

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

ӘОЖ 007.52 (043)

Қолжазба құқығында

**ЖЕТЕНБАЕВ НҮРСҰЛТАН ТАЛҒАТҰЛЫ**

**ТОБЫҚ ЭКЗОСКЕЛЕТІН ЖАСАНДЫ БҰЛШЫҚ ЕТТІ ҚОЛДАНУ  
АРҚЫЛЫ ЖАСАУ**

6D071600 – «Аспап жасау»

Философия докторы (PhD)  
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми жетекші:  
PhD., қауымдастырылған профессор  
Балбаев Ғани Құдайбергенович

Шет елдік ғылыми кеңесші:  
PhD., профессор  
Марко Чикарелли  
(Рим, Италия)

Қазақстан Республикасы  
Алматы – 2023

## МАЗМҰНЫ

<b>НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР</b>	3
<b>ҚЫСҚАРТУЛАР ТІЗІМІ</b>	4
<b>КІРІСПЕ</b>	5
<b>1. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТТЕРІНІҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫН ТАЛДАУ</b>	8
1.1 Оңалтудағы тобық буын экзоскелеттерінің заманауи дизайнына шолу	8
1.2 Жаңа тенденциялар мен болашақ бағыттар тобық буын экзоскелеттерінің дамуы	28
1.3 Тобық буын экзоскелеттерінде қолданылатын жасанды бұлшықеттерге шолу және талдау	41
1.3.1 Электрлік сызықтық жетектер	42
1.3.2 Пневматикалық жетектер	46
1.3.3 Сериялық серпімді жетектер (SEA)	49
1.3.4 Тростық жетектер	51
1.3.5 Гидравликалық жетектер	53
1.4 Бірінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы	66
<b>2. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ КИНЕМАТИКАСЫ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬ</b>	70
2.1 Тобық буынының биомеханикалық талдауы	70
2.2 Тобық буын экзоскелетінің кинематикасы	73
2.3 Тобық буын экзоскелетінің математикалық моделі	78
2.4 Тобық буын экзоскелетін компьютерлік модельдеу	80
2.5 Тобық буын экзоскелетін виртуалды зерттеу	83
2.6 Екінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы	93
<b>3. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ ПРОТОТИПІ</b>	95
3.1 Экзоскелеттің механикалық бөлігі	95
3.2 Тобық буын экзоскелетінің электроникасы	97
3.3 Басқару және бағдарламалық қамтамасыз ету алгоритмін әзірлеу	101
3.4 Үшінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы	104
<b>4. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ</b>	106
4.1 Эксперименттік орнату	106
4.2 Нәтижелерді талқылау, бірінші эксперимент	109
4.3 Төртінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы	114
<b>ҚОРЫТЫНДЫ</b>	116
<b>ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ</b>	118
ҚОСЫМША А – Патент	128

## НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Диссертациялық жұмыста келесі стандарттарға сәйкес сілтемелер қолданылған:

МЕСТ 20790-93, (МЕСТ Р 50444-92) - Медициналық құрылғылар, аппараттар мен жабдықтар, Жалпы техникалық шарттар

ҚР СТ МЕСТ Р 51264-2010 - «Электронды байланыс, информатика және сигнал беру құрылғылары. Жалпы техникалық шарттар»

МЕСТ 30324.0-95 (МЕСТ Р 50267.0-92, IЕС 601-1-88) «Медициналық электр жабдықтары. 1 бөлім. Қауіпсіздік туралы жалпы талаптар»

МЕСТ 6.38.90 – Құжаттаманың сәйкестендірілген жүйелері. Ұйымдастырушылық-жарлықтық құжаттама жүйесі. Құжаттарды рәсімдеуге қойылатын талаптар.

МЕСТ 7.32.2001 – Ақпарат, кітапхана және баспа істері жөніндегі стандарттар жүйесі. Ғылыми зерттеу жұмысы жөніндегі есеп. Рәсімдеу құрылымы мен ережелері.

МЕСТ 8.417 – 81 – Мемлекеттік өлшемдер біртұтатстығын қамтамасыз ету жүйесі. Физикалық шамалардың бірліктері

ҚР СТ МЕСТ 15.011-2005 – Патенттік зерттеулер

## ҚЫСҚАРТУЛАР ТІЗІМІ

ЖБ – Жасанды бұлшықет  
ҚА – Қозғалыс ауқымы  
ОР – Оңалту робототехникасы  
ТБ – Тобық буыны  
ТБЭ – Тобық буыны экзоскелеты  
СЭЖ – Сызықты электрлік жетек  
ГҚ – Гидравликалық қозғалтқыш  
СИ – Сенсорлық Интеграция  
ССЖ – Сериялық серпімді жетектер  
ҚА – Қозғалыс ауқымы  
БҚА – Бірлескен қозғалыс ауқымы  
ДК – Дербес компьютер  
ИМ – Имитациялық мәні

## КІРІСПЕ

**Жұмыстың өзектілігі.** Қозғалысы шектеулі адамдардың саны жыл сайын артып келеді. Бұл фактор адамдардың өмір сүру сапасына және олардың басқаларға тәуелділігіне әсер етеді. Бұл жағдайларды емдеу үшін физиотерапия қажет. Роботтық құрылғылардың көмегімен адамның қозғалысын басқаратын жаттығулар арқылы оңалтуға болады.

Қолданыстағы реабилитациялық роботтық шешімдердің кемшіліктері аяқ-қолы жарақат алған науқастарды оңалтуға мүмкіндік беретін қымбат емес құрылғыларды жасау қажеттілігін анықтады. Жасанды бұлшықеттен тұратын тобық буын экзоскелеты адамдарға жарақаттан кейін науқастарды оңалту үшін сәтті қолданылатын тобық буынның функцияларын оңалтуға көмектеседі. Сонымен қатар, бұлшықеттер адам денесі мен протездердің жаңа буынын жасауға болатын сенсорлар арасындағы байланыстырушы рөл атқара алады. Жасанды бұлшықеттерден тұратын тобық буын экзоскелетін денсаулық сақтау, оңалту және спорттық жетістіктерді қоса алғанда, бірнеше салада маңызды.

**Жұмыстың мақсаты.** тобық экзоскелетін жасанды бұлшық етті қолдану арқылы басқару және әзірлеу болып табылады.

### **Зерттеу міндеттері.**

1. Қолданыстағы тобық буын экзоскелеттерін, олардың құрылымдарын, техникалық шешімдері мен мәселелерін зерттеу;
2. Экзоскелет элементтері жасалатын дене бөліктерінің құрылымын зерттеп, сондай-ақ олардың биомеханикалық мәндерін қарастыру;
3. Экзоскелеттің талаптары мен дизайнына негізделген қолайлы жасанды бұлшықеттерді таңдау;
4. Құрылғының компьютерлік моделін құруды жүзеге асыру;
5. Тәжірибелік модель түрінде жобаланған жүйені енгізу;
6. Экзоскелетті сынау және нақтылау, соның ішінде экзоскелетті әртүрлі жүктемелермен және әртүрлі жағдайларда сынау, оның талаптарға сай екеніне және ұтқырлық пен өмір сапасын жақсартуда тиімді екеніне көз жеткізу.

**Зерттеу нысаны.** Зерттеу объектісі оңалтуға арналған тобық буына арналған экзоскелет болып табылады.

**Зерттеу пәні.** Зерттеу тақырыбы жасанды бұлшықеттермен тобық экзоскелетінің прототипын нақты зерттеу нысандары мыналарды қамтиды:

1. Тобық буын биомеханикасы: бұл зерттеу тобық буын механикасын, соның ішінде қозғалыс ауқымын, әртүрлі қозғалыстарға қажетті күшті және бұлшықетті үйлестіруді түсінуге бағытталған.
2. Жасанды бұлшықеттер: бұл зерттеу экзоскелетте қолдану үшін жасанды бұлшықеттерді, соның ішінде пневматикалық, гидравликалық және электрлік бұлшықеттерді жобалауға және оңтайландыруға бағытталған.

3. Басқару жүйелері: бұл зерттеу сенсорларды, процессорларды және қуат көздерін қоса алғанда, экзоскелеттік басқару жүйелерін әзірлеуге және оңтайландыруға бағытталған.

4. Өнімділікті арттыру: бұл зерттеу экзоскелеттің жылдамдыққа, ептілікке және төзімділікке әсерін қоса алғанда, оңалтуда өнімділікті арттырудағы тиімділігін бағалауға бағытталған.

**Зерттеу әдістері.** қойылған міндеттер теориялық және қолданбалы механика, роботты жүйелер теориясы, есептеу математикасы және басқару жүйелері әдістерін қолдану арқылы шешіледі.

Алынған нәтижелердің сенімділігі бастапқы алғышарттардың дәйектілігі мен толықтығына, теориялық және қолданбалы механика әдістерін дұрыс қолдануға, теориялық зерттеу нәтижелерінің эксперименттік мәліметтермен сәйкес келуіне және тобық буынын басқару жүйесі макетінің құрамында командаларын талдаудың ұсынылған әдістемесін тәжірибелік іске асыруға негізделген.

#### **Ғылыми жаңалығы:**

1. Қолданыстағы экзоскелеттер, сондай-ақ олардың басқару жүйелері зерттелді және талданды. Нәтижесінде жасанды бұлшықеттермен экзоскелеттік құрылғыны қолданудың оңтайлы шешімі табылды.

2. Жасанды бұлшықеттері бар экзоскелеттік құрылғы зерттелді және экзоскелеттік құрылғының тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін жаңа шешімдер табылды, атап айтқанда жасанды бұлшықеттер зерттеліп, талданды.

3. Жасанды бұлшықетпен жасалған экзоскелет қауіпсіздік талаптарына сәйкес. Барлық компонент пен электр жетектер талаптарға және электр қауіпсіздігіне сәйкес таңдалды. Жасанды бұлшықеттермен тобық экзоскелетін құрудың ғылыми жаңалығы тірек-қимыл аппараты бұзылған адамдардың қозғалғыштығы мен өмір сүру сапасын жақсартуға, және оңалтуға арналған құрылғыны жасау болып табылды.

4. Сенсорлар мен басқару жүйесінің интеграциясы жасанды бұлшықеттерді дәл және жеке басқаруға мүмкіндік береді, бұл экзоскелеттің инновациялық ерекшелігі.

5. Экзоскелет әртүрлі ұтқырлық бұзылыстары бар адамдардың нақты қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін бейімделуі мүмкін, бұл оңалту мен спорттық өнімділікті арттыруға жеке көзқарасты қамтамасыз етеді.

6. Зерттеудің ғылыми жаңалығы жасанды бұлшықеттер мен басқару жүйесін қамтитын экзоскелеттің жаңа дизайнын, сондай-ақ оның ұтқырлықты, оңалтуды және спорттық өнімділікті жақсарту әлеуетін әзірлеу болып табылады.

#### **Практикалық маңыздылығы мен нәтижелері:**

1. Ұсынылып отырған оңалтуға арналған тобық буын экзоскелеті үшін арналған сызықтық электрлік жетек басқарудың жаңа жүйелерін құру кезінде қолдануға болады.

#### **Қорғауға ұсынылатын тұжырымдар:**

1. Тобық буын экзоскелетінің қозғалыс динамикасының математикалық моделі, электр жетегіндегі сызықтықты ескере отырып.

2. Жасанды бұлшықеттер мен басқару жүйесін қамтитын және ұтқырлықты жақсарту және емдеуді жеделдету үшін функционалдық талаптарға жауап беретін экзоскелет дизайнының функционалды прототипі.

3. Экзоскелеттің қозғалыс ауқымын, қажетті күштерді және басқа функционалдық талаптарды анықтау үшін тобық биомеханикалық талдауы.

4. Жасанды бұлшықеттердің жұмысын эксперименттер мен сынақтар арқылы оңтайландыру, олардың тобық буынына жеткілікті қарсылық пен көмек көрсететініне көз жеткізу.

5. Тобық буын қозғалысын анықтауға арналған сенсорларды, жасанды бұлшықеттерді басқаруға арналған процессорды және қуат көзін қамтитын басқару жүйесін әзірлеу.

6. Экзоскелетті әртүрлі жүктемелермен және әртүрлі жағдайларда оның талаптарға сай екеніне және ұтқырлық пен өмір сапасын жақсартуда тиімді екеніне көз жеткізу үшін сынау.

**Зерттеу нәтижелерін апробациялау.** Жұмыстың негізгі нәтижелері 4 Халықаралық және ғылыми-техникалық конференцияларда, соның ішінде:

«IFToMM Asian Mechanisms and Machine Science Conference – 2021» (December 15-18, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam);

«55th International Conference on VIBROENGINEERING – 2022» (April 21, 2022 in Almaty, Kazakhstan);

«2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems», CIEES 2022, (24 – 26 November 2022, Veliko Tarnovo, Bulgaria);

«The Joint International Conference of the 13th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines (SYROM 2022) and the XXV International Conference on Robotics (ROBOTICS 2022)» Iasi, Romania (November 17 - 18, 2022.);

«8th International Workshop on New Trends in Medical and Service Robots, MESROB 2023 Craiova» 7-10 June 2023. апробациядан өтті.

**Жарияланымдар.** Жұмыстың негізгі тұжырымдары 16 жарияланымда ұсынылған, соның ішінде SCOPUS деректер қорына кіретін журналда 1 мақала (перцентиль 38%), SCOPUS деректер қорына кіретін халықаралық конференцияларда 4 мақала, ҚР БҒМ БҒСҚК ұсынған басылымдарда 3 мақала, ҚР өнертабысқа арналған 1 патентте, басқа басылымдарда 1 мақала жарияланған.

**Жұмыстың құрылымы және көлемі.** Жұмыс кіріспеден, төрт тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 1 қосымшадан тұрада. Жұмыстың жалпы көлемі 128 бетті құрайды, жұмыста 70 сурет, 12 кесте, 155 атаудан тұратын әдібиеттер тізімі бар.

## 1. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТТЕРІНІҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫН ТАЛДАУ

### 1.1 Оңалтудағы тобық буын экзоскелеттерінің заманауи дизайнына шолу

Оңалту экзоскелеті – физиотерапия және оңалту процесінде қозғалғыштығы шектеулі адамдарға көмектесуге арналған тозуға болатын роботты құрылғының бір түрі [1-2]. Бұл құрылғылар көбінесе жүруге және күнделікті әрекеттерді орындауға әсер ететін жарақат алған немесе ауруға шалдыққан адамдарға көмектесу үшін қолданылады [3]. Оңалту экзоскелеттері ұтқырлықты арттыруға, күшті жақсартуға және пациенттердің қалпына келуіне көмектесуге арналған.

Оңалту экзоскелеттерін жеке пациенттердің нақты қажеттіліктеріне сәйкес реттеуге болады. Бұған экзоскелет көрсететін көмек деңгейін реттеу, жүру үлгілерін бейімдеу және дененің әртүрлі өлшемдері мен пішіндеріне бейімделу кіреді [3]. Бұл құрылғылар әдетте физиотерапевтер басқаратын құрылымдық оңалту бағдарламасының бөлігі ретінде пайдаланылады. Олар пациенттерге қалпына келтіру, тепе-теңдікті жақсарту және дұрыс жүру үлгілерін қайта үйрену сияқты нақты оңалту мақсаттарына жетуге көмектеседі.

Оңалту экзоскелеттері әртүрлі клиникалық жағдайларда, соның ішінде оңалту орталықтарында, ауруханаларда және емханаларда қолданылады. Олар жұлын жарақаттары, инсульт, склероз және тірек-қимыл аппараты аурулары сияқты көптеген аурулары бар науқастарды емдеуде қолданылады [4].

Оңалту экзоскелеттерін пайдаланудың бірнеше пайдасы болуы мүмкін, соның ішінде пациенттердің моральдық жағдайын жақсарту, имобилизацияға байланысты қайталама денсаулық проблемаларының қаупін азайту және ауруханада болу ықтимал қысқа уақыт.

Тұтастай алғанда, оңалту экзоскелеттері қозғалғыштығы шектеулі адамдардың өмір сүру сапасын айтарлықтай жақсартып алатын, оларды қалпына келтіру және оңалту процестерін жеңілдететін технологияның қызықты және дамып келе жатқан саласы болып табылады. Зерттеушілер мен инженерлер пациенттердің кең ауқымына пайда әкелуі үшін осы құрылғылардың мүмкіндіктері мен қолжетімділігін арттыру бойынша жұмысты жалғастыруда.

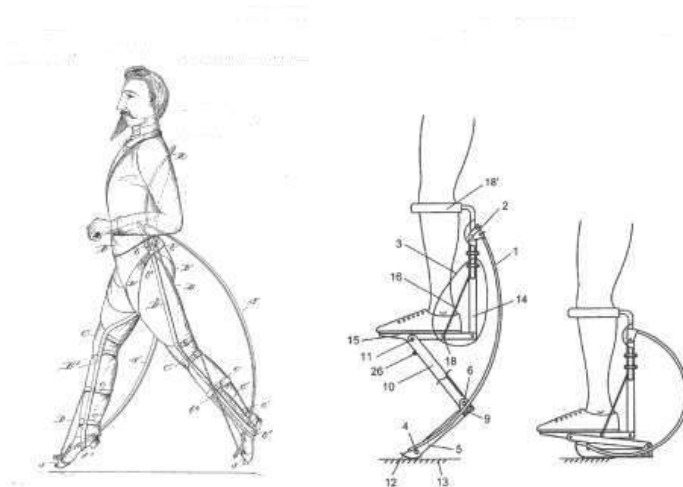
Экзоскелеттің жіктелуі:

- Толық дене — бүкіл денеге арналған экзоскелет бұл әскердегі күш пен оңалтуды арттыру үшін қолданылатын экзокостюм.
- Жоғарғы аяқ — жоғарғы аяқтың экзоскелеті қолды және денені қолдайды. Әрі қарай оны иық буындарына, шынтақ буындарына, білекке және тіпті саусақтарға бөлуге болады [2-4].
- Төменгі аяқ — бұл аяқтарды қолдау үшін қолданылатын экзоскелет. Ол жамбас, тізе немесе тек тобық, жамбас-тізе, тізе-тобық немесе жамбас-тізе-тобық сияқты әртүрлі конфигурациялардан тұрады [2-3].



Экзоскелеттердің екі түрі болады: *пассивті*, яғни қуат көзінсіз жұмыс жасайтын, адаммен басқарылатын және қозғалтқыштардың көмегін пайдаланатын күштік (ағылшынша *powered*) экзоскелеттері.

Пассивті экзоскелеттің алғашқы нұсқасы – эластипед болған (1.1 сурет) [4].



Сурет 1.1 Н.А. Янг жасаған эластипед экзоскелетінің құрылымы [4]

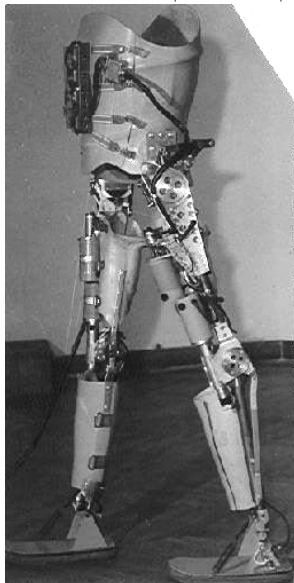
Эластипед – жаяу жүруді, жүгіруді және секіруді жеңілдетуге арналған құрылғы. Ол әскери мақсатта қолдануға арналған.

Бұл құрылғыны орыс өнертапқышы Николай Александрович Янг жасап шығарған (1849-1905) [4-5]. XIX ғасырдың аяғында ол эластипедтің пассивті экзоскелетінің бірнеше модификациясын жасап, патенттеді. Экзоскелеттердің бұл түрі кейінірек Александр Боктың өнертабысында дамытылды (1.2 суретте көрсетілген *powerbock* немесе *powerskip* тренажеры) [5].



Сурет 1.2. Александр Боктың өнертабысы [5]

Бірінші адымдайтын белсенді экзоскелет (1.3 сурет) 1969 жылы Югославия мен Сербия елдерінің ғалымы, биомеханика және робототехника саласының маманы Миомир Вукобратовичтің басшылығымен Белградта Михаил Пупин атындағы институтта жасалып шығарылды. Бұл экзоскелет медициналық мақсатта қолдануға арналған және тірек-қимыл аппараты бұзылған адамдарды емдеуге бағытталған. Кейіннен 1972-1974 жылдары бұл құрылғы ММУ-нің механика ҒЗИ-да жұмыс жасайтын ресейлік ғалымдарға зерттеуге және одан әрі дамытуға жіберілді. Сондай-ақ сол уақыттарда орталық мемлекеттік ортопедия және травматология институтында бұл экзоскелет арнайы жүргізілген клиникалық сынақтардан өткізілді.



Сурет 1.3. Миомир Вукобратовичтің белсенді экзоскелеті [5]

Экзоскелеттерді, сондай-ақ экзоскелеттік костюмдер немесе экзоскелеттік жүйелер деп те атайды, олардың мақсатына, дизайн ерекшеліктеріне, қозғалтқыштардың немесе жетектердің түріне, еркіндік дәрежелерінің санына және олар қолданатын басқару жүйесіне байланысты әр түрлі жіктеуге болады. Міне, осы жіктеулердің бөлінуі [6-7]:

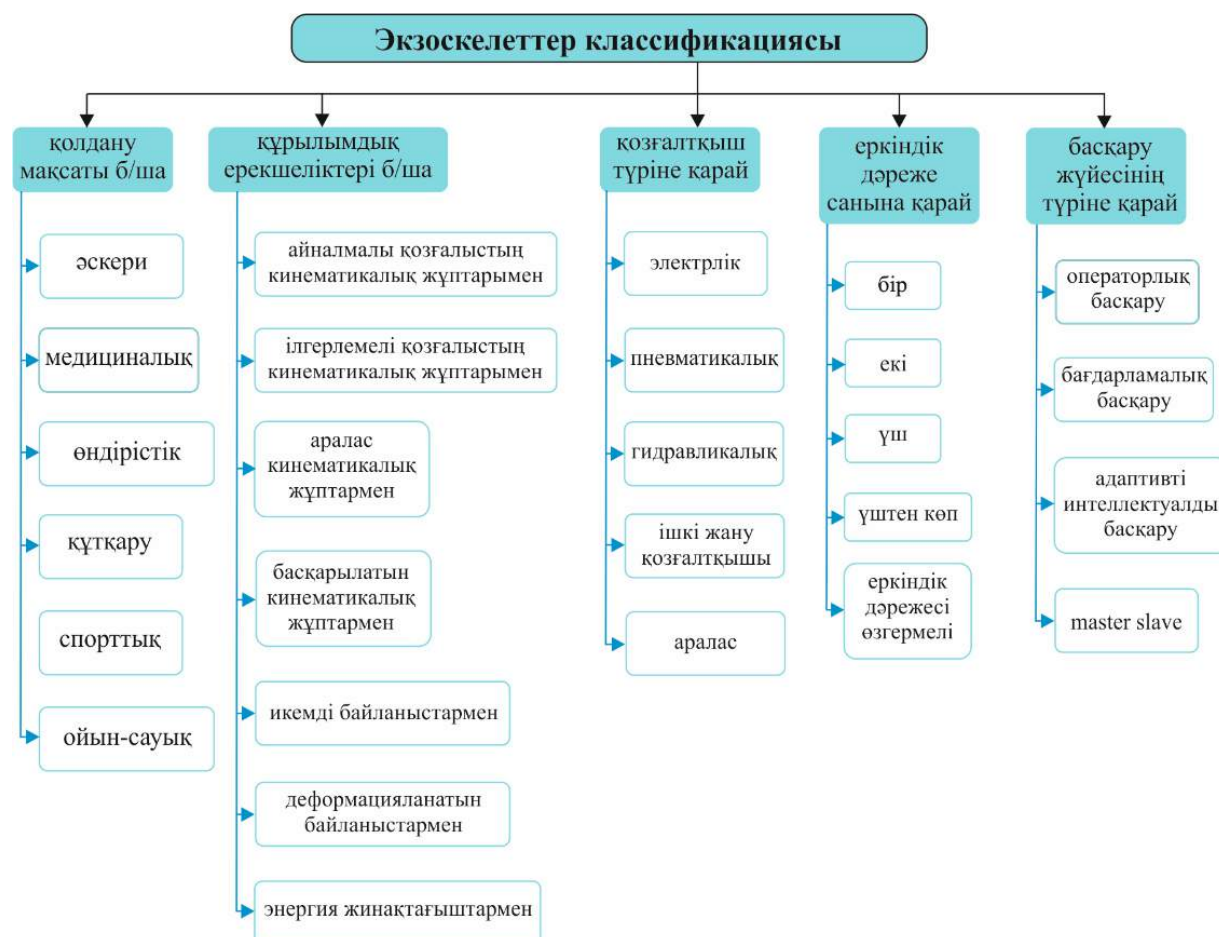
1. Пайдалану мақсаты:

- *Медициналық немесе оңалту экзоскелеттері*: параплегия сияқты қозғалғыштығы бұзылған адамдарға серуендеуге немесе басқа тапсырмаларды орындауға көмектесуге арналған.
- *Әскери экзоскелеттер*: ауыр жүктерді тасымалдауды немесе қорғауды қамтамасыз етуді қоса алғанда, сарбаздардың мүмкіндіктерін кеңейту үшін әскери қолдануға арналған.
- *Өнеркәсіптік экзоскелеттер*: өнеркәсіптік жағдайда жұмысшылардың физикалық мүмкіндіктерін кеңейту үшін қолданылады, әдетте қайталанатын тапсырмаларды орындау кезінде жарақат алу мен шаршау қаупін азайтады.

- *Тұтынушылық немесе рекреациялық экзоскелеттер:* күнделікті қолдануға немесе ойын-сауық мақсаттарына арналған, мысалы, спорттық өнімділікті жақсарту немесе ерекше тәжірибе беру.
2. Құрылымдық ерекшеліктері:
- *Жұмсақ экзоскелеттер:* тоқыма және эластомерлер сияқты икемді материалдардан жасалған, бұл табиғи сезім мен қозғалыстың жеңілдігін қамтамасыз етеді.
  - *Қатты экзоскелеттер:* сенімді қолдау мен қорғауды қамтамасыз ететін металл немесе көміртекті талшық сияқты қатты материалдардан тұрады.
3. Қозғалтқыш немесе жетек түрі:
- *Электр жетектері:* буындарды қуаттандыру және көмек көрсету үшін электр қозғалтқыштарын пайдалану.
  - *Пневматикалық жетектер:* қозғалысқа келтіру үшін сығылған ауаны қолдану.
  - *Гидравликалық жетектер:* қозғалыс жасау үшін қысымды сұйықтықтарды қолдану (әдетте май).
  - *Біріктірілген жүйелер:* кейбір экзоскелеттер әртүрлі функциялар үшін жетектердің бірнеше түрін біріктіре алады.
4. Еркіндік дәрежелерінің саны (DOF):
- *Тұрақты өріс тереңдігі:* бұл экзоскелеттерде буындар мен қозғалыстардың алдын ала анықталған жиынтығы бар.
  - *Өрістің айнымалы тереңдігі:* пайдаланушының тапсырмасына немесе қажеттіліктеріне байланысты еркіндік дәрежелерінің санын реттеуге мүмкіндік береді.
5. Бақылау жүйесі:
- *Қолмен басқару:* пайдаланушы экзоскелеттің қозғалысын тікелей басқарады, көбінесе түймелер, джойстиктер немесе басқа интерфейстер арқылы.
  - *Жартылай автономды басқару:* экзоскелет пайдаланушыға қозғалыстың белгілі бір аспектілерін басқаруға мүмкіндік беру арқылы көмек көрсетеді.
  - *Офлайн басқару:* экзоскелет пайдаланушының қозғалысы мен ниетіне бейімделу үшін сенсорлар мен алгоритмдерді қолдана отырып дербес жұмыс істейді.

Бұл классификациялар экзоскелеттік технологиялардың әртүрлілігі мен әмбебаптығын түсінуге көмектеседі, өйткені әртүрлі конструкциялар пайдаланушылардың нақты қолданылуы мен қажеттіліктеріне сәйкес келеді.

Сонымен қатар, материалтану, робототехника және басқару жүйелерінің үздіксіз жетістіктері әртүрлі салалардағы экзоскелеттердің мүмкіндіктері мен функционалдығын кеңейтуді жалғастыруда.



Сурет 1.4. Экзоскелеттер классификация [7]

Оңалту робототехникасы - роботтық құрылғыларды қолдану арқылы оңалтуды түсінуге және кеңейтуге арналған зерттеу саласы. Оңалту робототехникасы әртүрлі сенсомоторлы функцияларды (мысалы, қолды, тобық, тізе) қолдауға арналған роботты құрылғыларды әзірлеуді, әртүрлі қолдаушы терапиялық жаттығулар схемаларын әзірлеуді және пациенттің сенсомоторлық сипаттамаларын (қозғалу қабілетін) бағалауды қамтиды, мұнда роботтар көмекші құрылғылардан гөрі терапияға көмекші құрал ретінде пайдаланылады [8].

Роботтық оңалтуды әдетте пациенттер жақсы қабылдайды және қозғалыс бұзылыстарынан зардап шегетін адамдарда, әсіресе инсульттан зардап шегетін терапияға тиімді қосымша болып табылды [9].

Оңалту робототехникасын биомедициналық инженерияның ерекше саласы және адам мен робот әрекетінің бір бөлігі ретінде қарастыруға болады. Бұл салада клиникалар, терапевтер және инженерлер пациенттерді оңалтуға көмектесу үшін бірлесіп жұмыс істейді.

Соңғы жылдары қозғалыс қимылдарын қалпына келтіру (оңалтуға) үшін жаңа және жетілдірілген құрылғылар жасалды [10, 11, 12].

Себебі, қазіргі таңда инсульт сияқты ауруларға байланысты бұлшықет әлсіздігі бар адамдардың саны артуда [13]. Жүрісті қалпына келтіретін құрылғылардың көпшілігі аяқтың тобық буындарын қолдауға арналған,

өйткені зерттеулер көрсеткендей, жүруге қажетті оң энергияның көп бөлігі осы буында шығарылады екен [14].

Оңтайлы көмекші экзоскелет жасау үшін көптеген факторларды ескеру қажет.

Біріншіден, құрылғының салмағы мүмкіндігінше аз болу керек, өйткені жаяу жүргіншінің қосымша дене салмағы энергия шығынын арттырады, сондықтан ол оны пайдаланушының жай-күйіне әсер етіп, қолайсыздық тудыруы мүмкін [15]. Құрылғының салмағына байланысты тағы да бір маңызды фактор – бұл құрылғы дизайны немесе құрылысы. Ол аяқ буындарының табиғи қозғалысына кедергі келтірмеуі және пайдаланушы үшін ыңғайлы болуы қажет.

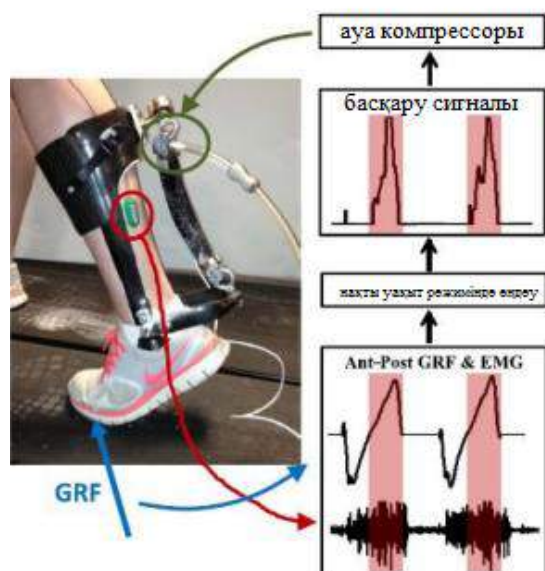
Ескеруді қажет ететін ең маңызды фактор – бұл атқарушы механизм жасаған күшті де, оны субъектінің жүру циклімен синхрондауды да ескеретін құрылғы конструкциясы. Болмаса, пайдаланушыға көрсетілген көмек тиімсіз, сәтсіз болып қалады немесе тіпті сол адамның қазіргі денсаулығына одан арман зиян келуі мүмкін [16].

Бүгінгі таңда тобық экзоскелетін іске асырудың ең көп тараған түрлеріне электрлік, гидравликалық және пневматикалық экзоскелеттер жатады.

Гидравликалық қозғалтқыштар негізінде жұмыс жасайтын құрылғылар қуат пен масса қатынасының ең жоғары шамасына ие, бұл оларды аяқ-қол экзоскелеттерін жасаудың тамаша әдістерінің бірі етеді [17-19]. Алайда, олар жұмыс сұйықтығы көзіне тәуелділігімен және құрылғының сорғысы мен клапандарының конфигурациясының күрделілігімен шектеледі. Бақытымызға орай, соңғы жылдары осы жұмыс әдістерінің жақсы қасиеттерін біріктіретін жаңа қозғалтқыштар пайда болды. Оның жарқын мысалы – Твенте университетінде, К. Staman және басқалары жасаған электро гидростатикалық қозғалтқышы [20]. Мұндай құрылғылардың сипаттамалары сорғылар мен клапандарды пайдаланбаса да, қарапайым гидравликалық қозғалтқыш ГҚ (жетек) сипаттамаларынан кем түспейді.

2015 жылы К.З. Такахаши және басқалары инсульт алған науқастардың жүрісін жеңілдету үшін салмағы ауыр емес, арнайы тобық буыны экзоскелетін жасап шығарды [21-22]. Бұл құрылғының басты ерекшелігі – пропорционалдық миоэлектрлік қозғалысты басқару алгоритмі (РМР) негізінде жұмыс істейді.

Бұл алгоритмге сәйкес тірек-қимыл реакциясының алдыңғы және артқы күші 0 ден асқан кезде экзоскелетке позаның фазасында өлшенген паретикалық жамбас бұлшықетінің (EMG) электромиографиясының сигналына пропорционалды табанды иуге мүмкіндік бар (1.5 сурет).



Сурет 1.5. Пропорционалды миоэлектрлік қозғалтқышы бар экзоскелеттің иллюстрациясы [21]

Сонымен қатар, экзоскелет арнайы таңдалған көміртекті талшықтан жасалғандықтан, салыстырмалы түрде жеңіл құрылымға ие ( $0,532 \pm 0,072$  кг).

ПҚ бар экзоскелеттер әдетте байланыспаған конфигурацияларда, жеке дара кездеспейді. Алайда, жаңа технологиялық дамудың арқасында ғалымдар қазір көлемі шағын автономды жүйелерді құра алатындай қабілетке жетті. Оның бір мысалы 1.6 суретте көрсетілген, тобық буыны және төменгі аяқтың көлемі шағын ортозы (РАFO) [23].

2016 жылы Z. Wang және басқалары жасаған РАFO ортозы, бұл –тобық буынында екі бағытты қосалқы айналмалы моментті қамтамасыз ете алатын заманауи құрылғы. Айналмалы моментті тудыру үшін құрылғы шағын пневматикалық қуат көзін және тісті рельсті пайдаланады. Стендтік сынақтар құрылғы шамамен 7,6 бар жұмыс қысымында 32 Нм дейін шығыс айналу моментін жасай алатындығын көрсетті. Салмағы 0,68 кг және ROM  $55^\circ$  бұл құрылғы сырт көзге перспективті болып көрінгенімен, оның жүру кезіндегі сипаттамалары әлі нақты және толықтай сыналып, тексерістен өткен жоқ.

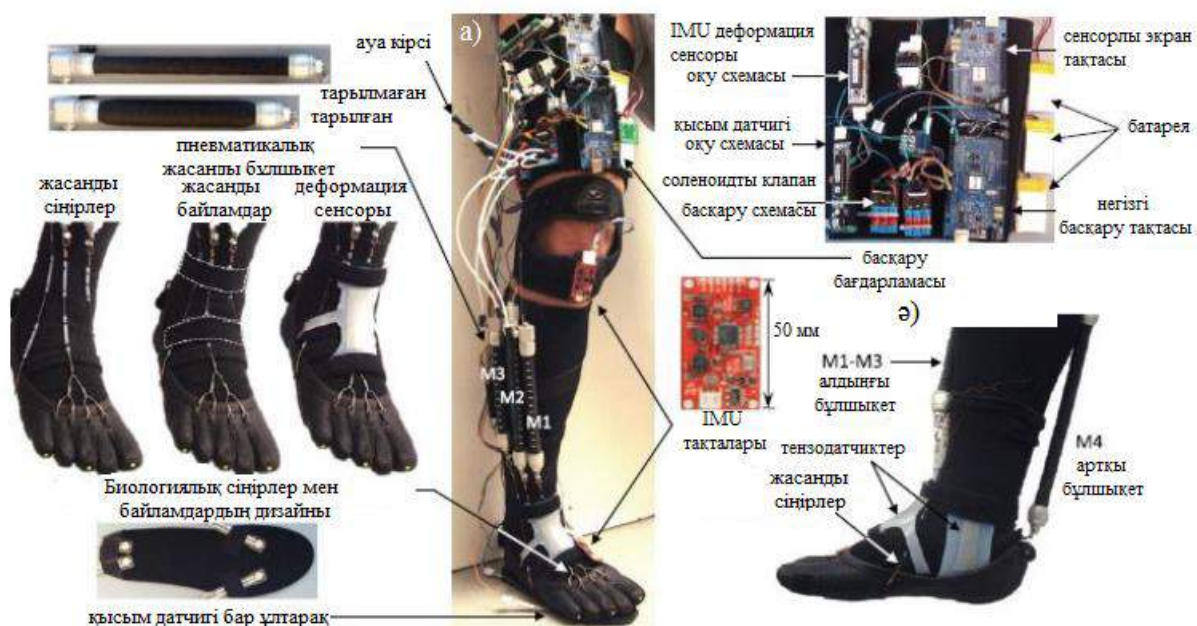


Сурет 1.6. РАFO экзоскелетінің артқы және бүйір көрінісі [23]



Пневматикалық қозғалтқышы бар экзоскелет дизайнын жасаудағы қызықты әдістердің бірі – ол 2014 жылы Y.L. Park және басқалары әзірлеген жұмсақ киілетін роботты экзоскелет болып табылады [23-24]. Бұл құрылғының басты атрибуты олар – төрт жасанды пневматикалық бұлшықеттер, олар тобық буынының биологиялық бұлшықет морфологиясы мен функционалдығын қайталайды.

1.7 суретте көрсетілгендей, үш қозғалтқыш артқы иілу, инверсия және эверсия үшін төменгі аяқтың алдыңғы жағында, ал біреуі табан иілу үшін артқы жағында орналасқан. Оның төрт жетегі оны әлдеқайда аз ROM - 25° (12° табанның бүгілуі, 13° иілу) бұрылуын қамтамасыз етеді.



Сурет 1.7. Биологиялық материалдар негізінде жасалған тобық буынының экзоскелетінің құрылымын суреттеу: а) алдынан қарағанда ә) бүйірінен қарағанда [24]

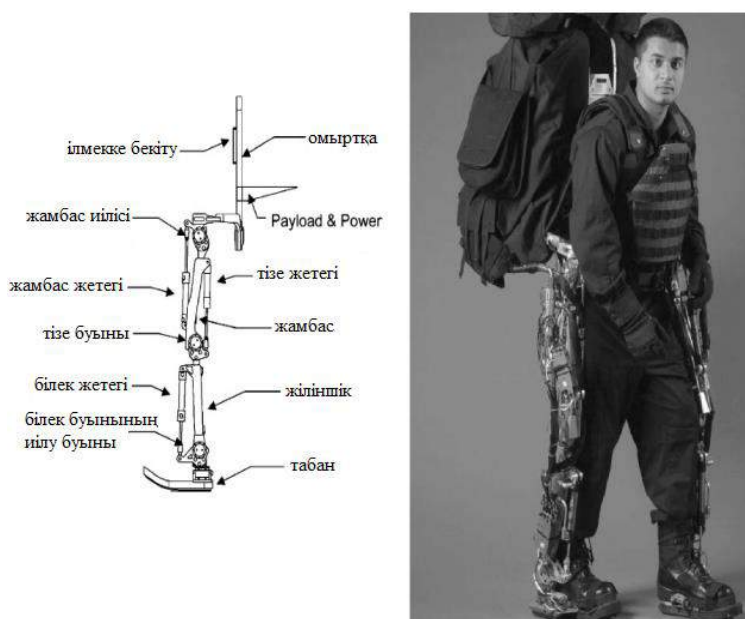
Экзоскелеттің құрылымы үш бөліктен тұрады, олар: негізгі қабат (аяғы, тобық және тізе буындары), ондағы пневматикалық күш төменгі аяққа түсіріледі, ортаңғы қабат (жасанды бұлшықеттер, сіңірлер) және сенсорлық қабат (ол жерде деформация, IMU және қысым сенсорлары орналасқан).

Бұл құрылғы отырып қозғалуға мәжбүр адамдармен сынақтан өткізілді және алынған нәтижелер оны тобық буындарын қалпына келтіру үшін белсенді көмекші құрал ретінде пайдалануға болатындығын көрсетті. Дегенмен, құрылғы адамның жүруіне әлі тексерілмеген және оның пневматикалық бұлшықеттерге сыртқы ауа көзін пайдалануға тәуелділігі оны автономды құрылғы ретінде пайдалануға жарамсыз етеді.

Гидравликалық қозғалтқыштар соңғы бірнеше жыл ішінде ең жоғары қуат пен салмақ қатынасына қол жеткізсе де, бұл технологияны тобық буыны экзоскелеттерін жасауға қолдануға ұмтылыс аз болды. Бұл негізінен

электронды басқару сияқты дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда гидравликалық жүйелерді жобалау қиынырақ болатындығымен байланысты [25-26].

Автономды гидравликалық қозғалтқышы бар алғашқы сәтті экзоскелетті 2005 жылы Калифорния университетінің Беркли робототехника және инженерия зертханасы әзірледі [27]. Берклидің төменгі аяқ экзоскелеті (BLEEX) екі антропоморфты аяқтардан тұрады, олар жетегі, қуат көзі және рюкзак тәрізді рамадан тұрады, оны әртүрлі ауыр жүктерді орнату үшін қолдануға болады (1.8 сурет). Оның құрылысы антропоморфты болып табылады және оның әр аяғында жеті еркіндік дәрежесі бар, олардың үшеуі тобықта орналасқан.



Сурет 1.8. Солдан оңға қарай: аяқ экзоскелеттінің қарапайым моделі және оны киіп тұрған адам [28]

Сонымен қатар, ол жеті еркіндік дәрежесінің төртеуін тобық буынындағы иілу мен созылу функцияларын іске қосу үшін қолданады, екі жақты сызықты гидравликалық қозғалтқыштарды пайдаланады, оның жалпы қуаты 1143 Вт құрайды. BLEEX-тің соңғы нәтижелеріне қарасақ, бұл экзоскелет 75 кг-ға дейінгі салмақта 1,3 м/с жылдамдықпен жүруді қамтамасыз ете алады екен.

Гидравликалық экзоскелеттің тағы бір мысалы – электрогидравликалық ортез (ЕНО), 2008 жылы М. Ноэль және басқалар жасаған [29]. 1.9 суретте көрсетілгендей, бұл құрылғы аз салмақты пластикалық пневматикалық шлангтар арқылы өзара байланысқан екі пневматикалық цилиндрден тұратын гибриді қозғалтқышты пайдаланады.

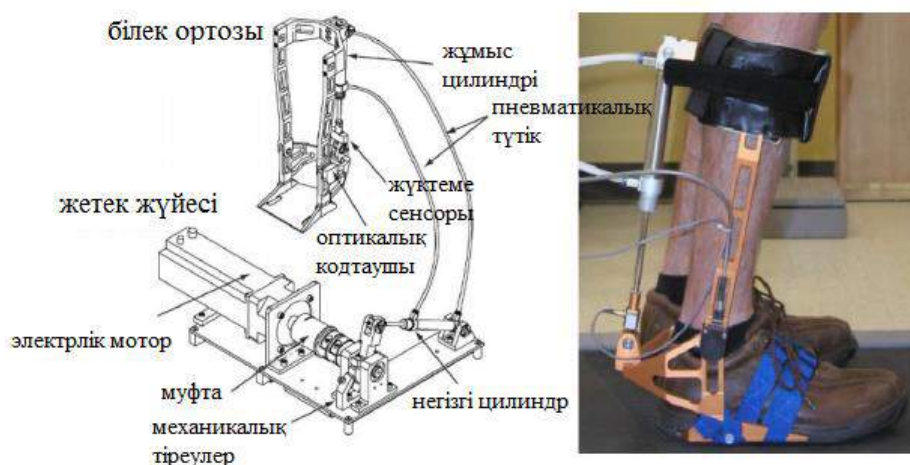
Негізгі цилиндр электрлік қозғалтқышпен басқарылады, ал жұмыс цилиндрі тобық буыны экзоскелетіне бекітіледі. Негізгі цилиндрді жүргізу үшін қолданылатын қозғалтқыш – бұл 3:1 беріліс коэффициенті бар



планетарлық беріліске қосылған щеткасыз айналмалы қозғалтқыш болып табылады [30].

Экзоскелет алюминийден жасалған және ұзындығы 0,30 м. Ортоз белгілі бір дәрежеде реттелетін, төменгі аяқтың әртүрлі өлшемдеріне сәйкес келетін, сонымен қатар аяқ пен табан арасында оңай ауыстырылатын етіп жасалған. Бұл жүйеде әдеттегі қарапайым PID реттегіші қолданылады.

Сонымен қатар, нақты уақыт режимінде құрылғы моменттік басқаруға (салмақ сенсоры) немесе позициялық басқаруға (оптикалық кодтаушы) арнайы бағдарланған қосқыш арқылы ауыса алады. Бір ортоздың жалпы массасы 1,70 кг және ROM 47° құрайды. Құрылғы тек адамның жүрісін зерттеу құралы ретінде пайдаланылды. Демек, оның жүруі және қимыл қозғалыс жасауы нашарлаған науқастарға көмектесу қабілеті әлі сынақтан өткізуді қажет етеді.



