үшін экзоскелеттер науқастардың мүмкіндіктерін кеңейтіп, тәуелсіздік деңгейін арттырады және өмір сүру сапасын жақсартуға көмек тигізеді. Бұл құрылғы инсульт, жарақаттардан кейінгі кейін жеңіл қалпына келтіруді жетелдетіп, қалпына келтіру процесін тездетеді.

Қазіргі медицинада механотерапиялық экзоскелеттердің дамыту ғылымында маңызды бағыттардың бірі болып саналады. Олар бүкіл әлемдегі миллиондаған адамдарға күнделікті өмірде көбірек сүру сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл шектеулерге қарамастан, медициналық қауымдастықтардың бірлескен күш-жігері, моторикасы шектеулі науқастарға күнделікті көбірек еркіндік пен белсенділікке қол жеткізуге көмектесетін қолжетімді экзоскелеттердің артуына әкеледі.

Осы диссертациялық жұмыста тобықтың қозғалыс функцияларын қолдауға, қалпына келтіруге арналған ортездің конструкциялық және функционалдық үлгісі дайындалды. Жұмыс барысында ортездің қолдану саласына, конструкциялық ерекшеліктеріне және реабилитациялық талаптарға талдаулар жүргізілді. Нәтижесінде ортездің құрылымдық сызбалары жасалып, негізгі механикалық элементтері мен бекіту жолдары таңдалып, құрылғының макеті құрастырылды.

Ортезді дайындау және жинақтау процесінде штангенциркуль, алты қырлы кілт, дрель, терможелім секілді құралдар қолданылды. Бұл құралдар конструкция элементтерінің дәлдігін қамтамасыз етуге, өлшемдерді нақтылау мен бөлшектерді сенімді түрде бекітуге мүмкіндікке ие. Құрастыру кезінде ортездің науқасқа ыңғайлылығы, қауіпсіздігі және анатомиялық сәйкестігі ескерілді.

Зерттеу нәтижесінде ортездің тәжірибелік макеті жасалып, оның жұмысқа қабілеттілігі зерттелді. Сынақ барысында ортез аяқтың қозғалысын белгілі бір бағытта ұстап тұру немесе қажетті диапазонға бұру, буынның тұрақтылығын арттыру мен қозғалыс кезінде қосымша қолдау көрсетуге мүмкіндік бере алатыны анықталды. Алынған нәтижелер әзірленген ортездің реабилитациялық процесте, жарақаттан кейінгі немесе қозғалыс функциясы әлсіреген жағдайларда қолдануға жарамды екенін дәлелдеді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы әзірленген ортез конструкциясының қарапайымдылығы, қолжетімді материалдарды пайдалану мен оны әрі қарай жетілдіру мүмкіндігі бар екенін көрсетті. Болашақта ортезді автоматтандырылған басқару элементтерімен, сенсорлармен немесе

механотерапиялық экзоскелет жүйелерімен біріктіру арқылы оның функционалдық мүмкіндіктерін арттыру жоспарлауы мүмкін.

Диссертациялық жұмыс барысында қойылған мақсатқа қол жеткізілді. Қойылған міндеттер толық орындалды. Алынған нәтижелер ортездер мен механотерапиялық құрылғыларды жобалау саласында одан әрі ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізуге негіз бола алады.

Қысқартулар мен терминдері тізімі

Ортез	Тірек-қимыл аппаратының функцияларын қолдау, түзету немесе қалпына келтіруге арналған сыртқы құрылғы
Экзоскелет	Адамның қимыл-қозғалысын қолдауға немесе күшейтуге арналған сыртқы механикалық/роботтандырылған құрылғы
Механотерапия	Механикалық құрылғылар арқылы қозғалыс функцияларын қалпына келтіру әдісі
Реабилитация	Жарақаттан немесе аурудан кейін функцияларды қалпына келтіру үдерісі
Буын	Сүйектердің қозғалысқа мүмкіндік беретін қосылу аймағы
Кинематика	Қозғалысты күштерді ескермей зерттейтін механика бөлімі
CAD	Computer-Aided Design – компьютерлік жобалау жүйесі
SolidWorks	Үшөлшемді модельдеу және инженерлік жобалауға арналған бағдарлама
МҚ	Микроконтроллер
ББ	Басқару блогы
СҚ	Сервокозғалтқыш
ЭҚ	Электр козғалтқыш
АТ	Атқарушы тетік (актуатор)
DOF	Degrees of Freedom – еркіндік дәрежелері
IMU	Inertial Measurement Unit – инерциялық өлшеу модулі
EMG	Electromyography – бұлшықет электр белсенділігін өлшеу
PID	Proportional–Integral–Derivative – реттегіш алгоритмі
PWM	Pulse Width Modulation – импульстік-ендік модуляция
RPM	Revolutions Per Minute – минутына айналу саны
ADC	Analog-to-Digital Converter – аналогты-сандық түрлендіргіш
I ² C	Екі сымды цифрлық байланыс протоколы
UART	Асинхронды тізбекті деректер интерфейсі
3D	Үшөлшемді модель

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Экзоскелеты: принцип действия, конструкция, применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/exoskeleton-explainedreview.html>. – Дата доступа: 23.12.2020.
2. Пропорции человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liveinternet.ru/users/5119274/rubric/4024314/http/friends/http/artps/comments/profile/friends/http/artps/page12.html>. – Дата доступа: 23.12.2020.
3. Иванов, А.А. и др. (2020). "Обзор технологий экзоскелетов и их применение в реабилитации." Журнал реабилитационной инженерии.
4. Петров, В.Б., & Сидорова, Е.К. (2019). "Разработка экзоскелета для реабилитации нижних конечностей." Труды Международной конференции по биомедицинской инженерии.
5. Смирнов, И.И. и др. (2018). "Проектирование и управление гибридным экзоскелетом для реабилитации нижних конечностей." Журнал технической биомеханики.
6. Новиков, П.С. и др. (2021). "Новые подходы в экзоскелетно-ассистированной реабилитации." Фронтиры робототехники и искусственного интеллекта.
7. Козлова, Е.А. и др. (2017). "Обзор экзоскелетов в реабилитации после инсульта." Журнал нейроинженерии и реабилитации.
8. Лебедев, В.П. и др. (2019). "Биомеханический дизайн экзоскелетов для реабилитации нижних конечностей: обзор." Журнал биомеханики и биомедицинской инженерии.
9. Сергеева, О.И., & Григорьев, А.М. (2018). "Разработка переносного экзоскелета для реабилитации нижних конечностей." Труды Международной конференции по робототехнике и автоматизации.
10. Кузнецов, Д.М. и др. (2016). "Стратегии управления для экзоскелетов нижних конечностей: обзор." Журнал интеллектуальных и робототехнических систем.
11. Михайлова, Н.С. и др. (2020). "Клинические приложения экзоскелетов в реабилитации: систематический обзор." Архивы физической медицины и реабилитации.
12. Чернов, Е.И., & Зайцев, П.Д. (2019). "Преимущества материалов для экзоскелетов: обзор".
13. World Health Organization. The Top 10 Causes of Death; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2020; Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (accessed on 1 December 2024).
14. Benjamin, E.J.; Muntner, P.; Alonso, A.; Bittencourt, M.S.; Callaway, C.W.; Carson, A.P.; Chamberlain, A.M.; Chang, A.R.; Cheng, S.; Das, S.R.; et al. Heart disease and stroke statistics—2019 update: A report from the American heart association. Circulation 2019, 139, e56–e528.
15. Hankey, G.J. Stroke. Lancet 2017, 389, 641–654.