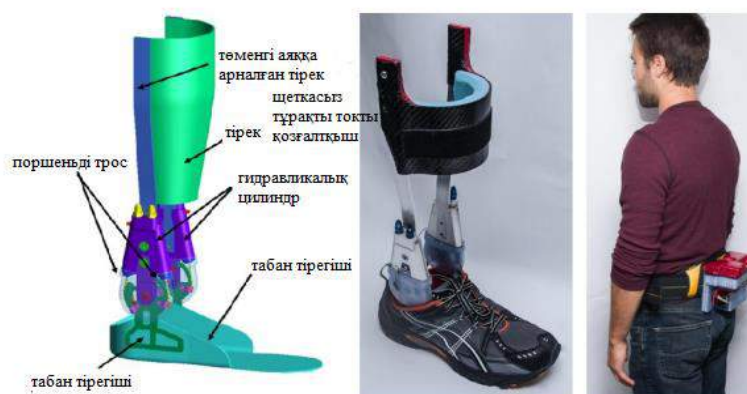
Сурет 1.9. Солдан оңға қарай: EGO экзоскелетінің иллюстрациясы және бүйір көрінісі [30]

Тобық буыны мен аяқтың гидравликалық ортозы (HAFO) деп аталатын заманауи автономды құрылғы гидравликалық экзоскелеттердің мөлшері мен салмағының айтарлықтай төмендеп, жақсарғанын көрсетті. 2016 жылы Б. Нойбауэр және басқалары жасаған құрылғының жалпы салмағы 3,30 кг (оның 0,97 кг тобық қозғалтқышына тиесілі, 2,16 кг қуат көзіне, ал қалған салмағы жастық пен шлангқа келеді) құрайды және ол сынақ кезінде (адамның қатысуынсыз) 60 Нм-ге дейін айналу моментін тудыруға қабілетті бола алатындығын көрсетті [31-35].

HAFO екі бөліктен тұрады: белдіктегі гидравликалық қуат көзі және тобық буынына бекітілген гидравликалық қозғалтқыштар. Екі бөлік бір-бірімен жұқа гидравликалық шлангтармен байланысқан. Қуат көзі батареядан, электр қозғалтқышынан, гидравликалық сорғыдан және клапандар жиынтығынан тұрады, ал қозғалтқыштар гидравликалық цилиндрлердің бір бағытты тарту-шығару жетектерінің екі жұбы болып табылады.

Тобық экзоскелеті төменгі аяқ тірегішінен, сондай-ақ тобық буынын сагиттальды және табанды иілу жазықтығы арқылы жылжытатын медиальды және бүйірлік дискілерден тұрады (1.10 сурет). Аяқ тіреуіші аяқ киім мен аяққа жетектер жасаған моментті бөледі. Аяқ пластинаға қарапайым аяқ киімнің көмегімен бекітіледі, ол пайдаланушының аяқ киімінің мөлшерінен екі есе үлкен болады.

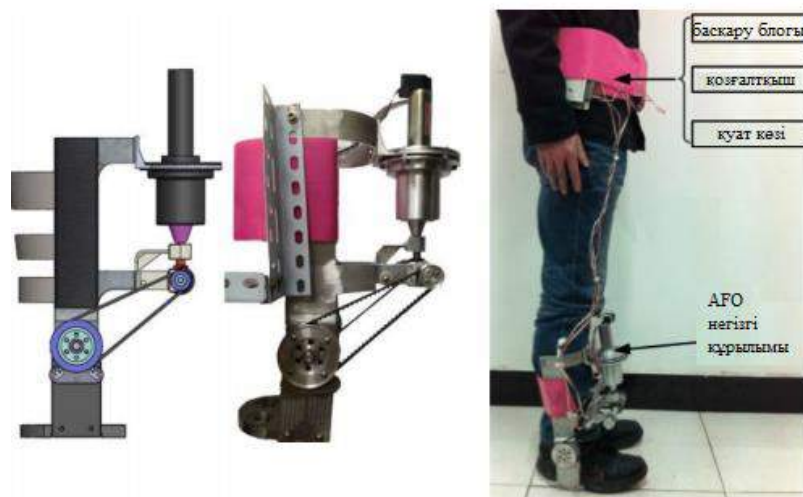
Сорғының максималды жұмыс бұрыштық жылдамдығы 2000 айн/мин және максималды жұмыс қысымы 138 бар құрайды. Құрылғы эквивалентті электромеханикалық нұсқалармен салыстырғанда жеңіл және ықшам дизайнға ие болса да, ол жүру жылдамдығы мен момент талаптарын қанағаттандыра алмайды.



Сурет 1.10 HAFO экзоскелет компоненттерінің сипаттамасы, физикалық моделі және қуат көзі [33]

Электр қозғалтқышы бар экзоскелеттердің бірі, ол – 2015 жылы Yang Bai және басқалары жасаған шағын тобық ортозы (P-AFO) болып табылады [36]. Бұл салыстырмалы түрде көлемі шағын, ұзындығы 0,245 м құрылғы. Құрылғы төменгі аяққа арнайы белдіктер мен оны пайдаланушының өкшесінің астындағы пластинамен бекітіледі. Оның негізгі бөлігі – төменгі аяқтың алдыңғы жағында орналасқан қозғалтқышы (1.11 сурет). Құрылғыны қосу жүйесі жоғары дәлдіктегі серво қозғалтқышынан және трансмиссиядан тұрады.

Құрылғының салмағы жеңіл, қуатты гармоникалық жетектен, конустық берілістен және синхронды белдік блоктарынан тұрады, олар құрылғыға 30°-қа табанды иуге және артқа иілуге (табанды иілу үшін 12°, артқы иілу үшін 18°) көмектеседі. Ол қазіргі таңда тек қимыл-қозғалыс зерттеулерін жүргізу үшін ғана пайдаланылғанымен, зерттеу нәтижелері оның жаяу жүруді қалпына келтіру құралы ретінде қолдануға болатын ұтымды шешім екенін көрсетеді [37-40].



Сурет 1.11 Солдан оңға қарай: САD экзоскелет сызбасы, физикалық модельі және экзоскелетті киген қатысушы [39]

Экзоскелеттердің тағы бір мысалы – 2014 жылы Моoney және басқалары жасаған автономды экзоскелет болып табылады [41]. Ол бір бағытты электр қозғалтқышын біліктің бүйірінде орналасқан шыны талшықты кергіштерге бекітілген бауды орау үшін пайдаланады. Тіректер етіктің түбіне бекітіледі, ал қозғалтқыш бауды ораған кезде күш тобық буынына әсер ететін моментті тудыратын тіректерге түсіріледі (1.12 сурет).

Мұндай экзоскелеттер пайдаланушылар 23 кг қосымша жүктемені көтерген тәжірибеде серуендеуге арналған энергия шығынын сәтті азайтты. Экзоскелетсіз бақылау жағдайымен салыстырғанда метаболикалық шығындардың төмендеуі  $8 \pm 3\%$  құрады [42].



Сурет 1.12 Массачусетс технологиялық институтының автономды экзоскелеті [43]

2014 жылы С. Meijneke және басқалары жасаған Ахилл экзоскелетінің сыртқы көрінісі 1.13 суретте көрсетілген. Экзоскелет электр қозғалтқышы, датчиктер (қысым датчигі, кодтаушы) және адамға көмек беру механизмі бар екі бәтенкеден тұрады [15]. Бәтенке серпімді жетек (SEA), шарикті бұрандалы шпиндель (SFK-SH6x2) және парак тәрізді жіңішке серіппесі бар Maxon-EC22

сериялы 4 полюсті қозғалтқыш арқылы айналасында айналу моментін тудыру үшін қажет. Құрылғымен жүргізілген тәжірибелік сынақта оның теория жүзінде қуаты 192 Вт және айналу моменті 78,54 Нм дейін жететіндігі анықталды.

Экзоскелеттің бір аяққа түсіретін салмағы 1,5 кг құрайды. Қуат көзі бар рюкзактың салмағы 5,2 кг тең. Құрылғының өзі серуендеу кезінде момент талаптарын қанағаттандыру үшін жеткілікті қуат бере алады және тәжірибелік сынақтарда ол 80,2 Вт-қа дейін жетуі мүмкін[44-45].

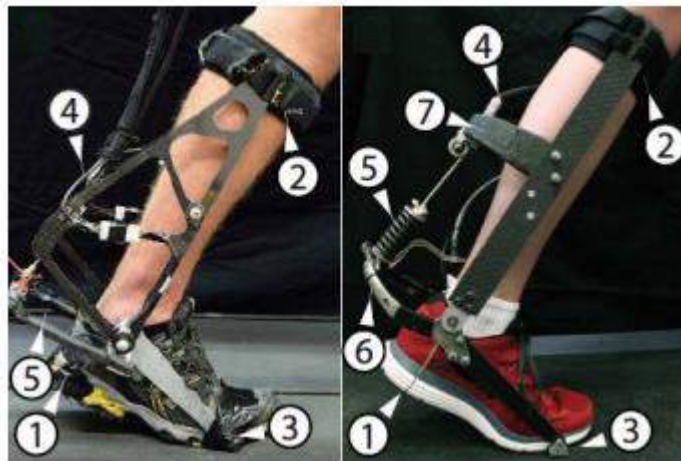


Сурет 1.13 Ахилл экзоскелетінің суреті (сол жақта) және экзоскелет компоненттерінің сипаттамасы (оң жақта) [45]

Аталған соңғы үш құрылғы автономды құрылғылар болып табылады, яғни қозғалтқыш пен қуат көзін пайдаланушы өзі бірге тасымалдайды. Алайда, экзоскелеттердің басқа да түрлері бар, оларда қуат көзі мен қозғалтқыш бөлек жүреді. Бұл құрылғылар байланысқан экзоскелеттер ретінде танымал және тек жүрісті қалыпқа келтіру үшін немесе осы бағытта зерттеулер жүргізу үшін ғана қолданылады, себебі олар қуат көзі орналасқан аймақпен шектеледі. Алайда, сыртқы жекелеген қозғалтқыштың арқасында тасымалданатын экзоскелеттің салмағы күшке әсер келтірместен өте төмен болуы мүмкін.

Мұндай құрылғылардың мысалдары – 2015 жылы К.А. White және басқалары жасаған Альфа және Бета модельдері болып табылады [46]. Альфа экзоскелеті таңдалған бағыттар бойынша сәйкестікті қамтамасыз ету үшін жасалған, ал бета ықшам құрылымға ие болу үшін жасалған. Бұл экзоскелет модельдері сыртқы электр қозғалтқышы және нақты уақыт контроллері арқылы іске қосылады. Қозғалтқыш жалғанған икемді Боуден кабелі арқылы механикалық энергияны экзоскелеттің жұмыс органына береді. 1.14 суретте көрсетілгендей, әр экзоскелет аяққа өкшеде орналасқан нүктелерде, тізе астындағы төменгі аяқта және аяқтың астындағы жерде бекітіледі.





Сурет 1.14 Солдан оңға қарай: альфа және бета экзоскелеттері. Альфа экзоскелеті келесі құрылымдардан тұрады: өкше астындағы бау (1), төменгі аяқты бекітуге арналған белбеу (2), аяқ киімге салынған топсалы пластина (3), тірекке бекітілген Боуден кабели (4) және серіппе (5). Ал бета экзоскелетінде 1 - 5 басқа, құрылысында білекте орналасқан, өкшені қамтып тұратын титан тұтқа (6) және қуыс көміртекті талшықтан жасалған Боуден кабелине арналған тірек (7) бар [47].

Жоғарыда аталған құрылғылардың жеке сипаттамаларын салыстырудың жылдам және қарапайым әдісін қамтамасыз ету үшін 1 кестесі жасалды.

Осылайша, жоғарыда аталған аспектілерді ескере отырып, 1 кестеде ұсынылған талаптардың тізбесі анықталды. 2 кестеде келтірілген мәліметтер техниканың қазіргі деңгейіне, ескертпелерде ұсынылған қосымша ақпаратқа негізделген.

3 кестеден көріп отырғанымыздай, төменгі аяқтың дұрыс көмекші экзоскелеті үшін барлық қажетті аспектілерді қанағаттандыра алатын құрылғы әлі жоқ. Демек, ең жақсы құрылғыны жасау үшін осы талаптарды орындауға тырысу өте маңызды.

Кесте 1.1 Экзоскелеттердің жалпы сипаттамалары

Иске қосу әдісі	Құрылғы атауы және жыл	Артықшылықтары	Шектеулер	Экзоскелеттің салмағы	Құрылғының қозғалыс ауқымы	DOF (Еркіндік дәрежесі)	Айналу моменті
<i>Электрлік</i>	Тасымалданатын тобық ортезі, 2015	Ықшам, берік, автономды	қолайсыз	-	12 <sup>0</sup> табанды иілу, 18 <sup>0</sup> артқы иілу	1 Белсенді	-
	Массачусетс технологиялық институтының автономды экзоскелеті, 2014	Эргономды, автономды	Басқару жүйесі жетілдіруді қажет етеді	1,35 кг	-	1 Белсенді	-
	Ахилл экзоскелеті, 2014	Жеңіл, эргономды, автономды	Аяқтың қозғалысы шектеулі	1,5 кг	-	1 Белсенді	78,54 Нм
	Альфа экзоскелеті, 2015	Жоғары қуатты, жеңіл, кең жолақты өткізу қабілеті	Автономды емес, реттелмейтін құрылымда үлкен медиальды және артқы шығыңқы жерлері бар, олар жүруге әсер етеді	0,835 кг	30 <sup>0</sup> табанды иілу, 20 <sup>0</sup> артқы иілу	1 Белсенді	80 Нм (ең жоғары орташа өлшенген момент)
	Бета экзоскелеті, 2015	Жоғары қуатты, жеңіл, кең жолақты өткізу қабілеті	Автономды емес, басқарылмайтын дизайн	0,875 кг	30 <sup>0</sup> табанды иілу, 20 <sup>0</sup> артқы иілу	1 Белсенді	87 Нм (ең жоғары орташа өлшенген момент)
<i>Пневматикалық</i>	Нейро-механикалық жетегі бар тобық экзоскелеті, 2015	Жеңіл, эргономды	Автономды емес, артқы бүгілу қолдау көрсетілмейді	0,5323± 0,072 кг	-	1 Белсенді	-
	Биологиялық материалдан жасалған тобық экзоскелеті, 2014	Биологиялық белсенді жұмыс жүйесі, жұмсақ құрылым	Автономды емес, күрделі қосу жүйесі	-	12 <sup>0</sup> табанды иілу, 13 <sup>0</sup> артқы иілу	2 Белсенді	-

	Шағын, қоректендірілетін тобық ортезі, 2016	Жеңіл, автономды	Көлемді, қолайсыз	0,68 кг	55 <sup>0</sup> (табанды артқы иілу үшін көрсетілмеген жалпы диапазон)	1 Белсенді	32 Нм (шамамен 7,6 бар қысымда)
<i>Гидравликалық</i>	BLEEX, 2006	Автономды, пайдалы жүктемені көтере алады, күші және тартқыштығы жоғары	Қолайсыз, көлемді	-	45 <sup>0</sup> флекс ионы, 45 <sup>0</sup> кеңейту, 20 <sup>0</sup> аддукция, 20 <sup>0</sup> алшақтату	1 Белсенді  2 Белсенді емес	150 Нм (итеру қозғалысы үшін айналу моменті)  190 Нм (итеру қозғалысы үшін айналу моменті)
	Электро- гидравликалық жетегі тобық ортезі, 2008	Реттелетін дизайн, басқарылатын қуат	Автономды емес	1,7 кг	47 <sup>0</sup> (табан бүгілу үшін көрсетілмеген жалпы диапазон)	1 Белсенді	-
	Гидравликалық тобық ортезі, 2016	Автономды, жеңіл, эргономды	Сорғының жылдамдығы мен күші шектеулі, жүруге қойылатын минималды талаптарға сай келмейді	0,97 кг	50 <sup>0</sup> табанды иілу, 20 <sup>0</sup> артқы иілу	1 Белсенді	60 Нм

Кесте 1.2 Экзоскелеттерге қойылатын талаптар

Сипаттамасы	Нақты мәндер
Экзоскелеттің қозғалыс ауқымы	Жалпы ROM: 55 <sup>0</sup> Табанды иілу 35 <sup>0</sup> , Артқы иілу 20 <sup>0</sup>
Экзоскелеттің салмағы	Макс.: 1,5 кг
Экзоскелеттің конструкциясы үшін аймақтың максималды өлшемдері	Жалпы биіктігі: 0,51 м (табаннан тізеге дейін), Алдыңғы аяқтар арасындағы қашықтық: 0,26-0,286 м (аяқ киім мөлшері 42-45 ЕС), Артқы аяқ кеңістігі: 0,16 м (еркін таңдалған), Аяқтың сыртқы кеңістігі: шектеусіз, Аяқтың максималды ішкі кеңістігі: 0,20 м
Төменгі аяқтың әртүрлі аймақтарына арналған күш (Н)	Аяқтың максималды артқы жағы, PPT (ауырсыну қысымының шегі): 50 Н, Аяқтың алдыңғы бөлігінің максималды: 50 Н, Аяқтың артқы жағындағы максималды: 30 Н, Табанның максималды: 20 Н
Жалпы DOF	3

Кесте 1.3 Экзоскелет жобасының кейбір талаптары негізінде заманауи құрылғыны бағалау

Құрылғы атауы	Экзоскелеттің салмағы		ROM		Минимал айналу момент	
	Техникалық сипаттамалары	Баға	Техникалық сипаттамалары	Баға	Техникалық сипаттамалары	Баға
Шағын тобық ортезі	-	-	12 <sup>0</sup> табанды иілу 18 <sup>0</sup> артқы иілу	қолайсыз	-	-
MIT автономды экзоскелеті	1,35 кг	ыңғайлы	-	-	-	-
Ахилл экзоскелеті	1,5 кг	ыңғайлы	-	-	78,64 Нм	қолайсыз
Альфа экзоскелеті	0,835 кг	ыңғайлы	30 <sup>0</sup> табанды иілу 20 <sup>0</sup> артқы иілу	қолайсыз	80 Нм	қолайсыз
Бета экзоскелеті	0,875 кг	ыңғайлы	30 <sup>0</sup> табанды иілу 20 <sup>0</sup> артқы иілу	қолайсыз	87 Нм	қолайсыз



Нейромеханикалық тобық экзоскелеті	0,5323 ± 0,072 кг	ыңғайлы	-	-	-	-
Биоинспирацияланған тобық экзоскелеті	-	-	12 <sup>0</sup> табанды иілу 13 <sup>0</sup> артқы иілу	қолайсыз	-	-
Шағын, қоректендірілетін тобық ортезі	0,68 кг	ыңғайлы	50 <sup>0</sup> жалпы ROM	?	32 Нм	қолайсыз
BLEEX	-	-	45 <sup>0</sup> табанды иілу 45 <sup>0</sup> артқы иілу	ыңғайлы	150 Нм (Итеру) 190 Нм (Тарту)	қолайсыз
Электр гидравликалық тобық ортезі	1,7 кг	қолайсыз	47 <sup>0</sup> жалпы ROM	?	-	-
Гидравликалық тобық ортезі	0,97 кг	ыңғайлы	50 <sup>0</sup> табанды иілу 20 <sup>0</sup> артқы иілу	ыңғайлы	60 Нм	қолайсыз

Оңалту роботтары жасалған кезде олар қалпына келтіру роботтары емес, адамдарға жанасу арқылы заттарды және жүйке жүйесі бұзылған адамдарды тануға көмектесу үшін жасалады. Оңалту роботтары тұру, тепе-теңдік сақтау және жүру мүмкіндігі шектеулі науқастарды қалпына келтіру процесінде қолданылады. Бұл роботтар адам мен оның қозғалысына сәйкес болуы керек, сондықтан машина жасау кезінде өндірушілер оның пациенттің прогрессіне сәйкес келетініне сенімді болуы керек.

Оңалту роботтары пациенттің бейімделу деңгейін анықтайтын әдістерді қолдану арқылы әзірленеді. Әдістерге белсенді тірек жаттығулары, белсенді тежеу жаттығулары, белсенді қарсылық жаттығулары, пассивті жаттығулар және бейімделу жаттығулары жатады, бірақ олармен шектелмейді. Көмекші тірекпен белсенді жаттығулар кезінде пациент қолды алдын ала белгіленген тәртіпте оған ешқандай қысымсыз жылжытады [48-50].

Роботтандырылған оңалту жүйелерінің негізгі артықшылықтарының бірі - олар пациенттерге оларды оңалтуға бағытталған және жекелендірілген тәсілмен қамтамасыз ете алады. Жетілдірілген сенсорлар мен компьютерлік алгоритмдерді пайдалана отырып, бұл жүйелер пациенттің үлгерімін қадағалап, терапияны сәйкесінше реттей алады [51].

Оңалту роботтық жүйелерінің тағы бір артықшылығы - олар медицина қызметкерлеріне жүктемені азайтуға көмектеседі. Бұл жүйелерді пациенттерге терапияны неғұрлым автоматтандырылған және тиімді түрде қамтамасыз ету үшін жиі қолдануға болады, бұл медицина қызметкерлерін пациенттерге күтім көрсетудің басқа аспектілеріне назар аударудан босатады [52-55].

Жалпы, оңалту роботты кешендер көптеген пациенттердің өмір сүру сапасын жақсарту алатын медицинаның перспективалы саласы болып табылады.

Бұл технологиялар дамып келе жатқандықтан, олар пациенттердің кең ауқымы үшін оңалту процесінің маңызды бөлігіне айналуы мүмкін.

Оңалтуға көмектесуге арналған роботтық технологиялар терапевттерге ұзақ уақыт бойы дәйекті оқытуды қамтамасыз етуге және прогресті өлшеу үшін деректерді жинауға көмектесу арқылы терапияның тиімділігі мен қолжетімділігін арттыруға мүмкіндік береді [56].

Терапияның автоматтандырылуы көптеген пациенттерге телереабилитация арқылы бір мезгілде және мүмкін тіпті қашықтан үйлерінен тыс емделуге мүмкіндік береді [57-60]. Жиналған деректер өнімділікті және құжаттың сәйкестігін, сондай-ақ прогресті объективті бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін. Осы сипаттамалардың барлығы терапевттерді пациенттерді емдеуде тиімдірек ете алады. Науқас үшін ең маңыздысы, ол қазіргі қаржылық ахуалда жиі сұранысқа ие және жоғары бағаланатын терапияға қолжетімділікті кеңейте алады. Соңғы жылдары көптеген арзан, дайын тұтынушыларға арналған құрылғылар терапия сеанстарында қолдануға бейімделді және мотивация мен белсенділікті арттыру әдістері олармен біріктірілді. Бұл бөлім оңалту үшін роботты технологияларды әзірлеу және енгізу бойынша күш-жігерді сипаттайды.

Реабилитация (оңалту) үшін тобық буын экзоскелеті – сауықтыру процесінде тобық дисфункциясы бар адамдарға көмектесуге арналған киілетін роботты құрылғы [61].

Экзоскелеттің бұл түрі қолдауды қамтамасыз етуге, ұтқырлықты жақсартуға және жарақаттан немесе невропатиядан кейін тобықтың күші мен бақылауын қалпына келтіруге көмектесуге арналған.

Оңалту үшін тобық буын экзоскелетін әзірлеуде маңызды бағыттармен сілтемелерді топтастыра келе мынандай түйін шығаруға болады [62-68]:

*Жеңіл және компактты дизайн.* Заманауи тобық буын экзоскелеттері жеңіл және компамты дизайнға бағытталған. Бұл құрылғылар ұзақ уақыт киюге арналған, сондықтан салмақ пен көлемді азайту пациенттің жайлылығы мен қолайлылығы үшін өте маңызды. Бұған көміртекті талшық пен алюминий сияқты жеңіл материалдарды пайдалану арқылы қол жеткізіледі [63].

*Әрекет ету механизмдері.* Қазіргі заманғы конструкцияларға көбінесе щеткасыз тұрақты ток қозғалтқыштары немесе пневматикалық жүйелер сияқты тиімді жетектер кіреді, олар қажетті көмек немесе тобық буын қозғалысына төзімділікті қамтамасыз етеді. Кейбір конструкциялар табиғи қозғалыс үшін иілгіш механизмдерді де пайдаланады.

*Қабылдау және бақылау.* Бұл құрылғыларға көбінесе акселерометрлер, гироскоптар және кодерлер сияқты әртүрлі датчиктер кіреді, олар пайдаланушының буындарының бұрыштарын өлшейді. Машиналық оқыту мен адаптивті басқаруды қоса алғанда, жетілдірілген басқару алгоритмдері экзоскелеттің көмегін немесе қарсылығын пайдаланушының қажеттіліктеріне бейімдеу үшін қолданылады.

*Орнату және бейімделу.* Көптеген заманауи тобық экзоскелеттері жеке пайдаланушылар үшін теңшеу мүмкіндігімен жасалған. Бұл құрылғыны пайдаланушының анатомиясына сәйкес орнатуды және басқару параметрлерін

оның нақты жүру үлгілері мен оңалту мақсаттарына бейімдеуді қамтиды. Кейбір конструкциялар сонымен қатар компоненттерді жаңартуды немесе ауыстыруды жеңілдететін модульділікті қамтиды.

*Энергия тиімділігі.* Батарейаның қызмет ету мерзімін ұзарту және пайдаланушыға жүктемені азайту үшін заманауи тобық экзоскелеттері энергияны үнемдейтін құрылымдарға бағытталған. Бұл энергияны тұтынуды азайту үшін атқарушы басқару стратегияларын оңтайландыруды және серуендеу кезінде энергияны қалпына келтіру және сақтау үшін регенеративті тежеу жүйелерін пайдалануды қамтиды.

*Ыңғайлы интерфейстер:* пайдаланушының тәжірибесін жақсарту үшін адам-машина интерфейстері жетілдірілген. Көптеген заманауи тобық экзоскелеттерінде интуитивті басқару интерфейстері бар, көбінесе смартфон қолданбалары немесе қарапайым түймелер арқылы пациенттер мен дәрігерлерге параметрлерді реттеуді және прогресті бақылауды жеңілдетеді.

*Клиникалық интеграция.* Тобық буын экзоскелеттері клиникалық жағдайларға оңай біріктірілуі мүмкін. Бұл қолданыстағы оңалту хаттамаларымен және құралдарымен үйлесімділікті қамтамасыз етуді, сондай-ақ терапевттерге пациенттің үлгерімін бақылау үшін тіркеу және деректерді талдау мүмкіндіктерін беруді қамтиды.

*Қауіпсіздік сипаттамалары.* Тобық буын экзоскелеттерін жобалау кезінде қауіпсіздік бірінші кезектегі міндет болып табылады. Қазіргі заманғы құрылғылар көбінесе қауіпсіздік мүмкіндіктерінің бірнеше деңгейлерін қамтиды, соның ішінде апаттық тоқтату түймелері, ақауларға төзімді механизмдер және жарақаттанудың алдын алу үшін құрылғы мен пайдаланушының күйін нақты уақыт режимінде бақылау.

*Құны және қол жетімділігі.* Технологияның дамуына қарамастан, шығындар мен қол жетімділік маңызды факторлар болып қала береді. Өндірушілер тобық экзоскелеттерін пациенттердің кең ауқымына, соның ішінде табысы төмен медициналық мекемелерге қолжетімді және қолжетімді ету үшін жұмыс істеуде.

*Клиникалық тиімділігі.* Тобық экзоскелеттерінің клиникалық тиімділігін бағалау үшін зерттеулер мен клиникалық зерттеулер жалғасуда. Бұл олардың жүрісті жақсарту, бұлшықетті күшейту және ауырсынуды азайту сияқты пациенттердің нәтижелеріне әсерін бағалауды қамтиды.

Осылайша, оңалту робототехникасындағы заманауи тобық экзоскелеттері кеңейтілген анықтау және басқару мүмкіндіктері бар жеңіл, реттелетін және энергияны үнемдейтін конструкцияларға артықшылық беру үшін дамыды. Менің соңғы жаңартуымнан кейін одан әрі жетістіктерге қол жеткізілгенімен, бұл принциптер оңалту контекстінде тобық экзоскелет технологиясын одан әрі дамытуға негіз береді. Осы саладағы соңғы әзірлемелер мен шолулармен танысу үшін соңғы дереккөздерге жүгіну өте маңызды.

## 1.2 Жаңа тенденциялар мен болашақ бағыттар тобық экзоскелеттерінің дамуы

Тобық буын экзоскелеттерінің дамуы киюге болатын робототехника саласындағы зерттеулер мен инновациялардың маңызды саласына айналды [69]. Бұл құрылғылар қозғалғыштығы шектеулі адамдарға көмек көрсетуге, қолдау көрсетуге және оңалтуға немесе тобықтың қайталанатын немесе шиеленіскен қозғалыстарына байланысты тапсырмаларды орындауға арналған.

Төменгі аяқтың экзоскелеттері, оның ішінде тобық экзоскелеттері туралы түсінік 2000 жылдардың басында күшейе бастады [70]. Бастапқы прототиптер көбінесе үлкен және көлемді болды, бұл олардың практикалығын шектеді. Осы кезеңде зерттеушілер мен инженерлер адамның ұтқырлығын арттыруға және мүмкіндіктерін арттыруға көмектесетін роботты құрылғылардың мүмкіндіктерін зерттеді. Алайда бастапқы прототиптер көбінесе үлкен және көлемді болды, бұл практикалық шектеулер қойды. Осы жылдар ішінде материалдар, миниатюризация, басқару жүйелері және қуат көздері саласындағы жетістіктер практикалық және пайдаланушыға ыңғайлы дизайн жасауға әкелді. Бүгінгі таңда тобық экзоскелеттері мен төменгі аяқтың экзоскелеттері күрделене түсті және әртүрлі қосымшаларда, соның ішінде оңалту, қозғалысқа көмектесу және өндірістік жағдайларда қолданылады [71-75].

Төменгі аяқтың экзоскелеттерінің алғашқы дамуының көпшілігі әскери қолдану арқылы ынталандырылды, мұнда сарбаздар жиі ауыр жүктерді ұзақ қашықтыққа тасымалдауға мәжбүр болды [76]. Мақсат сарбаздардың физикалық белсенділігін төмендету және олардың төзімділігін арттыру болды. Ғылыми-зерттеу институттары мен университеттері осы алғашқы прототиптерді әзірлеуде алдыңғы қатарда болды. Оларды экзоскелет технологиясының әскери және азаматтық мақсатта қолданудың әлеуетті артықшылықтарын зерттеуге деген ұмтылыс қозғады. Бұл алғашқы прототиптердің алдында тұрған негізгі мәселелердің бірі олардың мөлшері мен салмағы болды. Олар әдетте үлкен және ауыр болды, бұл оларды күнделікті қолдануға немесе ұзақ уақыт киюге жарамсыз етті. Ерте экзоскелеттер көбінесе үлкен батареялар сияқты көлемді энергия көздеріне сүйенді [76], бұл олардың салмағын арттырды және қозғалғыштығын шектеді.

Зерттеушілер адамның қозғалысының биомеханикасын және табиғи қозғалыстарды толықтыратын және көмектесетін экзоскелеттерді қалай жобалауға болатынын түсіну үшін жұмыс жасады. Тиімді бақылау жүйелерін дамыту тағы бір маңызды міндет болды [77]. Осы алғашқы прототиптерді әзірлеу және өндіру құны жоғары болды, бұл олардың қол жетімділігі мен кең қолдану үшін практикалық болуын шектеді.

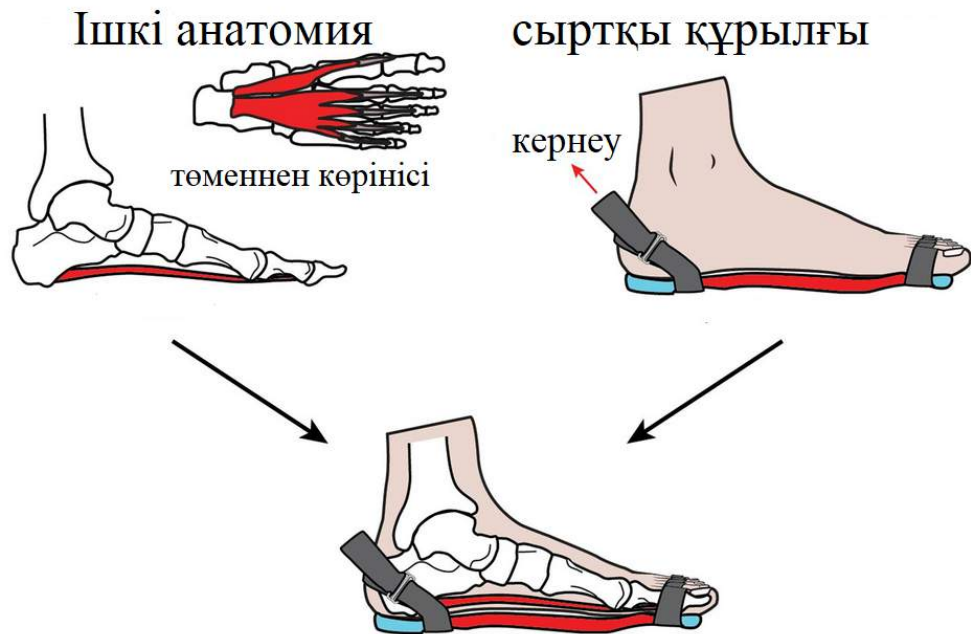
Тобық экзоскелеттеріндегі маңызды жетістіктердің бірі компоненттерді миниатюризациялау және портативтілікті арттыру болды. Зерттеушілер ыңғайлылық пен пайдаланудың қарапайымдылығын арттыру үшін бұл құрылғыларды жеңіл және ыңғайлы етуге назар аударды. Әрине, миниатюризация және портативтіліктің жоғарылауы тобық экзоскелеттерінің дамуындағы маңызды жетістіктерге айналды. Бұл жақсартулар тобық

экзоскелеттерін практикалық және қолдануға ыңғайлы етіп, ыңғайлылық пен пайдаланудың қарапайымдылығын қамтамасыз етті [78-80]. Пайдаланушының жайлылығы компоненттерді миниатюризациялау тобық экзоскелеттерінің көлемі мен салмағын азайтады. Бұл өз кезегінде құрылғыны киген кезде ауыртпалықты азайту арқылы пайдаланушының жайлылығын арттырады. Пайдаланушылар жеңіл және аз көлемді экзоскелеттермен еркін және табиғи түрде қозғала алады. Кішкентай және портативті тобық экзоскелеттерін кию және шешу оңайырақ, бұл оларды пайдаланушыларға ыңғайлы етеді. Бұл әсіресе қозғалғыштығы шектеулі адамдар үшін өте маңызды, олар құрылғыны кию және алу кезінде көмекке мұқтаж болуы мүмкін. Экзоскелет компоненттерінің мөлшері мен салмағының төмендеуі пайдаланушының шаршауын азайтуға көмектеседі. Пайдаланушылар аяқтарына аз жүктеме түсіреді, өйткені экзоскелеттер айтарлықтай қосымша жүктемелер жасамай көмектеседі.

Портативті тобық экзоскелеттерін қолданудың кең ауқымына бейімдеуге болады. Оларды оңалту үшін ғана емес, сонымен қатар әртүрлі жұмыс жағдайларында да қолдануға болады, бұл жұмысшыларға қайталанатын немесе ауыр тобық қозғалыстарын қажет ететін тапсырмаларды аз шаршаумен орындауға мүмкіндік береді. Кішігірім және қол жетімді тобық экзоскелеттері пайдаланушылардың кең ауқымы үшін, соның ішінде дамушы елдердің тұрғындары үшін және қозғалғыштығының әртүрлі деңгейлері үшін қол жетімді [81].

Миниатюризация мен портативтіліктің үздіксіз күш-жігері тобық экзоскелет технологиясының айтарлықтай жақсаруына әкелді, бұл құрылғыларды әртүрлі пайдаланушылар мен жағдайлар үшін практикалық және қолдануға ыңғайлы етті. Зерттеушілер мен инженерлер тобық буын экзоскелеттерінің тиімділігі мен ыңғайлылығын одан әрі жақсарту үшін осы аспектілерді жетілдіруді жалғастыруда.

Тобық буын экзоскелеттері тобықтың табиғи биомеханикасын имитациялайды. Инженерлер мен биомеханика мамандары қажет болған жағдайда қолдау көрсете отырып, табиғи жүруді және тобық қозғалысының кең ауқымын қамтамасыз ететін құрылымдарды әзірлеумен айналысты. Биомеханикалық дизайн тобық буын экзоскелетін дамытудың маңызды аспектісі болып табылады, өйткені ол осы киілетін құрылғылардың қажет болған жағдайда қолдау көрсете отырып, тобықтың табиғи қозғалысын тиімді түрде имитациялауын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.



Сурет 1.15 Тобық буынның плантар қаттылығы [81]

Тобық экзоскелеттері серуендеу кезінде табиғи жүруді қамтамасыз етуге арналған. Бұл тобық буынының дорсифлексияны (аяқты көтеру) және табанды бүгуді (аяқты төмен қаратып) қоса алғанда, толық қозғалыс ауқымын орындау мүмкіндігін болжайды. Жақсы жобаланған экзоскелет бұл қозғалыстардың шектелмеуін қамтамасыз етеді, бұл пайдаланушыға табиғи және ыңғайлы жүруді қамтамасыз етеді. Биомеханикалық дизайн пайдаланушының қозғалысын анықтай алатын және тиісті көмек көрсете алатын сенсорлар мен басқару алгоритмдерін қамтиды. Мысалы, егер пайдаланушы тегіс емес жерлерде жүрсе немесе баспалдақпен көтерілсе, экзоскелет тұрақтылық пен тепе-теңдікті сақтау үшін тобыққа қосымша көмек көрсету үшін қолдауын бейімдей алады [82].

Экзоскелеттің пайдаланушының тобығына қатысты дұрыс туралануы өте маңызды. Сәйкессіздік ыңғайсыздыққа, тиімсіз қозғалысқа және ықтимал жарақатқа әкелуі мүмкін. Биомеханикалық дизайн экзоскелеттің сенімді орналасуын және пайдаланушының анатомиясына сәйкес келуін қамтамасыз етеді. Жаяу жүру, жүгіру немесе ауыр көтеру сияқты әрекеттер кезінде тобық буынындағы стрессті азайту үшін тобық экзоскелеттері жиі қолданылады. Биомеханикалық дизайн табиғи буынға жүктемені азайту үшін күштердің экзоскелеттен пайдаланушының денесіне қалай ауысатынын ескереді.

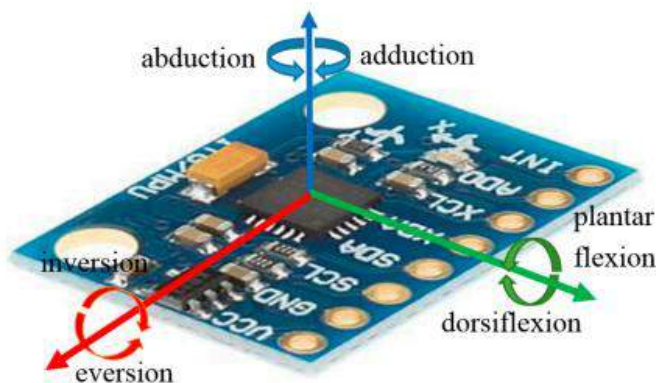
Жетілдірілген тобық экзоскелеттері пайдаланушының ниеті мен қозғалысына жауап беру үшін жасалған. Биомеханикалық сенсорлар мен басқару жүйелері экзоскелетке пайдаланушының тобықты қашан қозғағысы келетінін анықтауға және нақты уақыт режимінде көмек көрсетуге мүмкіндік береді [83].

Биомеханикалық дизайн сонымен қатар тепе-теңдік пен тұрақтылыққа қатысты мәселелерді шешеді [84-85]. Тобық экзоскелеттері құлаудың алдын алу үшін қолдау көрсете алады немесе неврологиялық бұзылулары бар адамдар сияқты тепе-теңдігі бұзылған пайдаланушыларға көмектесе алады. Жақсы жобаланған тобық экзоскелеттері қозғалыс тиімділігін арттыруға арналған. Тобыққа табиғи биомеханикалық қозғалыстар жасауға көмектесу арқылы

пайдаланушылар энергияны үнемдей алады және серуендеу немесе басқа әрекеттер кезінде қажет күш-жігерді азайтады. Биомеханикалық дизайн көбінесе экзоскелетті әртүрлі пайдаланушылардың қажеттіліктеріне, дене өлшемдеріне және ұтқырлықтың бұзылу деңгейіне бейімдеуге мүмкіндік беретін теңшеу опцияларын қамтиды. Бұл құрылғының әрбір жеке пайдаланушы үшін мүмкіндігінше тиімді болуын қамтамасыз етеді.

Тұтастай алғанда, биомеханикалық дизайн тобық буын экзоскелеттерінің табысы үшін өте маңызды, өйткені ол бұл құрылғыларға қажетті қолдау мен көмек көрсете отырып, пайдаланушының табиғи қозғалыстарымен оңай біріктіруге мүмкіндік береді. Инженерлер, биомеханика мамандары және зерттеушілер оңалту, қозғалысқа көмектесу және өнеркәсіптік пайдалануды қоса алғанда, әртүрлі қолданбалар үшін тобық экзоскелеттерінің функционалдығы мен жайлылығын оңтайландыру үшін осы дизайнерды жетілдіруді жалғастыруда.

Датчиктер және кері байланыс жүйелері акселерометрлер мен гироскоптар сияқты жетілдірілген датчиктер пайдаланушының жүрісін бақылау және нақты уақыттағы кері байланысты қамтамасыз ету үшін тобық экзоскелеттеріне біріктірілген [86]. Бұл кері байланыс көмек деңгейін реттеуге және пайдаланушының жүру тәсіліне бейімделуге көмектеседі. Датчиктер мен кері байланыс жүйелері тобық экзоскелеттерінің ажырамас компоненттері болып табылады және пайдаланушының жүрісін бақылауда, нақты уақыттағы кері байланысты қамтамасыз етуде және экзоскелеттің көмегін оңтайландыруда шешуші рөл атқарады [87].



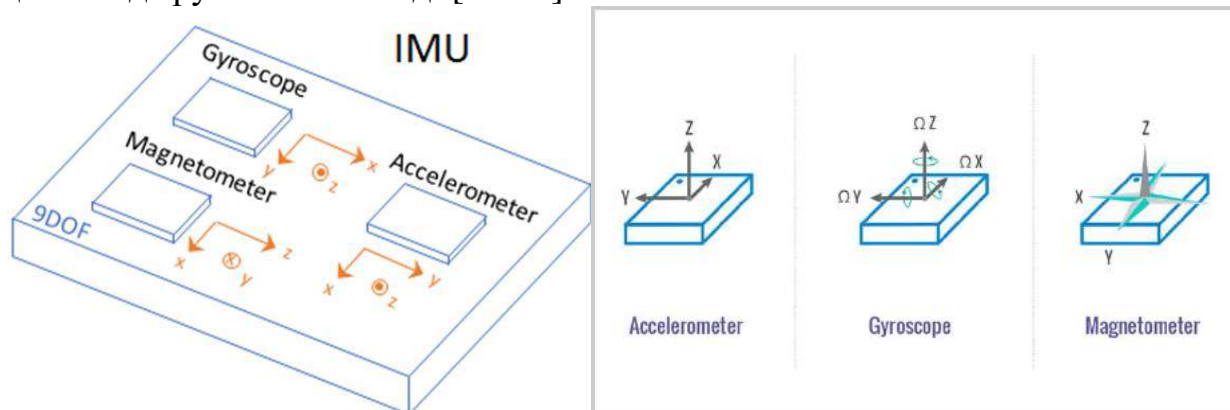
Сурет 1.16 Тобық буынның қозғалысын реттейтін IMU датчигі [25]

Сенсорлар мен кері байланыс жүйелерінің тобық экзоскелеттерінде қалай қолданылатыны туралы егжей-тегжейлі көзқарас мынадай [88-90]:

Акселерометрлер пайдаланушының қозғалысының үдеуін өлшейді, ал гироскоптар бұрыштық жылдамдық пен бағдарды өлшейді. Бұл сенсорлар пайдаланушының, әсіресе төменгі аяқтар мен тобықтардың қозғалысын бақылау үшін экзоскелетке жиі біріктіріледі. Олар пайдаланушының аяғы мен аяғының орналасуы, бағыты және қозғалысы туралы мәліметтер береді. Кейбір тобық экзоскелеттері әр қадам кезінде салмақ пен қысымның таралуын бақылау үшін табанға немесе табанға қысым датчиктерімен жабдықталған. Бұл деректер тепе-теңдікті, тұрақтылықты және жүру үлгісін бағалауға көмектеседі [91]. Бұрыш



датчиктері тобық пен төменгі аяқтың басқа буындарының бұрыштарын өлшеу үшін қолданылады. Олар экзоскелетке өз көмегін сәйкесінше реттеуге мүмкіндік беру арқылы пайдаланушының буындарының орналасуы мен қозғалысы туралы ақпарат береді. Күш датчиктерін экзоскелетке біріктіріп, пайдаланушының бұлшық еттеріне әсер ететін күштерді және қозғалыс кезінде пайда болатын қарсылықты өлшеуге болады. Бұл деректер көрсетілетін көмек деңгейін оңтайландыруға көмектеседі [92-95].