16. Centers for Disease Control and Prevention. Prevalence and most common causes of disability among adults—United States, 2005. *MMWR Morb. Mortal Wkly. Rep.* 2009, 58, 421–426.
17. Soundy, A.; Liles, C.; Stubbs, B.; Roskell, C. Identifying a Framework for Hope in Order to Establish the Importance of Generalised Hopes for Individuals Who Have Suffered a Stroke. *Adv. Med.* 2014, 2014, 471874.
18. Boudarham, J.; Zory, R.; Genet, F.; Vigné, G.; Bensmail, D.; Roche, N.; Pradon, D. Effects of a knee–ankle–foot orthosis on gait biomechanical characteristics of paretic and non-paretic limbs in hemiplegic patients with genu recurvatum. *Clin. Biomech.* 2013, 28, 73–78.
19. Chen, G.; Patten, C.; Kothari, D.H.; Zajac, F.E. Gait differences between individuals with post-stroke hemiparesis and non-disabled controls at matched speeds. *Gait Posture* 2005, 22, 51–56.
20. Baumann, M.; Lurbe, K.; Leandro, M.E.; Chau, N. Life satisfaction of two-year post-stroke survivors: Effects of socio-economic factors, motor impairment, Newcastle stroke-specific quality of life measure and World Health Organization quality of life: Bref of informal caregivers in Luxembourg and a rural area in Portugal. *Cerebrovasc. Dis.* 2012, 33, 219–230.
21. Bobath, B. *Adult Hemiplegia: Evaluation and Treatment*, 3rd ed.; Heinemann: Oxford, UK, 1990.
22. Sawner, K.; LaVigne, J. *Brunnstrom’s Movement Therapy in Hemiplegia: A Neurophysiological Approach*, 2nd ed.; JB Lippincott: Philadelphia, PA, USA, 1992.
23. Voss, D.E.; Ionta, M.K.; Myers, B.J. *Proprioceptive Neuromuscular Facilitation: Patterns and Techniques*, 3rd ed.; Harper & Rows: Philadelphia; PA, USA, 1985.
24. Carr, J.H.; Shepherd, R.B. *Neurological Rehabilitation—Optimizing Motor Performance*; Butterworth Heinemann: Oxford, UK, 1998.
25. Stockmeyer, S.A. An interpretation of the approach of Rood to the treatment of neuromuscular dysfunction. *Am. J. Phys. Med.* 1967, 46, 900–961.
26. Winstein, C.J.; Stein, J.; Arena, R.; Bates, B.; Cherney, L.R.; Cramer, S.C. Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery: A Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2016, 47, e98–e169.
27. Zhang, X.; Yue, Z.; Wang, J. Robotics in Lower-Limb Rehabilitation after Stroke. *Behav. Neurol.* 2017, 2017, 3731802.
28. Mehrholz, J.; Thomas, S.; Kugler, J.; Pohl, M.; Elsner, B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2020, 10, 006185.
29. Zhang, J.F.; Dong, Y.M.; Yang, C.J.; Geng, Y.; Chen, Y.; Yang, Y. 5-Link model based gait trajectory adaption control strategies of the gait rehabilitation exoskeleton for post-stroke patients. *Mechatronics* 2010, 20, 368–376.

30. Calabrò, R.S.; Cacciola, A.; Bertè, F.; Manuli, A.; Leo, A.; Bramanti, A. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: Where are we now? *Neurol. Sci.* 2016, 37, 503–514.
31. Calabrò, R.S.; Sorrentino, G.; Cassio, A.; Mazzoli, D.; Andrenelli, E.; Bizzarini, E. Robotic-assisted gait rehabilitation following stroke: A systematic review of current guidelines and practical clinical recommendations. *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* 2021, 57, 460–471.
32. Molteni, F.; Gasperini, G.; Cannaviello, G.; Guanziroli, E. Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review. *PM&R* 2018, 10 (Suppl. 2), S174–S188.
33. Попов, А.В., Иванов, И.Н. Экзоскелеты: принципы работы и области применения. — М.: Техносфера, 2021. — 248 с.
34. Петров, С.Л. Биомеханика человека. Учебное пособие. — СПб.: Питер, 2020. — 304 с.
35. Arduino Official Documentation. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.arduino.cc/> — Дата обращения: 29.04.2025.
36. MG996R Servo Motor Datasheet. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.electronicwings.com/nodemcu/mg996r-servo-motor> — Дата обращения: 29.04.2025.
37. Zhang, T., Wang, J., & Li, Y. Design and Control of a Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton for Assisted Walking. // *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, Vol. 152, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.robot.2021.104068.
38. Bogue, R. Exoskeletons in the Rehabilitation of Lower Limbs: State of the Art and Future Prospects. // *Sensor Review*, 2020, Vol. 40(2), pp. 121–127.
39. Материалы сайта Robotics Today: <https://www.roboticstoday.com> — (дата обращения: 29.04.2025).
40. FSR Sensor – Force Sensitive Resistor. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://learn.adafruit.com/force-sensitive-resistor-fsr> — Дата обращения: 29.04.2025.