Сурет 1.16 Тобық буынның қозғалысын реттейтін IMU датчигі (XYZ) [25]

Басқару алгоритмдері бұл сенсорлардан алынған мәліметтер нақты уақыт режимінде басқару алгоритмдерімен өңделеді. Бұл алгоритмдер сенсорлық деректерді түсіндіреді және экзоскелеттің дұрыс көмек деңгейін қамтамасыз ету үшін қалай реттеуге болатындығы туралы шешім қабылдайды. Мысалы, егер сенсорлық деректер серуендеу кезінде пайдаланушының тұрақсыздығын көрсетсе, экзоскелет құлаудың алдын алу үшін қосымша қолдау көрсете алады. Кейбір тобық экзоскелеттері пайдаланушыларға олардың жүрісі, қалпы және тепе-теңдігі туралы нақты уақыт режимінде ақпарат беретін био кері байланыс жүйелерімен жабдықталған. Бұл кері байланыс пайдаланушыларға қозғалыстарын реттеуге және жүрісті жақсартуға көмектеседі [96].

Жетілдірілген сенсорлары мен кері байланыс жүйелері бар тобық буын экзоскелеттері өз көмегін пайдаланушының жүру ерекшеліктеріне және рельефіне қарай бейімдей алады. Мысалы, олар жоғары көтерілу, баспалдақпен түсу немесе тегіс емес беттерде қозғалу кезінде көбірек қолдау көрсете алады.

Жетектерде акселерометрлер мен гироскоптар сияқты сенсорлардан кіріс алатын күрделі басқару жүйелері басқарады. Бұл басқару жүйелері пайдаланушының қозғалысы мен ниетіне байланысты жетек қуатын үздіксіз реттеу үшін кері байланыс тізбектерін пайдаланады [97]. Тобық буын экзоскелеттері жетектер мен басқару жүйелерін басқару үшін қуат көзін қажет етеді. Батарея технологиясының жетістіктері кішірек, тиімдірек және ұзаққа созылатын қуат көздеріне әкелді. Литий-ионды батареялар бұл батареялар жоғары энергия тығыздығына, жеңіл салмағына және қайта зарядтау мүмкіндіктеріне байланысты тобық экзоскелеттерінде кеңінен қолданылады. Олар ұзақ пайдалану кезеңінде сенімді энергия көзін қамтамасыз етеді. Кейбір ірі және өндірістік экзоскелеттерде гидравликалық жетектер қолданылады, оларды гидравликалық сорғылар мен резервуарлар басқара алады [98].



Көптеген тобық экзоскелеттері уақыт өте келе осы сенсорларды тіркеуге арналған. Бұл деректерді медицина мамандары немесе зерттеушілер оңалту кезінде пайдаланушының үлгерімін бағалау үшін немесе оңтайлы өнімділікке қол жеткізу үшін экзоскелет параметрлерін дәл реттеу үшін талдай алады. Датчиктер сонымен қатар пайдаланушыға қауіп төндіретін тұрақты емес қозғалыстарды немесе жағдайларды анықтау арқылы тобық экзоскелеттерінің қауіпсіздігіне ықпал етеді. Мұндай жағдайларда экзоскелет қауіпсіздік механизмдерін белсендіруі немесе жазатайым оқиғалардың алдын алу үшін ескертулер беруі мүмкін.

Заманауи сенсорлар мен кері байланыс жүйелерін біріктіру арқылы тобық буын экзоскелеттері пайдаланушының қозғалысын үнемі қадағалап, оларға бейімделе алады, бұл жекелендірілген және қолдау тәжірибесін қамтамасыз етеді. Бұл технология ұтқырлықты, оңалтуды және пайдаланушының жалпы жайлылығы мен қауіпсіздігін жақсартуға ықпал етеді.

Тобық буын экзоскелетін жасаушылар батареяларды қайта зарядтау немесе ауыстыру арасындағы жұмыс уақытын ұзарту үшін энергия тиімділігіне басымдық береді. Бұған басқару алгоритмдерін оңтайландыру, энергия шығынын азайту және тиімді жетек технологияларын таңдау кіреді. Жетектер мен қуат көздерін қоса алғанда, компоненттерді миниатюризациялау тобық экзоскелеттерін киюдің жалпы портативтілігі мен ыңғайлылығына ықпал етеді. Кішірек және жеңіл компоненттер экзоскелеттерді ыңғайлы етеді.

Тобық буын экзоскелетіндегі жетектер пайдаланушының жүрісіндегі немесе қозғалысындағы өзгерістерге жылдам жауап беруге арналған. Бұл жеделдік экзоскелетке уақтылы және тиісті көмек көрсету үшін өте маңызды. Жетектер пайдаланушыға зиян келтіруі мүмкін кенеттен немесе шамадан тыс қозғалыстардың алдын алу үшін қауіпсіздік механизмдерімен жабдықталған. Бұл қауіпсіздік мүмкіндіктері жазатайым оқиғалардың немесе жарақаттардың алдын алу үшін қажет. Тиімді жетектер мен қуат көздері озық басқару жүйелерімен бірге жаяу жүру кезінде ұтқырлықты, оңалтуды және шаршауды азайтуда тобық экзоскелеттерінің жалпы тиімділігіне ықпал етеді. Бұл технологиялық жетістіктер тобық экзоскелеттерін қолданушылардың кең ауқымы үшін практикалық және пайдалы етті [99-100].

Тобық буын экзоскелеттері барған сайын әртүрлі пайдаланушыларға реттеліп, реттелуі және қозғалғыштығының әртүрлі деңгейлеріне бейімделуі үшін жобалануда. Оларды қажетті көмек көрсету үшін конфигурациялауға болады. Даралау және бейімделу-қазіргі заманғы тобық экзоскелет дизайнының маңызды сипаттамалары. Бұл сипаттамалар ұтқырлық пен қалаудың әртүрлі деңгейлерін ескере отырып, тобық экзоскелеттерін жеке пайдаланушылардың нақты қажеттіліктеріне бейімдеуге мүмкіндік береді. Міне, даралау мен бейімделу тобық экзоскелет технологиясында шешуші рөл атқарады.

Тобық буын экзоскелеттерін әр пайдаланушының бірегей биомеханикалық сипаттамаларына сәйкес реттеуге болады. Бұған аяқтың ұзындығын, тобық қозғалысының ауқымын және қажетті көмек деңгейін реттеу кіреді. Жеке параметрлерді бастапқы бағалау мен пайдаланушылардың пікірлері негізінде анықтауға болады. Физиотерапевттер немесе денсаулық сақтау мамандары

экзоскелетті калибрлеп, оңалтудың нақты мақсаттарына және пайдаланушының үлгеріміне байланысты қажетті қолдауды қамтамасыз ете алады. Қажет болса, көмек деңгейі жоғарылауы немесе төмендеуі мүмкін. Экзоскелеттің пайдаланушының аяғына ыңғайлы және сенімді орналасуын қамтамасыз етуді қамтиды. Белдіктерді, бекіткіштерді және төсемдерді ұзақ уақыт пайдалану кезінде терінің ыңғайсыздығын немесе тітіркенуін болдырмай, оңтайлы сәйкестікке қол жеткізу үшін реттеуге болады.

Оңалту үшін қолданылатын тобық буын экзоскелеттері әр пациенттің емдеу жоспарына бейімделуі мүмкін. Құрылғыны оңалту мақсаттарына сәйкес келетін нақты жаттығуларды немесе әрекеттерді орындау кезінде мақсатты көмек көрсетуге бағдарламалауға болады. Кейбір тобық экзоскелеттерін әртүрлі жүру үлгілері мен жүру жылдамдығына бейімделу үшін реттеуге болады. Бұл әсіресе қозғалғыштығының әртүрлі дәрежесі бар пайдаланушылар үшін өте маңызды, өйткені бұл оларға экзоскелетпен табиғи жүруге мүмкіндік береді. Көптеген тобық буын экзоскелеттерінде оңай ауыстыруға немесе жаңартуға болатын модульдік компоненттер бар. Бұл модульдік дизайн техникалық қызмет көрсетуді жеңілдетеді және болашақта мүлдем жаңа құрылғыны қажет етпестен өзгертулер мен жақсартулар жасауға мүмкіндік береді [100].

Тұтастай алғанда, даралау және бейімделу тобық экзоскелеттерінің ажырамас сипаттамалары болып табылады, бұл оларға әртүрлі қажеттіліктері мен ұтқырлық қалаулары бар пайдаланушыларға жекелендірілген, тиімді және ыңғайлы көмек көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл аспектілер тобық экзоскелеттерінің әмбебаптығы мен ыңғайлылығына оңалтудан бастап күнделікті қозғалысқа көмектесуге дейін әртүрлі мақсаттарда ықпал етеді [101].

Тобық экзоскелеттері клиникалық жағдайда оңалту мақсатында қолданылады. Олар пациенттерге инсульттан немесе тобық жарақаттарынан қалпына келтіруге көмектеседі, бұл олардың қозғалғыштығын қалпына келтіруге және бұлшықет күшін жақсартуға көмектеседі. Тобық экзоскелеттері клиникалық және оңалту мекемелерінде құнды қолдануды тапты, бұл төменгі аяқтың қозғалғыштығына әсер ететін әртүрлі жағдайлардан айыққан науқастарға айтарлықтай артықшылықтар береді. Инсульттан аман қалғандар көбінесе аяқ-қолдарының әлсіздігін немесе сал ауруын сезінеді, бұл олардың жүру және тепе-теңдікті сақтау қабілетіне әсер етеді. Тобық экзоскелеттері зардап шеккен тобыққа мақсатты қолдау көрсету арқылы жүрісті жаттықтыруға және оңалтуға көмектеседі. Олар инсультпен ауыратын науқастарға өзіне деген сенімділікті қалпына келтіруге және жүру қабілетін жақсартуға көмектеседі.

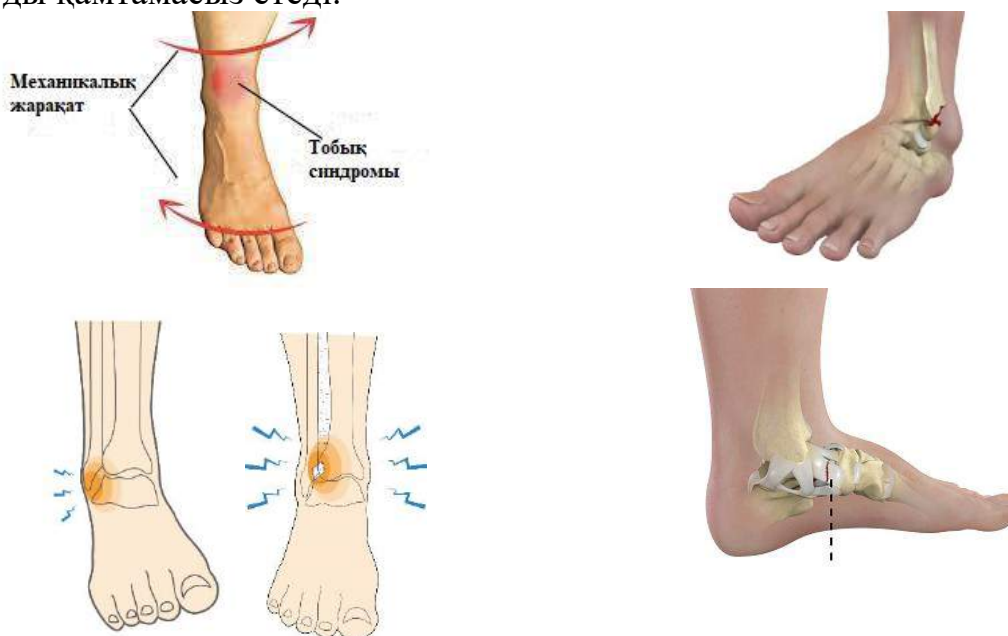
*Жұлын жарақаты (TSM).* Жұлын жарақаттары бар адамдарда төменгі аяқтың жұмысында бұзылулар болуы мүмкін. Тобық экзоскелеттері қозғалғыштығын қалпына келтіруге көмектеседі, жүруге және тепе-теңдікті сақтауға көмектеседі. Бұл құрылғылар жұлын жарақаты бар науқастарға жүруді және тәуелсіздікті қалпына келтіруді қайта үйрену үшін қажет қарқынды жүріс жаттығуларын ұсынады.

*Ортопедиялық жарақаттар:* тобық жарақаттары, сынықтар немесе операциялар зақымдалған аяқтың қозғалғыштығы мен бұлшықет әлсіздігінің шектелуіне әкелуі мүмкін. Тобық экзоскелеттері оңалту процесінде қолдау

көрсете алады, бұл пациенттерге тобықтағы күш пен қозғалыс ауқымын қалпына келтіруге көмектеседі.

*Неврологиялық бұзылулар.* Склероз немесе церебральды сал ауруы сияқты әртүрлі неврологиялық аурулар бұлшықет әлсіздігі мен қозғалғыштық проблемаларына әкелуі мүмкін. Тобық экзоскелеттері-бұл адамдарға тұрақтылықпен және жақсы жүріспен жүруге мүмкіндік беретін осы жағдайларда көмектесетін бақыланатын және реттелетін құралдар.

*Тірек-қимыл аппаратының аурулары.* Остеоартрит немесе ревматоидты артрит сияқты тірек-қимыл аппараты бұзылған науқастарда ауырсыну және жүру қиын болуы мүмкін. Тобық экзоскелеттері зақымдалған буындардағы стрессті азайтады, ыңғайсыздықты жеңілдетеді және белсенді өмір сүруге көмектесетін қолдауды қамтамасыз етеді.



Сурет 1.17 Тобық буынның жарақаттары [25-28]

Заманауи сенсорлармен жабдықталған тобық экзоскелеттері медицина қызметкерлеріне жүрісті талдауға көмектеседі. Олар пациенттің жүру үлгісі мен буын қозғалысы туралы сандық деректерді береді, бұл прогресті бағалау және оңалту жоспарларын түзету үшін маңызды. Кейбір тобық экзоскелеттері үйдегі оңалту бағдарламаларында қолдануға арналған. Пациенттер бұл құрылғыларды қашықтағы медицина қызметкерлерінің басшылығымен алып жүре алады, бұл оңалту сеанстарын жиі және ыңғайлы өткізуге мүмкіндік береді. Оңалту жаттығулары кезінде белгілі бір бұлшықет топтарына әсер ету үшін тобық экзоскелеттерін қолдануға болады. Олар бұлшықеттерді күшейту күштерін күшейту үшін қажет болған жағдайда қарсылық немесе қолдау көрсетеді.

Тобық экзоскелеттері көбінесе пациенттердің моральдық және мотивациясын арттырады, тіпті егер олар бастапқыда қозғалғыштығында қиындықтар туындаса да, тұруға және жүруге мүмкіндік береді. Бұл психологиялық импульс оңалту процесіне оң әсер етуі мүмкін. Тобық экзоскелеттері әртүрлі аурулардан айыққан адамдардың өмір сүру сапасы мен функционалдық тәуелсіздігін жақсартуға уәде берді. Олар ерте жұмылдыруды жеңілдетеді, қозғалмайтын асқынулардың қаупін азайтады және пациенттерге

ұтқырлық пен күнделікті әрекеттерге деген сенімділікті қалпына келтіруге көмектеседі. Технология дамып келе жатқандықтан, тобық экзоскелеттері Клиникалық оңалту бағдарламаларында барған сайын маңызды рөл атқарады деп күтілуде.

Жеңіл материалдарды, эргономикалық дизайнды және тыныс алатын маталарды пайдалану арқылы тобық экзоскелеттерін киюдің жайлылығы мен ыңғайлылығы жақсарды [102].

Эргономика және киюге ыңғайлылық - бұл пайдаланушылардың бұл құрылғыларды ыңғайлы және тиімді киюін қамтамасыз тобық экзоскелеттерін жобалаудың шешуші факторлары. Материалдар, дизайн және пайдаланушы интерфейсіндегі жетістіктер жалпы пайдаланушы тәжірибесін айтарлықтай жақсартты.

*Жеңіл материалдар:* тобық экзоскелеттері көміртекті талшық, алюминий қорытпалары және жоғары беріктігі бар пластмассалар сияқты жеңіл материалдардан жасалған. Бұл материалдар пайдаланушының аяғындағы жүктемені азайту арқылы құрылғының жалпы салмағын азайтады.

*Эргономикалық дизайн:* тобық экзоскелеттері пайдаланушының аяқтары мен аяқтарының контурларын қайталайды. Эргономикалық пішін қысым нүктелерін немесе ыңғайсыздықты тудырмай, экзоскелеттің ыңғайлы орналасуын қамтамасыз етеді.

*Реттелетін белдіктер мен бекіткіштер:* белдіктер, ілгектер және бекіткіштер оңай реттеуге арналған. Пайдаланушылар әртүрлі өлшемдер мен пішіндердегі сенімді және ыңғайлы аяқ киімге кепілдік бере отырып, өз қалауы бойынша сәйкестікті реттей алады. Тобық экзоскелеттеріне құрылғы пайдаланушының терісіне тиетін жерлерде төсеу және жастықтау кіреді. Бұл үйкеліс пен қысым нүктелерін азайтады, кию кезінде жайлылықты арттырады.

Тобық экзоскелеттері төмен профильге ие, бұл киюді және шешуді жеңілдетеді. Жіңішке дизайн сонымен қатар тобықтың табиғи қозғалысын жеңілдетеді және киіммен өзара әрекеттесуді азайтады. Кейбір тобық экзоскелеттерінде тазалау немесе ауыстыру үшін алып тастауға болатын модульдік компоненттер бар. Бұл техникалық қызмет көрсетуді жеңілдетеді және құрылғының ұзақ уақыт бойы гигиеналық және ыңғайлы болуын қамтамасыз етеді. Ұзақ мерзімді пайдалану тобық экзоскелеттері ұзақ уақыт киюге арналған, сондықтан ыңғайлылық пен киюге ыңғайлылық өте маңызды. Бұл пайдаланушыларға құрылғыны күнделікті әрекеттер немесе оңалту сеанстары кезінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Эргономика мен киюге ыңғайлылыққа назар аудара отырып, тобық экзоскелеттері оңалтудан өтсе де, қозғалуға көмектесу үшін экзоскелетті пайдаланса да немесе күнделікті әрекеттермен айналысса да, пайдаланушыларға ыңғайлылық пен жайлылықты қамтамасыз етуге арналған. Бұл конструктивті ойлар пайдаланушының қанағаттануына және қажет болған жағдайда құрылғыны кию режимін сақтауға ықпал етеді.

Кейбір тобық экзоскелеттері зерттеу прототиптерінен коммерциялық өнімдерге айналды. Оларға қозғалу мүмкіндігі шектеулі адамдарға көмектесуге арналған құрылғылар, сондай-ақ физикалық ауыр жұмыстарды орындайтын

жұмысшыларға жүктемені азайтуға арналған өнеркәсіптік экзоскелеттер кіреді. Шынында да, тобық экзоскелеттері зерттеу прототиптерінен коммерциялық өнімдерге айналды, бұл құрылғыларды әзірлейтін және сататын компаниялардың саны артып келеді. Бұл коммерциялық тобық экзоскелеттері екі негізгі мақсатқа қызмет етеді: қозғалғыштығы шектеулі адамдарға көмектесу және физикалық ауыр жұмыстарды орындайтын жұмысшыларға қолдау көрсету.

Коммерциялық тобық экзоскелеттері көбінесе ыңғайлылықты, беріктікті және қауіпсіздікті ескере отырып жасалады. Олар салалық стандарттар мен нормативтік талаптарға сәйкестігі бойынша қатаң сынақтардан өтеді. Коммерциялық өнімдердің қол жетімділігі бұл технологияны пайдаланушылар мен салалардың кең ауқымы үшін қол жетімді етті. Бұл аймақ дамып келе жатқандықтан, біз тобық экзоскелет технологиясында одан әрі ілгерілеуді күте аламыз, соның ішінде киюге ыңғайлылықты, бейімделуді және қолжетімділікті жақсарту. Сонымен қатар, үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелер нақты медициналық жағдайлар мен өнеркәсіптік қолдану үшін одан да мамандандырылған экзоскелеттерге әкелуі мүмкін. Үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелер технологияны жетілдіруді, шығындарды азайтуды және қолжетімділікті арттыруды жалғастыруда. Бұл күш-жігерге инженерлер, Денсаулық сақтау мамандары және физиотерапевтер арасындағы ынтымақтастық кіреді. Аяқтың экзоскелеттік технологиясындағы үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелер бұл құрылғыларды қозғалыс мүмкіндігі шектеулі адамдар мен физикалық тұрғыдан талап етілетін салалардың жұмысшылары үшін тиімдірек, қолжетімді және қолжетімді ету арқылы одан әрі дамуға уәде береді. Технология дамып келе жатқанда, ол көптеген адамдардың өмір сүру сапасын айтарлықтай жақсартып алады.

Тобық экзоскелеттері айтарлықтай прогреске қол жеткізгенімен, шығындар, беріктік және пайдаланушылардың кең ауқымы үшін құрылғылардың қолжетімділігін қамтамасыз ету сияқты шешуді қажет ететін мәселелер әлі де бар. Дегенмен, тобық экзоскелеттерінің дамуы қозғалыс мүмкіндігі шектеулі адамдардың өмірін жақсарту және әртүрлі салаларда физикалық қиын тапсырмаларды орындауға көмектесу үшін үлкен перспективаларға ие.

Қазіргі уақытта клиникалық жағдайларда қолданылатын роботтық құрылғылардың көпшілігі белсенді немесе интерактивті, бірақ сонымен бірге пассивті түрде жұмыс істей алады. Сонымен қатар, құрылғының пайдаланушымен өзара әрекеттесуіне байланысты құрылғыларды соңғы әрекет ететін құрылғылар немесе экзоскелет құрылғылары ретінде жіктеуге болады [103].

Робототехникаға негізделген оңалту және телереабилитация тиімді екендігі кеңінен дәлелденгенімен, көп жағдайда олар әлі күнделікті емдеудің бөлігі емес. Бұл, ең алдымен, зерттеулердің көпшілігінде жаппай өндірілмейтін арнайы роботтық құрылғылардың қатысуымен және коммерциялық қол жетімді оңалту роботтары кең таралғанымен, олардың құны жоғары болып қалуымен байланысты. Пациенттердің көп бөлігін амбулаторлық оңалтумен қамтамасыз

ету қажеттілігімен бірге қазір терапевттің тікелей бақылауын жеңілдететін арзан құрылғыларды әзірлеу және енгізу бойынша айтарлықтай күш-жігер жұмсалуда.

Экзоскелеттік оңалту мүмкіндігі шектеулі адамдар үшін қозғалыс қабілетін қалпына келтіруге ұмтылатын жоғары тиімді және перспективалы тәсілге айналды.

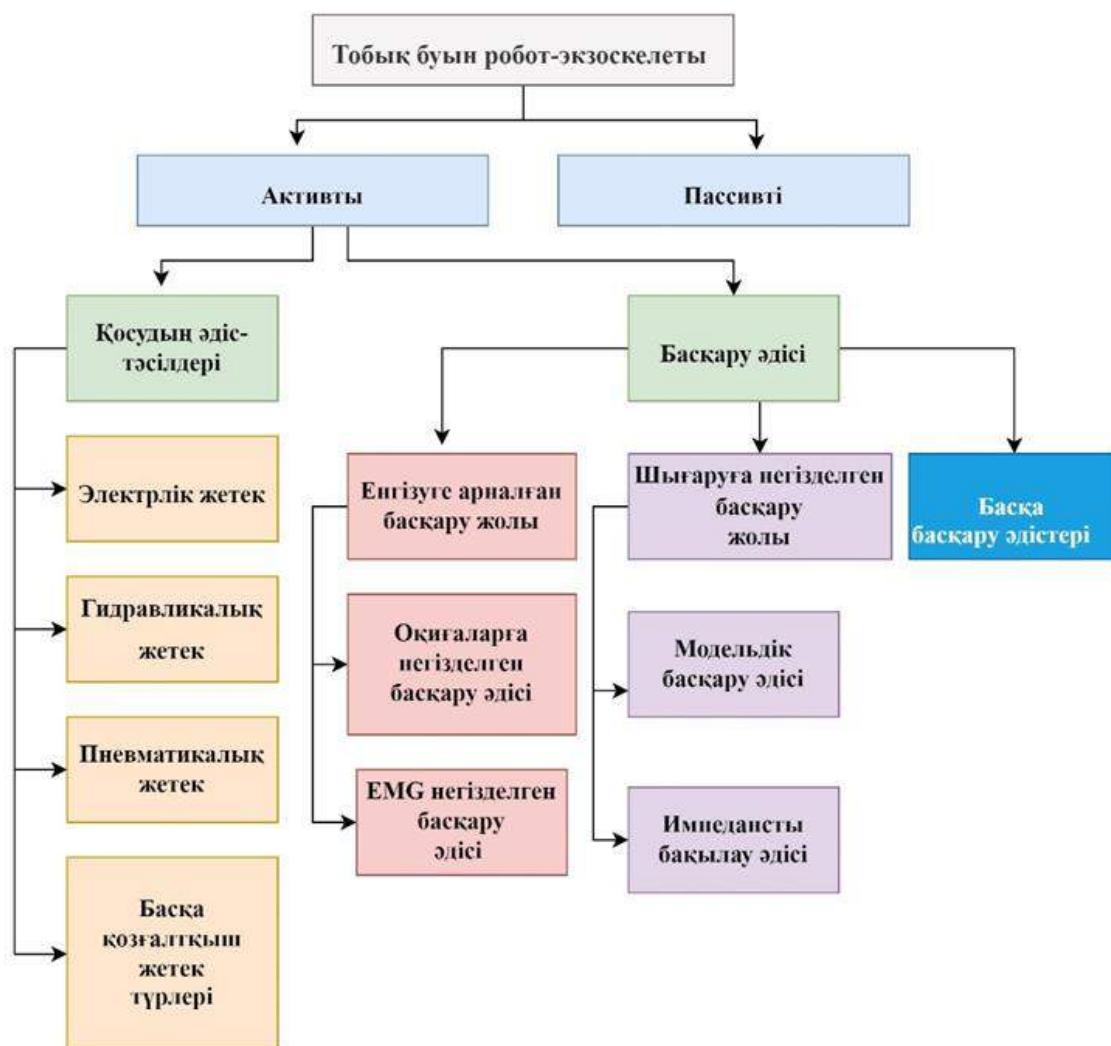
Экзоскелет құрылғыларын және экзоскелет конструкцияларын әзірлеу саласындағы қазіргі жағдайларға байланысты экзоскелеттердің келесідей жіктелуі ұсынылады (1.18 сурет): жіктеудің негізгі критерийлері ретінде мыналар қабылданған [104];

1. Конструкциялық сипаттамалар;
2. Қозғалтқыш түрі;
3. Еркіндік дәреже саны;
4. Басқау жүйесінің түрі.

Экзоскелеттерді қолданылу мақсаты бойынша жіктеу олардың құрылымының ең маңызды белгісі болып табылады. Әскери немесе құтқару, медициналық, өндірістік, спорттық немесе ойын-сауық мақсаттарында қолданылуына қарай экзоскелеттердің дизайны және оның негізгі техникалық сипаттамалары мен мүмкіндіктері айтарлықтай өзгеше болады.

Қозғалтқыш түріне байланысты экзоскелет конструкциялары басқа мехатрондық жүйелер сияқты жітерге бөлінеді: олар электрлік, гидравликалық, пневматикалық немесе аралас. Сондай-ақ, ішкі жану қозғалтқышын қолдануға болады, бірақ ол әлі конструктивті ерекшеліктерін таппаған.

Айтылған қозғалтқыш түрлерінің әрқайсысының артықшылықтары мен кемшіліктерін қажетті жүк көтергіштік, массалық, эргономикалық және автономдық талаптарды, т.б. ескере отырып қарастыру керек.



Сурет 1.18. Тобық буын экзоскелеттерінің жіктелуі

Қозғалтқыш түрі сонымен қатар экзоскелет құрылысында қолданылатын кинематикалық жұптардың типтеріне белгілі бір талаптар мен артықшылықтар қояды: мысалы айналмалы немесе ілгерлемелі қозғалыстарды орындау. Әдетте, бұлар қарапайым немесе параллель құрылымның ашық кинематикалық тізбектерін құра отырып, қатты немесе деформацияланатын байланыстармен қолданылатын бір қозғалысты ( $V$  класты) кинематикалық жұптар болып табылады.

Қолданыстағы немесе перспективті экзоскелеттердің көрсетілген дизайн ерекшеліктеріне жоғары икемді байламдарды (кабельдерді), басқарылатын сипаттамалары бар кинематикалық жұптарды, механикалық энергия жинақтағыштарын пайдалануды және т.б. жатқызуға болады.

Еркіндік дәрежелерінің санына қарай экзоскелет конструкциялары қажетті қозғалысты жүзеге асыруда қанша еркіндік дәрежесін қолдану қажет екеніне байланысты айтарлықтай әртүрлі болуы мүмкін. Мәселен, медициналық мақсаттарға арналған және жоғарғы немесе төменгі аяқтың бір, екі немесе үш буындарының механотерапиясын қамтамасыз ететін стационарлық экзоскелет үшін екі-алты еркіндік дәреже қажет болуы мүмкін. Жылжымалы антропоморфты экзоскелеттердің автономды дизайндары 13-тен жоғары

еркіндік дәрежеге ие, яғни олар бір-бірінен тәуелсіз бірнеше қозғалғыштармен жұмыс жасайды. Еркіндік дәрежелерінің өзгермелі (басқарылатын) саны бар экзоскелет құрылымын пайдалану перспективасын ерекше атап өткен жөн. Бұл құрылымның тиімділігін арттыруға, қозғалыстың үлкен тұрақтылығын қамтамасыз етуге және қажет болған жағдайда энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді.

Экзоскелет құрылымын басқару түріне сәйкес келесі оларды келесідей санаттарға жіктеуге болады:

1. оператордың көмегімен басқарылатын;
2. қатаң алгоритмнен тұратын бағдарламамен басқарылатын;
3. адаптивті интеллектуалды басқарылатын;
4. түрі бойынша басқарылатын.

Бионикалық принциптерге, соның ішінде экзоскелеттерге негізделген роботтық құрылғыларды, жүйелер мен медициналық мақсаттағы кешендерді әзірлеу және құру бағытының даму тенденциялары әлемдегі әзірлеушілер осындай аппараттардың массасын азайту, функционалдық жүйелердің үздіксіз жұмыс уақыты мен энергия тиімділігін арттыру, күш сипаттамаларын арттыру, материалтану саласындағы соңғы жетістіктерді (соның ішінде нанотехнология, автоматтандырылған жүйелер мен басқару жүйелері, сондай-ақ микроэлектроника) қолдану бағытында жұмыс жасау керектігін көрсетеді.

Экзоскелет науқастарды реабилитациялау мақсатында пайдаланылатын медициналық экзоскелет кешеннің құрылымына қойылатын негізгі талаптар осы аппараттардың атқаратын міндеттері мен жұмыс істеу ерекшеліктерімен анықталады.

Негізгі міндеттерге мыналар жатады:

1. Көлденең бетпен жүру, кедергілерге тап болу, бұрылу сияқты әртүрлі режимдерде экзоскелет буындарының қозғалысының қажетті заңдылығын қалыптастыру;
2. Экзоскелет буындарының, содан соң науқастың қозғалысының берілген заңдылығын жүзеге асыру;
3. Еркіндік дәрежелерінің қажетті санын қамтамасыз ету қозғалысқа қарсы тұрудың қажетті сәтін іске асыру жүйенің қажетті жылдамдығын қамтамасыз ету;
4. Экзоскелеттің механизмдері мен қозғалтқыштарын адам денесіне орналастыру;

Роботтандырылған құрылғыларды, медициналық мақсаттағы жүйелер мен кешендерді құру бионикалық принциптерге негізделуі және осындай аппараттардың массасын азайтуға, функционалдық жүйелердің үздіксіз жұмыс уақыты мен энергия тиімділігін арттыруға, күш сипаттамаларын арттыруға, материалтану саласындағы соңғы жетістіктерді, соның ішінде нанотехнологияларды, автоматтандырылған басқару жүйелерін, сондай-ақ микроэлектрониканы қолдануға бағытталуы тиіс.

Экзоскелеттердің заманауи конструкцияларын талдау, олардың артықшылықтары мен кемшіліктерін, талаптары мен тенденцияларын анықтау нәтижесінде экзоскелеттердің заманауи робототехникалық конструкцияларын



құру саласындағы жаңа техникалық шешімдерді іске асыру бойынша ұсыныстар тұжырымдалып, ұсынылды:

1. Массасы мен өлшемдерін азайту, құрылымның беріктігі мен қаттылығын арттыру, заманауи материалдар мен технологияларды қолдану арқылы эргономика мен дизайнды жақсарту.
2. Автономия мен маневрлікті қамтамасыз ету; гравитациялық өтемақы, резонанстық қасиеттер, энергияны қалпына келтіру, ауыспалы (басқарылатын) еркіндік дәрежелері арқылы энергияны тұтынуды азайту және пайдалы қуатты арттыру.
3. Қашықтан басқару пультіңсіз құрылғыны басқару жүйесін жетілдіру, адамның қозғалысын дәл қайталау, экзоскелеттің әртүрлі сценарийлерді орындауын қамтамасыз ететін бағдарламалық жасақтама кешенін әзірлеу.

Соңғы ғылыми-зерттеу кезінде тобық экзоскелеттерін дамытуда жаңа тенденциялар мен болашақ бағыттар пайда болды. Соңғы жылдары пайда болуы немесе байқалуы мүмкін кейбір ықтимал тенденциялар мен бағыттарды жіктеп жаздық:

### **1.3 Тобық буын экзоскелеттерінде қолданылатын жасанды бұлшықеттерге шолу және талдау**

Жасанды бұлшықеттер тобық буын экзоскелеттерінің негізгі құрамдас бөліктері болып табылады, олардың қозғалғыштығын арттыруда, оңалтуға көмектесуде және өнімділікті арттыруда олардың тиімділігіне терең әсер етеді [105]. Бұл ғылыми шолу мен талдау тобық экзоскелеттерінде жасанды бұлшықеттерді қолдануды мұқият қарастырады, олардың артықшылықтары, кемшіліктері және перспективалық бағыттары қарастырылады. Жасанды бұлшықеттер, мысалы, пневматикалық немесе жұмсақ жетектер, керемет жеңіл қасиеттерге ие, бұл оларды экзоскелеттің жақтауларына біріктіруді жеңілдетеді. Бұл атрибут киілетін құрылғылар үшін өте маңызды.

Кейбір жасанды бұлшықеттер табиғи бұлшықет - сіңір жүйелерінің биомеханикасын қайталайды [106], жүру кезінде сенімдірек жүруді қамтамасыз етеді. Бұл пайдаланушының жайлылығын арттыруға және жүру кезінде ауытқуларды азайтуға көмектеседі. Жасанды бұлшықеттер пайдаланушылардың қажеттіліктеріне шебер бейімделе отырып, әртүрлі дәрежеде көмек көрсете алады. Бұл бейімделу баға жетпес болып шығады, әсіресе пациенттер қалпына келтірудің әртүрлі кезеңдерінен өткен кезде оңалту жағдайында. Айта кету керек, кейбір жасанды бұлшықеттер, мысалы, диэлектрлік эластомер жетектері (DEA) ерекше энергия тиімділігіне ие. Бұл функция портативті экзоскелеттердің ұзақ жұмыс істеуін қамтамасыз ету және батареяның қызмет ету мерзімін оңтайландыру үшін өте маңызды [107-110].

Шуды азайту механикалық буындарға толы кәдімгі қатты экзоскелеттерден айырмашылығы, жасанды бұлшықеттер шудың төмендеуімен жұмыс істейді. Бұл шуды азайту ыңғайлылықты айтарлықтай арттырады.

Жасанды бұлшықеттердің қуат күші көбінесе дәстүрлі қатты жетектерден төмен. Бұл шектеу экзоскелеттерге айтарлықтай қолдау немесе үлкейтуді қажет

ететін зиянды болуы мүмкін. Жасанды бұлшықеттердің беріктігі, әсіресе механикалық жүктемелер мен тозудың жоғарылауымен сипатталатын сценарийлерде мұқият зерттеуді қажет етеді. Прогрессивті деградация немесе уақыт өте келе техникалық қызмет көрсету қажеттілігі ықтимал проблемаларды тудырады. Жасанды бұлшықеттермен жұмыс істеу қажетті кинематикаға жету үшін мұқият үйлестіруді қажет ететін күрделі басқару механизмдерін қажет етеді. Сенсорлық Интеграция (СИ) және жетілдірілген басқару алгоритмдері осы аспектінің ажырамас компоненттеріне айналады [111]. Жасанды бұлшықеттерді жобалау және өндіру айтарлықтай шығындарды талап етеді, бұл кеңірек пайдалану үшін тобық экзоскелеттерінің қолжетімділігі мен ауқымдылығын қиындатуы мүмкін.

Қауіпсіздік талаптары экзоскелеттерде қолданылған кезде жасанды бұлшықеттердің қауіпсіздігіне кепілдік беру өте маңызды. Ақаулар немесе ақаулар пайдаланушының жарақатына әкелуі мүмкін, бұл сенімді қауіпсіздік механизмдері мен резервтік хаттамаларды қажет етеді [112].

Материалдардың жетістіктері ол авангардтық материалдарды, соның ішінде жоғары эластомерлерді, пішінді жад қорытпаларын және жоғары тиімді полимерлерді үздіксіз зерттеу күштің, беріктіктің және тиімділіктің жоғарылауымен сипатталатын жасанды бұлшықеттерді тудыруы мүмкін [113].

Интеллектуалды басқару жүйелері машиналық оқыту және жасанды интеллект парадигмаларына негізделген күрделі басқару жүйелерін әзірлеу пайдаланушылардың қажеттіліктеріне жауап беру жылдамдығын арттыра отырып, жасанды бұлшықеттердің үйлестірілуі мен бейімделуін жақсартуға уәде береді [114].

Адам-машина интеграциясы жасанды бұлшықеттердің туа біткен тірек-қимыл аппараты мен пайдаланушылардың жүйке жүйелерімен үздіксіз интеграциясы экзоскелет контекстінде интуитивті және органикалық операциялық синергияны тудыруы мүмкін.

Қауіпсіздікті арттыру резервтік жүйелер мен ақауларға төзімді механизмдерді қоса алғанда, қатаң қауіпсіздік шараларын енгізу тобық экзоскелеттерінде жасанды бұлшықеттерді пайдалану кезінде пайдаланушының қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін қажет.

Шығындарды азайту жасанды бұлшықеттерге байланысты өндіріс шығындарын азайту және оларды экзоскелетке біріктіру үшін көп күш салу қол жетімділікті кеңейту үшін өте маңызды болады [115].

### **1.3.1 Электрлік сызықтық жетектер**

Электрлік сызықтық жетектер — бұл электр энергиясын сызықтық механикалық қозғалысқа айналдыру үшін қолданылатын құрылғылар, бұл оларды дәл және бақыланатын сызықтық қозғалысты қажет ететін қосымшаларға жарамды етеді [116]. Бұл дискілер бірнеше негізгі сипаттамаларға ие және әртүрлі қосымшаларды табады:

*Негізгі ерекшеліктері:*

Электрлік сызықтық жетектері электр қуатымен жұмыс істейді, көбінесе қозғалтқыштарды негізгі энергия көзі ретінде пайдаланады. Бұл сипаттама электрлік басқару жүйелеріне интеграцияны жеңілдетеді [117].

Сызықтық қозғалыс бұл жетектер түзу сызықты қозғалысты қамтамасыз ете отырып, сызықтық қозғалысты қамтамасыз етеді. Бұл оларды көтеру, итеру, тарту және дәл орналастыру сияқты тапсырмалар үшін өте қолайлы етеді.

Дәл басқару электрлік сызықтық жетектер позицияны, жылдамдықты және күшті дәл басқаруды қамтамасыз етеді. Бұл басқару деңгейі қозғалыс дәлдігін қажет ететін қолданбалар үшін өте маңызды [118].

Жоғары тиімділік олар электр энергиясын механикалық қозғалысқа тиімді түрлендіреді, бұл басқа жетек механизмдерімен салыстырғанда энергияны үнемдеуге әкелуі мүмкін. Электрлік сызықтық жетектер тыныш жұмыс істейді, бұл оларды қолдануға жарамды етеді, мұнда шу деңгейін азайту керек. Олар әртүрлі өлшемдер мен конфигурацияларда келеді, соның ішінде шектеулі кеңістікке орналастыруға болатынақтам құрылымдар. Электрлік сызықтық жетектерді қолдану талаптарына байланысты көлденең, тік немесе көлбеу сияқты әртүрлі позицияларда орнатуға болады. Көптеген электрлік сызықтық жетектерде басқарудың дәлдігін арттыра отырып, нақты уақыттағы позиция туралы ақпарат беру үшін кодерлер сияқты кіріктірілген кері байланыс жүйелері бар [118-119].

Электрлік сызықтық жетектер әдетте өнеркәсіптік автоматика мен робототехникада нысандарды ұстау және орналастыру, құбырларды басқару және роботтық қол қозғалысын жеңілдету сияқты тапсырмалар үшін қолданылады. Медициналық құрылғыларда олар әртүрлі медициналық құрылғыларда, соның ішінде аурухана төсектерінде, пациенттерге арналған көтергіштерде, стоматологиялық креслоларда және хирургиялық жабдықтарда қолданылады, бұл қозғалыс пен позицияны дәл бақылауға мүмкіндік береді. Электрлік сызықтық жетектер электрлік үстелдер мен орындықтар сияқты реттелетін жиһаздарда, сондай-ақ перделерді ашу және жабу сияқты тапсырмалар үшін үйді автоматтандыру жүйелерінде қолданылады. Ауыл шаруашылығында олар ауылшаруашылық жабдықтарында соқалардың, тырмалардың және отырғызғыштардың биіктігін реттеу үшін қолданылады, бұл ауылшаруашылық операцияларына көмектеседі. Электрлік сызықтық жетектер тиеу-түсіру жүйелерінде тауарларды конвейер таспаларына, өндірістік желілерге және қойма сөрелеріне жылжыту және орналастыру үшін қолданылады. Олар автомобиль өнеркәсібінде шешуші рөл атқарады, соның ішінде автомобиль орындықтарын реттеу, терезелерді басқару және автомобильдердің шығатын жүйелерін басқару. Электрлік сызықтық жетектер ұшақтар мен ғарыш аппараттарының ажырамас бөлігі болып табылады, олар қақпақтарды, шассиді, жүк есіктерін және басқа да маңызды компоненттерді басқарады. Күн энергиясын бақылау жүйелерінде олар күн энергиясын бақылау жүйелерінде Күннің қозғалысын бақылау және күн панельдерінің тиімділігін оңтайландыру үшін қолданылады. Өнеркәсіптік жабдықтарда престер, кесу машиналары және орау жабдықтары сияқты әртүрлі өнеркәсіптік машиналар құралдың қозғалысы

мен орналасуын басқару үшін электрлік сызықтық жетектерді пайдаланады [120].



Сурет 1.19. Электрлік сызықтық жетектер [118]

Электрлік сызықтық жетектер бірнеше түрде қол жетімді, соның ішінде бұрандалы, белдік және штангалық жетектер, олардың әрқайсысы жүк көтергіштігі, жылдамдық және дәлдік талаптары сияқты факторларға байланысты нақты қосымшаларға сәйкес келеді. Электрлік сызықтық жетекті таңдау қолданудың ерекше қажеттіліктеріне байланысты [121].

Электрлік сызықтық жетектерде (ЭСЖ) қолданатын тобық экзоскелеттері экзоскелеттік технологиялар саласындағы жетектердің басқа түрлері сияқты кең таралмаған. Сызықтық қозғалысты дәл басқару қабілеті бар электрлік сызықтық жетектер тобық қозғалысы кезінде дәл көмекті қажет ететін қолданбалар үшін жақсы жұмыс істейді. Міне, ЭСЖ технологиясын қолдануға болатын тобық экзоскелеттерінің мысалдары:

- Ekso Bionics EksoGT: бұл экзоскелеті, ең алдымен, төменгі аяқтың сал ауруына шалдыққан адамдарға көмектесуге арналған. Ол негізінен жамбас пен тізе буындарына арналған пневматикалық жетектерді қолданғанымен, бұл экзоскелеттің нұсқалары электрлік сызықтық жетектерді немесе тобықты қолдауға арналған басқа технологияларды қамтуы мүмкін. Техникалық сипаттамалар нақты модель мен нұсқаға байланысты өзгеруі мүмкін [120].
- Висс институтының жұмсақ экзос костюмдері (Гарвард университеті): Висс институтының зерттеушілері қуат үшін кабельдер мен электр қозғалтқыштарын пайдаланатын жұмсақ экзос костюмдер жасады. Бұл экзоскосттар тобыққа көмектесуге, оңалтуға және жүрудің тиімділігін арттыруға арналған.
- Карнеги Меллон Университетінің тобық экзоскелеті (Carnegie Mellon University Ankle Exoskeleton): Карнеги Меллон Университетінің кейбір зерттеу бастамалары жүруге және оңалтуға көмектесу үшін жасалған тобық экзоскелеттерін зерттеді. Бұл экзоскелеттер тобық қозғалысын жеңілдету үшін электрлік сызықтық жетектерді қамтуы мүмкін.
- Мичиган университетіндегі роботты тобық ортозы: Мичиган университетінің зерттеушілері электрлік сызықтық жетектері бар тобық

ортоздарында (АFO) жұмыс істейді. Бұл құрылғылар адамдарға аяқтың құлауы сияқты жағдайларда көмектесуге арналған [121].

Электрлік сызықтық жетектердің (ЭСЖ) тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы артықшылықтары:

- Дәл бақылау электрлік сызықтық жетектер тобық буын қозғалысын, оның ішінде позицияны, жылдамдықты және күшті дәл бақылауды қамтамасыз етеді. Бұл дәлдік буындардың нақты қозғалысын қажет ететін жүруге көмектесу және оңалту сияқты қолданбалар үшін өте маңызды.
- Реттелетін мүмкіндігі бұл жетектерді пайдаланушылардың нақты қажеттіліктеріне сәйкес бейімдеуге болады. Жетектің жылдамдығы мен күші сияқты басқару параметрлерін реттеу арқылы оларды әртүрлі қозғалғыштық бұзылыстары мен жүру үлгілерін ескере отырып дәл реттеуге болады.
- Жақсартылған ұтқырлық электрлік сызықтық жетектері бар тобық буын экзоскелеттері тобыққа байланысты мүмкіндігі шектеулі адамдардың ұтқырлығын арттыра алады. Олар электр жетегіне көмек көрсетеді, бұл пайдаланушыларға жүруді және күнделікті әрекеттерді орындауды жеңілдетеді.
- Энергия тиімділігі ол электрлік сызықтық жетектері энергияны үнемдеуге бейім, өйткені олар тек жұмыс кезінде энергияны пайдаланады. Бұл тиімділік экзоскелет батареясының қызмет ету мерзімін ұзартады және батареяны қайта зарядтау немесе ауыстыру жиілігін азайтады.
- Тыныш жұмыс электрлік сызықтық жетектері үнсіз жұмыс істейді, бұл пайдалану кезінде құпиялылық пен минималды шуды қажет ететін пайдаланушылар үшін артықшылық.

Электрлік сызықтық жетектердің (ЭСЖ) тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы кемшіліктері:

- Қиындығы электрлік сызықтық жетектерді тобық экзоскелеттеріне енгізу жүйені қиындатуы мүмкін. Бұл күрделілік қосымша сенсорларды, басқару алгоритмдерін және электронды компоненттерді қамтуы мүмкін, бұл техникалық мәселелердің қаупін арттырады.
- Салмағы мен көлемі электрлік сызықтық жетектер олармен байланысты компоненттермен бірге экзоскелеттің салмағы мен көлемін арттыра алады. Бұл қосымша салмақ пайдаланушылар үшін ауыр болуы мүмкін және құрылғыны пайдаланудың жалпы ыңғайлылығына әсер етуі мүмкін.
- Құны электрлік сызықтық жетектердің (ЭСЖ) тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы, әсіресе жоғары сапалы, медициналық немесе оңалту үшін жарамды, қымбат болуы мүмкін. Бұл шығын кейбір пайдаланушылар үшін тобық экзоскелеттерінің болуын шектеуі мүмкін.
- Қуат көзіне тәуелділігі электрлік сызықтық жетектердің (ЭСЖ) тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы қуат көзінен, әдетте батареялардан жұмыс істейді. Пайдаланушылар құрылғының үздіксіз пайдалану үшін жеткілікті зарядталғанына көз жеткізуі керек, бұл кейбір адамдар үшін ыңғайсыз болуы мүмкін.

- Техникалық қызмет көрсету электрлік сызықтық жетектер, кез-келген механикалық немесе электронды компонент сияқты, оңтайлы өнімділікті қамтамасыз ету үшін мерзімді техникалық қызмет көрсетуді және жөндеуді қажет етуі мүмкін. Техникалық қызмет көрсету қажеттілігі меншіктің жалпы құнын арттыруы мүмкін.
- Техникалық мәселелер электрлік сызықтық жетектерді тобық экзоскелеттеріне біріктіру техникалық проблемаларды тудыруы мүмкін, соның ішінде тозу, беріктік және пайдаланушының табиғи жүрісімен синхрондау мәселелерін шешу.

Осылайша, электрлік сызықтық жетектер тобық экзоскелеттерін дәл басқаруға және реттеуге мүмкіндік береді, ұтқырлықты жақсартады және энергияны үнемдейді. Дегенмен, олардың күрделілігін, салмағын, құнын, қуат көзіне тәуелділігін, техникалық қызмет көрсету талаптарын және ықтимал техникалық мәселелерді ескеру қажет. Электрлік сызықтық жетектерді таңдау экзоскелеттік пайдаланушылар мен қосымшалардың нақты қажеттіліктері мен мақсаттарына сәйкес келуі керек.

Электрлік сызықтық жетектері бар тобық экзоскелетін қарастыра отырып, өндірушілердің, ғылыми-зерттеу институттарының және тиісті жобалардың соңғы әзірлемелерінен хабардар болған жөн. Бұл ЭСЖ технологиясын қолдануды растауға көмектеседі және құрылғының мүмкіндіктері туралы түсінік береді.

### **1.3.2 Пневматикалық жетектер**

Пневматикалық жетектер — өнеркәсіпте, өндірісте және автоматтандыруда жиі қолданылатын бақыланатын механикалық қозғалысты жасау үшін сығылған ауаның немесе газдың энергиясын пайдаланатын механикалық құрылғылар [122]. Олар бірнеше негізгі ерекшеліктерімен ерекшеленеді және әртүрлі салаларда кеңінен қолданылады. Төменде біз осы ерекшеліктерді түсіндіреміз және ғылыми контексте пневматикалық жетектердің әртүрлі қолданылуын сипаттаймыз:

*Пневматикалық жетектердің негізгі ерекшеліктері:*

Пневматикалық энергия көзі пневматикалық жетектер энергияны сығылған ауадан немесе газдан алады, өнеркәсіптік жағдайда оңай қол жетімді және үнемді ресурс. Бұл мүмкіндік олардың экономикалық тиімділігі мен интеграцияның қарапайымдылығын арттырады. Сызықтық және айналмалы қозғалыс мүмкіндіктері пневматикалық жетектер сызықтық және айналмалы қозғалысты шығаруға қабілетті [123]. Сызықтық жетектер түзу сызықта созылып, тартылады, ал айналмалы жетектер айналмалы қозғалыстарды орындайды, бұл олардың функцияларының әмбебаптығын қамтамасыз етеді. Жоғары күш генерациясы пневматикалық жетектер айтарлықтай механикалық күшке ие, бұл оларды ауыр жүкті көтеру, итеру, тарту немесе қысу операцияларын қажет ететін тапсырмалар үшін қажет етеді. Жылдам жауап беруімен танымал пневматикалық жүйелер жылдам іске қосуды қамтамасыз етеді. Сығылған ауаны жылдам үрлеу немесе үрлеу пневматикалық жетектердің қозғалысын жылдамдатады, өндіріс жылдамдығын және жалпы жұмыс

тиімділігін арттырады [124]. Қарапайым және сенімді дизайны басқа жетек түрлерімен салыстырғанда аз компоненттерден тұратын дизайнның қарапайымдылығы олардың беріктігіне, сенімділігіне және техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығына ықпал етеді. Реттелетін қозғалыс параметрлері пневматикалық жетектер жеткізілетін ауа қысымын реттеу арқылы жылдамдық пен күш сияқты қозғалыс параметрлерін модуляциялауға мүмкіндік береді, бұл әртүрлі қолданбаларға бейімделуді қамтамасыз етеді. Қауіпсіздік яғни электрлік компоненттер мен ұшқындардың болмауы пневматикалық жүйелерді қауіпсіз етеді, бұл оларды тұтану немесе жарылыс қаупі басым қауіпті ортада қолдануға жарамды етеді [125].

Пневматикалық жетектер өнеркәсіптік автоматтандыруда жетек конвейерлерінде, роботты манипуляторларда және түсіру және жылжыту машиналарында кеңінен қолданылады, бұл өңдеу және құрастыру сияқты тапсырмаларды жеңілдетеді. Жүк көтергіштерді, қысқыштарды және ұстағыштарды қоса алғанда, тиеу-түсіру жабдықтарында пневматикалық жетектер объектілерді жылжытуда және басқаруда шешуші рөл атқарады. Қаптама жабдықтарында пневматикалық жетектер контейнерлерді дәл және тиімді тығыздауда, таңбалауда және толтыруда маңызды рөл атқарады. Автомобиль өнеркәсібі құрастыру желісінің әртүрлі процестері үшін пневматикалық жетектерді пайдаланады, соның ішінде дәнекерлеу, бояу және компоненттерді орналастыру. Аэроғарыштық қолдану ұшақтар қауіпсіз және тиімді ұшуды қамтамасыз ететін шасси, қақпақтар және жүк есіктерінің жұмысы сияқты өмірлік маңызды функцияларды басқару үшін пневматикалық жетектермен жабдықталған. Пневматикалық жетектер мұқият бақылауды қамтамасыз ету үшін медициналық құрылғыларға, соның ішінде хирургиялық құралдарға және пациенттерге арналған көтергіштерге біріктіріледі, әсіресе хирургиялық процедуралар кезінде. Пневматикалық жетектер құрылыс техникасында, балғалар мен пневматикалық бұрғылар сияқты жетек құралдарында қолданылады. Өнеркәсіптік процестерде пневматикалық жетектер клапандарды басқару, сұйықтық ағынын реттеу және қысымды ұстап тұру сияқты тапсырмаларда маңызды рөл атқарады, дәл басқару мен автоматтандыруға ықпал етеді. Ойын-сауық саласында сахналық қойылымдар үшін декорациялар мен реквизиттерді әсемдік пен сенімділікпен жылжытуға мүмкіндік беретін пневматикалық жетектер қолданылады. Пневматикалық жетектер бұрғылау, қазу және материалдарды тасымалдау тиімділігін арттыра отырып, тау-кен жабдықтарына біріктірілген [126].

Қорытындылай келе, пневматикалық жетектер әмбебаптықты, үнемділікті және сенімділікті білдіреді, бұл оларды әртүрлі ғылыми және өндірістік салаларда бақыланатын қозғалыс пен айтарлықтай шығыс күшін қажет ететін қосымшалар үшін қажет етеді.



Сурет 1.20. Пневматикалық жетек [126]

*Пневматикалық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы артықшылықтары:*

- пневматикалық жетектер жеңіл болуы мүмкін, бұл оларды киюге болатын экзоскелеттерге қолайлы етеді. Олар тобықтың табиғи қозғалысын имитациялау үшін пайдалы айнаымалы қаттылықты қамтамасыз ете алады.

*Пневматикалық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы кемшіліктері:*

- бұл жетек экзоскелеттердің тасымалдануын шектейтін сығылған ауа көзін қажет етеді. Олар сондай-ақ электр қозғалтқыштарымен салыстырғанда баяу жауап беру уақытына ие болуы мүмкін.

Пневматикалық жүйелерді пайдаланғаны белгілі тобық экзоскелеттерінің кейбір мысалдары:

- Гарвард Висс институтының жұмсақ экзокостюм (Soft Exosuit from Harvard Wyss Institute): Гарвард университетінің Wyss биологиялық инженерия институтының зерттеушілері жаяу жүру кезінде тобық қозғалысына ықпал ететін пневматикалық жетектерді қолданатын жұмсақ экзокостюм жасады. Бұл жұмсақ экзо костюмдер жүру кезінде метаболикалық шығындарды азайтуға арналған.
- FZK— Icaros бұл машина жасау және автоматтандыру институты жасаған тозуға болатын пневматикалық экзоскелет. Германиядағы Фраунгофера. Ол жаяу жүруге және қозғалуға көмектесетін төменгі аяқтарға, соның ішінде тобыққа қолдау көрсетеді.
- BLEEX (төменгі аяқтың экзоскелеті Беркли): Берклидегі Калифорния университетінде жасалған BLEEX экзоскелеті тек тобыққа арналмаған, бірақ оның дизайнында ол төменгі аяқтың қозғалысына көмектесу үшін пневматикалық жетектерді пайдаланады, соның ішінде тобық тірегі ретінде.

Экзоскелеттерде пневматикалық жүйелерді қолдану олардың нақты механизмдері мен функцияларына байланысты өзгеруі мүмкін екенін ескеру қажет. Пневматикалық жүйелер реттелетін күш пен икемділік деңгейлерін қамтамасыз ете алады, бұл жүруге көмектесу және оңалту сияқты қолданбалар үшін пайдалы болуы мүмкін. Дегенмен, мұндай құрылғылардың болуы мен үлгілері менің соңғы жаңартуымнан бері өзгеруі мүмкін және пневматикалық



жүйелермен тобық экзоскелеттері туралы ең өзекті ақпаратты алу үшін өндірушілер мен зерттеу институттарының соңғы ақпараты толыққанды емес.

### **1.3.3 Сериялық серпімді жетектер (SEA)**

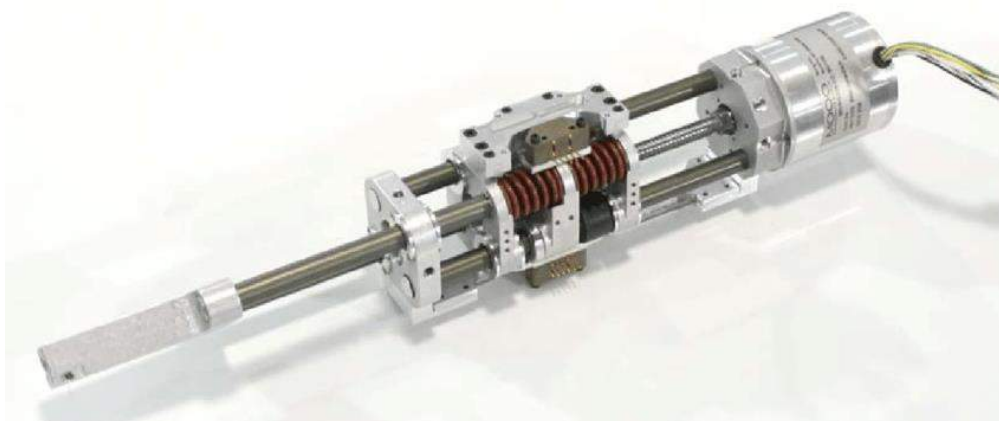
Сериялық серпімді жетектер (ССЖ) робототехника және мехатроника салаларында маңызды болып табылатын арнайы жетек дизайны болып табылады [127]. ССЖ бейімделгіш және мұқият бақыланатын қозғалыстарды қамтамасыз ету үшін стратегиялық түрде пайдаланылады, бұл оларды позициялық реттеуде де, аяқ қозғалысы, экзоскелеттер және тактильді құрылғылар сияқты күш модуляциясында да дәлдікті қажет ететін қолданбаларда әсіресе тиімді етеді. ССЖ-ның негізгі принципі әдетте қозғалтқыштан тұратын жетек блогы мен буын немесе аяқ-қол ретінде көрінуі мүмкін тағайындалған жүктеме арасында стратегиялық орналасқан жетек жүйесіне сериялық серпімді компонентті қосу төңірегінде өрбиді [128-129]. Мұнда біз ғылыми дискурс контекстінде дәйекті серпімді дискілерді бейнелейтін маңызды ерекшеліктер мен принциптерді түсіндіреміз:

*Сериялық серпімді жетектердің негізгі ерекшеліктері:*

ССЖ архитектурасының негізі әдетте серіппе немесе эластомерлік компонент ретінде ұсынылған дәйекті серпімді элемент болып табылады. Бұл серпімді объект қозғалтқыш пен жүктеме арасындағы шешуші байланысты тиімді орната отырып, жетек шығысымен жүйелі түрде қосылады. ССЖ функционалдығының мәні сәйкестікті қамтамасыз ету, осылайша жүйенің механикалық бейімделуін қамтамасыз ету болып табылады. Бұл контекстегі икемділік жүйенің сыртқы күштерге тікелей жауап ретінде деформациялану немесе ұзару қабілетін білдіреді. Бұл маңызды атрибут кіріктірілген серпімді элементті пайдалану арқылы мұқият бақыланады. Күштерді басқару шеберлігі ССЖ жүйелері күштерді басқарудағы ерекше қабілеттерімен танымал. Серпімді компонентпен қамтамасыз етілген ішкі икемділік жүйеге берілген жүктемеге әсер ететін күш мөлшерін мұқият өлшеуге және модуляциялауға мүмкіндік береді. Бұл атрибут әсіресе жаяу жүретін роботтарға тән қосымшаларда маңызды, мұнда жермен өзара әрекеттесу күштерін дәл манипуляциялау өте маңызды. Энергия тиімділігі сериялық серпімді жетекті пайдалану дәстүрлі қатты жетек жүйелерімен салыстырғанда энергия тиімділігінің айтарлықтай өсуін қамтамасыз етеді. Серпімді элементке тән деформация энергияны сақтауды және кейіннен босатуды жеңілдетеді, осылайша жүйенің жалпы қуат тұтынуын азайтады [130]. Жақсартылған қауіпсіздік ССЖ адам мен роботтың өзара әрекеттесу сценарийлерінде қауіпсіздік деңгейін жоғарылатуы мүмкін. Оның серпімді компонентпен қамтамасыз етілген икемділігі қорғаныс қызметін атқарады, робот адамдармен немесе заттармен байқаусызда соқтығысқан жағдайда жарақат алу қаупін азайтады. Кірістірілген сериялық серпімді элементтің қаттылық сипаттамаларын модуляциялау арқылы жүйенің әрекетін әртүрлі тапсырмалар мен өзгеретін қоршаған орта жағдайларына бейімдеуге болады. ССЖ көптеген қосымшаларда, соның ішінде аяқтардағы роботтарда, протездік аяқ-қолдарда, экзоскелеттерде, тактильді кері байланыс құрылғыларында және күш пен икемділікті мұқият бақылауды қажет ететін кез-

келген контекстте кеңінен қолданылады. Басқару алгоритмдерін сараптау ССЖ әлеуетін тиімді пайдалану көбінесе арнайы басқару алгоритмдерін қолдануды талап етеді [131]. Бұл алгоритмдер серпімді компоненттің деформация динамикасын адал қарастырады, бұл позицияның дәлдігін, жылдамдығы мен күшін дәл реттеуге мүмкіндік береді [132-135].

Қорытындылай келе, сериялық серпімді жетектер басқару дәлдігі мен механикалық бейімделудің үйлесімін білдіреді, бұл оларды динамикалық және белгісіз жағдайларда жұмыс істеуге өте қолайлы етеді. Бұл бейімделу тенденциясы әсіресе адам мен роботтың ынтымақтастығын, динамикалық қозғалысты және көмекші құрылғылардың дамуын көрсететін қосымшаларда маңызды. Биологиялық бұлшықетке тән күш пен икемділіктің Қос атрибуттарын көрсете отырып, ССЖ роботтық жүйелерге ерекше дәлдік пен бейімделгіштікпен әртүрлі әрекеттер спектрін орындау мүмкіндігін беру үшін перспективалы бағыт болып табылады.



Сурет 1.21. Сериялық серпімді жетектер (SEA) [131]

Сериялық серпімді жетектерді (ССЖ) қамтитын тобық буын экзоскелеттері кейбір басқа түрлері сияқты кең құжаттама мен коммерцияландыруды алған жоқ. Дегенмен, ССЖ осы саладағы жеке зерттеулер мен әзірлемелерде қолданылды.

Экзоскелеттердің технологиялық ортасы динамикалық аймақ екенін және содан бері кейінгі жетістіктер болуы мүмкін екенін мойындау өте маңызды. Мұнда біз тобық буынының функционалдығын арттыру үшін ССЖ қолданылған экзоскелеттер мен жобалардың көрнекті мысалдарын атап өтеміз:

- Cyberdyne ұсынған HAL (гибридті көмекші аяқ). HAL қолдану аясы тобық буынының ерекше ұлғаюынан асып түссе де, бұл киілетін экзоскелет төменгі аяқтың әртүрлі буындарына, соның ішінде тобық буынына көмектесуді жеңілдету үшін ССЖ-ны біріктіреді. Ол ұтқырлық пен оңалту әрекеттерін қолдау үшін медициналық және оңалту мекемелерінде қолданылды.
- Гарвард жұмсақ экзо костюмдері. Гарвард университетінің зерттеушілері, соның ішінде Висса биологиялық инженерия институтының зерттеушілері төменгі аяқ буындарының, соның ішінде тобық буындарының спектрін қолдау үшін ССЖ-ны қамтитын жұмсақ, киілетін экзоскосттарды әзірлеуге жетекшілік етті. Бұл экзоскосттар серуендеу кезінде метаболикалық

шығындарды азайту үшін мұқият жасалған, бұл жүру тиімділігін арттырады.

- Bionic Boot. Өнертапқыш Кеахи Сеймур ойлап тапқан Bionic Boot экзоскелеті жоғары жылдамдықпен жүгіру өнімділігін оңтайландыруға арналған. Оның негізгі мақсаты жүгіру нәтижелерін жақсарту болса да, ол тобық буынының соққыларды сіңіру және қозғалысты жеңілдету қабілетін арттыруға арналған механизмдерді қамтиды [131].
- REX Bionics экзоскелеті: REX экзоскелеті - бұл шектеулі ұтқырлықпен күресетін адамдарға мүмкіндік беретін ССЖ технологиясының көрнекі қолданылуы. Негізінен тұру мен қозғалысты қолдауға арналған, ол сонымен қатар Тобықты қолдауға арналған құралдарды қамтиды.
- AssistOn-Nkle: Карнеги Меллон Университетінің зерттеушілері ұсынған Assiston-Nkle бастамасы біріктірілген ССЖ бар тобық экзоскелетін жасауға бағытталған. Бұл инновациялық жүйе табиғи жүрісті құрудың түпкі мақсатымен жүрісі бұзылған адамдарға арналған [135].

Қорытындылай келе, сәйкестік пен қауіпсіздікті жақсарту принципіне негізделген дәйекті серпімді жетектер тобық экзоскелет аймағына басып кіріп, қауіпсіздікті арттырып, жарақат алу қаупін азайтады. Көбінесе қозғалтқыштармен серіппелі элементтер ретінде біріктірілген бұл ССЖ-лар тобық экзоскелеттерінің функционалдығын кеңейтетін негізгі компоненттер ретінде қызмет етеді, осылайша оларды қауіпсіз және тиімді етеді.

*Сериялық серпімді жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы артықшылықтары:*

- ССЖ қауіпсіз болу үшін жасалған, өйткені сәйкестік күш пен кедергінің пайдаланушының қозғалысына сәйкестігін басқаруға мүмкіндік береді.

*Сериялық серпімді жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы кемшіліктері:*

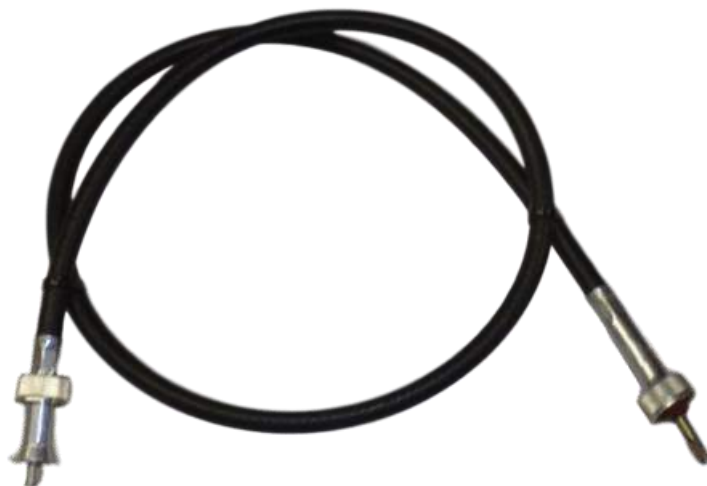
- ССЖ қарапайым электр қозғалтқыштарымен салыстырғанда жобалау және басқару қиынырақ болуы мүмкін. Калибрлеу және техникалық қызмет көрсету қажет болуы мүмкін.

### **1.3.4 Тростық жетектер**

Көбінесе тростық жетектер деп аталатын тростық жетек механизмдері күш немесе қозғалысты бір нүктеден екінші нүктеге беру құралы ретінде икемді кабельдерді, соның ішінде сымдарды немесе тросты пайдаланатын жүйелер класы болып табылады [136]. Олар әмбебаптығы мен қиын жолдарды еңсеру арқылы ұзақ қашықтыққа энергияны тиімді тасымалдау қабілетінің арқасында әртүрлі салаларда кеңінен қолданылады. Бұл шолу тростық жетектердің негізгі компоненттерін сипаттайды және олар кеңінен қолданылатын әртүрлі аймақтарды қарастырады:

Тростық жетек күштің немесе қозғалыстың берілуіне жауап беретін икемді орта ретінде қызмет етеді [137]. Нақты қолдану талаптарына байланысты тростар әдетте болат, нейлон немесе кевлар сияқты материалдардан жасалады. Кабельдік жетектерді қолдану қазіргі лифт жүйелерінде лифт кабиналарының тік қозғалысын жеңілдету үшін тростпен басқарылатын механизмдер кеңінен

қолданылады. Бұл трост лифт білігінің ішіндегі барабанға оралады, лифт қозғалысы кернеуді басқарумен реттеледі. Аспалы көлік жүйелері, соның ішінде аспалы жолдар мен гондолалар, әдетте таулы немесе қалалық жерлерде жолаушыларды немесе жүктерді тасымалдау үшін қолданылады. Олар сенімді және тиімді көлік түрін қамтамасыз етеді [138]. Тростық жетектер зауыттарда, қоймаларда және тарату орталықтарында материалдарды тасымалдау үшін қолданылатын конвейерлік жүйелер мен тиеу-түсіру жабдықтарының ажырамас компоненттері болып табылады. Робототехникада көбінесе тростық роботтармен манипуляторлар жұмыс органдарының қозғалысын басқару үшін тростық жетектерді пайдаланады. Бұл жүйелер ерекше дәлдік пен икемділікті қамтамасыз етеді. Медициналық құрылғыларда хирургиялық роботтар сияқты кейбір медициналық құралдар медициналық процедуралар кезінде дәлдікті қамтамасыз ете отырып, хирургиялық құралдардың қозғалысын мұқият реттеу үшін тростық жетектермен жабдықталған. Аэроғарыш өнеркәсібінде тростық жетектер аэроғарыш саласында, әсіресе ұшақтарды басқару жүйелерінде қолданылады, олар дәл маневр жасау үшін аэрондарды, биіктік рульдерін және рульдерді басқару үшін қолданылады. Архитектуралық жобаларда, ауыр есіктердің, терезелердің немесе шатыр құрылымдарының бақыланатын ашылуы мен жабылуын жеңілдетуде шешуші рөл атқарады. Тростық жетектер көпірлер, аспалы көпірлер сияқты конструкциялар үшін кернеу жүйелерінде ерекше орын алады, мұнда бұл құрылымдардың тұрақтылығы кабельдердің дәл реттелетін кернеуіне байланысты. Тау-кен және бұрғылау жұмыстарында тростық жетектері ауыр жүктерді көтеру немесе жер бетінде терең бұрғылау үшін қажет көтергіштер сияқты жабдықта қолданылады [139-140].



Сурет 1.22. Тростық жетектер [137]

Тростық жетектер ең аз энергия шығынын алып жүре отырып, ұзақ қашықтыққа қозғалысты немесе күшті тиімді беру қабілетіне байланысты әртүрлі қосымшаларда артықшылық береді. Оларға тән икемділік оларға қиын маршруттар бойынша жүруге мүмкіндік береді. Трос материалын, шкив дизайнын және кернеу механизмдерін таңдау әр қосымшаның нақты талаптары мен шектеулеріне байланысты. Бұл инновациялық құрылғылар коммерциялық нарықтарда әлі кеңінен қол жетімді болмады, өйткені тобық экзоскелет

технологиясының саласы серпінді болып қала береді және үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелерді қажет етті [138].

Төменде әртүрлі даму және зерттеу кезеңдерінде болған тростық жетек механизмдері бар тобық буын экзоскелеттерінің таңдаулы мысалдары берілген:

- Карнеги Меллон Университетінің тобық экзоскелеті: Карнеги Меллон Университетінің зерттеушілері жүрісті жақсарту мен оңалтуды жеңілдету үшін арнайы жасалған тобық экзоскелеттерін жасауға белсенді қатысты. Бұл прототиптердің кейбіреулері тобық қозғалысын басқаруға арналған кабельдік жетек жүйелерін қамтуы мүмкін.
- Гарвардтың жұмсақ экзо костюмдері: Гарвард университетінің зерттеушілері, әсіресе васса биологиялық инженерия институтымен байланысты адамдар қатысатын бірлескен бастама жұмсақ киілетін экзо костюмдерді ілгерілетуге бағытталған. Бұл экзо костюмдер төменгі аяқтың әртүрлі буындарына, соның ішінде тобық буынына көмектесу үшін кабельдік жетекті механизмдерді пайдаланды. Бұл жұмсақ экзо костюмдердің негізгі мақсаты серуендеу кезінде метаболикалық энергия шығындарын азайту болды.
- Әртүрлі зерттеу күштері: көптеген академиялық институттар мен ғылыми-зерттеу мекемелері тобық экзоскелеттеріндегі кабельдік жүйелердің пайдалылығын белсенді түрде зерттеді. Бұл бастамалар ұтқырлықты арттыруға және жүрісті қалпына келтіруге ықпал етуге бағытталған.

Тростық жетекпен басқарылатын жүйелерде қозғалысты тобық буынына беру үшін қозғалтқышқа қосылған кабельдер немесе сіңірлер қолданылады. Бұл жүйелер дизайн және басқару тұрғысынан икемділікті ұсынады.

*Тростық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы артықшылықтары:*

- Тростық жетекпен басқарылатын жүйелер жеңіл, бейімделгіш және пайдаланушыға жайлылық беру үшін жетектерді буыннан алыстатуы мүмкін. Олар буындардың қозғалысын дәл бақылауға мүмкіндік береді.

*Тростық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы кемшіліктері:*

- Тростық жетек үйкеліс пен тозуды тудыруы мүмкін, бұл техникалық қызмет көрсетуді қажет етуі мүмкін. Кабельдер мен басқару алгоритмдерінің күрделілігі де проблема болуы мүмкін.

### ***1.3.5 Гидравликалық жетектер***

Гидравликалық жетектер механикалық қозғалысты құру және реттеу үшін қысымдағы гидравликалық сұйықтықты пайдаланатын қуат беру жүйелерінің класы болып табылады [140]. Бұл жүйелер қуатты күш, дәл басқару және үздіксіз жұмыс істеу қабілетіне байланысты әртүрлі салалар мен қолданбаларда кеңінен қолданылады. Төменде біз гидравликалық жетектердің негізгі компоненттері мен қолданылуын ғылыми тұрғыда сипаттаймыз [141]:

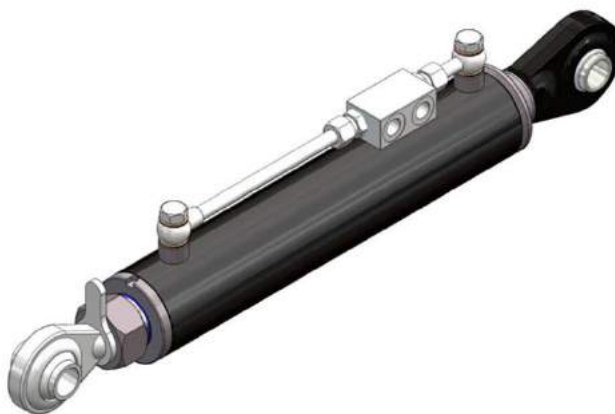
Гидравликалық жүйелерде қуат беру ортасы ретінде арнайы гидравликалық сұйықтық, әдетте май қолданылады. Бұл сұйықтықты таңдау оның майлау сипаттамаларына, жоғары тұтқырлыққа және температураның

ауытқуына төзімділігіне байланысты. Гидравликалық сорғы сұйықтық ағынын құруға жауап береді. Гидравликалық сорғы сұйықтықта қысым жасайды және оны жүйе арқылы жылжытады [142]. Гидравликалық сорғылардың белгілі нұсқаларына беріліс, қалақ және поршенді сорғылар жатады. Гидравликалық цилиндр қысымды сызықтық қозғалысқа айналдыратын механикалық жетек қызметін атқарады. Ол әдетте цилиндрге салынған поршеньден тұрады. Гидравликалық қысымды қолдану поршеньді ұзартуға немесе тартуға әкеледі, осылайша сызықтық күш жасайды. Басқару клапандары гидравликалық сұйықтық ағынын реттеу және гидравликалық цилиндр немесе гидравликалық қозғалтқыш болсын, жетектің жылдамдығы мен бағытын басқару үшін өте маңызды. Гидравликалық жүйелерді басқару үшін гидравликалық тарату клапандары мен қысымды реттейтін клапандарды қоса алғанда, басқару клапандарының әртүрлі түрлері қолданылады. Гидравликалық сұйық резервуар ретінде қызмет ететін резервуар сұйықтықты сақтап қана қоймайды, сонымен қатар оның тұрақты жеткізілуіне кепілдік береді және жұмыс кезінде пайда болатын жылудың таралуына ықпал етеді. Сонымен қатар, ластануды жою арқылы сұйықтықты тазарту үшін резервуарға сүзу жүйелері енгізілген. Шлангтар мен түтіктер гидравликалық жүйенің жеке компоненттері арасында гидравликалық сұйықтықты тасымалдауды жеңілдету үшін қолданылады [143-145].

Гидравликалық жетектер экскаваторлар, бульдозерлер және тиегіштер сияқты ауыр құрылыс техникасында кеңінен қолданылады, мұнда олар жер мен материалдардың едәуір көлемін көтеру, қазу және жылжыту үшін қажетті күшті қамтамасыз етеді. Тракторлар мен ауылшаруашылық жабдықтары көбінесе соқалар мен комбайндар сияқты мылтықтарды Көтеру, түсіру және басқару сияқты тапсырмалар үшін гидравликалық жүйелермен жабдықталған. Гидравликалық жетектер әртүрлі өнеркәсіптік машиналардың ажырамас бөлігі болып табылады, соның ішінде престер, инъекциялық қалыптау машиналары және күш пен қозғалысты дәл қолдануға мүмкіндік беретін металдарды қысыммен өңдеуге арналған жабдық. Гидравликалық жүйелер ұшақты басқаруда шешуші рөл атқарады, шассиді шығару, тежеу жүйелері және Ұшуды басқару беттерін манипуляциялау сияқты функцияларды қамтамасыз етеді, дәл басқару мен сенімділікті қамтамасыз етеді. Автомобильде қолдануда кейбір автомобильдерде рульдік басқару жүйелері мен автоматты беріліс қорабы қолданылады, бұл рульді жақсартады және берілістерді ауыстыруды жеңілдетеді. Гидравликалық көтергіштер, қайшы көтергіштер және жүк көтергіштер әртүрлі тиеу-түсіру жұмыстарында ауыр жүктерді көтеру және түсіру үшін гидравликалық жетектерді пайдаланады. Гидравликалық жүйелер кемелерді басқару механизмдерін, лебедкаларды және кемелер мен теңіз платформаларында палубалық жабдықтардың жұмысын қоса алғанда, теңізде қолдануда маңызды рөл атқарады. Гидравликалық жетектер тау-кен өндірісінің жоғары қажеттіліктерін қанағаттандыруды қамтамасыз ететін гидравликалық экскаваторларды, бұрғылау қондырғыларын және самосвалдарды қоса алғанда, тау-кен жабдықтарының ажырамас бөлігі болып табылады [146]. Мұнай-газ секторында гидравликалық жүйелер бұрғылау қондырғыларында,

ұңғымалардың аузын басқару және құбырларды пайдалану жүйелерінде кең таралған. Гидравликалық жетектер гидравликалық бөгеттер мен тыныс алу генераторлары сияқты жаңартылатын энергия жүйелерінің белгілі бір түрлерінде қолданылады, бұл сұйықтықтың қысымын электр энергиясына айналдыруға мүмкіндік береді.

Гидравликалық жетектердің жоғары қуат пен салмақ қатынасы, дәл басқару және қиын жағдайларға бейімделу сияқты артықшылықтары бар. Дегенмен, олар компоненттердің оңтайлы жұмыс істеуін қамтамасыз ету және сұйықтықтың ластануын болдырмау үшін үнемі техникалық қызмет көрсетуді және күтімді қажет етеді.



Сурет 1.23. Гидравликалық жетектер [146]

Гидравликалық жетектер тобық экзоскелеттерінде қолданылған кезде ғылыми тұрғыдан зерттеуге тұрарлық ерекше артықшылықтар мен кемшіліктерге ие.

*Гидравликалық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы артықшылықтары:*

- Дәл басқару гидравликалық жетектер тобық қозғалысын дәл бақылауды қамтамасыз етеді. Бұл атрибут жүруге көмектесу және оңалту сияқты буындардың бұрыштары мен күш-жігерін дәл реттеуді қажет ететін қолданбалар үшін өте маңызды.
- Жоғары күш генерациясы гидравликалық жетектерге айтарлықтай күштер шығаруға қабілетті. Бұл сипаттама оларды емдік жаттығулар кезінде жүктеме, салмақ көтеру немесе қарсылық көрсету тапсырмаларына жақсы сәйкес етеді.
- Гидравликалық жетектер тегіс қозғалысты қамтамасыз етеді, бұл тобықтың табиғи және ыңғайлы қозғалысын қамтамасыз етудің негізгі факторы болып табылады. Бұл Пайдаланушының жайлылығын арттыруға және ұзақ уақыт пайдалану кезінде шаршауды азайтуға көмектеседі.
- Айнымалы көмек деңгейлері гидравликалық жетектерді пайдаланушының жеке талаптарына бейімделген көмек немесе қарсылық деңгейлерінің айнымалыларын қамтамасыз ету үшін реттеуге болады. Бұл бейімделу пайдаланушылардың әртүрлі қажеттіліктерін қанағаттандыру және жекелендірілген оңалту режимдерін жеңілдету үшін құнды болып табылады.

- Гидравликалық тобық экзоскелеттері пайдаланушылардың бірегей талаптарына сәйкес келетін теңшеу опцияларын ұсынады. Бұл бейімделу жеке талаптарға дәл сәйкес келу үшін қозғалыс ауқымын, Шығыс Күшін және басқару алгоритмдерін өзгертуді қамтиды.

*Гидравликалық жетектің тобық буын экзоскелеттерін басқарудағы кемшіліктері:*

- Гидравликалық жүйелер баламалы әрекет ету әдістерімен салыстырғанда салыстырмалы түрде күрделі дизайнға ие. Ол үшін экзоскелет жүйесінің жалпы күрделілігін арттыратын сорғылар, клапандар және шлангтар сияқты компоненттер қажет.
- Гидравликалық компоненттер, соның ішінде гидравликалық сұйықтық ыдысы экзоскелетке қосымша салмақ береді. Бұл артық салмақ, әсіресе портативті құрылғыларда алаңдаушылық тудыруы мүмкін, себебі ол пайдаланушының жайлылығы мен ептілігіне әсер етуі мүмкін.
- Техникалық қызмет көрсету талаптары гидравликалық жүйелер сұйықтықты тексеруді, сүзгілерді ауыстыруды және ағып кетуді ықтимал жөндеуді қоса алғанда, мерзімді техникалық қызмет көрсетуді қажет етеді. Тұрақты техникалық қызмет көрсету қажеттілігі меншіктің жалпы құнын арттырып, арнайы білімді қажет етуі мүмкін.
- Гидравликалық жүйелер дұрыс күтілмеген жағдайда немесе компоненттер зақымдалған жағдайда сұйықтықтың ағып кетуіне бейім. Сұйықтықтың ағуы операциялық асқынуларға әкелуі мүмкін және тазалау шараларын қажет етеді.
- Энергияны тұтыну гидравликалық жүйелер энергияны қажет етуі мүмкін, әсіресе ұзақ уақыт пайдаланған кезде. Гидравликалық сорғының жұмысы және жүйеде қысымды ұстап тұру айтарлықтай энергия көзін қажет етуі мүмкін.
- Сорғылар мен клапандар сияқты гидравликалық жүйелердің ажырамас бөлігі болып табылатын компоненттер айтарлықтай шығындарға әкелуі мүмкін. Бұл гидравликалық жетектерді қолданатын тобық экзоскелеттеріне байланысты жалпы шығындардың өсуіне ықпал етуі мүмкін.

Қорытындылай келе, дәлдікпен және сенімді күш генерациясымен сипатталатын гидравликалық жетектер жүруге көмектесу және оңалту сияқты қолданбаларға арналған тобық экзоскелеттері үшін жақсы жұмыс істейді деп айтуға болады. Дегенмен, қиындықтар, қажетті техникалық қызмет көрсету шарттары, салмақтың ықтимал салдары және құндылық туралы ойлар тобық экзоскелеттерін іске қосу әдісін таңдауды қарастырған кезде жан-жақты бағалауды қажет етеді. Іске қосу әдісін таңдау экзоскелетті қолданудың нақты мақсаттары мен шарттарына сәйкес келуі керек және нәтижесі кесте ретінде көрсетілді.