А Қосымша

```
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Объекты
Servo myServo;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Адрес дисплея может быть 0x3F у
некоторых моделей

// Настройки
const int servoPin = 6;
const int cyclesTotal = 10;

const int pulseLow = 700; // ~20° (подберите под ваш сервопривод)
const int pulseMid = 1200; // ~90° (подберите под ваш сервопривод)

// "Скорость" (для позиционного сервопривода) через параметры плавного
перемещения:
const int stepUs = 5; // шаг изменения импульса в микросекундах (меньше =
плавнее/медленнее)
const int stepDelayMs = 10; // задержка между шагами (больше = медленнее)

void moveServoSmooth(int targetUs) {
    // Берём текущее положение; если ещё не задано — считаем стартом
    pulseMid
    static int currentUs = pulseMid;

    int dir = (targetUs > currentUs) ? 1 : -1;

    while (currentUs != targetUs) {
        currentUs += dir * stepUs;

        // Чтобы не "перешагнуть" цель
        if ((dir == 1 && currentUs > targetUs) || (dir == -1 && currentUs < targetUs))
        {
            currentUs = targetUs;
        }

        myServo.writeMicroseconds(currentUs);
        delay(stepDelayMs);
    }
}
```

```

void setup() {
  myServo.attach(servoPin);
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Start");
  delay(1500);
  lcd.clear();

  for (int i = 1; i <= cyclesTotal; i++) {
    // Движение на ~20°
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cycle: ");
    lcd.print(i);
    lcd.print("    "); // подчистка хвоста

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("angle: ~20 grad");
    moveServoSmooth(pulseLow);
    delay(500);

    // Возврат в середину (~90°)
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("angle: ~90 grad ");
    moveServoSmooth(pulseMid);
    delay(500);
  }

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("cycle ended");
  myServo.detach();
}

void loop() {
  // Пусто
}

```

Қосымша Б

```
#include <Servo.h>

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

Servo myServo;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // LCD мекенжайы 0x27 болуы мүмкін (кейде 0x3F)

int lifts = 0;

int angleLow = 20;      // Төменгі бұрыш
int angleMid = 90;      // Ортаңғы бұрыш

void setup() {
  myServo.attach(6);
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Басталды...");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  // Төмен бұрышқа бұру
  myServo.write(angleLow);
  lifts++; // Көтерілім саны артады
  pdateLCD(angleLow, lifts);
  delay(1000);
```

```

// Орташа қалыпқа оралу
myServo.write(angleMid);
updateLCD(angleMid, lifts);
delay(1000);
}

void updateLCD(int angle, int count) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Бұрыш: ");
  lcd.print(angle);
  lcd.print((char)223); // Градус белгісі
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Көтерілім: ");
  lcd.print(count);
}

```

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

7M07107 – Робототехника және мехатроника білім беру бағдарламасы

Ораз Д.Х. магистрлік диссертациясына ғылыми жетекшіден берілген

ПІКІР

Тақырыбы: «Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау»

Диссертациялық жұмыста магистрант адам денсаулығын қалпына келтіру саласындағы өзекті мәселелердің бірі – аяқ, нақтырақ айтқанда тобық буынының қозғалыс функцияларын оңалтуға арналған механотерапиялық құрылғыны әзірлеу мәселесін қарастырған. Автор роботтық ортезді инновациялық техникалық шешім ретінде ұсынып, оны жобалау, модельдеу және тәжірибелік іске асыру кезеңдерін кешенді түрде орындаған. Аталған тақырып биомедициналық инженерия, робототехника және оңалту медицинасы салаларының тоғысында орналасқан және қазіргі таңда жоғары практикалық маңызға ие.

Құрылымдық модельдеу SolidWorks ортасында жүзеге асырылды. Құрылғының компоненттері (корпус, табан платформасы) жеңіл әрі портативті. Электрондық басқару бөлімі ретінде Arduino Nano микроконтроллері таңдалып, оған сервоқозғалтқыш, LCD 16x2 дисплей және қуат көздері қосылды. Бағдарламалық қамту Arduino IDE ортасында жазылып, қозғалыс бұрышы мен орындалған жаттығу саны дисплейде нақты көрсетілетіндей реттелді.

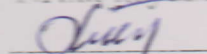
Магистрант Ораз Дигна Хамидиновна зерттеу тапсырмаларын толық орындап, техникалық білімін, өз бетінше шешім қабылдау қабілетін және тәжірибелік дағдыларын көрсете білді. Жұмысы ғылыми және инженерлік тұрғыдан жоғары деңгейде орындалған.

Диссертациялық жұмыс мазмұны бойынша техникалық ғылымдар саласында заманауи талаптарға толық сай келеді. Автор жоғары деңгейде жобалау, жүйелеу және инженерлік ойлау қабілетін көрсеткен. Ғылыми аппараты, терминдермен жұмыс, қолданбалы нәтижелердің айқындылығы – бәрі біртұтас жүйе ретінде орындалған.

Осыған байланысты магистранттың аталған диссертациялық жұмысын «92%» бағалап, оған «Робототехника және мехатроника» білім беру бағдарламасы бойынша магистр академиялық дәрежесін беруге лайық деп есептеймін.

Ғылыми жетекші

Т.ғ.к., қауымдастырылған профессор

 Курмангалова Л.А.