Кесте 1.4 Экзоскелеттерде қолданылатын жасанды бұлшықеттердің сипаттамсы




Жасанды бұлшықет түрі	Сипаттама	Артықшылығы	Кемшіліктері
<p>Пневматикалық бұлшықет жетектері (ПБЖ)</p> 	<p>Пневматикалық бұлшықет жетектері (ПБЖ) — бұл адамның бұлшықет қызметін имитациялайтын жұмсақ, икемді және жеңіл құрылғылар. Олар тоқылған жеңмен қоршалған эластомерлік камерадан тұрады. Ауа немесе газ қысымымен қуық кеңейіп, жиырылады, бұл бұлшықеттің әрекеті сияқты жеңнің қысылуына немесе созылуына әкеледі. Тобық экзоскелеттерінде ПБЖ көбінесе бақыланатын қозғалысты қамтамасыз ету және тобықты қолдау үшін құрылғыға біріктіріледі.</p>	<p>ПБЖ-лар адамның бұлшықеттерінің қозғалысы мен икемділігіне дәл еліктей алады, бұл тобықтың табиғи және тегіс қозғалысын қамтамасыз етеді. Бұл әсіресе жаяу жүру және дәл бақылауды қажет ететін басқа әрекеттер кезінде өте маңызды.</p> <p>ПБЖ әдетте жеңіл және икемді, бұл оларды киюге болатын экзоскелеттерге жарамды етеді. Бұл жеңіл салмақ экзоскелеттің жалпы салмағын азайтуға көмектеседі, бұл Пайдаланушының жайлылығы мен энергия тиімділігі үшін өте маңызды.</p> <p>ПБЖ тобық буынының өзгермелі қаттылығын</p>	<p>ПБЖ әдетте электр қозғалтқыштары немесе гидравлика сияқты дәстүрлі қатты жетектермен салыстырғанда қуаты төмен. Бұл шектеу экзоскелеттің жоғары деңгейдегі көмек немесе қолдау көрсету қабілетіне әсер етуі мүмкін, әсіресе күрделі тапсырмаларды орындау кезінде.</p> <p>ПБЖ-ны дәл бақылауға қол жеткізу олардың икемділігі мен сызықтық емес мінез-құлқына байланысты қиын болуы мүмкін. Жетек реакциясын тиімді басқару үшін көбінесе күрделі басқару алгоритмдері қажет.</p> <p>ПБЖ сығылған ауа немесе газ көзін қажет етеді, бұл экзоскелеттің дизайнын қиындатады және оның тасымалдануы мен жұмыс уақытын шектей алады.</p> <p>ПБЖ-да қолданылатын материалдар уақыт өте келе тозуы мүмкін, нәтижесінде қызмет ету мерзімі қысқарады және техникалық қызмет көрсету талаптары сенімді іске қосу әдістерімен салыстырғанда артады.</p> <p>ПБЖ әзірлеу және өндіру қымбатқа түсуі мүмкін, бұл технологияны қолданатын тобық экзоскелеттерінің бастапқы шығындарының жоғарылауына әкелуі мүмкін.</p>


		<p>қамтамасыз ету үшін басқарылуы мүмкін. Бұл мүмкіндік экзоскелетке әртүрлі жүру немесе жүгіру жағдайларына бейімделуге мүмкіндік береді, Қажет болған жағдайда қолдау көрсетеді және басқа әрекеттер кезінде табиғи қозғалыстарды қамтамасыз етеді.</p>	
<p><i>Гидравликалық жасанды бұлшықеттер</i></p> 	<p>Гидравликалық жасанды бұлшықеттер, гидравликалық жетектер немесе гидравликалық цилиндрлер деп те аталады, қозғалыс жасау үшін гидродинамика принциптерін қолданады. Бұл жетектер әдетте гидравликалық сұйықтықпен толтырылған цилиндрлік камерадан және қысыммен камераның ішінде қозғалатын поршеньден тұрады. Сұйықтық камераға айдалғанда, ол поршеньді итеріп, механикалық күш</p>	<p>Гидравликалық жетектер айтарлықтай күш пен момент тудыруы мүмкін, бұл оларды қолдануға жарамды етеді, мұнда беріктік пен қолдау өте маңызды, мысалы, жаяу жүруге, жүгіруге немесе ауыр жүктерді көтеруге көмектесу үшін қажет тобық экзоскелеттері үшін.</p> <p>Гидравликалық жетектер қозғалыс пен күштің дәл бақылауын қамтамасыз ете алады, бұл әр түрлі</p>	<p>Гидравликалық жетектер дұрыс сақталмаған жағдайда сұйықтықтың ағып кетуіне бейім болуы мүмкін, бұл тозуға әкеледі, экзоскелеттер үшін проблема болуы мүмкін.</p> <p>Гидравликалық компоненттер, соның ішінде сорғылар мен резервуарлар экзоскелеттің салмағын арттыра алады, бұл пайдаланушының жайлылығы мен қозғалғыштығына әсер етуі мүмкін.</p> <p>Гидравликалық жетектер жобалау және енгізу гидродинамика және басқару техникасы туралы білімді қажет ететін күрделі міндет болуы мүмкін.</p>

	пен қозғалыс жасайды. Тобық экзоскелетін (тобық пен аяқтың) басқару контекстінде гидравликалық жасанды бұлшықеттерді басқарылатын қозғалысты қамтамасыз ету және осы буындарды қолдау үшін біріктіруге болады.	<p>әрекеттерді, соның ішінде жүріс пен тепе-теңдікті бақылауды жеңілдету үшін дәл баптауға мүмкіндік береді.</p> <p>Гидравликалық жетектер сенімділігі мен беріктігімен танымал. Олар жоғары жүктемелерге төтеп бере алады және айтарлықтай тозусыз ұзақ мерзімді пайдалануға төтеп бере алады, бұл оларды ұзақ мерзімді пайдалануға жарамды етеді.</p> <p>Гидравликалық жүйелер салыстырмалы түрде тыныш жұмыс істей алады, әсіресе электр қозғалтқыштары сияқты кейбір басқа жұмыс әдістерімен салыстырғанда.</p>		
<i>Сызықты жетектері</i>	<i>электрлік</i>	Электрлік сызықтық жетектер электр	Дәл басқару электрлік сызықтық жетектер	Электр сызықтық жетектерінде қуат шығысы шектеулері болуы мүмкін, бұл олардың күрделі

	<p>қозғалтқышынан, бұрандалы немесе штангалы механизмнен және корпустан тұрады. Қозғалтқыш айналғанда, ол бұранданы немесе штанганы қозғалысқа келтіреді, оның ұзындығы бойынша сызықтық қозғалыс тудырады. Тобық экзоскелеті жаяу, жүгіру немесе тұру сияқты әрекеттерге қолдау мен көмек көрсете отырып, тобық буын қозғалысын басқару үшін электрлік сызықтық жетектерді біріктіруге болады.</p>	<p>позиция мен қозғалыс жылдамдығын дәл басқаруды қамтамасыз етеді. Бұл бақылау деңгейі тобыққа дәл және дәл көмек көрсету үшін қажет.</p> <p>Айнымалы қаттылық жетектің жылдамдығы мен күшін реттеу арқылы экзоскелеттің әртүрлі жүру жағдайлары мен пайдаланушының қалауына бейімделуіне мүмкіндік беру арқылы тобық буынының айнымалы қаттылығын қамтамасыз етуге болады.</p> <p>Электрлік сызықтық жетектер ыңғайлы және жеңіл болуы мүмкін, бұл киілетін экзоскелеттерге пайдалы, пайдаланушының жайлылығы мен</p>	<p>тапсырмаларды орындау кезінде қолдаудың жоғары деңгейін қамтамасыз ету қабілетіне әсер етуі мүмкін. Бұл шектеу үлкен немесе қуатты қозғалтқыштарды қажет етуі мүмкін, бұл салмақ пен өлшемнің өсуіне әкелуі мүмкін.</p> <p>Батареяның қызмет ету мерзімі электр жетектері энергияны үнемдейтін болса да, олар әлі де батареяларға немесе қуат көздеріне сүйенеді, бұл экзоскелеттің жұмыс уақытын шектеуі мүмкін. Қуатты басқару ұзақ мерзімді пайдалану кезінде өте маңызды болады.</p> <p>Кешенді басқару дәл басқаруға қол жеткізу үшін күрделі басқару алгоритмдері, сенсорлар және кері байланыс жүйелері қажет болуы мүмкін. Бұл күрделілік жалпы дизайн және техникалық қызмет көрсету талаптарын арттыруы мүмкін.</p> <p>Құны жоғары сапалы электрлік желілік жетектер салыстырмалы түрде қымбат болуы мүмкін, бұл тобық экзоскелетін әзірлеу мен өндірудің жалпы құнын арттыруы мүмкін.</p> <p>Электр жетектері қозғалтқышқа техникалық қызмет көрсетуді, майлауды және механикалық компоненттердің тозуын бақылауды қоса алғанда, мерзімді техникалық қызмет көрсетуді қажет етуі мүмкін.</p>
---	---	---	--

		<p>ұтқырлығын қамтамасыз етеді.</p> <p>Энергия тиімділігі олар энергияны үнемдей алады, әсіресе тиімді қозғалтқыш технологиялары мен басқару алгоритмдерін қолданған кезде. Бұл бір батарея зарядында экзоскелеттің жұмыс уақытын ұзартуға көмектеседі.</p> <p>Электрлік сызықтық жетектер көбінесе үнсіз жұмыс істейді, бұл Пайдаланушының жайлылығына ықпал етеді және қоршаған ортадағы шуды азайтады.</p>	
<i>Тросстық жетектері</i>	<p>Экзоскелеттік тобық буынына тросстық жетектері жүйесі кабельдерден (көбінесе болат немесе синтетикалық талшықтар сияқты жоғары беріктігі</p>	<p>Табиғи қозғалыстар тросстық жетектері адамның табиғи қозғалыс ауқымын және тобық икемділігін дәл еліктей алады, бұл</p>	<p>Тросстық жетекті жүйелерде қуат шығысы шектеулері болуы мүмкін, бұл олардың күрделі тапсырмаларды орындау кезінде қолдаудың жоғары деңгейін қамтамасыз ету қабілетіне әсер етуі мүмкін. Бұл шектеуді жеңу үшін қуатты қозғалтқыштар немесе қосымша механикалық артықшылықтар қажет болуы мүмкін.</p>

	<p>бар материалдардан жасалған), шкивтерден және әдетте электр қозғалтқышы болып табылатын күш көзінен тұрады. Тросс тобықтың бақыланатын қозғалысын қамтамасыз ету үшін стратегиялық түрде салынған. Қозғалтқыш іске қосылғанда, ол троссты орап немесе шешіп, кернеуді немесе салбырауды тудырады, нәтижесінде қосылыста қозғалыс пайда болады. Бұл жүйелер тобықтың табиғи қозғалысын имитациялауға арналған, қажет болған жағдайда қолдау мен көмек көрсетеді.</p>	<p>пайдаланушыға табиғи және ыңғайлы жүру немесе жүгіру тәжірибесін береді.</p> <p>Жеңіл дизайн тросстық жетектері кейбір басқа әрекет ету әдістерімен салыстырғанда салыстырмалы түрде жеңіл, бұл киілетін экзоскелеттер үшін артықшылық, өйткені ол жалпы салмақты азайтады және пайдаланушының жайлылығын арттырады.</p> <p>Айнымалы қаттылық тросстық жетектері керілуін реттеу арқылы экзоскелеттің әртүрлі әрекеттер мен рельефтерге бейімделуіне мүмкіндік беру арқылы тобық буынының айнымалы қаттылығын</p>	<p>Тросстық жетектері тобықтың табиғи жолымен жүретіндей етіп жобалау және төсеу дәл дизайнды қажет ететін және бүкіл жүйенің салмағы мен күрделілігін арттыратын күрделі міндет болуы мүмкін.</p> <p>Тросстық жетектердің тозуы және қызмет көрсетуі уақыт өте келе тозуы мүмкін және ауыстыруды немесе техникалық қызмет көрсетуді қажет етеді. Бұл техникалық қызмет көрсету талаптарының артуына және мүмкін болатын үзілістерге әкелуі мүмкін.</p> <p>Энергияны тұтыну дизайнға байланысты тросстық жетекті жүйелер батареяның қызмет ету мерзіміне және жұмыс уақытына әсер етуі мүмкін кейбір басқа жұмыс әдістерімен салыстырғанда көбірек қуат тұтынуы мүмкін.</p> <p>Шектеулі қозғалыс ауқымы тросстық жетектері қамтамасыз ететін қозғалыс ауқымы кейбір басқа әрекет ету әдістерімен салыстырғанда шектелуі мүмкін, бұл Пайдаланушының табиғи қозғалысын белгілі бір дәрежеде шектеуі мүмкін.</p>
---	--	--	---

		<p>қамтамасыз етуге болады.</p> <p>Тросстық жетектері үнсіз жұмыс істей алады, пайдаланушының жайлылығын қамтамасыз етеді және шудың ластануын азайтады.</p> <p>Экономикалық тиімділік тросстық жетектері кейбір басқа әрекет ету әдістерімен салыстырғанда үнемді болуы мүмкін, бұл оларды белгілі бір қолданбалар үшін практикалық таңдау жасайды.</p>	
<p><i>Сериялық серпімді жетектер (SEA)</i></p> 	<p>Сериялық серпімді жетектер адамның тірек-қимыл аппаратының сипаттамаларын имитациялауға арналған. Олар әдетте қатты жетектен (көбінесе электр қозғалтқышы), серпімді элементтен (мысалы, серіппе немесе</p>	<p>Табиғи қозғалыстар ССЖ адамның бұлшықет энергиясының икемділігі мен жинақталу сипаттамаларына еліктеу үшін жасалған, бұл тобықтың табиғи</p>	<p>Кешенді басқару ССЖ көмегімен дәл басқаруға қол жеткізу қозғалтқыш, серпімді элемент және буын арасындағы өзара әрекеттесуге байланысты қиын болуы мүмкін. Басқару алгоритмдері қауіпсіз және тиімді жұмысты қамтамасыз ету үшін мұқият әзірленуі керек.</p> <p>Техникалық қызмет көрсету ССЖ күрделі механикалық компоненттер мен серпімді элементтерді қамтуы мүмкін, олар уақыт өте келе</p>

	<p>сіңір) және беріліс жүйесінен тұрады. Серпімді элемент қозғалтқышқа және топсаға тізбектей қосылады, бұл энергияны сақтауға және босатуға мүмкіндік береді. Қозғалтқыш күш қолданған кезде серпімді элементті созады, ал қозғалтқыш босаңсыған кезде серпімді элемент қысылып, буында қозғалыс пайда болады. The тобық экзоскелеті sea бақыланатын қозғалысты қамтамасыз ету және тобық буынына қолдау көрсету үшін біріктірілуі мүмкін.</p>	<p>және ыңғайлы қозғалысына әкеледі. Энергия тиімділігі ССЖ серпімді элемент арқылы энергияны тиімді сақтай және шығара алады, бұл экзоскелеттің қуат тұтынуын азайтуға және батареяның қызмет ету мерзімін ұзартуға көмектеседі. Айнымалы қаттылық серпімді элементтің қасиеттерін немесе қозғалтқышты басқаруды реттеу арқылы ССЖ әртүрлі әрекеттер мен рельефтерге бейімделу арқылы білек буынының айнымалы қаттылығын қамтамасыз ете алады. Жауапты басқару ССЖ экзоскелеттің пайдаланушының жүрісіндегі немесе</p>	<p>тозуы мүмкін және техникалық қызмет көрсету мен ауыстыруды қажет етеді. Бұл компоненттердің ұзақ мерзімді сенімділігі күмәнді болуы мүмкін.</p> <p>Салмақ: дизайнға байланысты ССЖ серпімді элемент пен беріліс жүйесінің болуы арқылы экзоскелеттің салмағын арттыра алады. Салмақ пен өнімділікті теңестіру қиын болуы мүмкін.</p> <p>Құны қажетті дәлдік пен сенімділікпен ССЖ әзірлеу және өндіру қымбатқа түсуі мүмкін, бұл тобық экзоскелетінің жалпы құнын арттырады.</p> <p>Пайдаланушының ССЖ тәжірибесі әртүрлі болуы мүмкін және құрылғыға бейімделу уақытты алуы мүмкін. Пайдаланушылардың экзоскелетті қалай тез үйреніп, қалай қолдануға болатындығы туралы белгісіздік бар.</p>
--	---	---	---



		жер бедерінің жағдайындағы өзгерістерге бейімделуіне мүмкіндік беру арқылы бірлескен қозғалыстарды жедел және нақты уақыт режимінде басқаруға мүмкіндік береді.	
--	--	---	--

Тобық буын экзоскелеттерінде қолданылатын жасанды бұлшықеттер әр түрлі формада болады, олардың әрқайсысының өзіндік қасиеттері мен артықшылықтары бар.

Жасанды бұлшықеттердің әр түрінің өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар, бұл оларды тобық экзоскелеттерінде нақты қолдану үшін аздық-көпті қолайлы етеді. Жасанды бұлшықет түрін таңдау қажетті қозғалыс ауқымы, күшке қойылатын талаптар, салмақ шектеулері және экзоскелетті жобалаудың жалпы мақсаттары сияқты факторларға байланысты. Зерттеушілер мен инженерлер тобық экзоскелет технологиясындағы жасанды бұлшықеттердің өнімділігі мен әмбебаптығын жақсарту үшін осы салада зерттеулер мен инновацияларды жалғастыруда.

#### **1.4 Бірінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы**

Қорытындылай келе, бұл жан-жақты шолу оңалту саласындағы экзоскелет дизайнның заманауи ландшафтына тереңірек үңіліп, жаңа тенденцияларды көрсетеді және болашақ ықтимал траекторияларды белгілейді. Экспозиция тобық экзоскелеттерінің динамикалық эволюциясын бақылап, олардың тұжырымдамадан шындыққа трансформациялық жолын жарықтандырды.

Тобық буын экзоскелеттерінде қолданылатын жасанды бұлшықет технологияларының спектрін қамтитын мұқият шолу жасалды. Бұған пневматикалық және гидравликалық жетектер, сериялық серпімді жетектер және электрлік сызықтық жетектер кіреді. Әрбір нұсқа оның бірегей қасиеттері, артықшылықтары мен шектеулері үшін мұқият зерттелді, ол тобық экзоскелеттерінің ең тиімді таңдауын анықтау үшін мұқият бағалаумен аяқталды. Олардың ішінде дәлдігімен, тиімділігімен және экзоскелеттің күрделі архитектурасына тегіс интеграциялану мүмкіндігімен ерекшеленетін электрлік сызықтық жетектер оңтайлы бәсекелес болды.

Осы күрделі өрістерді зерттеу арқылы бұл зерттеу заманауи дизайн принциптерінің, озық іске қосу технологияларының және тобық экзоскелеттерін дамытудағы оңалту императивтерінің терең синтезіне жарық түсіреді. Инновацияның мұндай жақындасуы қазіргі кездегі керемет жетістіктерге баса назар аударып қана қоймайды, сонымен қатар әлі зерттелмеген перспективалы бағыттарды көрсететін мызғымас компас ретінде қызмет етеді. Аяқтың экзоскелеттік сферасы тынымсыз зерттеулер мен тапқырлыққа негізделген өркендеуін жалғастыра отырып, ол оңалту шекараларын қайта анықтауға және әр түрлі ортадан шыққан адамдар үшін ұтқырлықты жақсарту траекториясын өзгертуге дайын.

Тобық буын экзоскелеттері инженерлік инновациялардың, медициналық тәжірибенің және жұмыс орнының ұтқырлығын, оңалтуын және эргономикасын арттыруға бағытталған бірлескен күш-жігердің тамаша үйлесімі болып табылады. Бұл киюге болатын құрылғылар өздерінің алғашқы прототиптерінен бастап ұзақ жолдан өтіп, кең ауқымды қолданбалары бар практикалық және қолжетімді шешімдерге айналды. 2000 жылдары пайда болғаннан бері тобық экзоскелеттері айтарлықтай өзгерістерге ұшырады. Миниатюризация, жеңіл

материалдар және эргономикалық дизайн оларды ыңғайлы және ыңғайлы етті. Датчиктер, жетектер және кері байланыс жүйелері бұл құрылғыларға тобықтың табиғи қозғалысына еліктеу және пайдаланушылардың қажеттіліктеріне бейімделу арқылы жеке көмек көрсетуге мүмкіндік береді. Коммерциялық тобық экзоскелеттері зерттеу зертханаларынан нақты шешімдерге көшті. Олар жарақаттанудан, инсульттан немесе неврологиялық аурулардан айыққан адамдарға оңалту және қозғалу бойынша көмек ұсынады. Өнеркәсіптік секторда олар физикалық ауыр жұмыстардағы қауіпсіздік пен өнімділікті арттыру арқылы жұмысшылардың физикалық белсенділігін төмендетеді. Үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелер инновацияларды ынталандыруды жалғастыруда, бұл тобық экзоскелеттерін тиімдірек, үнемді және теңшелетін етеді. Инженерлер, Денсаулық сақтау мамандары және физиотерапевтер арасындағы ынтымақтастық осы прогрестің негізі болып қала береді, бұл тобық экзоскелеттерінің пайдаланушылардың өсіп келе жатқан қажеттіліктерін қанағаттандыруын қамтамасыз етеді. Тобық экзоскелет технологиясы дамып келе жатқанда, ол қозғалғыштығы шектеулі адамдардың өмір сүру сапасын жақсартуға және жұмыс орнындағы қауіпсіздікті жақсартуға үлкен перспективалар ашады. Бұл құрылғылар ұтқырлық пен оңалтудың күрделі мәселелерін шешудегі пәнаралық ынтымақтастық пен инновацияның күшінің дәлелі болып табылады. Үздіксіз дамудың арқасында тобық экзоскелеттері көптеген адамдардың өмірін өзгерте алады, бұл үлкен ұтқырлықты, тәуелсіздік пен жайлылықты қамтамасыз етеді.

Тобық экзоскелеттері аймағында электрлік сызықтық жетектер (ЭСЖ) пневматикалық немесе гидравликалық механизмдер сияқты балама жетек жүйелері сияқты кең таралмады. Алайда, тобық экзоскелеттерін іске қосу технологиясын таңдау нақты қолдану, пайдалану талаптары мен дизайн мақсаттарын қамтитын факторлардың жиынтығына байланысты екенін атап өту өте маңызды. Электрлік сызықтық жетектердің (ЭСЖ) артықшылықтары:

Дәл басқару сызықтық қозғалысты басқаруда теңдесі жоқ дәлдік пен дәлдікті қамтамасыз етеді, бұл оны тобық буындарын мұқият бақылауды қажет ететін қолданбалар үшін өте қолайлы етеді. Жақсартылған тиімділік ЭСЖ әдетте электр энергиясын механикалық қозғалысқа тиімді түрлендіру арқылы энергия тиімділігінің жоғарылауын көрсетеді. Бұл тиімділік профилі энергияны үнемдеуге және батареямен жұмыс істейтін экзоскелеттердегі батареялардың қызмет ету мерзімін ұзартуға әкелуі мүмкін. Акустикалық эмиссияның төмен деңгейі ЭСЖ механизмдері ең аз шу деңгейінде жұмыс істейді. Бұл сипаттама, мысалы, медициналық мекемелерде немесе кеңселерде шуды азайту өте маңызды жағдайларда баға жетпес болып шығады. Үздіксіз интеграция ЭСЖ басқа экзоскелеттік компоненттермен тегіс үйлестіруді және оңтайлы функционалдылықты қамтамасыз ететін электрлік басқару жүйелеріне оңай енеді.

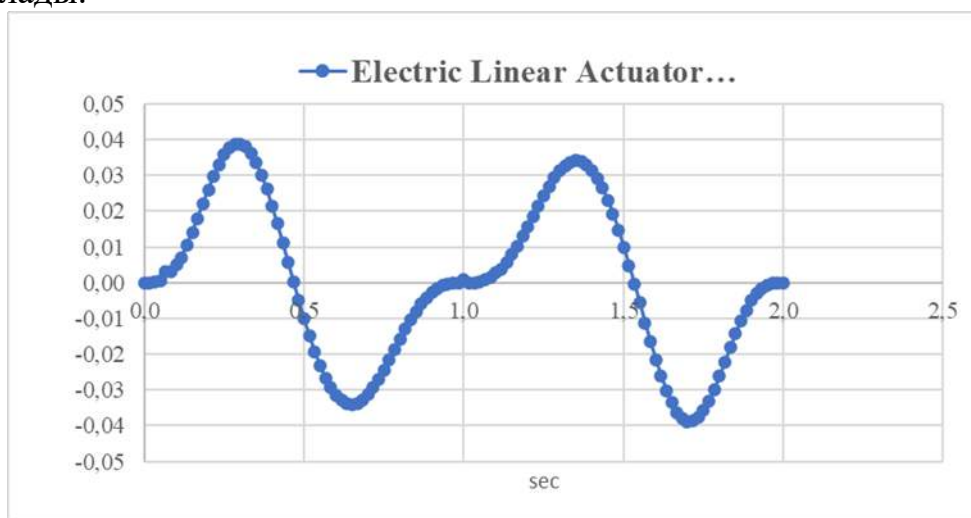
Жүк көтергіштігі ЭСЖ жүк көтергіштігінің шектеулеріне ие болуы мүмкін, бұл әртүрлі өлшемдері мен дене салмағы бар пайдаланушыларға арналған тобық экзоскелеттері үшін маңызды. ЭСЖ жүйелері альтернативті позитивті технологиялармен салыстырғанда басқару электроникасы мен кері байланыс

жүйелері тұрғысынан күрделіліктің жоғарылауына әкелуі мүмкін. Бұл күрделіліктің жоғарылауы жүйенің жалпы күрделілігіне және оған техникалық қызмет көрсету талаптарына әсер етуі мүмкін. Өлшемі мен салмағы ЭСЖ физикалық өлшемдері мен салмағы әртүрлі болуы мүмкін, бұл тобық экзоскелетінің жалпы дизайны мен пайдаланушының жайлылығына әсер етуі мүмкін. Құны ЭСЖ жүйелері кейбір балама позитивті технологиялармен салыстырғанда жоғары шығындарға әкелуі мүмкін, бұл тобық экзоскелеттерінің кең қолжетімділігіне әсер етуі мүмкін.



Сурет 1.24. Сызықты жетек моделі а) SolidWorks-тегі CAD моделі; б) түпнұсқа прототип [121]

1.23 суретте. 40 Н жетегі қандай максималды күш-жігерде жұмыс істейтіні көрсетілген. Графикке сәйкес, барлық бағыттардағы қозғалыстар максималды мәндердің шырдарына ие. 2 секундта жетектер графикте көрсетілгендей еркін қозғала алады.



Сурет 1.25. Сызықты жетектің имитациялық мәні

Кесте 1.5 Тобық буын экзоскелетінде қолданылатын жасанды бұлшықеттің сипаттамсы

Өндіруші	Actuonix Motion Devices Inc.
Қатар	Л16
Орау	Масса
Өнім күйі	Белсенді
Түрі	СЫЗЫҚТЫҚ ЖЕТЕК
Қозғалтқыш түрі	Мөлдір емес
Кіріс ұзындығы	140,00 мм

Жүктеме күші (Динамикалық)	50,0 Н
Жүктеме күші (статикалық)	250,0 Н
Жылдамдық	(32,0 мм/с
Жұмыс циклі	20%
Кернеу-номиналды	12 В тұрақты ток
Құрылымы	Шарикті бұранда
Дәлдік	±0,50 мм
Функции	Шекті ажыратқыштар
Беріліс коэффициенті	35
Аяқтау стилі	Қосқышы бар сымдар
Жұмыс температурасы	-10°C ~ 50°C

Қорытындылай келе, электрлік сызықтық жетектер дәлдік пен тиімділік сияқты айқын артықшылықтарға ие, бұл оларды дәлдік пен энергия тиімділігіне басымдық беретін белгілі бір тауашалардағы тобық экзоскелеттері үшін ақылды таңдау жасайды. Дегенмен, әрекет ету әдісінің орындылығы жүк көтергіштігін, күрделілігін, өлшемін, салмағын және құнын қамтитын тұтас бағалауға байланысты. Оңтайлы таңдау тобық экзоскелеттерінің қажетті сипаттамалары мен функцияларын жүзеге асыру үшін осы аспектілердің нәзік тепе-теңдігін қажет етеді. Үздіксіз технологиялық жетістіктер мен зерттеу күштері экзоскелеттерді қуаттандыру тәсілдерінің ландшафтын үнемі өзгертіп, жаңа перспективалар мен инновацияларды ашуы мүмкін.

## **2. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ КИНЕМАТИКАСЫ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬ**

### **2.1 Тобық буынының биомеханикалық талдауы**

Адамның тобық буыны – бұл адам қаңқасының өте күрделі құрылымы және қозғалу кезінде күштер мен моменттердің берілуінде маңызды рөл атқарады [147]. Тобық буыны жұмысының бұзылуына немесе күнделікті өмірде жасалатын қозғалыс ауқымының шектелуіне (ҚА) әкелетін көптеген факторлар бар. Тобық буыны егде жастағы адамдарда болатын артық салмақ, шамадан тыс физикалық белсенділік немесе оның жетіспеушілігі, мысалы, туа біткен патологияларға байланысты адам ағзасындағы ең көп жарақат алатын буындардың біріне жатады. Тобық буынында жиі байқалатын зақымдану ол – буын байламдарының созылуы. Олар буын шектен тыс функционалды қозғалыс жасаған кезде пайда болады, мысалы спортшыларда, сонымен қатар пассивті қозғалыс жасайтын, яғни көбінесе отырықшы өмір салтын ұстанатын адамдарда да болуы мүмкін [148]. Төменгі аяқ әлсіздігі, яғни аяқтың басы мен саусақтарын жоғары қарай ие алмау тобық буыны зақымдануының (мүгедектігінің) тағы бір көрінісі болып табылады. Сондай-ақ, сүйектердің сынуы немесе инсульттан туындаған неврологиялық бұзылулар және омыртқа жарақаттары, паралич, гемипарез және т.б. сияқты басқа да ауыр аурулар тобық буынын оңалтуды әлдеқайда ұзақ мерзімді және күрделі процесс етеді. Тобық буынын қалпына келтіруде қолданылатын физиотерапиялық процедуралардың түрлері әртүрлі және науқастың бұлшық еттерінің немесе қаңқасының нақты жағдайына байланысты болады. Әдетте күшейту және резистивті жаттығулар ұсынылады. Науқастарға ең жиі тағайындалатын жаттығулар қатарына пассивті, көмекші және белсенді жаттығулар жатады. Пассивті жаттығулардың басқаларынан айырмашылығы жаттығуды орындау кезінде науқас ешқандай күш жұмсамайды. Оның орнына физиотерапевт науқастарға аяқ бұлшық еттері мен буындарын қозғалтуға, жылжытуға көмектеседі.

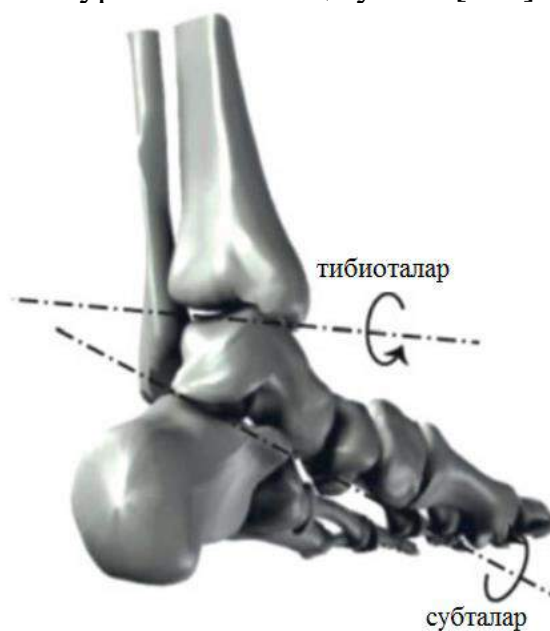
Роботтарды жобалау және жасау үшін тобық буынының биомеханикасын білу өте маңызды. Ол жүру секілді қозғалыс функциясы нашарлаған науқастарға арналған тиімді және олаға зақым келтірмейтін оңалту роботтарының дизайнын дайындауға қажетті робот параметрлерін таңдауға көмектеседі. Аяқ – адамның тірек-қимыл аппаратының негізі бөлігі болып табылады және олар әртүрлі қимыл-қозғалыс ерекшеліктеріне орай бір мезетте қатаң және икемді құрылымдарға ие бола алады. Тобық буынының анатомиялық құрылымы өте күрделі және келесі бөліктерден: 4 сүйектен, 7 бұлшықеттен, 9 сіңірден, және байламдардың 4 тобынан құралған.

2.1 суретте көрсетілгендей, тибиоталар және субталар буындарының комбинациясы тобық буынындағы қозғалысты жеңілдетеді [149]. Тибиоталар буыны тибия мен фибула және талус сүйегінің жоғарғы беті арасында байланыс түзеді, ал субталар буыны талус сүйегінің төменгі бөлігі мен өкше сүйегінің жоғарғы беті арасында байланыс түзеді.

2.2 суретте тобық буынының тибиоталар мен субталар буындарына қатысты айналу осьтері бейнеленген.



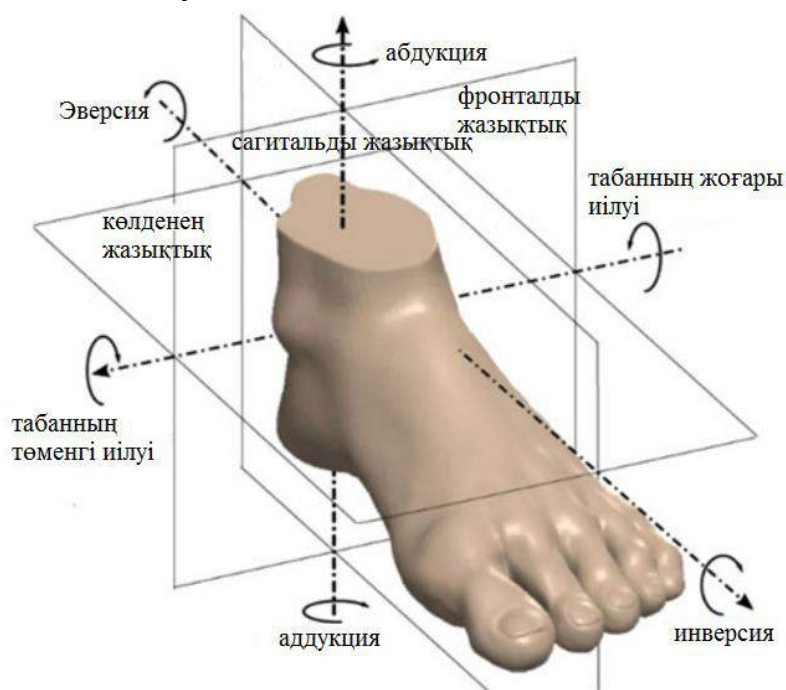
Сурет 2.1. Тобық буыны [150]



Сурет 2.2 Тобық буының айналу осьтері [150]

Айналу осьтері мен жазықтықтары тобын буынының кеңістіктік конфигурациясын сипаттау үшін қолданылады. Аяқты сагиттальды, фронтальды және көлденең жазықтықтарға бөліп қарастыруға болады (2.3 сурет). Бұл жазықтықтар буын қозғалысын (осы жазықтықтарға параллель) жобалау үшін қолданылатын өзара перпендикуляр үш айналу осьтерін табуға мүмкіндік береді [151]. Осьтерді де, жазықтықтарды да қолдана отырып, буындардағы қозғалыстарды келесідей жіктеуге болады: (а) табанның сыртқа және ішке қарай иілуі – олар сагиттальды және көлденең жазықтықтардың өзара қиылысуынан пайда болған осьтің айналасында, сагитальды жазықтықтағы қозғалыстармен сипатталады. Табанның сыртқа қарай иілуі дегеніміз бұл – табанның жоғары, яғни жіліншікке қарай сирақ пен табан арасындағы бұрыш 90 градустан аз болатындай бүгілуімен жүзеге асырылатын қозғалыс түрі. Оған қарсы қозғалыс - табан сирақтан 90 градустан көп бұрыш жасай төмен қарай бүгіледі; (ә) эверсиялық және инверсиялық қозғалыстар – фронтальды жазықтыққа параллель

қозғалыстар. Эверсиялық қозғалыс – бұл табанның латериалды иілуі, ал инверсия – медиальды иілуі болып табылады; (б) абдукция және аддукция – олар көлденең жазықтыққа параллель өз осінің айналасындағы өкшенің айналмалы қозғалыстарын білдіреді. Абдукция – бұл алдыңғы аяқтың бүйірлік ығысуы, ал аддукция – медиальды ығысуы [152].



Сурет 2.3. Тобық буын жазықтықтары және қозғалысы

Супинация және пронация бұл – жоғарыда аталған үш қозғалыстың комбинациясынан тұратын күрделі қозғалыстар. Супинация инверсиялық қозғалыс, табанның төмен қарай иілуі және аддукциялық қозғалысты біріктіреді. Ал пронация эверсиялық, табанның жоғары қарай иілуі және абдукциялық қозғалыстардың комбинациясы болып табылады (сурет 2.3) [153]. Тобық буынының қозғалғыштығын зерттеу ең алдымен тек қозғалыс ауқымын (ҚА) анықтап алудан басталады [154]. 2.1 кесте әрбір жоғарыда аталған қозғалыстар үшін ҚА шамасы градуспен көрсетілген.

Кесте 2.1. Тобық буыны қозғалысы үшін ҚА шамасы (градуспен) [154]

Ось (XYZ)	Қозғалыс түрі	Қозғалыс ауқымы (ҚА)
көлденең	Табанның төмен қарай иілуі	37,6-45,8
	Табанның жоғары қарай иілуі	20,3-29,8
бүйірлік	Инверсия	14,5-22
	Эверсия	10-17
вертикаль	Аддукция	22-36
	Абдукция	15,4-25,4



## 2.2 Тобық экзоскелетінің кинематикасы

Тобық буын экзоскелеттерін зерттеу кинематикалық және статикалық бағалауды қамтитын қос тәсілді ұсынады. Бұл талдаулар экзоскелеттің механикалық динамикасын және әртүрлі әрекеттер мен пайдаланушылардың өзара әрекеттесуіндегі мүмкіндіктерін түсіну үшін өте маңызды.

Кинематикалық зерттеу күштердің әсерінсіз механизмнің жеке компоненттерінің орналасуы, жылдамдығы және үдеуі сияқты параметрлерді қамтитын қозғалысты жүйелі зерттеуге жатады. Тобық буын экзоскелеттері контекстінде кинематикалық талдау жүру немесе жүгіру сияқты әрекеттер кезінде буынның қозғалыс көлемін және бұрыштық параметрлерін анықтауға қызмет етеді. Бірлескен қозғалыс ауқымы (БҚА) кинематикалық талдаудың бұл аспектісі экзоскелет арқылы қол жеткізуге болатын буындардың максималды және минималды бұрыштарын сандық бағалауды қамтиды. БҚА түсіндірмесі табиғи қозғалыстардың біркелкі орындалуын қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Жүрісті бағалау кезінде экзоскелеттің пайдаланушының жүру динамикасына әсері зерттеледі. Қадамның ұзындығын, жиілігін және симметриясын қамтитын параметрлер экзоскелеттің асқынусыз жүрісті оңтайлы жақсартатынына көз жеткізу үшін бағаланады. Буын кинематикасы кинематиканы талдау қозғалыс кезінде буындардың бұрыштық жылдамдықтары мен үдеулерін түсінуге тереңдей түседі. Мұндай идеялар серуендеу кезінде пайдаланушының биомеханикасына сәйкес келетін экзоскелеттің дизайнын жақсартуға ықпал етеді. Жұмыс кеңістігін талдау бұл зерттеу экзоскелет пайдаланушыға механикалық кедергілер мен ыңғайсыздықтарсыз үздіксіз жұмыс істейтін жұмыс аймағын анықтауға бағытталған.

Статикалық талдау экзоскелеттің тыныштықтағы немесе сыртқы жүктемелердегі механикалық әрекетін бағалауды қамтиды. Бұл тексеру экзоскелеттің пайдалану кезінде пайда болатын күштер мен моменттерге төзімділігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Вольтты талдау әртүрлі жүктеме сценарийлерінде экзоскелет құрылымындағы кернеулердің таралуын бағалау құрылымның бұзылуына немесе пайдаланушының ыңғайсыздығына әкелуі мүмкін ықтимал осалдықтарды анықтауды жеңілдетеді. Экзоскелет конструкцияны деформацияламай немесе бұзбай көтере алатын жүктеменің жоғарғы шегін анықтау пайдаланушының қауіпсіздігі үшін міндетті болып табылады. Экзоскелеттің белсенділік кезіндегі тұрақтылығын зерттеу, әсіресе тұру және жүру, қосымша салмақтан немесе құрылымның нюанстарынан туындайтын тепе-теңдік проблемаларын болдырмайды. Материалды таңдау беріктік, икемділік және салмақ сияқты сипаттамалары бар материалды оңтайлы таңдау экзоскелеттің жалпы өнімділігі мен беріктігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды.

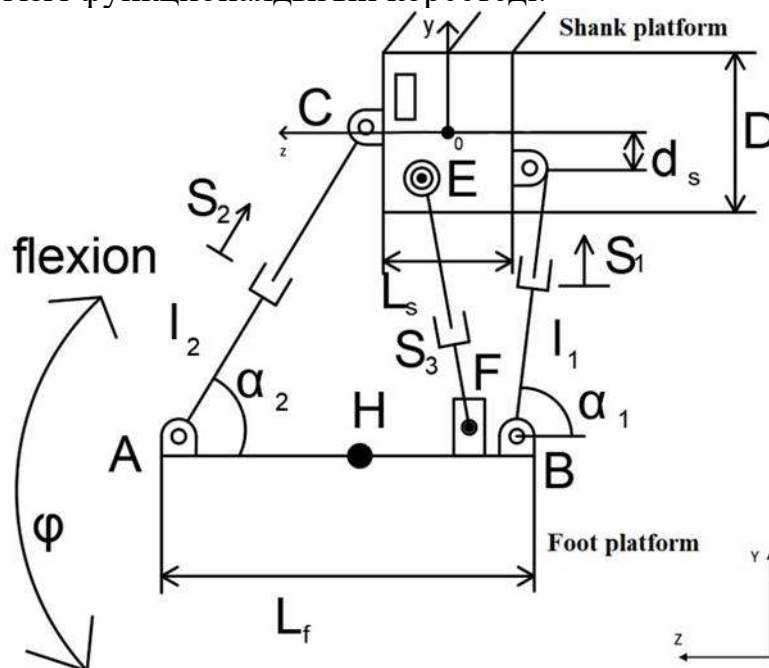
Кинематикалық және статикалық талдауды біріктіру қозғалыс кезінде де, тыныштық жағдайында да тобық буын экзоскелетінің мінез-құлқын тұтас түсінумен аяқталады, осылайша оның ұтқырлықты арттырудың және пайдаланушыны қолдаудың негізгі мақсатына сәйкестігін растайды.

Бұл әрекеттің мәні физиотерапиялық жаттығулардың қарапайым қажеттіліктерін қанағаттандыратын құрылғы жасау болып табылады.

Ұсынылған дизайн экономикалық бір аяқты механизм арқылы аяқтың тобық буынындағы сызықтық электр жетегін қамтитын жаңа парадигма болып табылады. Физиотерапиялық процедуралар кезінде тегіс қозғалысты қамтамасыз ету үшін арнайы жасалған бұл дизайнның ерекше артықшылығы оның күтілетін жеңіл және ыңғайлы сипатында, пайдаланушыға жайлылық пен шексіз ұтқырлықты қамтамасыз етеді.

Негізгі мәселе - қажетті қозғалыстардың белгіленген ауқымын ұстана отырып, жеткілікті момент пен жылдам реакция жасау арқылы пайдаланушының қозғалысын жеңілдету.

2.4 суреттегі иллюстрациялық механизм төменгі аяқ пен тобық арасындағы сфералық буындармен біріктірілген төрт параллель сызықты электр жетегін пайдаланды. Сызықтық электр жетектеріндегі трансляциялық қозғалыстың бұл оркестрі табанмен пен тобық буынының айналуын тудырады, осылайша механизмнің негізгі функционалдығын көрсетеді.



Сурет 2.4. Тобық буын экзоскелетінің кинематикалық дизайны

Аяқтың (A) және төменгі аяқтың (B) арасындағы бекітпелерден тұратын пассивті тобық экзоскелеті (L4) шарлы топса элементін қолдана отырып, адамның табан тірегі ілмектер арқылы бір-бірімен байланысқан және алдыңғы жағына бекітілген екі бөліктен тұрады. (L1) (L3) тобықтың артқы және алдыңғы жағына бекітілген электрлік сызықтық жетек.

E және F байланыстары тірек буыны шар топсасы-білік пен тірек платформасы арасындағы бағыттаушы буын.

Электрлік сызықтық жетек - бұл экзоскелетпен біріктірілген білек қозғалысын қамтамасыз ететін екі өзара байланысты қаңқа компоненттері арасындағы синхрондалған қозғалысты басқаруға арналған жүйе.

Тобық экзоскелетінің еркіндік дәрежесі (DOF) оның қозғалуы мүмкін тәуелсіз бағыттардың бірі болып табылады.

Тобық экзоскелетіне тән еркіндік дәрежесі (DOF) экзоскелет қозғалыс мүмкіндіктерін көрсететін автономды өлшемді білдіреді. Дәстүр бойынша, тобық экзоскелеттері аяқтың буындарына сәйкес келетін белгілі бір иілу дәрежесін қамтамасыз етуге ерекше назар аудара отырып жасалды, атап айтқанда, плантар мен дорсифлексия қозғалыстары.

Тобық экзоскелетін басқаратын кеңістіктік механизм белгілі бір қозғалыс ауқымына жету үшін синергетикалық жұмыс істейтін қатты және икемді компоненттердің жиынтығын қамтиды. Әдетте бұл механизмде пайдаланушының төменгі аяғына бекітілген Аяқ тірегі және төменгі аяққа бекітілген қатты жақтау болады. Тірек тақтайшасы рамамен топсалы қосылыс арқылы әрекеттеседі, осылайша сагиттальды жазықтықтағы плантарлы иілу және дорсальды иілу қозғалыстарына сәйкес айналуы қамтамасыз етеді.

Сомов-Малышев формуласына сәйкес кеңістіктік кинематикалық құрылым үшін механизмнің  $W$  еркіндік дәрежелерінің саны келесідей анықталады:

$$W = 6 \cdot (n - 1) - 5 \cdot p_5 = 6 \cdot 8 - 5 \cdot 9 = 3$$

Егер механизмді құрайтын буындардың қозғалысына қосымша шарттар қойылмаса (барлық айналу жұптарының осьтері параллель, бір нүктеде қиылысқан және т.б.), бұл формуланы қолдануға болады. Бұл қосымша талаптар механизмнің қозғалу сипатын өзгертеді және сәйкесінше оның құрылымдық формуласының пішінін өзгертеді.

Сфералық механизмде барлық үш кинематикалық тізбектер бірдей қосылыстарға ие және барлық жұптардың осьтері бір нүктеде қиылысады. Ұсынылған дизайнда үш қуат бұрандасы және үш кинематикалық өзара бұрандалар бар. Бұл нөлдік параметрі бар бұрандалар.

Еркіндік дәрежелерінің санын анықтау үшін біз Добровольский формуласын қолданамыз:

$$W = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot (8 - 1) - 2 \cdot 9 = 3$$

Егер соңғы айналмалы жұптар сфералық жұптармен ауыстырылса, онда бұл жағдайда әр тізбек бір байланыс орнатады. Еркіндік дәрежелерінің саны сомов-Малышев формуласы бойынша анықталады:

$$W = 6 \cdot (n - 1) - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3 = 6 \cdot (8 - 1) - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 3 = 3$$

Суреттегі механизмнің дизайны тиісінше табан мен тобық арасындағы сфералық қосылыстарға параллель орнатылған төрт сызықты электрлік жетектерімен жұмыс істейді.

Сызықты электр жетектерінің алға қозғалысы тобық пен табан буындарының айналуын қамтамасыз етеді.

Мұндай механизмдер әр кинематикалық тізбекте үш жетектен тұрады және екі алға және бір айналмалы қозғалыс жасай алады.

Еркіндік дәрежелерінің санын анықтау үшін біз тегіс механизм үшін П. Л. Чебышевтің құрылымдық формуласын қолданамыз:

$$W = 3 \times (n - 1) - 2 \times p_5 - p_4 \quad (2.1)$$

(1) теңдеуге сәйкес жазықтық механизмінің еркіндік дәрежелерінің саны:

$n$  – сілтемелер саны.

$p_5$  – бесінші класс жұптарының саны (бір қозғалыстағы жұптар).

$p_4$  – төртінші класс жұптарының саны (екі жылжымалы жұп).

(1) теңдеуге сәйкес жазықтық механизмінің еркіндік дәрежелерінің саны:

$$W = 3 \times (8 - 1) - 2 \times 9 = 3$$

Суреттегі тегіс механизм үшін еркіндік дәрежелерінің санын есептеп Сомов – Малышев формуласын қолдану:

$$W = 6 \times (n - 1) - p_5 - 4 \times p_4 - 3 \times p_3 - 2 \times p_2 - p_1 \quad (2.2)$$

$p_i$  –  $(6 - i)$  қозғалғыштық дәрежесі бар ( $i = 1, \dots, 5$ ). класс кинематикалық жұптарының саны.

Еркіндік дәрежелерінің саны:

$$W = 6 \times (8 - 1) - 5 \times 9 = -3$$

Балтырға бекітілген платформа  $Oxuz$  жақтауы бар  $A$  санақ жүйесімен көрсетілген, ал табанға бекітілген платформа  $Ox'y'z'$  жақтауы бар  $B$  санақ жүйесімен 2.5 суретте көрсетілгендей кескінделген берілген.

Табанға бекітілген платформаның балтырға бекітілген платформаға қатысты салыстырмалы қозғалысын  ${}^{AB}R = R_z(\alpha)R_y(\varphi)R_x(\theta)$  түрінде өрнектеуге болады, мұндағы  $\varphi$  – dorsiflexion/plantarflexion,  $\theta$  – inversion/eversion, ал  $\alpha$  – abduction/adduction. Салыстырмалы қозғалысты қарастыру кезінде мына үш жағдайға назар аудару керек: (а) барлық жетектер әрдайым кернеуде болады, (ә) жетектерді платформаға бекіту нүктелері сфералық топсалар ретінде әрекет етеді, ал (в) жетектер аз ғана осьтік деформациясы бар призмалық топсалар ретінде қарастырылады.

2.5 суреттегі экзоскелет дизайнындағы байланыстырушы шешімдердің кинематикасына сүйене отырып, буындардың артикуляциялық бұрыштарын келесідей көрсетуге болады:

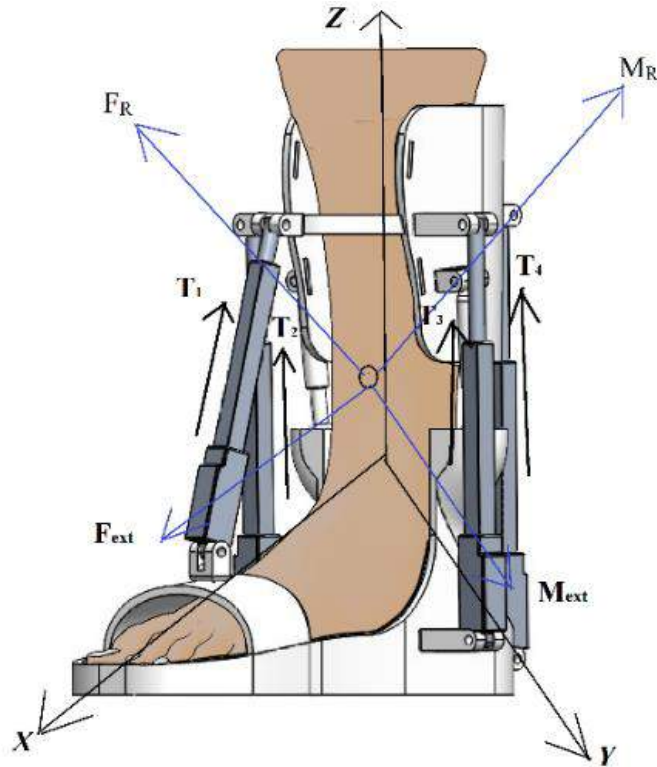
Балтырға бекітілген платформаға қатысты аяққа бекітілген платформаның салыстырмалы қозғалысы  ${}^{AB}R = R_z(\alpha)R_y(\varphi)R_x(\theta)$ , түрінде көрсетілуі мүмкін, мұндағы  $\varphi$  – dorsiflexion мен plantarflexion,  $\theta$  – inversion мен eversion, ал  $\alpha$  – abduction мен adduction. Салыстырмалы қозғалысты қарастырған кезде келесі үш тармаққа назар аудару керек: (а) барлық жетектер әрқашан кернеуде болады, (б) жетектерді платформаға бекіту нүктелері сфералық топсалар ретінде әрекет етеді және (с) жетектер аз осьтік деформациясы бар призмалық топсалар ретінде

қарастырылады. Білекке бекітілген платформада дискілер орналасқан нүктелер жалпы  $A_{a_i} = (a_{ix} a_{iy} a_{iz})^T$  ретінде белгіленуі мүмкін, ал аяққа бекітілген платформадағы нүктелер  $B_{a_i} = (b_{ix} b_{iy} b_{iz})^T$  ретінде белгіленуі мүмкін.

Сурет 2.5 әр жетек үшін түйіннің векторлық тұйықталу теңдеуін келесідей жазуға болады.

$$A_{l_i} = {}^{AB}R^B b_i - {}^A a_i \quad (2.3)$$

Оңалту жаттығулары пациенттің ең аз күйзеліске немесе ауырсынуға ұшырауы үшін біркелкі, баяу және бақыланатын қозғалыстарды орындауды талап етеді. Бұл жаттығулар шектеулі жылдамдықпен орындалатындықтан, талдау кезінде инерциялық әсерлер мен қозғалыс динамикасын елемеуге болады. Осылайша, роботтың тиімділігін бағалау үшін статикалық талдауды қолдануға болады.



Сурет 2.5. Тобық буын экзоскелетінің статикалық моделі

Әр жетектегі кернеу  $T_i = -T_i p_i$  ретінде бірлік векторының көбейтіндісі және оның қарқындылығы ретінде анықталады, ал  $T$  векторы мұнда  $(T_1 T_2 T_3 T_4)^T$ .

$$P^T \cdot T - F_R = F_{ext} \quad (2.4)$$

және

$$Q^T \cdot T - M_R = M_{ext} \quad (2.5)$$

where  $P^T = [p_1 p_2 p_3 p_4]$  and  $Q^T = [b_1 \times p_1 \dots b_4 \times p_4]$ .

Жоғарыда айтылғандай, тобықтың кинематикалық көрінісі сфералық болып саналады, сонымен қатар айналмалы қозғалыс тобық қозғалыс диапазонында шектелмейді,  $MR$  реакция моменті нөлдік вектор болып табылады. Сол себепті толық тепе теңдік теңдеуін жазуға болады:

$$\begin{bmatrix} P^T & -I_3 \\ Q^T & 0_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T \\ F_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

### 2.3 Тобық буын экзоскелетінің математикалық моделі

Белгілі бір күш қолдану үшін сызықтық жетекті қозғалысқа келтіру үшін қажетті айналу моментінің шамасы (2.7) теңдеуде көрсетілген.

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + T_C \quad (2.7)$$

мұндағы  $F$  – әрекет ететін күш шамасы,  $d_m$  – бұранданың сыртқы диаметрі,  $l$  – сызықтық жетектің ұзындығы,  $f$  – жетекші бұранда мен материал арасындағы үйкеліс коэффициенті,  $\alpha$  – бұрылу бұрышы.

(2.8) теңдеумен анықталатын айналу моментінің шамасын ауырлық күшіне қарсы күш бағытымен есептейді, басқаша айтқанда тобықты көтеру үшін қажетті момент. Екінші жағынан, тобықты төмен түсіруге арналған момент (2.8) теңдеумен анықталады. Тежелу қажетті момент минусқа тең болған кезде де орын алуы мүмкін.

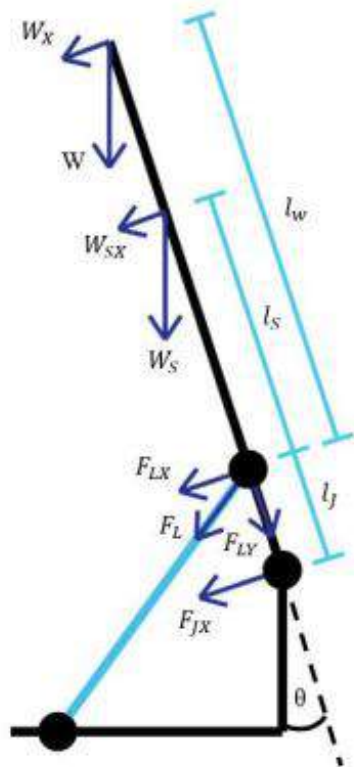
$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{-l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m + f l \sec \alpha} \right) + T_C \quad (2.8)$$

Әдетте механизмде тобықты көтеру үшін табанның ұшына немесе ортасына бекітілген қысқыштар деп аталатын қосымша компонент қолданылады.

Сызықтық жетек айналмалы қозғалысты сызықтық қозғалысқа айналдырады; сондықтан қозғалтқыштың қажетті моменті әр сызықтық жетекке әсер ететін күш мөлшеріне байланысты болады.

Сызықтық жетек үшін таңдалған қозғалтқыш түрі – тұрақты қозғалтқыш. Қозғалтқыштың салмағы экзоскелеттің жүктемесіне айтарлықтай әсер ететінін ескере отырып, ықшам және жеңіл қозғалтқышқа артықшылық беріледі және оны ескеру қажет. Алайда, мұндай техникалық сипаттамалары бар қозғалтқышты, әсіресе ықшам қозғалтқышты нарықта табу қиын. Сондықтан жылдамдық пен момент арасындағы аспектілердің бірін алып тастау қажет және бұл жұмыста жылдамдыққа қарағанда айналу моментіне басымдық беріледі.

Тобық буыны бос денесінің диаграммасы 2.6 суретте көрсетілген. Күш табан буынының  $\theta$  бұрышы  $8,18^\circ$  болған кезде есептеледі.



Сурет 2.6 Тобық буынының бос дене диаграммасы

$F$  табу үшін қажетті айнымалылар төменде келтірілген:  $W$  – жоғарғы дене бөлігі, бір аяқтың және LA тізе салмағы,  $W_s$  – экзоскелеттің жақтауынан басқа, біліктің салмағы,  $F_l$  – LM тобыққа төтеп беретін күш мөлшері,  $F_j$  – тобық буынына әсер ететін күш шамасы,  $l_w$  –  $W$  иық ұзындығы,  $l_j$  –  $F_j$  иық ұзындығы,  $l_s$  –  $W_s$  иық ұзындығы.

$$0 = W_x \times l_w - F_{jx} \times l_j + W_{sx} \times l_s \quad (2.9)$$

$$0 = W_x + W_{sx} + F_{LMx} + F_{jx} \quad (2.10)$$

$$F_{LM} = \frac{F_{LMx}}{\sin\alpha} \quad (2.11)$$

Моменттер мен күштердің тепе-теңдік әдісін (3) және (4) қолдана отырып,  $\alpha = 55,86^\circ$  (сызықтық жетек пен білік арасындағы бұрыш) кезінде сызықтық білекке әсер ететін күшті (5) теңдеумен есептеуге болады және ол 358,505 Н құрайды.

Осылайша, білектің сызықты жетегі үшін жүкті көтеру және түсіру үшін қажетті момент сәйкесінше 0,953 Нм және -0,043 Нм құрайды.

Серпу фазасы кезінде актуаторлар аяқтың төменгі жартысының инерциясына төтеп беруі керек, бұл негізінен тізе буынының жетегіне келеді. Инерцияны есептеу үшін теңдеу қарапайым маятниктің инерциясына негізделген:

$$I = m_{sf} l_{sf}^2 \quad (2.12)$$

мұндағы  $m_{sf}$  – жіліншік пен табан массасы,  $l_{sf}$  – жіліншік пен табанның ауырлық центрі. Ауырлық центрін (7) теңдеудің көмегімен есептеуге болады.

$$l_{sf} = \frac{m_b \times l_{sg} + 0,0145 \times l_{fg}}{0,061 \times m_b} \quad (2.13)$$

(6) теңдеуді дененің жалпы массасы мен биіктігі тұрғысынан алмастыра отырып, инерция теңдеуін алуға болады (8).

$$I = m_b h_b^2 (1,51 \times 10^{-3}) \quad (2.14)$$

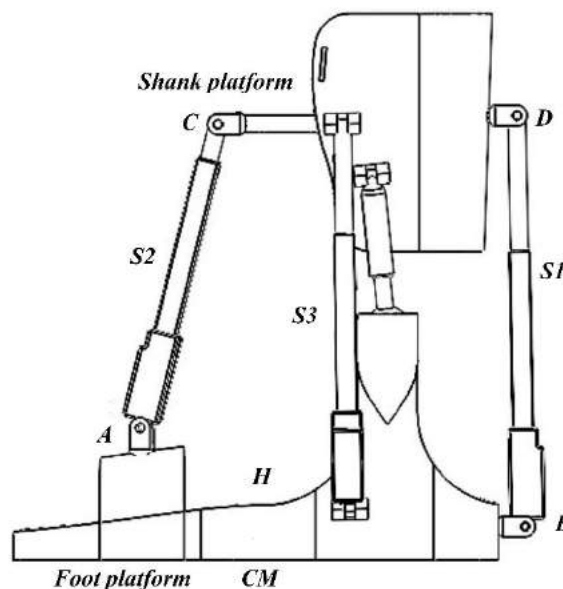
## 2.4 Тобық буын экзоскелетін компьютерлік модельдеу

SolidWorks Motion көмегімен тобық экзоскелетін модельдеу бірнеше қадамдарды қамтиды.

SolidWorks — қозғалысты талдау мүмкіндіктерін ұсынатын қуатты автоматтандырылған дизайн (CAD) бағдарламалық құралы.

SolidWorks Motion көмегімен тобық экзоскелетін модельдеу бірнеше қадамдарды қамтиды. SolidWorks-та қозғалысты талдау мүмкіндіктерін ұсынатын қуатты автоматтандырылған дизайн (CAD) бағдарламалық құралы.

2.7 суретте көрсетілген экзоскелет дизайнындағы байланыстырушы шешімдердің кинематикасына сүйене отырып, буындардың артикуляциялық бұрыштарын келесідей көрсетуге болады:



Сурет 2.7 CAD-суреттегі тобық қозғалысын қолдайтын экзоскелеттің схемасы

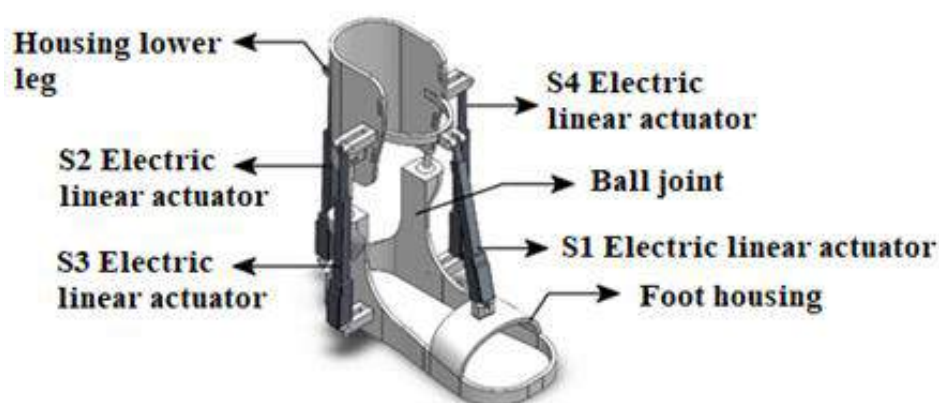


Кесте 2.2 Тобық экзоскелетінің конструктивті және пайдалану параметрлері.

Өлшемі	SP (mm)	FP (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>3</sub> (mm)	L <sub>4</sub> (mm)
	200	265	243	226	181	93

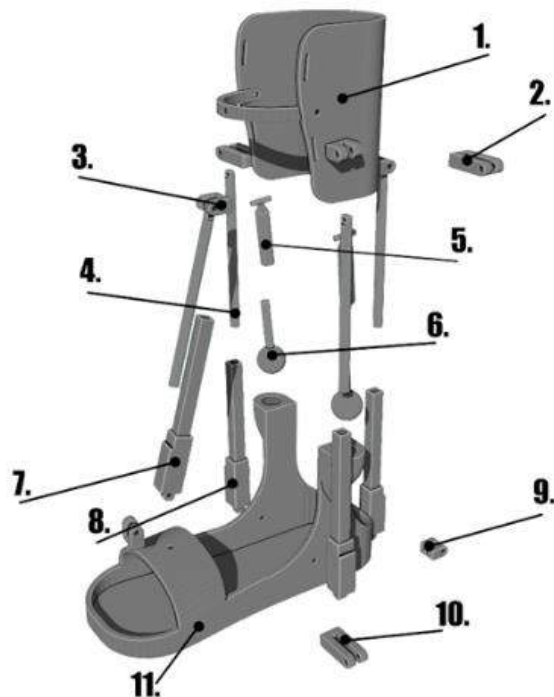
Бұл экзоскелет науқастың аяғына сырттан бекітілген кезде ортоз ретінде қолданыла алады. Аяқ киім үлгісіне арналған жақтау аяқ киімді киюге болатындай етіп жасалған. Сілтемелер қосылатын төрт буынды қосылыс экзоскелет бөліктері арасындағы соқтығысуды болдырмау үшін екі түрлі жазықтықта болатындай етіп жасалған.

Суретт шығу моментінің коэффициентін арттыру үшін шар буынының механизмімен жабдықталған сызықтық жетекпен қозғалатын экзоскелет моделінің АЖЖ жобасы көрсетілген.



Сурет 2.8. Сызықтық жетекпен қозғалатын экзоскелет моделінің АЖЖ жобасы

Электрлік сызықтық жетекпен жабдықталған Almaty тобық буынына арналған экзоскелет ұтқырлықты арттыруға және тобық буынын қолдауды қамтамасыз етуге арналған тағылатын құрылғы болып табылады. Бұл экзоскелет тобық пен жіліншіктің айналасына арнайы жасалған және ол күш жасау үшін сызықтық қозғалысты пайдаланатын моторлы механизм болып табылатын электрлік сызықтық жетекпен жұмыс істейді. Күш қозғалыс кезінде пайдаланушының тобығын қолдау үшін қолданылады, осылайша қозғалғыштығын арттырады және буынға жүктемені азайтады.



Сурет 2.9. Almaty Ankle Exoskeleton

1 - корпусның төменгі тірегі; 2 - артқы жетекті бекіту; 3 - алдыңғы жетекті бекіту; 4 - Электрлік сызықтық жетек (S3); 5 - шарлы топса; 6 - шарлы топса; 7 - электрлік сызықтық жетек (S1); 8 - Электрлік сызықтық жетек (S2); 9 - Бекіту оң жетек; 10 - сол жақ жетекті бекіту; 11 - аяқ корпусы.

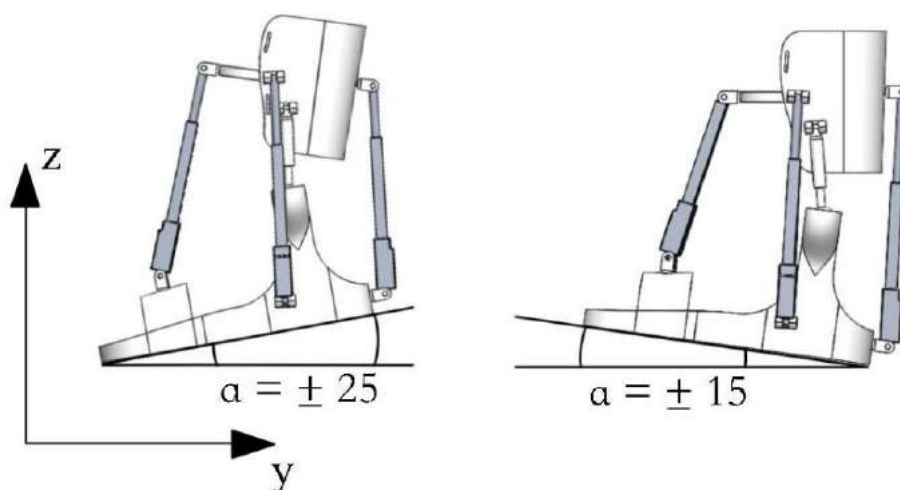
Төрт электрлік сызықтық жетегі бар тобық экзоскелетінің прототипі келесі компоненттерден тұрады:

- Корпустың төменгі тірегі: бұл компонент құрылымдық қолдауды қамтамасыз етеді және экзоскелеттік компоненттерден тұрады.
- Артқы жетекті бекіту: артқы жетекті бекіту экзоскелеттің артқы жағын бекіту нүктесі ретінде қызмет етеді, тұрақтылық пен туралауды қамтамасыз етеді.
- Алдыңғы жетекті бекітпелер: алдыңғы жетекті бекітпелер экзоскелеттің алдыңғы бөлігін бекітеді және орналастырады, тұрақтылық пен туралауға ықпал етеді.
- Электрлік сызықтық жетек (S1): алдыңғы жағында орналасқан бұл электрлік сызықтық жетек тобықтың белгілі бір қозғалысын жеңілдету немесе кедергі жасау үшін сызықтық қозғалыс жасайды.
- Электрлік сызықтық жетек (S2): артқы жағында орналасқан Электрлік сызықтық жетек тобық қозғалыстарының қозғалысын қамтамасыз етеді.
- Электрлік сызықтық жетек (S3): оң жақта орналасқан бұл электрлік сызықтық жетек тобықтың белгілі бір қозғалысымен байланысты және көмекке немесе қарсылыққа ықпал етеді.
- Электрлік сызықтық жетек (S4): сол жақта орналасқан бұл электрлік сызықтық жетек тобық қозғалысын басқаруға жауап береді.
- Оң жақ жетекті орнату: бұл компонент экзоскелеттің оң жақ жетегінің компоненттерін бекітуге арналған бекіту механизміне жатады.

- Сол жақ жетекті бекіту: сол сияқты, бұл компонент экзоскелеттің сол жақ жетегінің компоненттерін бекіту механизмі болып табылады.
- Аяқ корпусы: бұл компонент экзоскелет ішіндегі пайдаланушының табанына қолдау мен құрылым береді.

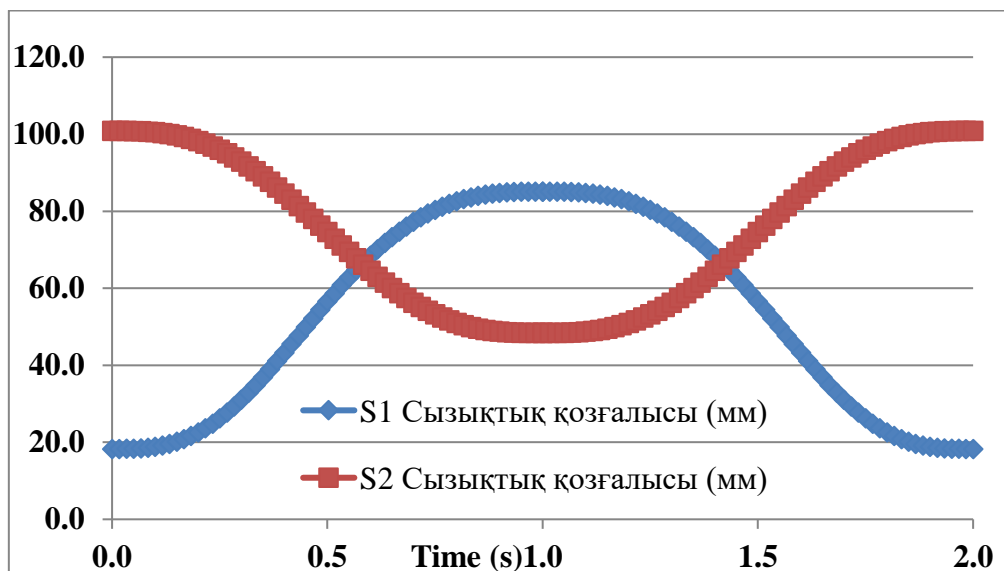
## 2.5 Тобық буын экзоскелетін виртуалды зерттеу

3D модельдеу және модельдеу есептеулері виртуалды ортада Solidworks Simulation бағдарламалық жасақтамасы мен Motion Simulation қондырмасы арқылы орындалды. Solidworks модельдеуімен тобық қозғалысын тудыратын электрлік сызықтық жетек енгізіледі. 2.10 суретте SolidWorks модельдеу арқылы алынған dorsiflexion – plantarflexion иілу көрсетілген. Dorsiflexion артқы иілу бұл қозғалыстағы қозғалыс ауқымы 20 градусқа дейін, ал имитациялық иілу 15 градусқа дейін болады. Plantarflexion иілу кезіндегі қозғалыс диапазоны 40-тан 50 градусқа дейін, ал модельдеу кезінде имитациялық иілу кезінде 20 градусқа дейін.



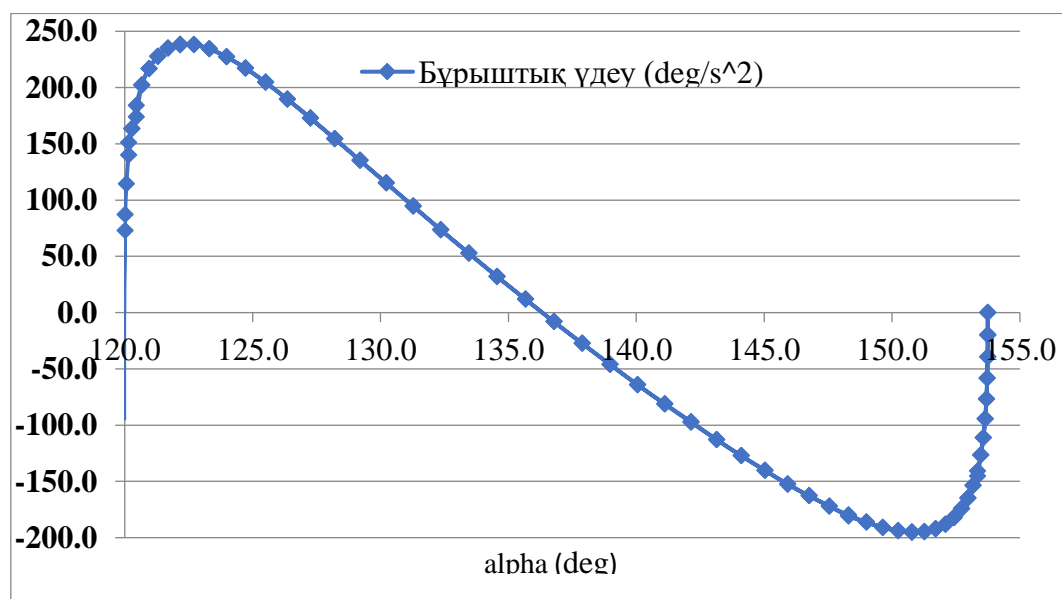
Сурет 2.10. dorsiflexion – plantarflexion арқылы имитацияланған қозғалыстың суреті.

Сурет 2.11-де платформаның сызықтық қозғалысының компоненттері көрсетілген. Графикке сүйенсек, барлық бағыттағы қозғалыстардың максималды мәндері  $100 \text{ градус/с}^2$  болатын шыңдары бар. X компоненті үшін және басқа компоненттер үшін  $85 \text{ градус/с}^2$  – ден аз.



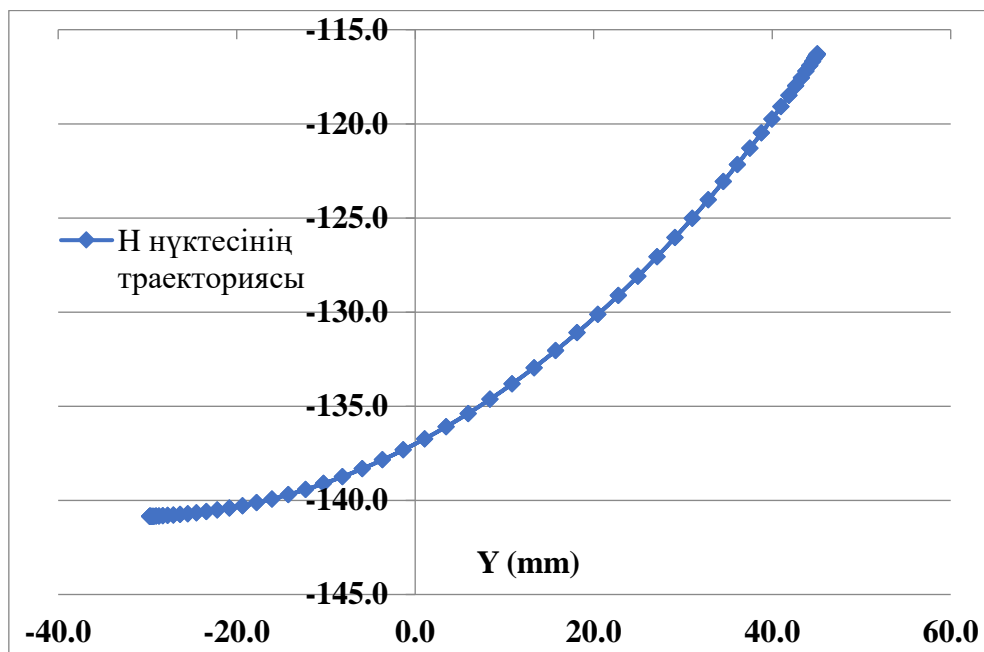
Сурет 2.11. имитациялық сызықтық жетектердің қозғалысы тұрғысынан

Бұрышқа қатысты бұрыштық үдеу 2.12 суретте көрсетілген. 240 градус/с<sup>2</sup>-ге тең үдеудің ең үлкен мәні жоғарғы позицияға жақын, ал 150 градус/с<sup>2</sup>-ге тең басқа шын төменгі позицияға жақын.



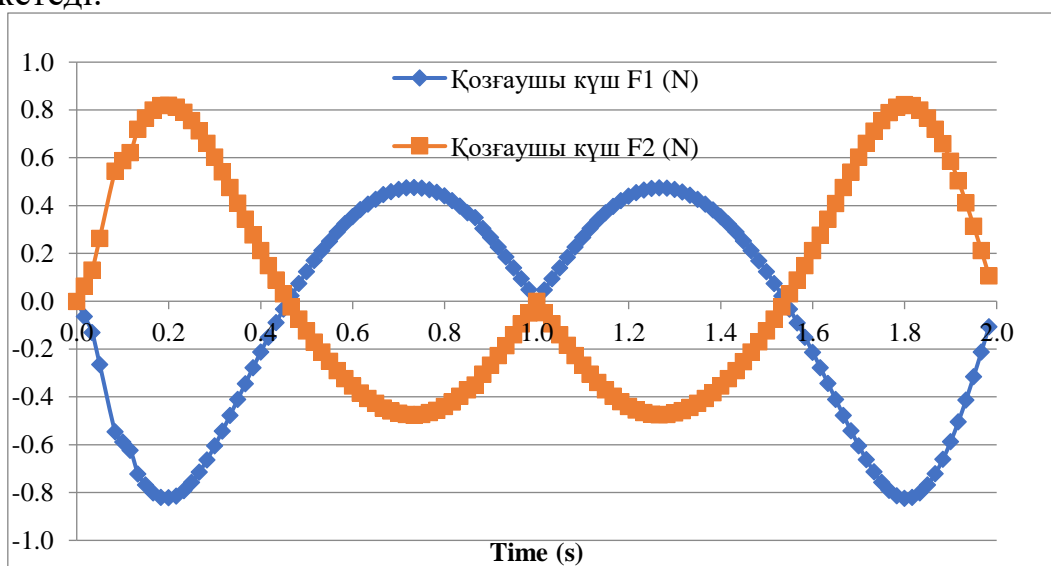
Сурет 2.12. Имитациялық қозғалыстың  $\alpha$  платформаның бұрыштық үдеу

Сурет 2.13-те платформадағы орталық нүкте Н нүктесінің траекториясын көрсетеді. Бұл нүктенің Z осі бойынша қозғалыстары 25,5 мм, Y осі бойынша қозғалыстар 74,6 мм жетеді.



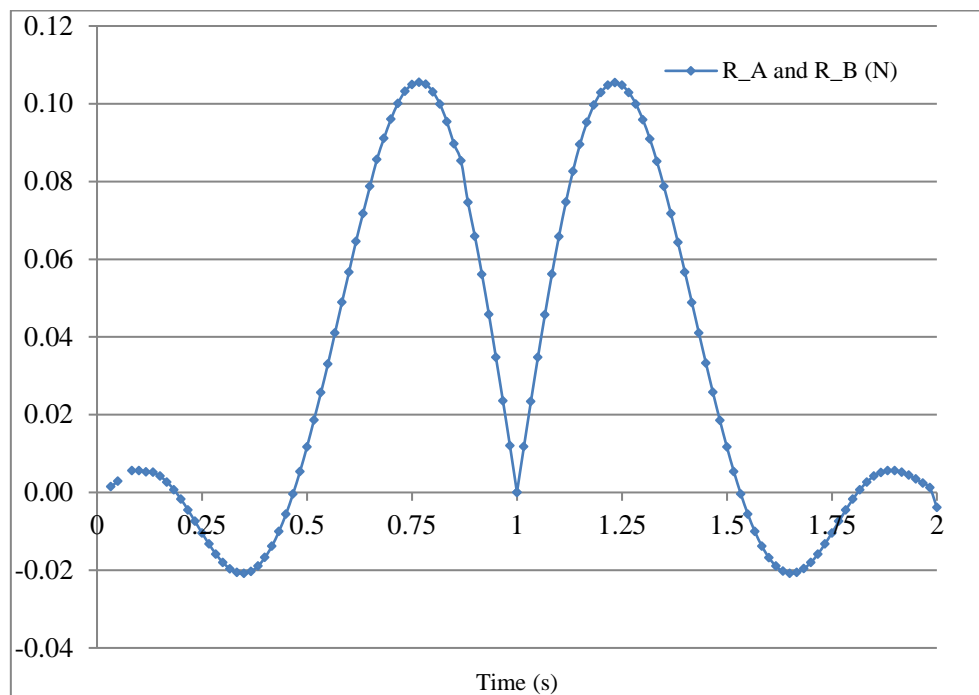
Сурет 2.13. платформасының Н нүктесінің траекториясы тұрғысынан

Сурет 2.14 сызықтық жетектердің жетек күші көрсетілген:  $F1$ -аяқтың алдыңғы жағындағы сызықтық жетектің күші,  $F2$ -аяқтың артқы жағындағы сызықтық жетектің күші, сәйкесінше.  $F1$  және  $F2$  күштерін есептеу нәтижелері 0,8 Н жетеді.



Сурет 2.14. сызықтық жетектердің қозғаушы күштері

Сурет 2.15-те  $F1$  және  $F2$  сызықтық жетектің А және В түйісу нүктелеріндегі реакция күші бейнеленген.



Сурет 2.15 сызықтық жетектің А және В түйісу нүктелеріндегі реакция күші тұрғысынан

SolidWorks-те модельдеу арқылы алынған dorsiflexion – plantarflexion буынының бүгілуін сипаттайтын қозғалысқа қатысты кейбір мәндерді берілді.

Dorsiflexion қозғалыс ауқымы:

- Бастапқы бұрыш: dorsiflexion қозғалыс ауқымы 0 градус бұрыштан басталады.
- Максималды бұрыш: ол максимум 20 градусқа жетеді.
- Имитация мәні: dorsiflexion имитация мәні 15 градусқа дейін.

Бұл модельдеу немесе талдау кезінде буын бейтарап қалыпта (0 градус) басталып, артқы бағытта 20 градусқа дейін бүгіліп, белгілі бір мақсат үшін 15 градус бұрышқа еліктеуге немесе жетуге ұмтылатынын көрсетеді.

Plantarflexion қозғалыс ауқымы:

- Бастапқы бұрыш: plantarflexion иілудің қозғалыс ауқымы 40 градустан басталады.
- Максималды бұрыш: 50 градусқа дейін кеңейеді.
- Модельдеу мәні: модельдеу кезінде табанның бүгілуі 20 градусқа жетеді.

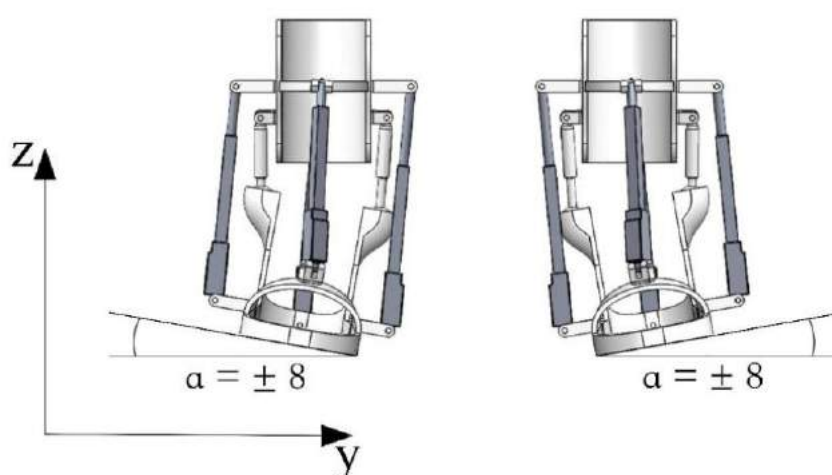
Бұл модельдеуде буынның plantarflexion бүгілуі 40-тан 20 градусқа дейін болатындығын көрсетеді. Бұл диапазон қазірдің өзінде физиологиялық немесе 40-тан 50 градусқа дейінгі плантарлы иілу үшін қажетті қозғалыс ауқымы болып табылады. Модельдеу SolidWorks-те орнатылған шектеулер мен параметрлер шеңберінде модельдеу нәтижелерін білдіретінін ескеру қажет. Мұндай модельдеу механикалық талдау мен дизайн үшін пайдалы болды, бірақ ол адамның бірлескен қозғалыстарының күрделілігін толығымен қайталамауы мүмкін және соған сәйкес түсіндірілуі керек.

2.3 - кесте сынақ нәтижелері туралы алынған деректердің қысқаша мазмұны dorsiflexion – plantarflexion буынының бүгілуін сипаттайтын қозғалыс

Параметрлер	$\Delta S1$ (mm)	$\Delta S2$ (mm)	$\Delta\phi$ (degree)	$\alpha$ (degree)		Траектория		F1	F2	Power
				max	min	Z	Y			
СЫЗЫҚТЫҚ ҚОЗҒАЛЫСЫ	85 градус /с <sup>2</sup>	100 градус /с <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
Бұрыштық үдеу	-	-	-	240 градус /с <sup>2</sup>	150 градус /с <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
Н нүктесінің траекториясы	-	-	-	-	-	25,5 мм	74,6 мм	-	-	-
Қозғаушы күштері	-	-	-	-	-	-	-	0,8 Н	-	-
Реакция күші	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 Н

Берілген мәндер нақты SolidWorks модельдеу контекстінде dorsiflexion – plantarflexion иілу үшін имитацияланған немесе талданған қозғалыс ауқымын сипаттайды.

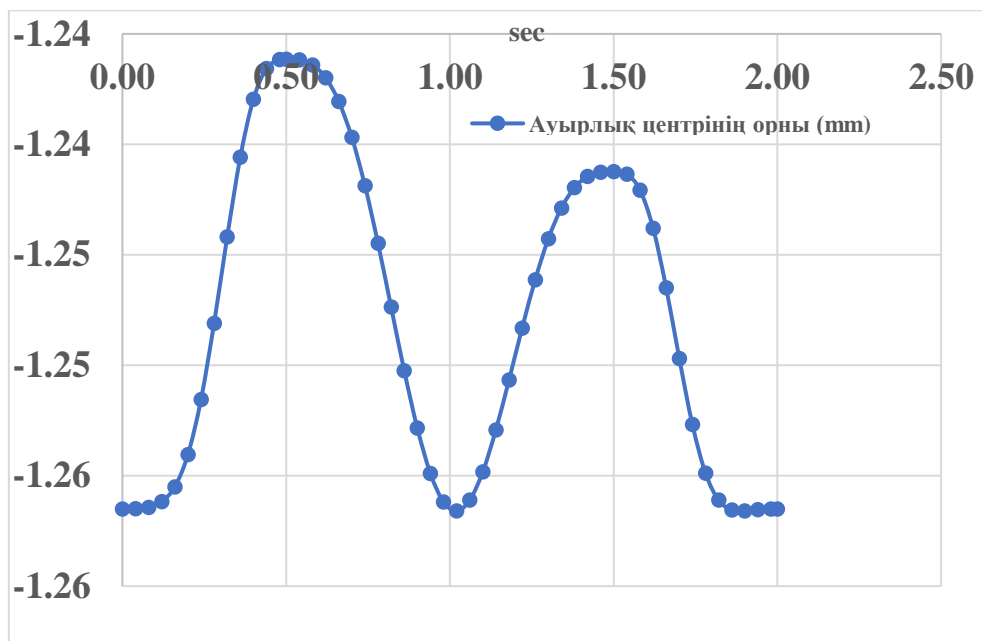
2.16 суретте SolidWorks Simulation көмегімен алынған abduction – adduction қозғалысы көрсетілген. Adduction қозғалыс ауқымы бұл қозғалыста 22,0 градустан артады. 36 градусқа дейін., ал имитация мәні 15 градусқа дейін бүгіледі. Abduction кезіндегі қозғалыс диапазоны 15,4 градустан 25,9 градусқа дейін, ал имитациялау (модельдеу) кезінде 10 градусқа дейін.



Сурет 2.16 Abduction–Adduction қозғалыстың имитацияланған бейнесі

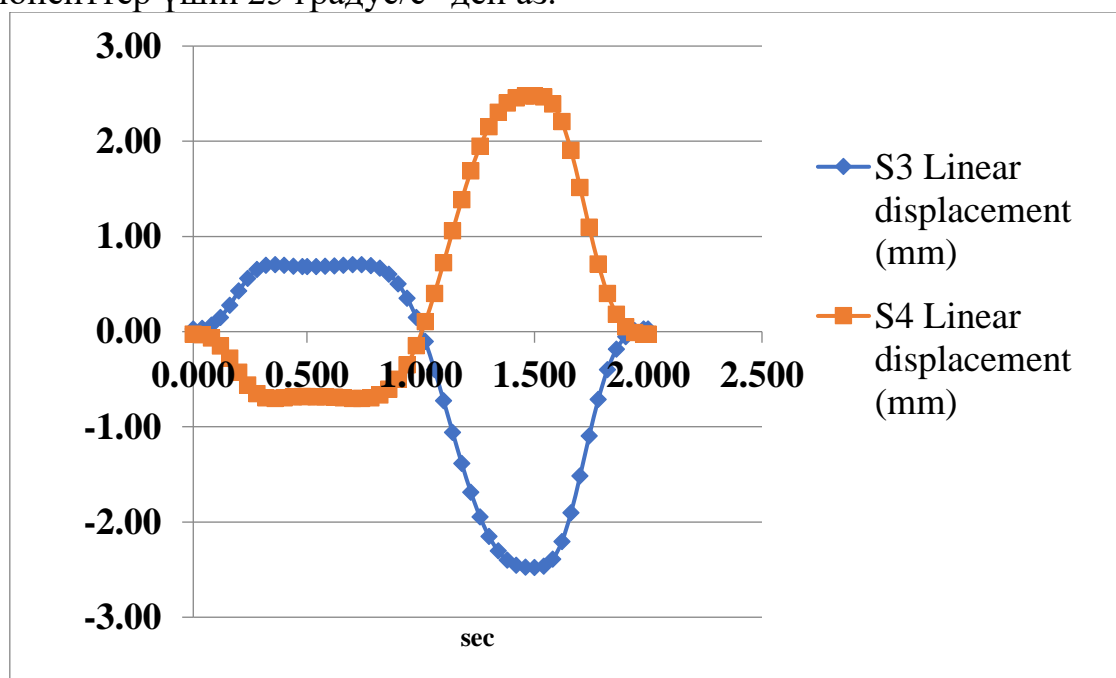
Сурет 2.17-те платформаның ауырлық центрінің құрамдас бөліктерін есептеу нәтижелері көрсетілген. Бұл нүктенің Y осі бойымен қозғалуы -1,23 мм.

Бұл зерттеудегі ауырлық орталығы ауырлық күшінің әсерінен денелер мен қатты орталардың тепе – теңдік позицияларының тұрақтылығын көрсетеді, атап айтқанда: материалдардың кедергісінде Верещагин ережесін қолданған кезде.



Сурет 2.17 Ауырлық центрінің имитациялық қозғалысы

2.18 суретте сызықтық жетектердің сызықтық қозғалысының компоненттері көрсетілген. Графикке сүйенсек, барлық бағыттағы қозғалыстардың максималды мәндері  $30 \text{ градус/с}^2$  болатын шыңдары бар. Y компоненті үшін және басқа компоненттер үшін  $25 \text{ градус/с}^2$ -ден аз.

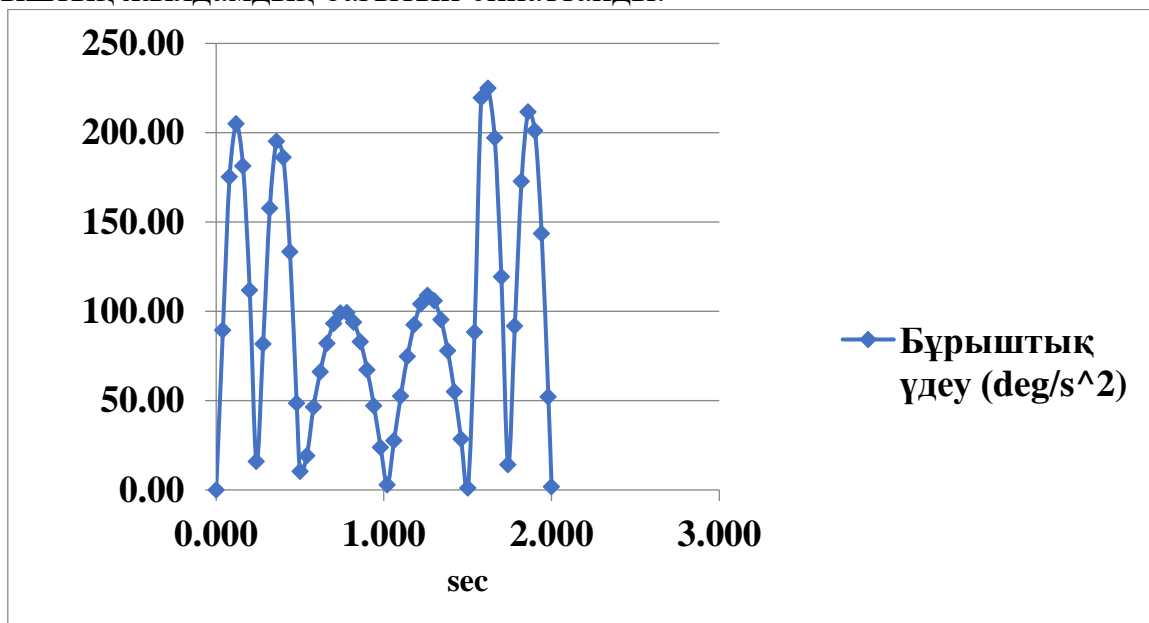


Сурет 2.18 Сызықтық жетектердің қозғалысы

Бұрышқа қатысты бұрыштық үдеу 2.19 суретте көрсетілген.  $33 \text{ градус/с}^2$ -ге тең үдеудің ең үлкен мәні жоғарғы позицияға жақын. Бұрыштық үдеу модульдің



өзгеру қарқындылығын және экзоскелет көмегімен тобықты жылжыту кезіндегі бұрыштық жылдамдық бағытын сипаттайды.