Ф ҚазҰТУ 706-16. Ғылыми жетекшінің пікірі

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

7M07107 – «Робототехника және мехатроника» білім беру бағдарламасының студенті
Ораз Диананын
Магистрлік диссертациясы

**Тақырыбы: «Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін
механотерапиялық экзоскелет жасау»**

Әзірленген:

- а) графикалық бөлімі _____ парақ
б) түсіндірме жазбасы _____ бетте

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Ораз Диананың магистрлік диссертациясы «Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау» атты тақырыпқа арналған.

Диссертациялық жұмыстың негізгі мақсаты - аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелетті жобалау. Осы мақсатқа жету үшін аяқ қозғалыстарын оңалтуға арналған қолданыстағы экзоскелеттерге талдау жүргізіліп, аяқтың оңға және солға бұрылу қозғалысын қамтамасыз ететін құрылымдық сұлба әзірленді. Мұндай робот – аяқтары сынған, созылған немесе инсульт алған адамдарға қайта оңалту үшін қажет.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы робот табан мен тобық буынының инверсия және эверсия қозғалыстарын орындауға арналған сервожетекпен басқарылатын динамикалық ортез-макеттің жасалуы болып табылады. Бұл адамның өзі әлі аяғын жақсы қозғалта алмаған кезде емдік жаттығулар жасауға көмектеседі. Жұмысқа қатысты ғылыми мақала «Вестник КазАТК» ғылыми журналына жарияланған және «Тағам, жеңіл өнеркәсіптері мен қонақжайлылық индустриясының инновациялық дамуы» халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясына жарыққа шықты.

Жұмыс барысында Solidworks, Autocad, Arduino IDE құралдары қолданылған. Макеттің негізгі компоненттері – Arduino NANO микроконтроллері, дисплей, сервожетек болып табылады.

Бірінші бөлімде экзоскелеттерге ғылыми-техникалық шолу жасалынды. Екінші бөлімде техникалық шешім қарастырылды. Макеттің 3Д сұлбасы жобаланып, функцияналдық міндеттері қарастырылды. Үшінші бөлімде экзоскелеттің конструкциясын дайындау мен жинау қарастырылды. Жұмыс макетіне сервожетектің жұмысын жетілдіруді қажет етеді.

ЖҰМЫС БАҒАСЫ

Магистрант Ораз Диананың «Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау» атты диссертациялық жұмысы өзекті, жоғары деңгейде орындалған, қойылған ғылыми-техникалық мәселелер нақты шешімін тапқан. Магистрлік диссертацияны 90 балл аралығында бағалап, магистр академиялық дәрежесіне лайық деп есептеймін.

Сын пікір беруші

М. Тынышбаев атындағы АЛТ университеті,
«Автоматтандыру және басқару» кафедрасының
қауымдастырылған профессоры, PhD докторы
«2» 04 2026 ж

Қарымсақова Н.Т.



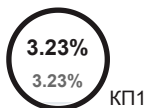
Отчет подобия

Метаданные

Название организации		Подразделение		
Satbayev University		ИАиИТ		
Название				
Аяқтың функцияларын оңалту және қалпына келтіру үшін механотерапиялық экзоскелет жасау				
Автор		Научный руководитель / Эксперт		
Ораз Диана Хамидиновна		Ляззат Курманғалиева		
Количество слов	Количество символов	Дата отчета	Дата редактирования	Идентификатор документа
13768	113930	1/9/2026	---	333076838

Объем найденных подоби

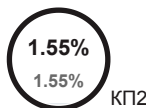
КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

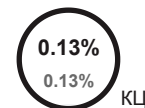
Длина фразы для коэффициента подоби 2



КП2

13768

Количество слов



КЦ

113930

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		0
Интервалы		0
Микропробелы		2
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		53

Источники

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подоби не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАИИТ)	117 0.85 %
2	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАИИТ)	40 0.29 %

3	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	30 0.22 %
4	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	26 0.19 %
5	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	21 0.15 %
6	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	20 0.15 %
7	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	16 0.12 %
8	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	16 0.12 %
9	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	15 0.11 %
10	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	14 0.10 %

База данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

Домашняя база данных (3.14 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Троспен басқарылатын тобықты қалпына келтіруге арналған роботты жобалау және модельдеу 6/4/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	433 (23) 3.14 %

Программа обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

Интернет (0.09 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
2	https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-66268-3_56	12 (1) 0.09 %

Исключенные фрагменты

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---