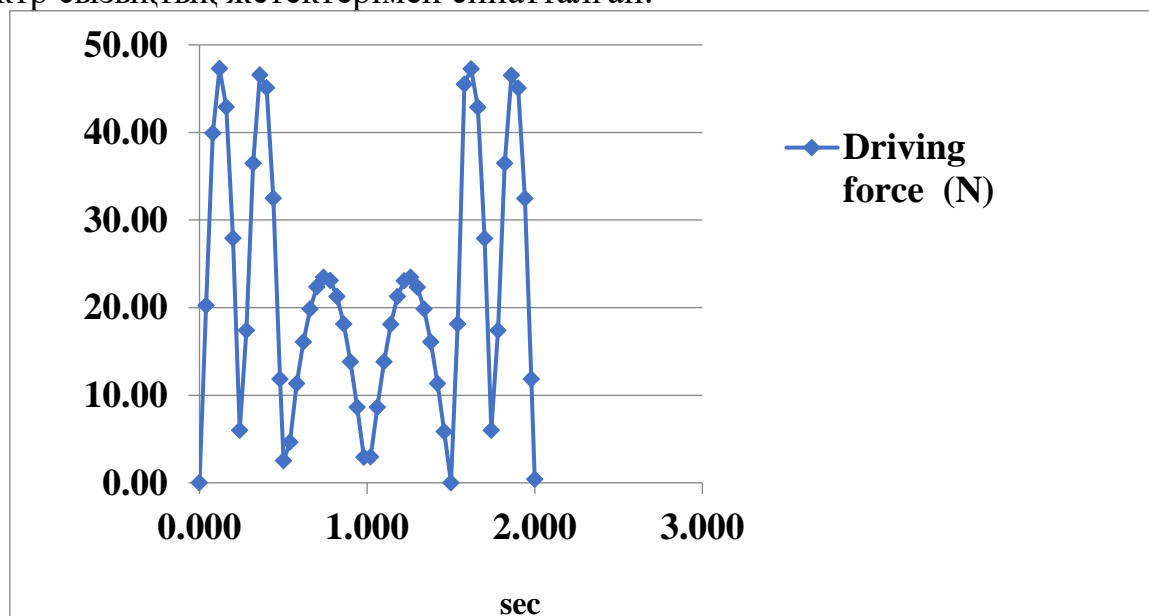


Сурет 2.19 Имитациялық қозғалыстың бұрыштық үдеуі

Имитациялық талдаумен расталған бұл прототип болашақ сынақтарда жобалық шешімнің орындылығын тексеру үшін де, оның тобықты қалпына келтірудегі қозғалыс тиімділігіне әсерін сипаттау үшін де қолданылады.

2.20 суретте S3 және S4 электр сызықтық жетектеріндегі қозғаушы күш негізінен жетектің негізгі құрамдас бөлігі болып табылатын электр қозғалтқышынан келеді.

Abduction–Adduction қозғалыстың имитацияланған бейнесі S3 және S4 электр сызықтық жетектерімен сипатталған.



Сурет 2.20 Имитациялық қозғалыстың жетектегі қозғаушы күш

SolidWorks Simulation-да Abduction–Adduction қозғалысын сипаттайтын мәндер берілді.

Abduction қозғалыс ауқымы :

- Бастапқы бұрыш: Abduction-ның қозғалыс ауқымы 22,0 градустан басталады.
- Соңғы бұрыш: максимум 36 градусқа дейін артады.
- Имитация мәні 15 градусқа дейін ауытқиды.

Бұл модельдеу немесе талдау кезінде буын аддукцияның 22 градусынан басталып, максимум 36 градусқа жетеді және белгілі бір мақсат үшін 15 градус бұрышқа еліктеуге немесе жетуге тырысады.

Adduction қозғалысының ауқымы :

- Бастапқы бұрыш: Adduction қозғалыс ауқымы 15,4 градустан басталады.
- Соңғы бұрыш: 25,9 градусқа дейін кеңейеді.
- Модельдеу мәні: модельдеу кезінде ол 10 градусқа жетеді.

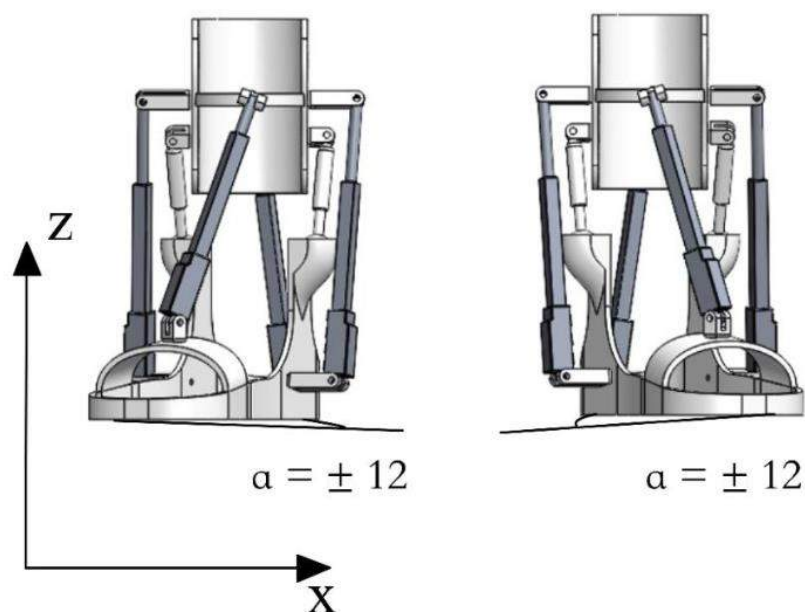
Бұл модельдеу кезінде буынның adduction 15,4-тен 10 градусқа дейін болатындығын көрсетеді. Бұл диапазон 15,4-тен 25,9 градусқа дейінгі үшін физиологиялық немесе қажетті қозғалыс диапазоны болып табылады.

SolidWorks бағдарламалық жасақтамадағы модельдеу механикалық қозғалыстар туралы құнды ақпарат бере алатындығын ескеру маңызды, бірақ модельдеу процесінде жеңілдетулер мен болжамдарға байланысты адам буындарының күрделі қозғалысын әрдайым дәл қайталай бермейді.

2.4 - кесте Abduction–Adduction қозғалыстың имитацияланған сынақ нәтижелері туралы алынған деректердің қысқаша мазмұны

Параметрлер	Y қозғалуы	$\Delta S3$ (mm)	$\Delta S4$ (mm)	$\alpha$ (degree)	Power
ауырлық центрі	-1,23 мм.				
жетектердің сызықтық қозғалысы		30 градус/ с <sup>2</sup>	25 граду с/с <sup>2</sup>		
бұрыштық үдеуі				33 градус/с <sup>2</sup>	
қозғаушы күш					47 Н

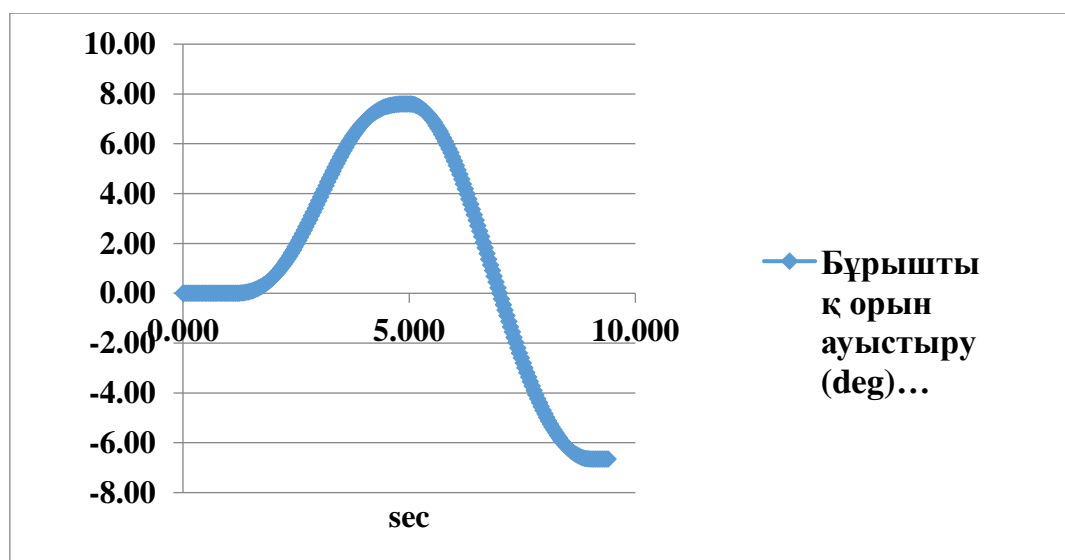
SolidWorks Simulation көмегімен алынған бұл қозғалысы inversion ауқымы 12 градусқа жетеді, eversion имитациялық қозғалыс мәні 12 градусқа дейін иіледі. Тобық буыны қозғалысы үшін ҚА шамасы (градуспен) inversion 14,5-22 градус аралығын қамтиды ал eversion 10-17 градусты көрсетеді.



Сурет 2.21 Inversion – Eversion арқылы имитацияланған қозғалыс

Сурет 2.22 бұрыштық қозғалыстағы сызықтық жетектердің компоненттері көрсетілген. Бұрыштық  $\Delta\varphi$  дененің шеңбер бойымен қозғалуы кезінде орын ауыстыру. Бұрыштық қозғалыс (айналу бұрышы) дененің 1-ші нүктеден 2-ші нүктеге жылжитқанда радиус-вектордың қозғалатын қашықтығы.

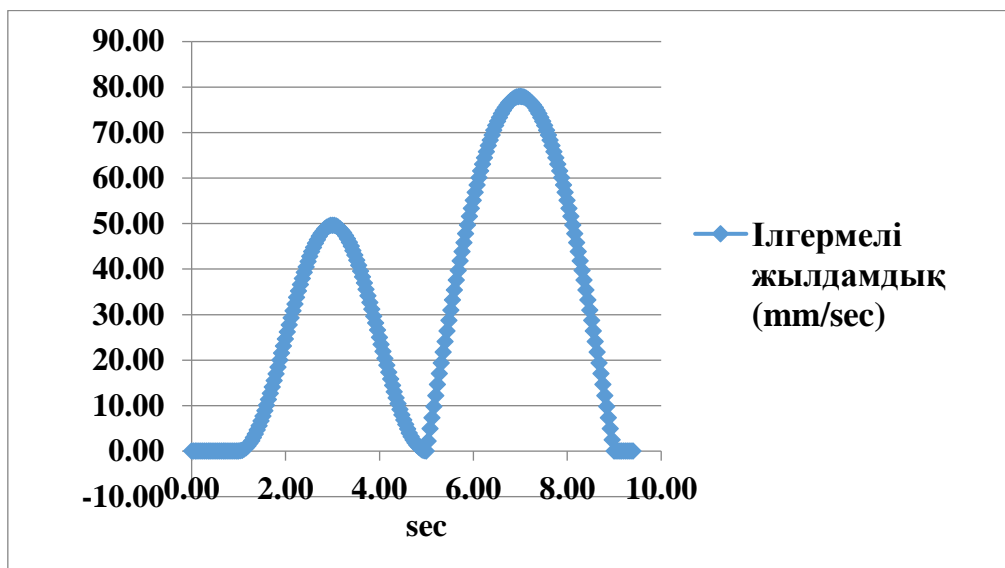
Графикке сәйкес, барлық бағыттардағы қозғалыс максималды мәні 7 градус/с<sup>2</sup> болатын амплитудаға ие. X компоненті мәні ретінде ұсынылған.



Сурет 2.22 қозғалысты модельдеуге кезіндегі бұрыштық орын ауыстыру

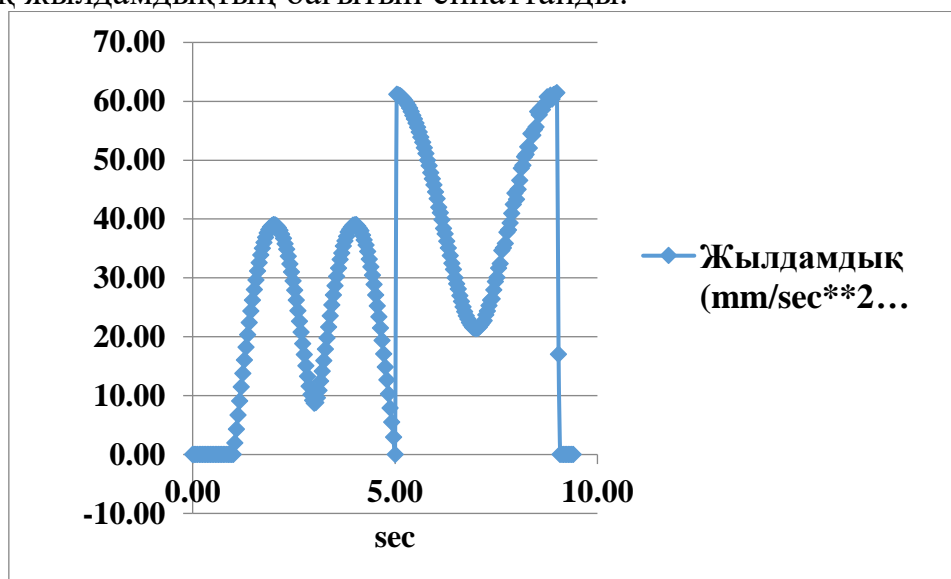
2.23 суретте 10 секундта 7,8 градус/с<sup>2</sup> болатын аяқ платформасының ілгермелі жылдамдығы көрсетілген.

Қозғалыс жылдамдығы оның айналуымен екі өлшемнен аспайтынын білдіреді. Жылдамдық уақытқа бөлінген қашықтық ретінде есептеледі, ал үдеу – бұл өзгерістің орын алуы үшін қажетті уақытқа бөлінген жылдамдықтың өзгеруі.



Сурет 2.23 Аяқ платформасының ілгермелі жылдамдығы

Бұрышқа қатысты бұрыштық үдеу 2.24 суретте көрсетілген. Үдеудің ең үлкен мәні – 40 градус/с<sup>2</sup>, жоғарғы позицияға жақын, ал басқа шыңы 60 градус/с<sup>2</sup>. Бұрыштық үдеу модульдің өзгеру қарқындылығын және жетек қозғалған кезде бұрыштық жылдамдықтың бағытын сипаттайды.



Сурет 2.24 имитацияланған қозғалыстың жылдамдығы

Тобық қозғалысына арналған SolidWorks модельдеу контекстінде қозғалыс пен бұрыштарға қатысты кейбір мәндер мен диапазондарды сипаттайды.

SolidWorks Simulation арқылы алынған Inversion қозғалыс ауқымы: SolidWorks Simulation арқылы алынған инверсиялық қозғалыс ауқымы 12 градус. Бұл модельдеу кезінде тобық белгілі бір бастапқы нүктеден Inversion бағытында максимум 12 градусқа дейін қозғалуы мүмкін дегенді білдіреді. Eversion қозғалысты имитациялау: айналмалы қозғалысты имитациялау да 12 градусқа жетеді. Бұл модельдеу кезінде тобық белгілі бір бастапқы нүктеден Eversion бағытында максимум 12 градусқа дейін қозғалуы мүмкін дегенді білдіреді.

- Inversion тобықтың инверсиялық қозғалысы 14,5-тен 22 градусқа дейінгі аралықты қамтиды. Бұл тобық қозғалысының нақты диапазонында ол инверсия бағытында 14,5-тен 22 градусқа дейін жүре алатынын білдіреді.
- Eversion тобықтың Эверсиялық қозғалысы 10-нан 17 градусқа дейін. Бұл тобық қозғалысының нақты диапазонында ол инверсия бағытында 10-нан 17 градусқа дейін жүре алатынын көрсетеді.

2.5 - кесте Inversion – Eversion қозғалыстың имитацияланған сынақ нәтижелері туралы алынған деректердің қысқаша мазмұны

Параметрлер	$\Delta\phi$	$v$ (mm)	$\Delta v$ (mm)	
			max	min
бұрыштық орын ауыстыру	7 градус/с <sup>2</sup>			
ілгермелі жылдамдық		7,8 градус/с <sup>2</sup>		
жылдамдық			60 градус/с <sup>2</sup>	40 градус/с <sup>2</sup>

Модельдеу арқылы алынған мәндер әрқашан адамның тобық қозғалысының нақты физиологиялық диапазонына сәйкес келе бермейді. Бұл модельдеу нәтижелері инженерлік және жобалық мақсаттар үшін пайдалы, бірақ адамның нақты буын қозғалысының барлық күрделілігі мен өзгеруін ескермеуі мүмкін. Берілген ақпарат Inversion – Eversion жағдайында тобық қозғалысының модельденетін және күтілетін диапазоны туралы түсінік береді.

## 2.6 Екінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы

Қорытындылай келе, SolidWorks Simulation бағдарламалық жасақтамасын Motion Simulation қондырмасымен бірге пайдалану электрлік сызықтық жетекпен басқарылатын тобық қозғалысының жүйесін кешенді модельдеуге және талдауға мүмкіндік бергенін атап өтеміз. Инженерлік және биомеханикалық талдаудың бұл күрделі процесі жоғарыда сипатталған бірнеше негізгі қадамдар мен компоненттерді қамтыды. 3D модельдеу бастапқы кезең тобық буыны, электрлік сызықтық жетек, тірек құрылымдары және қажетті сенсорлар немесе компоненттерді қамтитын бүкіл жүйенің егжей-тегжейлі 3D CAD моделін құруды қамтыды.

Кинематикалық модельдеу дәл кинематика тобық мінез-құлқын дәл көрсету үшін анықталды. Бұл параметрлерге еркіндік дәрежелері, қозғалыс ауқымы және тобықтың табиғи қозғалысына еліктейтін шектеулер кіреді. Сызықтық жетекті интеграциялау бұл электрлік сызықтық жетек CAD құрастыруына оңай енеді және оның физикалық қасиеттері мен мүмкіндіктері модельдеу шеңберінде мұқият анықталады. Қозғалысты модельдеу ол қозғалыс профилдері дорсифлексия, плантарлы иілу, инверсия, инверсия және басқа да тиісті қозғалыстарды қоса алғанда, білек қозғалысының қажетті үлгілерін

анықтау үшін анықталады. Басқару логикасы осы профильдерге сәйкес Дискіні басқару үшін жүзеге асырылады. Динамикалық талдау бүкіл жүйенің механикалық әрекетін бағалау үшін SolidWorks Simulation көмегімен жүзеге асырылады. Бұл күштерді, моменттерді және реакцияларды модельдеуге әкеледі, бұл кезде тобық берілген қозғалыстарды орындайды. Стрессті талдау компоненттердің құрылымдық тұтастығын бағалайды және қауіпсіздік пен өнімділікті бағалау кез келген ықтимал мәселелерді анықтау үшін орындалады.

Датчиктерді біріктіру кері байланыс датчиктерін модельдеу процесін байытатын байланыс бұрыштары, жетек позициясы және басқа да тиісті параметрлер туралы нақты уақыттағы деректерді жинау үшін біріктіруге болады. Визуализациялау модельдеу нәтижелері SolidWorks-пен, соның ішінде анимациямен, кернеу графиктерімен және графикамен көрнекі түрде бейнеленеді, Бұл жүйенің тобық қозғалысы кезіндегі мінез-құлқы туралы құнды ақпарат береді. Оңтайландыру және тексеру модельдеу деректері жобалау және басқару параметрлерін оңтайландыру үшін мұқият талданады, олардың күтілетін биомеханикалық және инженерлік критерийлерге сәйкестігін қамтамасыз етеді. Осы критерийлерге сәйкестігін тексеру жүйенің өнімділігін, қауіпсіздігін және сенімділігін қамтамасыз етудегі маңызды қадам болып табылады.

Электрлік сызықтық жетек арқылы тобық қозғалысын модельдеу мен талдаудың бұл кешенді тәсілі күрделі механикалық жүйелерді виртуалды түрде жобалауға, бағалауға және нақтылауға мүмкіндік беретін SolidWorks Simulation мүмкіндіктерін көрсетеді. Бұл инженерлерге негізделген жобалық шешімдер қабылдауға, даму процесінің басында ықтимал мәселелерді анықтауға және сайып келгенде, тобықтың бақыланатын қозғалысы үшін жақсы оңтайландырылған, қауіпсіз және тиімді жүйені құруға мүмкіндік береді.

### 3. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ ПРОТОТИПІ

#### 3.1 Экзоскелеттің механикалық бөлігі

PLA-дан тобық буын экзоскелет корпусының негізгі қызметі құрылымдық тұтастықты сақтау болып табылады. Ол тұрақты жұмысты қамтамасыз ете отырып, тобық қозғалысы кезінде пайда болатын механикалық күштер мен кернеулерге төтеп беруге арналған болуы керек. PLA-ның 3D басып шығаруға жарамдылығы экзоскелет корпусын теңшеуді жеңілдетеді. Бұл бейімделу құрылғыны жеке пайдаланушылардың анатомиялық нюанстары мен өлшемдеріне бейімдеуге мүмкіндік береді, осылайша сенімді және ыңғайлы сәйкестікті қамтамасыз етеді.



a)

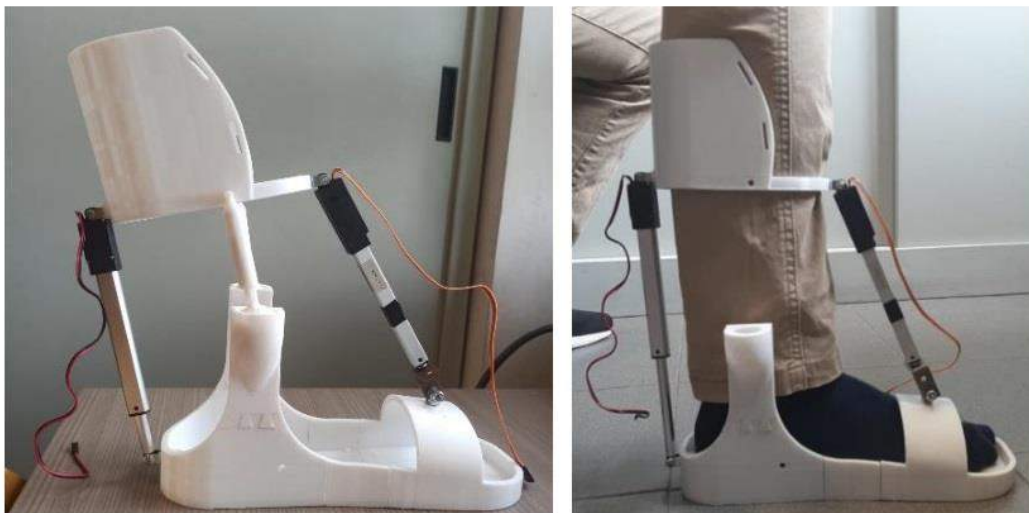


b)

Сурет 3.1. a) PLA-пластик b) 3D принтер Creality Ender-3

PLA жеңіл салмағы экзоскелеттің жалпы салмағын азайтуға мүмкіндік береді. Бұл сипаттама пайдаланушының жайлылығы мен ұтқырлығын арттыру үшін өте маңызды, әсіресе ұзақ уақыт пайдаланған кезде. PLA материалын нығайтуға немесе оның беріктігін арттыру үшін кейінгі өңдеу әдістеріне ұшыратуға болады. Бұл беріктік экзоскелеттің ұзақ өмір сүруін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады, әсіресе оналтуға немесе ұзақ мерзімді көмекке қатысты қолданбаларда..

Тобық буынға арналған экзоскелет 3.2 суретте көрсетілген. зертханалық прототип ретінде. Оның салмағы әр аяғы үшін 2,05 кг құрайды. Жақтау жасалған Материал PLA пластиктен жасалған. Аяқ пен жетекті бекітуге арналған белдіктер де PLA пластиктен жасалған және 3D басып шығарылған.

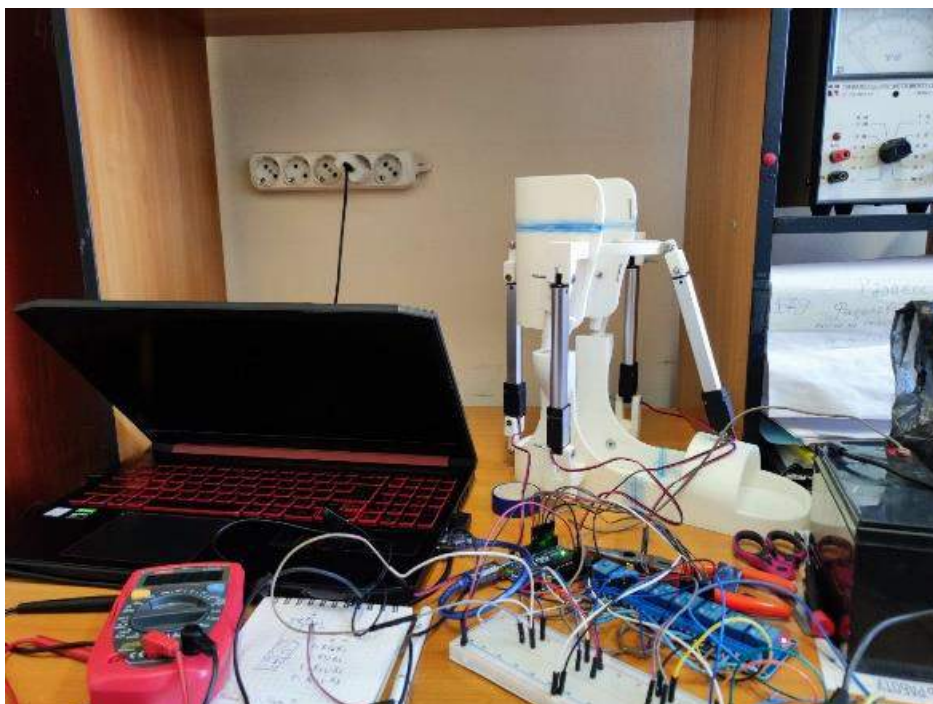


Сурет 3.2. Римдегі LARM2 зертханасында алғашқы прототип

Прототип әртүрлі компоненттердің, соның ішінде экзоскелетті пайдаланушының төменгі аяғына бекітетін жетектердің, датчиктердің және бекіту механизмдерінің тегіс интеграциясын жеңілдету үшін стратегиялық түрде орналастырылған бекіту нүктелерімен жабдықталған. Эргономика корпусының дизайнында шешуші рөл атқарады. Эргономикалық ойларға қысым нүктелерін азайту, сәйкестікті оңтайландыру және пайдаланушының жайлылығын қамтамасыз ету үшін салмақты бөлу кіреді. Эстетика маңызды болмаса да, PLA экзоскелет корпусының сыртқы түрі эстетикалық жағымды болатындай етіп мұқият жобаланды. Эстетикалық тартымдылық пайдаланушылардың оңалту бағдарламаларын қабылдауы мен орындауына оң әсер етуі мүмкін.

Корпусты жобалау кезінде құрастырудың қарапайымдылығы басымдыққа ие болды, бұл оны тәжірибешілерге де, пациенттерге де ыңғайлы етеді. Оңтайландырылған құрастыру процесі құрылғының практикалық және ыңғайлы болуына ықпал етеді. Қауіпсіздік шаралары абразияларды азайту үшін дөңгелектелген жиектерді, улы емес материалдарды және экзоскелет жұмыс істеп тұрған кезде кенеттен немесе қауіпті қозғалыстардың алдын алатын механизмдерді қолдануды қамтуы мүмкін. PLA-дан тобық экзоскелетінің корпусы құрылғының функционалдығы үшін негізгі құрылымды қамтамасыз ететін негізгі компонент деп айтуға болады. Оны жобалау кезінде даралау, беріктік, салмақты оңтайландыру, эргономикалық ойлар, қауіпсіздік мүмкіндіктері және құрастырудың қарапайымдылығы сияқты факторлар басымдыққа ие болуы керек. Біріктірілген бұл атрибуттар әртүрлі оңалту және ұтқырлық қолданбаларында экзоскелет пайдаланушысының тиімділігін, қауіпсіздігін және жайлылығын қамтамасыз етеді.





Сурет 3.3. Римдегі LARM2 зертханасында алғашқы прототип

PLA экзоскелеттік корпусы - өте танымал 3D басып шығару материалы. Бұл барлық нұсқалар үшін өте қолайлы емес, өйткені бұл мүмкін емес, бірақ бәрібір өте жан-жақты. PLA полилактикалық қышқыл (немесе полилактид) дегенді білдіреді. Бұл қарапайым термопластиканы басып шығару оңай, биологиялық ыдырайтын және арзан. Ол негізінен жылдам прототиптеу, демонстрациялық модельдер жасау немесе білім беру мақсатында қолданылады. Ең бастысы, құрылғы пайдаланушыға қозғалыс жасауға көмектеседі. Құрылғы қажетті қозғалыстардың кем дегенде минималды диапазонын сақтау үшін жеткілікті айналу моментін қамтамасыз етуі және жылдам әрекет етуі керек. Бұл режимдердің қозғалыс диапазондары географиялық мәдени айырмашылықтарға, анатомиялық құрылымға және деректерді жинаудың әртүрлі әдістеріне байланысты әртүрлі адамдарда айтарлықтай өзгергіштікпен сипатталады. Сәйкес сызықтық электр жетегінің профилі физиотерапиялық процедуралар кезінде дұрыс қозғалуға арналған.

### 3.2 Тобық буын экзоскелетінің электроникасы

Экзоскелет төрт электрлік сызықтық жетек арқылы тобық қозғалысын басқаруға және басқаруға мүмкіндік береді. Алдыңғы жетектер (S1 және S2) алға және артқа қозғалысты қамтамасыз етеді, ал бейне драйверлері (S3 және S4) бүйірлік қозғалыстарды жеңілдетеді. Бұл конфигурация үйлестірілген және мақсатты көмек немесе тобықтың белгілі бір қозғалыстарына қарсы тұруды қамтамасыз етеді.

Кесте 1. Прототиптің негізгі компоненттерінің параметрлері.

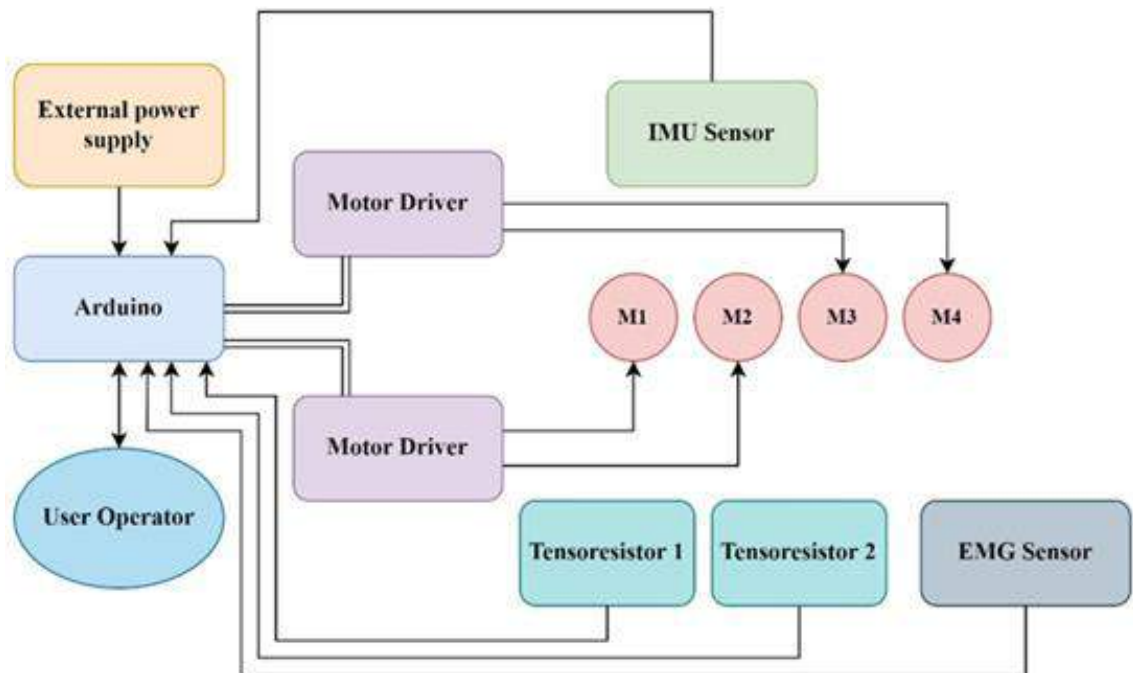
Component	Commercial name	Voltage	Mass	Max force/torque	Speed
-----------	-----------------	---------	------	------------------	-------

Arduino board	Mega 2560 23	7–12 V	37 g	—	—
Linear actuator	L16-100-63-12-P 19	12 V	74 g	100 N	20 mm/s
Servomotor	MG996R 20	4.8–7.2 V	55 g	150 N-cm	461.5 deg/s
IMU	BMI16025	3–5 V	2 g	—	—
Ten's resistors	—	—	—	—	—

Экзоскелетті мүмкіндігінше ыңғайлы және табиғи ету үшін экзоскелет жеңіл және тобықтың табиғи қозғалысын имитациялайды. Экзоскелет пайдаланушының табанының өлшеміне сәйкес реттеледі.

Экзоскелет батареямен немесе сымды қуат көзімен жабдықталған. Прототиптің төмен қуат тұтынуы ұсынылған құрылғы портативті батареялармен жұмыс істей алатынын білдіреді.

2-суретте Almaty тобық экзоскелетінің - тобық буынын жылжытуға көмектесетін тағылатын құрылғының тұжырымдамалық дизайны көрсетілген.



Сурет 3.4. Almaty тобық экзоскелетінің зертханалық прототипінің тұжырымдамалық жобасы

Төрт электрлік сызықтық жетегі бар тобық экзоскелеті үйлестірілген түрде жұмыс істейді, тобық буынын оңалтуда көмектеседі және оны қолдайды:

*Датчиктер:*

*IMU сенсоры:* инерциялық өлшеу блогының сенсоры (IMU) пайдаланушының тобығының бағытын, үдеуін және бұрыштық жылдамдығын

өлшеу үшін қолданылады. Ол тобықтың орналасуы мен қозғалысы туралы Кері байланыс береді.

*EMG сенсоры:* электромиографиялық сенсорлар (EMG) пайдаланушының бұлшықеттері шығаратын электрлік сигналдарды анықтайды. Оларды пайдаланушының ниетін немесе олардың күш-жігерінің деңгейін бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін бұлшықет белсендіру үлгілерін бекіту үшін төменгі аяқтың немесе балтырдың бұлшықеттеріне орналастыруға болады.

*Тензометриялық датчиктер:* Тензометриялық датчиктер әдетте жұмыс кезінде пайда болатын кернеулерді немесе деформацияларды өлшеу үшін экзоскелет құрылымында орналасады. Бұл ақпарат дискілердің күш-жігерін бақылауға және пайдаланушының экзоскелетпен өзара әрекеттесуін бағалауға көмектеседі.

*Қозғалтқыш жетектері (екі арналы L298N/2A):*

L298N/2A сияқты қозғалтқыш жетектері электрлік желілік жетектерді басқарады. Бұл қозғалтқыш жетектері жетектерді басқару үшін қажетті қуат пен басқару сигналдарын береді.

Әрбір қозғалтқыш жетегінде екі сызықтық жетекті бір уақытта басқаруға мүмкіндік беретін екі арна бар. Бұл конфигурация төрт жетекті тобық экзоскелетіне сәйкес келеді, өйткені ол әр жұп жетектерді әр түрлі тобық қозғалыстары үшін тәуелсіз басқаруды қамтамасыз етеді.

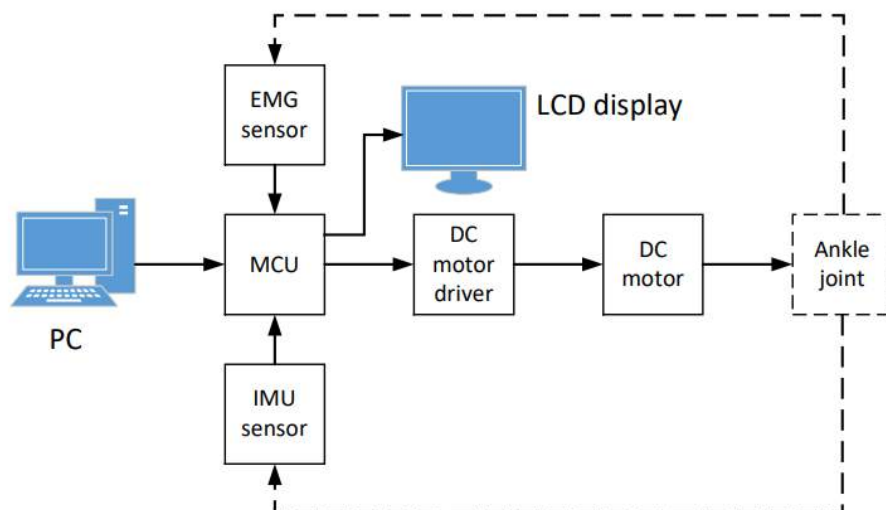
*Басқару жүйесі:*

Тобық экзоскелетін басқару жүйесі сызықтық жетектерге сәйкес көмекші және басқару сигналдарын анықтау үшін IMU сенсорларының, EMG және жүктеме ұяшықтарының деректерін өңдейді. IMU сенсорының деректері тобықтың орналасуын бақылауға және көмек деңгейін белсендіру немесе реттеу үшін қолдануға болатын қозғалыстарды анықтауға көмектеседі. EMG сенсорының деректері пайдаланушының бұлшықет белсенділігі туралы ақпарат береді және пайдаланушының ниетін немесе оның күш-жігерінің деңгейін анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл кейінірек көрсетілетін көмекке әсер етуі мүмкін. Жүктеме ұяшығының өлшемдері экзоскелет дизайнының күштері мен жүктемелерін басқаруға көмектеседі, бұл басқару жүйесіне экзоскелеттің қауіпсіз шектерде жұмыс істеуін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

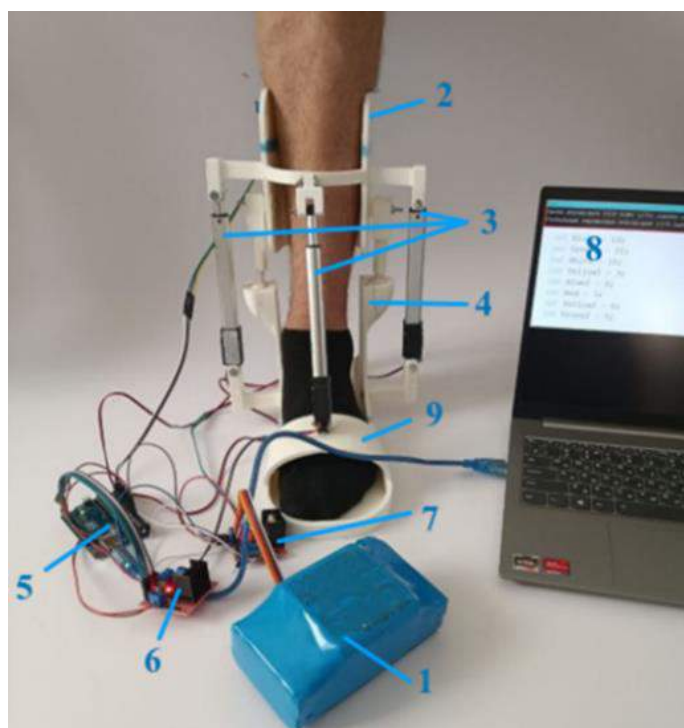
Датчиктердің кіріс сигналдары мен басқару жүйесінің алгоритмдері негізінде басқару сигналдары қозғалтқыш жетектеріне беріледі, бұл өз кезегінде электрлік сызықтық жетектерді басқарады. Сызықтық жетектер пайдаланушының тобық қозғалысын жеңілдету немесе күшейту үшін итеру немесе тарту арқылы сызықтық қозғалыс жасайды. Жетектер көрсететін көмек пайдаланушының қажеттіліктеріне, жүру кезеңіне немесе басқару жүйесімен анықталған көмек деңгейіне байланысты реттелуі мүмкін.

Әдетте, датчиктер (IMU, EMG, тензометриялық датчиктер) басқару жүйесімен маңызды кері байланысты қамтамасыз етеді, бұл оған электрлік сызықтық жетектер ұсынатын көмекті бейімдеуге мүмкіндік береді. L298N/2A сияқты қозғалтқыш жетектері басқару жүйесі шығаратын басқару сигналдарына негізделген жетектерді басқарады. Осы компоненттерді біріктіру арқылы тобық

экзоскелеті пайдаланушының тобық буынындағы қозғалыстарға интеллектуалды және синхронды қолдау көрсетеді.



Сурет. 3.5 Тобық буын экзоскелетін басқару жүйесінің құрылымдық схемасы



Сурет. 3.6 Тобық буынына арналған Almaty экзоскелетінің прототипінің қозғалысына еліктеу.

Тензометриялық сенсор - бұл объектінің кернеуін немесе деформациясын өлшеу үшін қолданылатын сенсордың тағы бір нұсқасы. Оның жұмыс істеуі электр кедергісінің өзгеруін анықтауға негізделген, өйткені объект деформацияға ұшырайды. Бұл конфигурация экзоскелетке түсетін күштің немесе қысымның мөлшерін өлшеу үшін екі тензометриялық сенсорды пайдаланады. Кейіннен бұл ақпаратты сызықтық жетектердің қозғалысын сәйкесінше реттеу үшін пайдалануға болады.

Бұл компоненттердің барлығы Жүйенің орталық процессоры ретінде қызмет ететін Arduino микроконтроллерімен өзара байланысты. Arduino датчиктерден сигналдар алады және оларды қозғалтқыш жетектеріне арналған командаларға айналдырады, бұл өз кезегінде сызықтық жетектерді реттейді. Сонымен қатар, микроконтроллер деректерді тіркеу, сенсорлық деректерді өңдеу және басқа құрылғылармен байланыс орнату сияқты басқа функцияларды орындай алады. Бұл қондырғы экзоскелеттің прототипін немесе пайдаланушының бұлшықет белсенділігі негізінде басқарылатын және қолданылатын күшке жауап беретін ұқсас киілетін құрылғыны жасау үшін пайдаланылуы мүмкін.

### **3.3 Басқару және бағдарламалық қамтамасыз ету алгоритмін әзірлеу**

Аяқтың бағдарламалық экзоскелетін басқару алгоритмін әзірлеу аппараттық және бағдарламалық жасақтаманы біріктіруді қамтиды. Жүйенің бұл түрі әдетте пайдаланушының қозғалысы мен ниетін анықтау үшін сенсорларды, сенсорлық деректерді өңдеу және экзоскелетті белсендіру үшін басқару алгоритмдерін және өзара әрекеттесу үшін пайдаланушы интерфейсін қажет етеді.

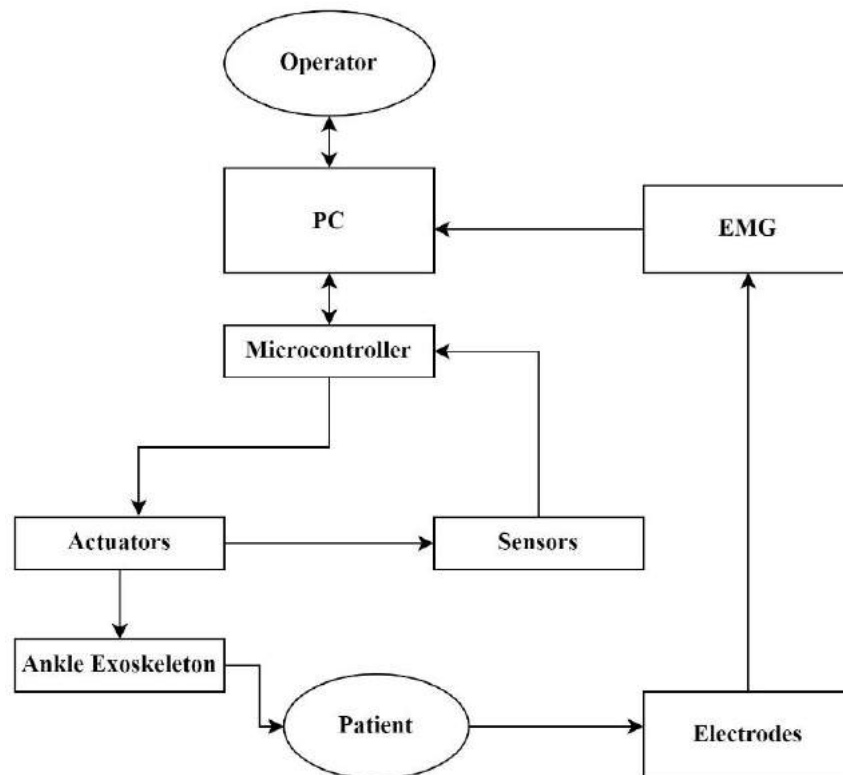
Төрт жетекті тобық экзоскелеті - бұл тобық қозғалысына көмектесетін немесе күшейтетін тозуға болатын құрылғы. Экзоскелет тобық пен аяқтың айналасына орналастыруға арналған және тобық буынына электр беру жүйелерімен қосылған төрт электр қозғалтқышымен жұмыс істейді.

Экзоскелет корпусы 3D басып шығаруда кеңінен қолданылатын биологиялық ыдырайтын термопластикалық материал болып табылатын PLA пластиктен жасалған. PLA пластмассасы жеңіл, берік және пішіндеуге оңай, бұл оны тапсырыс бойынша экзоскелет жасау үшін тамаша материал етеді.

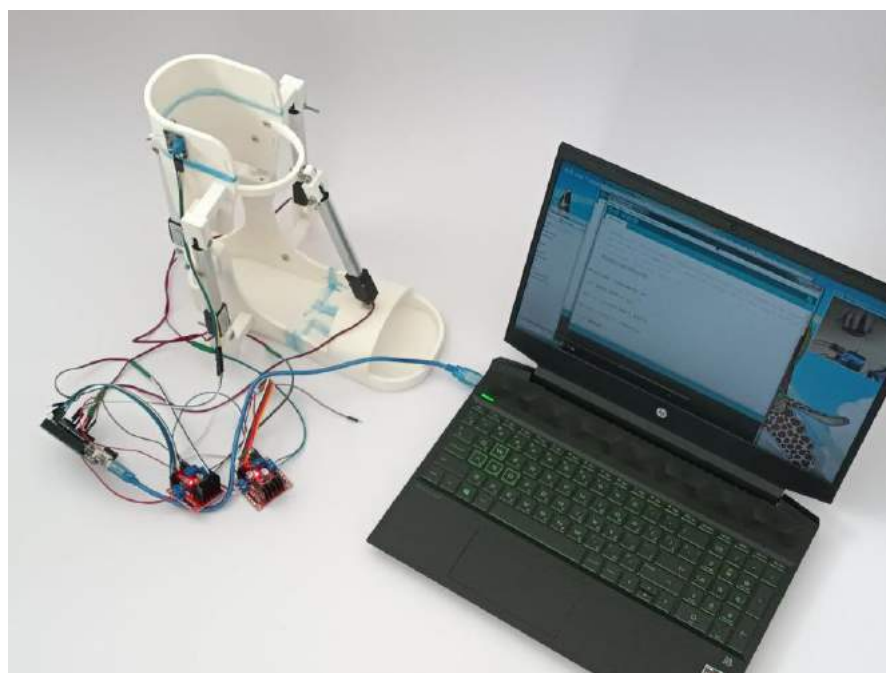
Экзоскелеттегі төрт электр жетегі тобық қозғалысын жеңілдету немесе арттыру үшін қажетті күш береді. Қозғалтқыштарды пайдаланушының қозғалысына байланысты қозғалтқыштардың айналу жылдамдығы мен бағытын реттей алатын микроконтроллер арқылы басқаруға болады.

2-суретте көрсетілгендей, біз енгізген тобықты оңалтуға келтіру жүйесі негізінен компьютерден (дербес компьютерден), микроконтроллерден, белсендірілген экзоскелеттен және миоэлектрлік сигналдарды тіркеу құрылғысынан (ЭМГ) тұрады. ДК үш функцияны орындайды: ол графикалық интерфейс арқылы оператормен (ол терапевт немесе тіпті пациенттің өзі болуы мүмкін) өзара әрекеттеседі, пациенттің миоэлектрлік сигналдарын тіркейді және өңдейді және ақырында командаларды беру немесе сенсорлық ақпаратты алу үшін сериялық байланыс арқылы микроконтроллермен әрекеттеседі. Микроконтроллер дискілер үшін қажетті басқару сигналдарын жасайды және оларға орнатылған сенсорлар арқылы олардың нақты орнын бақылайды.

3 суретте кешенді оңалту жүйесі үшін басқару және бағдарламалық қамтамасыз ету жүйесі көрсетілген.



Сурет. 3.7 Оңалту үшін тобық экзоскелетін басқарудың технологиялық схемасы



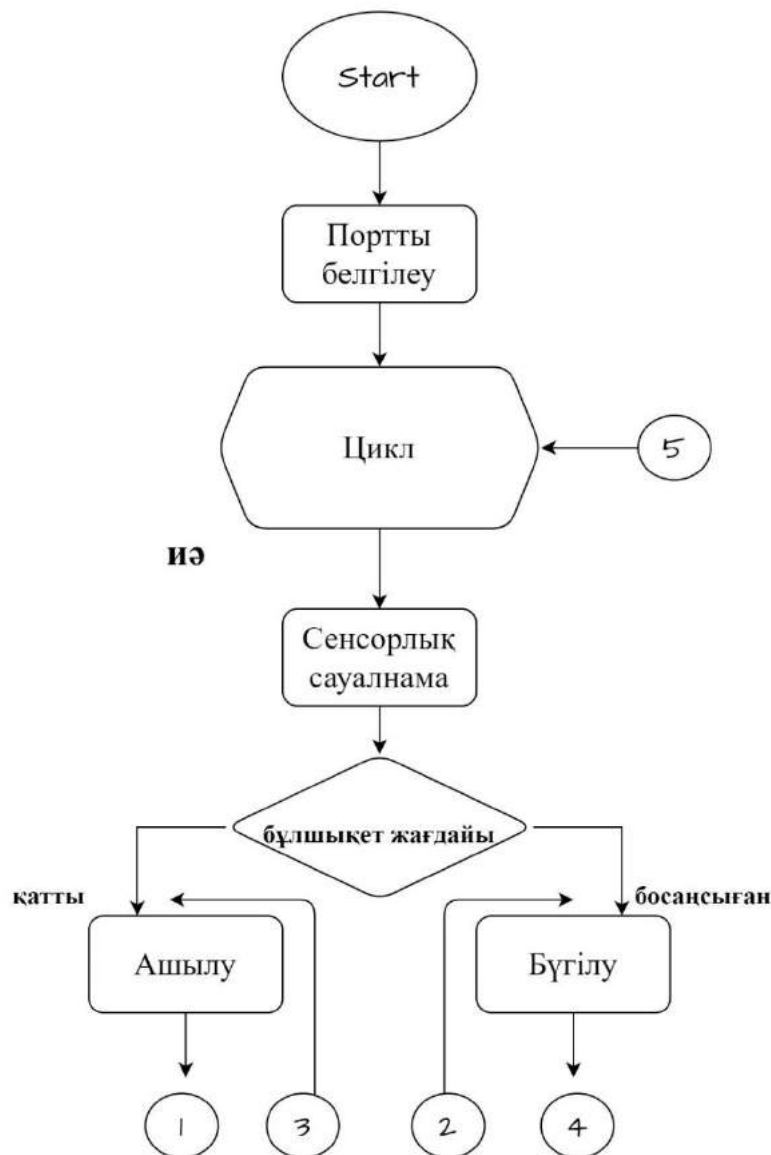
Сурет. 3.8 Оңалту үшін тобық экзоскелетін басқарудың бағдарламасы

Экзоскелетті қозғалғыштығы бұзылған адамдарға көмектесу немесе спортшылардың өнімділігін жақсарту үшін тобық жарақатын қалпына келтіру үшін пайдалануға болады. Экзоскелет ыңғайлы сәйкестік пен оңтайлы өнімділікті қамтамасыз ету үшін әрбір жеке пайдаланушы үшін конфигурациялануы мүмкін.



Төрт желілік электр жетегін жобалап, дамытқаннан кейін олардың өнімділігі тексеріліп, олардың қажетті техникалық сипаттамаларға сәйкес келетіндігіне көз жеткізу үшін бағаланды. Тестілеу және бағалау процесі әдетте бірнеше негізгі кезеңдерді қамтиды:

1. Функционалды тестілеу: бірінші қадам-әрбір желілік электр жетегінің дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін функционалды тестілеуді орындау. Бұған қозғалтқышты, беріліс қорабын және басқа механикалық компоненттерді, сондай-ақ басқару электроникасы мен бағдарламалық жасақтаманы сынау кіреді.
2. Жүктемені тестілеу: функционалды тестілеу аяқталғаннан кейін келесі қадам жүктемені тестілеуді орындау болып табылады. Бұл желілік электр жетектеріне қажетті жүктемелер мен күш-жігерді олардың қажетті жұмыс жүктемесіне төтеп беруін қамтамасыз ету үшін қолдануды қамтиды.
3. Жылдамдықты тестілеу: жүктемені тексеруден басқа, желілік электр жетектерінің қажетті жылдамдыққа жетуіне көз жеткізу үшін жылдамдықты тексеру қажет. Бұл қажетті техникалық сипаттамаларға сәйкес келетініне көз жеткізу үшін әртүрлі жүктемелер мен жағдайларда жылдамдықты тексеруді қамтиды.
4. Төзімділікті тексеру: желілік электр жетектерінің беріктігін және олардың ұзақ қызмет ету қабілеттілігін қамтамасыз ету үшін олардың беріктігін тексеру қажет. Бұл ұзақ мерзімді пайдалануды имитациялау және кез келген ықтимал төзімділік мәселелерін анықтау үшін дискілерді қайта-қайта пайдалануды қамтиды.
5. Қауіпсіздікті тексеру: сонымен, желілік электр жетектерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін қауіпсіздікті тексеру қажет. Бұл электр тогының соғуы немесе механикалық ақаулар сияқты ықтимал қауіптерді тексеруді және жетектердің барлық қажетті қауіпсіздік стандарттары мен нұсқауларына сәйкестігін қамтамасыз етуді қамтиды.



Сурет. 3.9 Оңалту үшін тобық экзоскелетін басқарудың бағдарламасы dorsiflexion – plantarflexion

Тұтастай алғанда, тестілеу және бағалау процесі желілік электр жетектерінің қажетті техникалық сипаттамаларға сәйкестігін және олардың жұмыс қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Тестілеу кезінде анықталған кез-келген проблемалар жетектер өндіріске енгенге дейін және нақты қосымшаларда қолданылмай тұрып шешілуі керек.

Артқы және табан буындарының бүгілу мүмкіндігі бірнеше факторларға байланысты, соның ішінде буын анатомиясы, айналадағы байламдардың тұтастығы және тартылған бұлшықеттердің күші мен икемділігі.

### 3.4 Үшінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы

Қорытындылай келе, тобық экзоскелетін дамыту, әсіресе 3D басып шығару технологиясын қолдана отырып, PLA-дан жасалған корпус әртүрлі факторларды мұқият ескеруді қажет ететін көп қырлы міндет екенін атап өтеміз. Экзоскелет корпусы үшін материал ретінде PLA таңдау пайдаланудың қарапайымдылығы



мен тұрақтылығы жағынан артықшылықтар береді. Дегенмен, бұл беріктік пен беріктікке қатысты мәселелерді де тудырады.

Дизайн процесі пайдаланушының жайлылығына, биомеханикалық үйлесімділікке және электронды компоненттермен интеграцияның қарапайымдылығына басымдық беретін 3D моделін құруды қамтиды. Басып шығарылатын бөліктердің сапасын қамтамасыз ету үшін үлгіні басып шығаруға жарамды бөліктерге бөлу, сәйкес 3D басып шығару опцияларын таңдау және кейінгі өңдеуді орындау өте маңызды. 3D басып шығарылған компоненттерді құрастыру, сондай-ақ сенсорларды, жетектерді және басқару блоктарын біріктіру өте маңызды қадам болып табылады. Экзоскелет пайдаланушысының функционалдығын, қауіпсіздігі мен жайлылығын тексеру үшін мұқият тестілеу мен тексеру қажет. 3D басып шығару және биомеханика саласындағы сарапшылармен үнемі нақтылау және ынтымақтастық оңтайлы өнімділікке қол жеткізу үшін мәселелерді шешуге және дизайнды жақсартуға көмектеседі. Қауіпсіздік стандарттары мен ережелерін құжаттау және сақтау міндетті болып табылады, әсіресе экзоскелет медициналық немесе көмекші мақсаттарға арналған болса.

Осылайша, PLA-дан 3D басып шығарылған корпусы бар тобық экзоскелетін жасау дизайн, материалдарды таңдау, тестілеу және сарапшылармен ынтымақтастықты қамтитын кешенді тәсілді қажет етуі мүмкін. Сайып келгенде, бұл технология қозғалу мүмкіндігі шектеулі адамдарға құнды көмек ұсына алады, бірақ оның тиімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін егжей-тегжейге назар аудару және қатаң даму процестері қажет.

## 4. ТОБЫҚ БУЫН ЭКЗОСКЕЛЕТІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

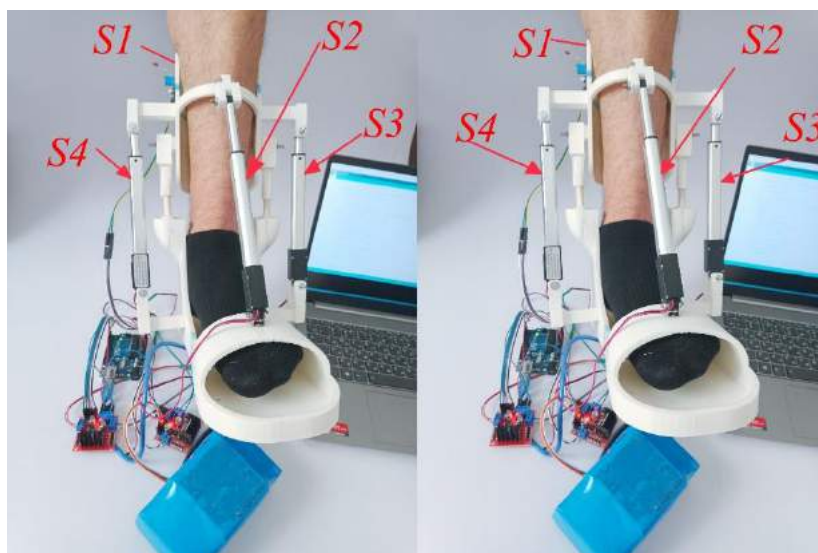
### 4.1 Эксперименттік орнату, деректерді жинау және талдау

Эксперименттік қондырғы экзоскелетті әртүрлі режимдерде сынауға арналған. Бұл әртүрлі жүктемелер мен жағдайларда экзоскелеттің өнімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Тестілеу және бағалау процесі әдетте бірнеше негізгі кезеңдерді қамтиды.

Бірінші қадам - сызықтық жетектердің әрқайсысы дұрыс жұмыс істейтініне көз жеткізу үшін функционалды тексеру.

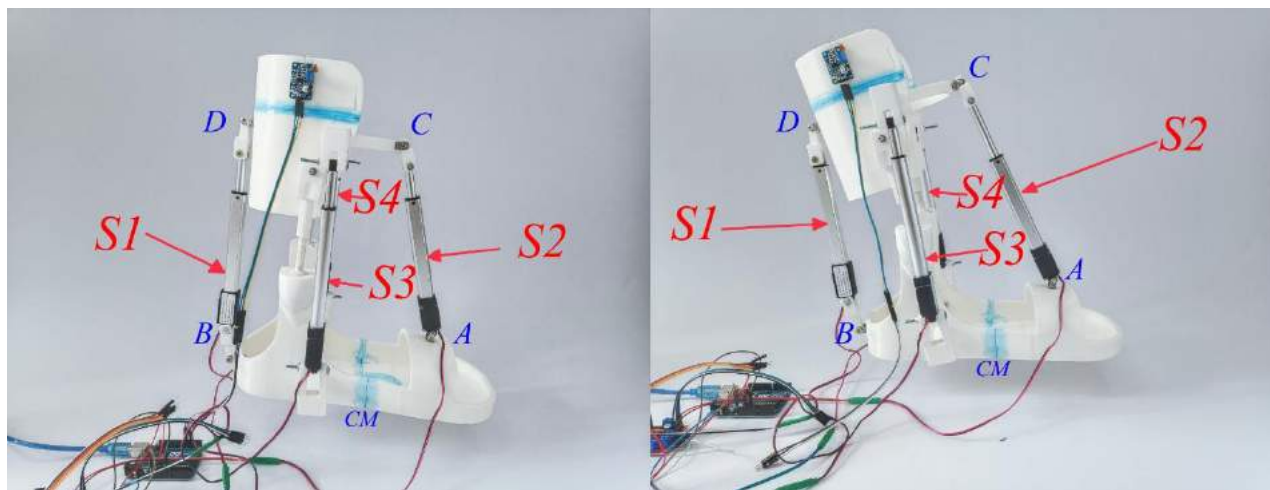
Тобық экзоскелетіне арналған эксперименттік қондырғының функционалды тестілеу кезеңінде негізгі мақсат әр сызықтық жетектің дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз ету болып табылады.

Функционалды тексеру кезеңінен сәтті өтіп, экзоскелеттің жалпы функционалдығын, әртүрлі жүктемелер мен жағдайларда пайдалану ыңғайлылығы мен қауіпсіздігін бағалауға болады.



Сурет 4.1. Dorsi and plantar flexion иілу конфигурациясында тобық экзоскелетін функционалды тестілеу

Тобық буынын емдеуге арналған реабилитациялық құрылғының мехатрондық дизайнын әзірлеу үшін сапа функционалын енгізу, өндірістік және конструкциялық жобалаулар сияқты бірқатар әдістер қолданылды. Ұсынылған үш өлшемді реабилитациялық құрылғы аяқ платформасынан және төрт сызықты электр жетектермен басқарылатын элементтерден тұрады. Осының арқасында, бұл құрылғының көмегімен тобық буынының табиғи қозғалыстарына қол жеткізуге болады. Сонымен қатар бұл құрылғыда төменгі аяқ бөлігінің қажетті қозғалысын қамтамасыз ететін кең ауқымды жұмыс кеңістігі қарастырылған.



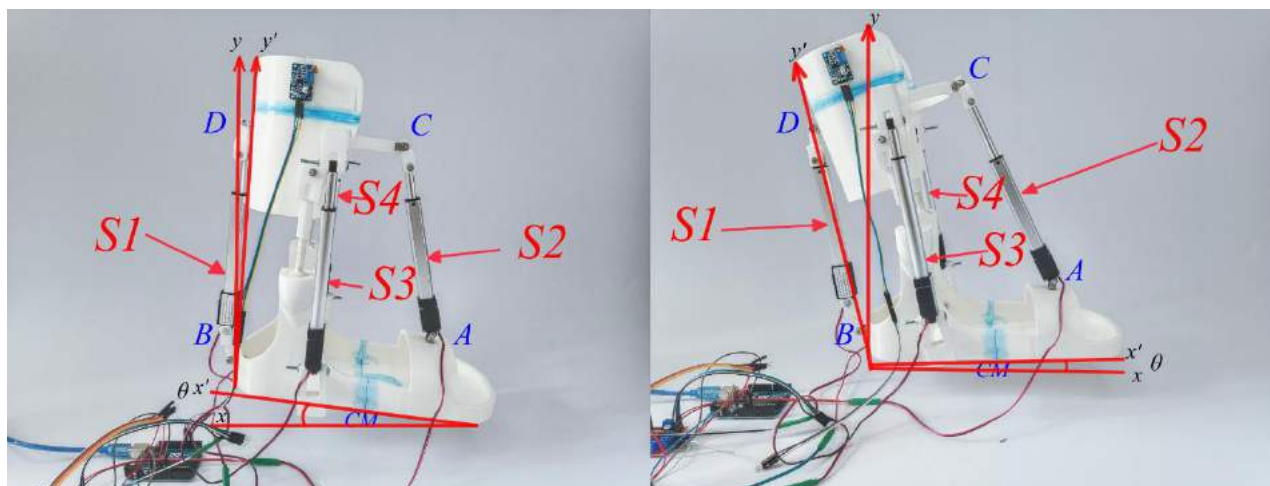
а)

ә)

Сурет 4.2. а) дорсифлексия және ә) плантарфлексия қозғалыстары

Үш қозғалысты ескере отырып, тобық буынын реабилитациялауға арналған құрылғы жұмысын реттейтін динамиканы модельдеу өте қиын, себебі жалпы жүйе сызықты емес. Кейбір практикалық тұжырымдарға байланысты мехатрониканың басты міндеті – құрылғыларды жеңілдетілген модельдер арқылы басқару. Осылайша оларды кейбір сыртқы әсерлерге төзімді етуге болады. Осыған байланысты алдымен тобық буынын реабилитациялауға арналған құрылғының негізгі қозғалыстарын басқару үшін жекелеген динамикасы қарастырылды. Оның басты себебі – пассивті реабилитация кезінде ең алдымен тобық буынының тұрақтылығы мен функционалдылығын қамтамасыз ететін белгілі бір жаттығу түрлері орындалады.

8 суретті қарастырайық, мұндағы  $\theta$  дорсифлексию мен плантарфлексия қозғалыс бұрышын анықтайды,  $x, y$  – абсолютті координаттар жүйесі,  $x', y'$  – жылжымалы координаттар жүйесі,  $P$  – күш шоғырын анықтайды, себебі күш тобық салмағының қандай да бір бөлігінен пайда болады (бүкіл аяқтың салмағы қарастырылмаған, өйткені науқас тек аяқтың бөлігіне ғана сүйенеді, мысалы, науқастың отырған жағдайын алып қарастыратын болсақ), сонымен қатар ол тобық буынының қаттылығын сипаттайды,  $d$  – тұрақты арақашықтық,  $\tau$  – бұрыштық бағдарды реттеу үшін қозғалтқыш беретін айналудың моменті.



Сурет 8. Дорсифлексия мен плантарфлексия қозғалыстарын сипаттайтын бұрыш  $\theta$

Аяқ платформасының дорсифлексию мен плантарфлексия қозғалыстары кезінде бұрыштық позицияны басқару үшін тек жекелеген динамика қарастырылған, біріктірілген қозғалыстар үшін қарастырылмаған. Қозғалыстың динамикасын басқаратын математикалық модельді Ньютонның екінші заңын қолдану арқылы алуға болады:

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} = \tau - Fd, \quad (4.1)$$

мұндағы  $J$  – инерция моменті,  $c$  – үйкеліс коэффициенті.

Алдын ала белгіленген траекторияларға сәйкес  $\theta^*$  қалаған позицияны жүзеге асыру үшін PID контроллерін қолдану ұсынылады.

$$\tau = Jv + c\dot{\theta}, \quad (4.2)$$

$$v = \ddot{\theta}^* - \alpha_2(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) - \alpha_1(\theta - \theta^*) - \alpha_0 \int_0^t (\theta - \theta^*) dt.$$

Жоғарыда ұсынылған траекторияны басқаратын контроллері бар, қателігі  $e = (\theta - \theta^*)$  құрайтын тұйық жүйе динамикасы келесідей беріледі:

$$\ddot{e} + \alpha_2\dot{e} + \alpha_1e + \alpha_0 \int_0^t e dt = -Fd, \quad (4.3)$$

$$\ddot{e} + \alpha_2\dot{e} + \alpha_1e - \alpha_0e = 0.$$

$\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  және  $\alpha_2$  параметрлері (4.3) сипаттамалық көпмүшесі модель динамикасының жаһандық асимптотикалық тұрақты болуын қамтамасыз ету үшін Хурвиц көпмүшесі болатындай етіп таңдалады.

Қажетті қозғалыс траекториясы келесі Безье көпмүшесімен беріледі:

$$\theta^*(t) = \theta_i + (\theta_f - \theta_i)\sigma(t, t_i, t_f)\mu_p^5,$$

$$\sigma(t, t_i, t_f) = \gamma_1 - \gamma_2\mu_p + \gamma_3\mu_p^2 - \dots + \gamma_6\mu_p^5, \quad (4.4)$$

$$\mu_p = \frac{t - t_i}{t_f - t_i},$$

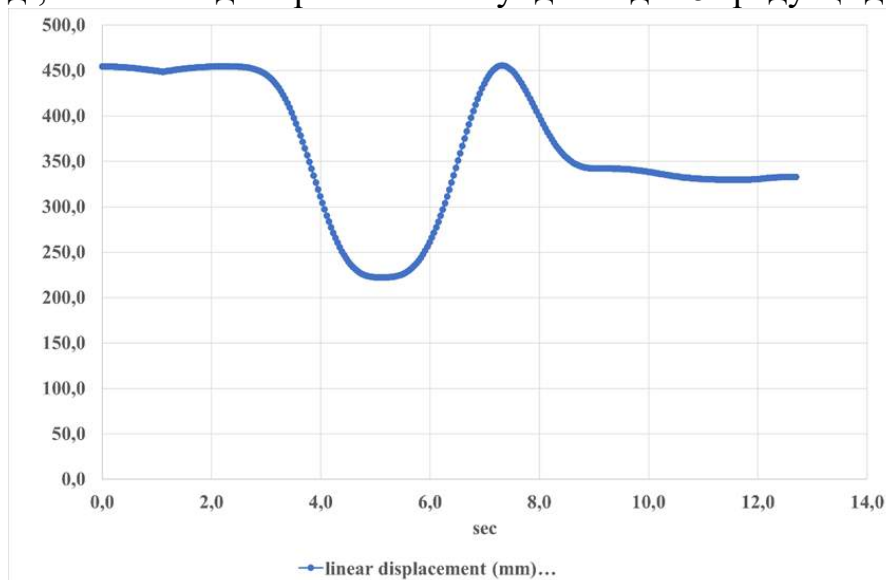
мұндағы  $\theta_i = \theta^*(t_i)$  және  $\theta_f = \theta^*(t_f)$  – бастапқы және соңғы қажетті позициялар болып табылады, осылайша реабилитация процесі бастапқы позициядан баяу бірқалыпты келесі позицияға ауысу арқылы жүзеге асырылады.

## 4.2 Нәтижелерді талқылау, бірінші эксперимент

Сурет 4.3-те dorsiflexion – plantarflexion иілулердің сызықтық қозғалыс кезінде тобық экзоскелетінің функционалды сынағы көрсетілген, оның ішінде экзоскелеттің жұмысын бағалау және тобық осы бағыттарда сызықтық қозғалыстарға ұшыраған кездегі реакция.

Табанның бұрыштық қозғалысының кірістері 14 секундта 45 градусты көрсетеді, оған мыналар кіреді: бұлшықет жиырылуы. Балтыр, табан, алдыңғы жіліншік және басқалары сияқты тобық айналасындағы бұлшықеттер жиырылып, босаңсып, қозғалу үшін қажетті күш жасайды.

Бұл кірістер тобықтың бұрыштық қозғалысын ұйымдастыру үшін бірге жұмыс істейді, нәтижесінде берілген 14 секунд ішінде 45 градусқа дәл бұрылады.

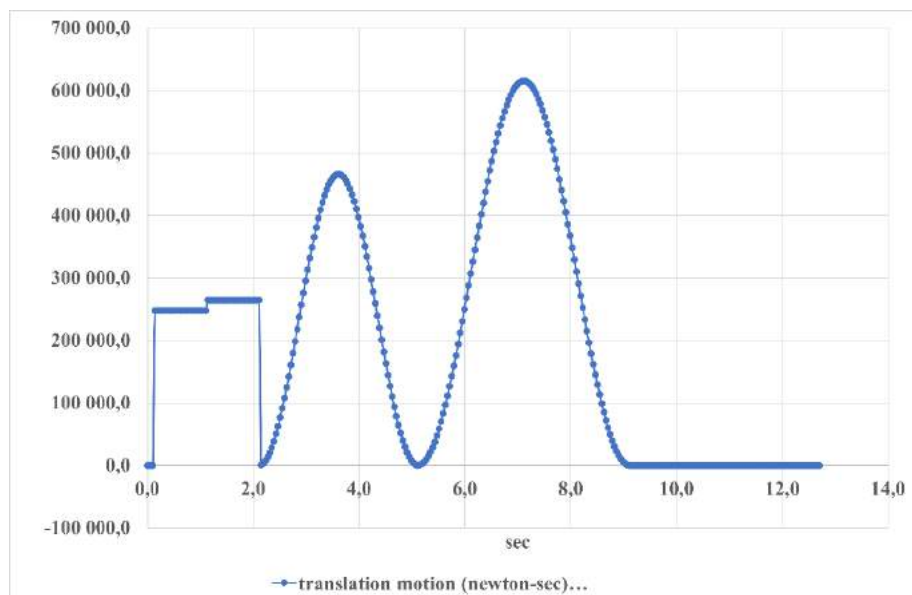


Сурет 4.3. Сынақ кезінде жетектердің сызықтық қозғалысына көрсетілген

Бұл бағалау экзоскелеттің динамикалық қозғалысы кезінде тиісті қолдауды, тұрақтылықты және бақылауды қамтамасыз ету қабілетін көрсетеді, бұл оның қозғалғыштығы мен жүрісін жақсартуға көмектесуде тиімділігін қамтамасыз етеді.

4.4-нші суретте жүргізілген сынақ кезінде S1 жетегінің трансляциялық қозғалысының егжей-тегжейлі талдауын ұсынатын алынған деректердің жан-жақты визуализациясын ұсынады, бұл жетектердің жауаптылығы және тобық экзоскелетінің онтайлы жұмыс істеуі үшін қажетті сызықтық қозғалыстарды жасау дәлдігі туралы құнды ақпарат береді.

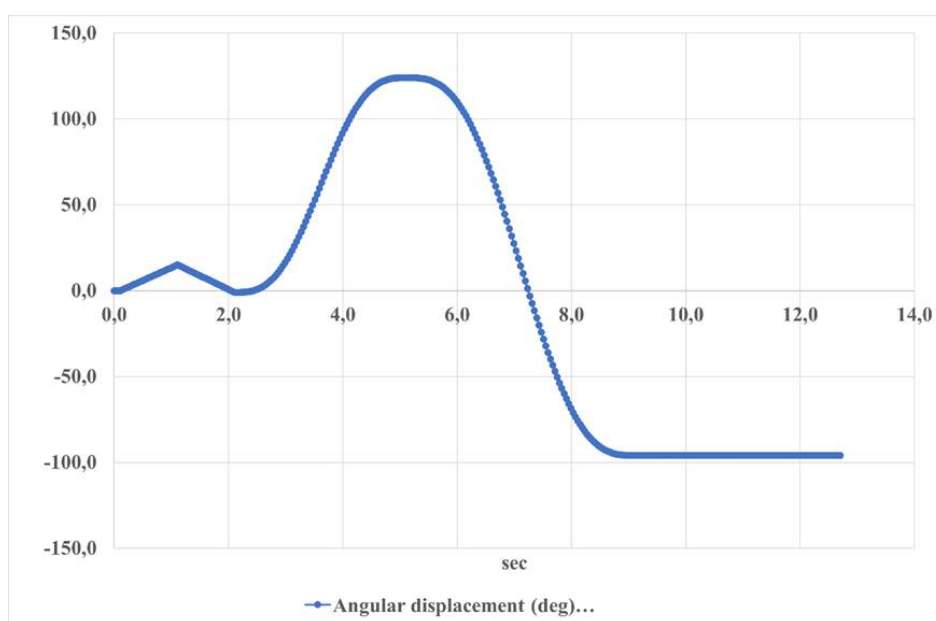
S1 тобық жетегінің ілгермелі қозғалысына арналған кіріс 14 секундта 600 ньютон секундты көрсетеді. S1 жетегі ілгермелі қозғалысты жасау үшін 600 Ньютон көрсетті. Бұл күш қозғалысқа жауап береді, көрсетілген уақыт ұзақтығы 14 секунд, бұл алға жылжу кезеңін көрсетеді.



Сурет 4.4 Сынақ кезінде  $S1$  жетегінің ілгермелі қозғалысы тұрғысынан алынған мәліметтер

Жоғарыдағы бұрыштық орын ауыстыру ( $S2$ ) сияқты, жан-жақты талдау тобық экзоскелетінің тиімді жұмыс істеуі үшін қажетті бақыланатын сызықтық қозғалыстарды жасау кезінде жетектердің керемет жауаптылығы мен дәлдігін көрсетті.

Сурет 4.5 +11-ден -10 градусқа дейінгі қозғалыс ауқымын көрсететін 14 секунд ішінде тобық экзоскелеттерінің ( $S2$ ) бұрыштық орын ауыстыру функционалды тексеру көрсетілген.

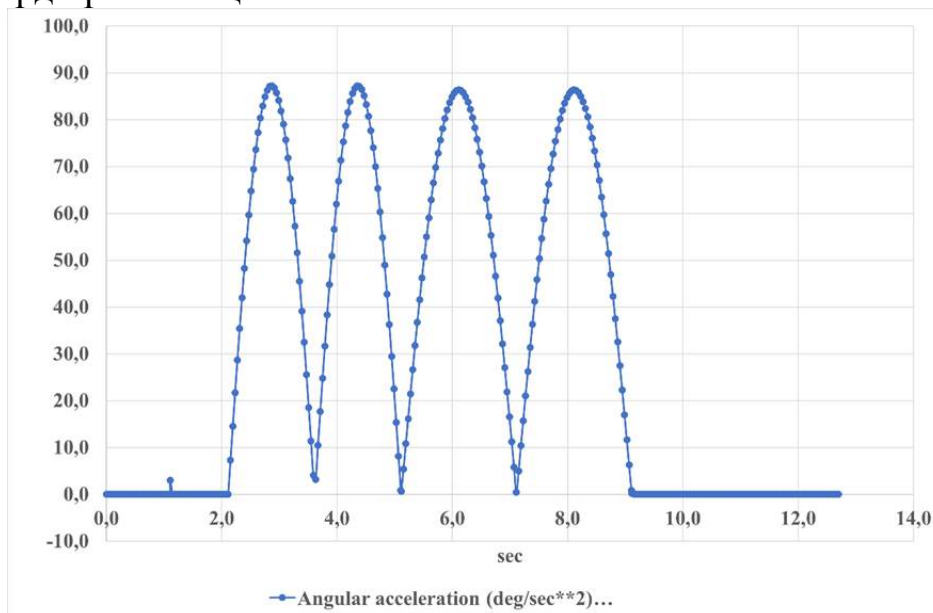


Сурет 4.5. бұрыштық орын ауыстыру ( $S2$ )

4.6 суретте бұрыштық үдеу көрсетілген, бұрыштық үдеу 85 градусқа 14 секундта жетеді. График уақыт өте келе бұрыштық жылдамдықтың өзгеру жылдамдығын көрсететін тобық экзоскелет жүйесінің бұрыштық үдеуін көрсетеді. Бір қызығы, тобық экзоскелеті небәрі 14 секундта 85 градусқа жететін



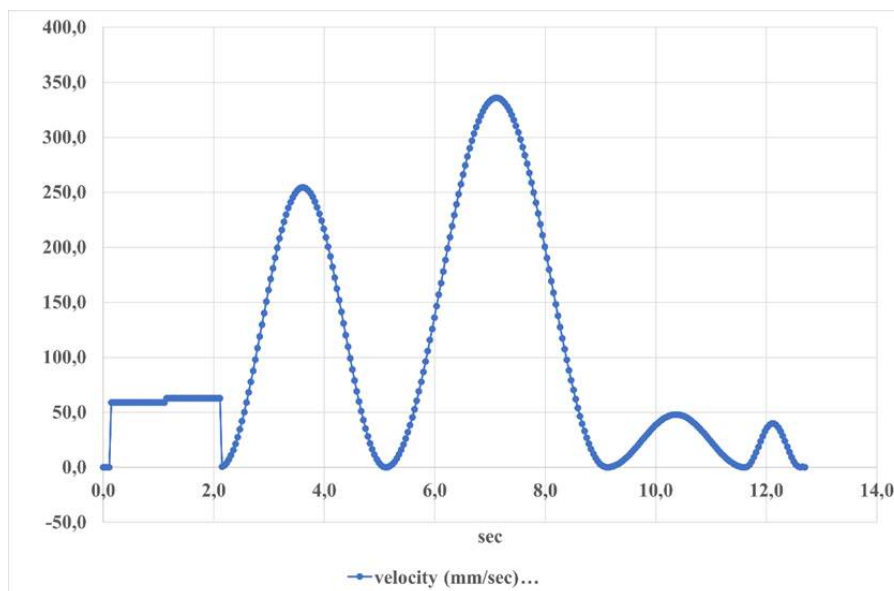
керемет бұрыштық мәнін көрсетеді. Бұл деректер тобық экзоскелеттерінің маңызды бұрыштық қозғалыстарға жылдам жету қабілетін көрсетеді, олардың әсерлі өнімділігі мен жауаптылығын көрсетеді. Суретте көрсетілген нәтижелер тобық экзоскелетінің бұрыштық үдеу тиімді генерациялау қабілетін көрсетеді, бұл жылдам және дәл қозғалыстар жүру және ұтқырлық тапсырмаларын орындау кезінде оңтайлы функционалдылық пен қолдау үшін маңызды болып табылатын қолданбаларда үлкен маңызға ие.



Сурет 4.6. Бұрыштық үдеу

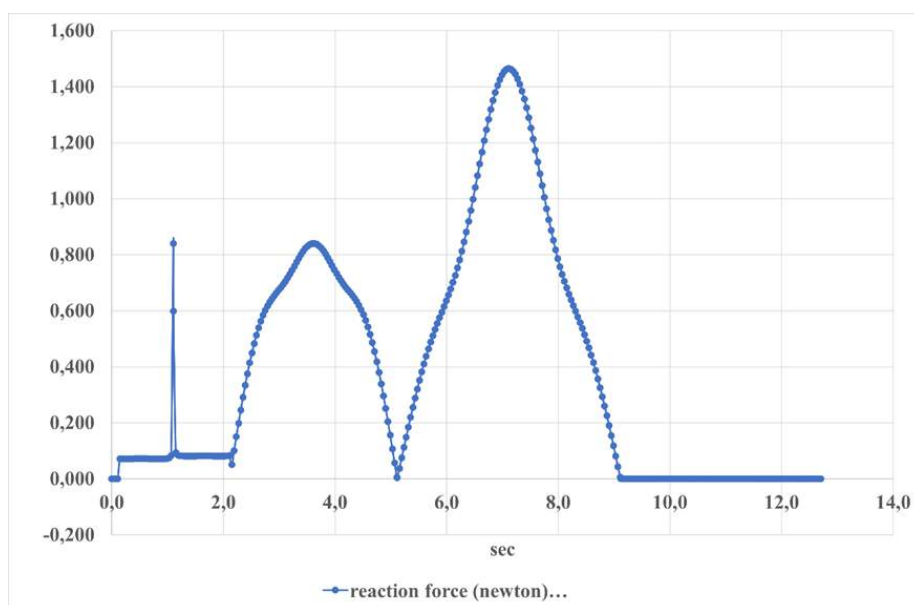
Суретте 14 секундына метрмен (м/с) өлшенген тобық экзоскелетінің жылдамдық профилінің толық көрінісі ұсынылған. Алғашқы 2 секундта жылдамдық 0-ден басталып, 50 м/с-қа дейін біртіндеп артады, содан кейін 2-ден 5-ші секундқа дейін жылдамдық айтарлықтай жылдамдайды, жылдамдық 250 м/с-қа жетеді, 6-шы және 9-шы секундтар арасында жылдамдық салыстырмалы түрде тұрақты болып қалады, максималды мәнге жетеді. 340 м/с. Ақырында, 9-дан 13-ші секундқа дейінгі аралықта жылдамдық біртіндеп төмендейді, минималды 50 м/с-қа тұрақтанады.

Бұл бақылаулар тобық экзоскелетінің динамикалық мінез - құлқы және оның жүрістің әртүрлі фазалары мен пайдаланушының талаптарына бейімделу үшін әртүрлі жылдамдықтарды жасау қабілеті туралы құнды ақпарат береді, бұл оның ұтқырлықты және ұтқырлықты арттыру әлеуетін көрсетеді.



Сурет 4.7. Жылдамдық

Суретте бақылау кезеңінде әрекет ететін  $S1$  және  $S2$  реакция күштері көрсетілген. 0-ден 5 секундқа дейін  $S1$  реакция күші 0-ден басталып, 80 Н мәніне дейін біртіндеп артады, содан кейін 5 секундтан басталып, 10 секундқа дейін жалғасады,  $S2$  реакция күші айтарлықтай өсуді көрсетеді, 145 Н-ге жетеді. Бұл деректер жүйенің динамикалық мінез-құлқы туралы құнды ақпарат береді, әр түрлі күштерді көрсетеді белгіленген уақыт аралығында тобық экзоскелетімен



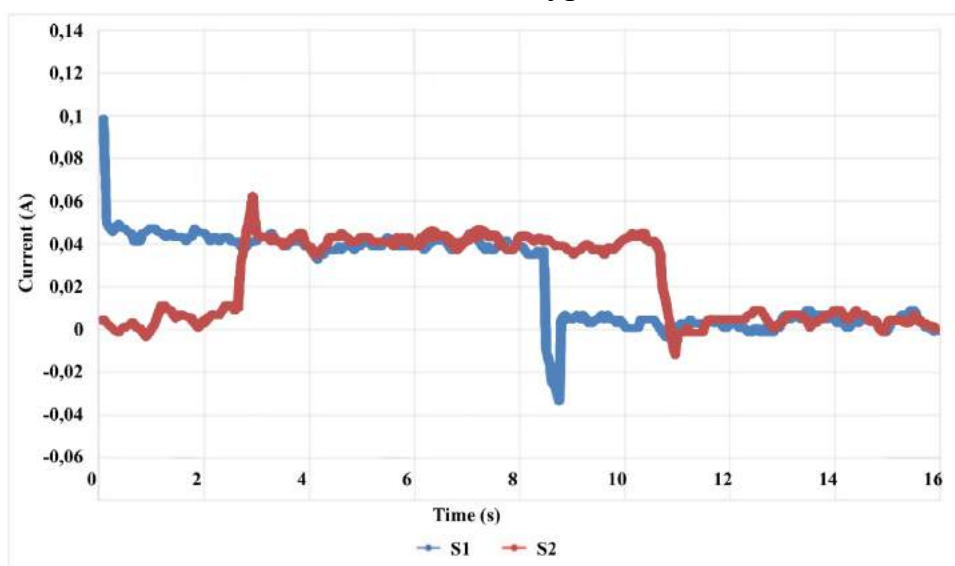
Сурет 4.8. Реакция күші ( $S1$  және  $S2$ )

Тобық буын экзоскелетінде төрт электрлі жетек болған кезде, әрбір электрлік сызықтық жетек тұтынатын ток әртүрлі факторларға, соның ішінде экзоскелеттің дизайнына, салмағына және пайдаланушының қозғалыс талаптарына және қолданылатын басқару жүйесіне байланысты өзгеруі мүмкін. Әрбір жетек талап ететін токқа жүктеме, қажетті момент, жетектердің жылдамдығы мен тиімділігі сияқты факторлар әсер етеді.

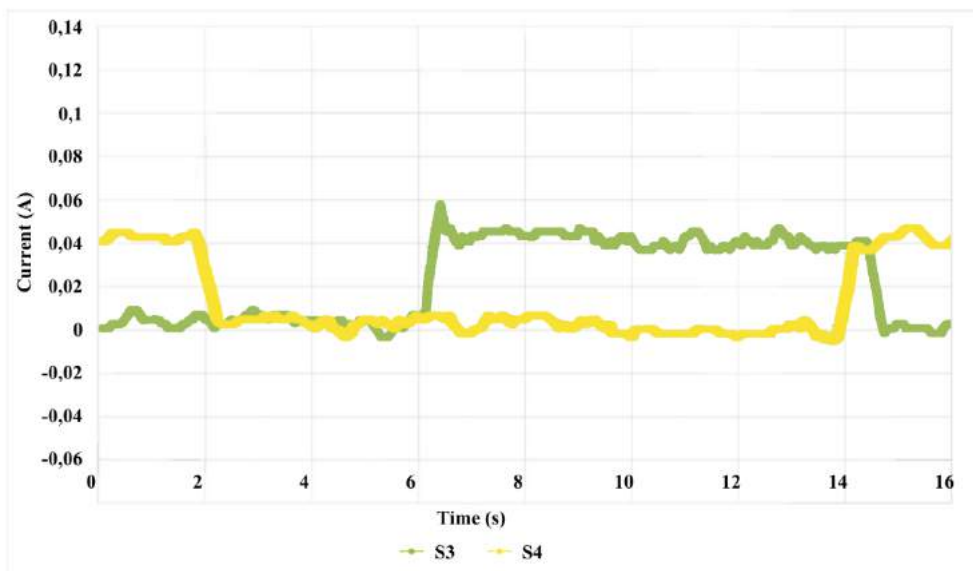


Мұндай жүйеде әрбір электр сызықтық жетегі (А) тұтынатын токты анықтау үшін қажет. Өнімділік талаптарын анықтау әр экзоскелеттік тобық жетегі үшін қажетті моментті, жылдамдықты және қозғалыс ауқымын анықтау. Сәйкес жетектерді таңдау көрсетілген талаптарға сәйкес келетін сызықтық жетектерді таңдап. Әр түрлі номиналды қуаты мен тиімділік сипаттамалары бар жетектер әр түрлі токтарды тұтынуы мүмкін ескеру қажет. Таңдалған жетектерге және олардың техникалық сипаттамаларына сүйене отырып, қалаған өнімділікке жету үшін әр жетекке қажет токты есептеп кернеу, қуат және тиімділік сияқты факторларды қамтуы мүмкін. Датчиктердің кері байланысы (мысалы, күш немесе позиция датчиктері) және пайдаланушының қозғалысы негізінде нақты уақыт режимінде әр дискіге берілетін токты реттей алатын басқару жүйесін жасау. Басқару жүйесі энергияны үнемдеу кезінде пайдаланушының қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін токты оңтайландыру үшін алгоритмдерді қолдана алады. Қауіпсіз және тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін жұмыс кезінде әр жетектің ток шығынын үнемі бақылап отырдық.

Токтың нақты шығыны пайдалану кезінде  $S1$  0,1 А және  $S2$  0,06 А жетектің нақты қозғалыстары мен күштеріне байланысты динамикалық түрде өзгеруі мүмкін. Сондықтан энергияны тұтынуды азайту кезінде пайдаланушыға қажетті қолдау мен ұтқырлықты қамтамасыз ету үшін осы өзгермелі жағдайларға бейімделе алатын жақсы жобаланған басқару жүйесінің болуы өте маңызды. Сонымен қатар,  $S3$  0,06 А және  $S4$  0,04 А тұтынылатын токтың нақты мәндері таңдалған жетектердің сипаттамаларына және экзоскелеттің дизайнына байланысты болады нәтижесі 4.9 бен 4.10 суретте.



Сурет 4.9.  $S1$  және  $S2$  жетектерінің ток мәні



Сурет 4.10. S3 және S4 жетектерінің ток мәні

#### 4.4 Төртінші тараудың қорытындылары және мәселенің тұжырымы

Суреттерде көрсетілген жан-жақты бағалау тобық экзоскелетінің әсерлі сипаттамалары мен жауаптылығын көрсетеді. Қысқа уақыт ішінде айтарлықтай жылдамдықпен үдеулермен басқарылатын сызықтық және бұрыштық қозғалыстарды жасау мүмкіндігі оның динамикалық әрекеттер кезінде ұтқырлықты, тұрақтылықты және қолдауды арттыру әлеуетін көрсетеді. Әр түрлі реакция күші сонымен қатар жүйенің жүрістің әр түрлі фазаларына және сыртқы тітіркендіргіштерге бейімделуіне баса назар аударады.

4.1 - кесте dorsiflexion – plantarflexion иілулердің тобық экзоскелетінің функционалды сынағы көрсетілген, сынақ нәтижелері туралы алынған деректердің қысқаша мазмұны.

Параметрлер	$d$ (mm)		$\Delta S1$ (mm)	$\Delta\theta$ (degree)		$\alpha$ (degree)	$\Delta v$ (mm)		Power	Current (A)
	max	min		max	min		max	min		
	градус/с <sup>2</sup>									
Сызықтық қозғалысы	45	35	-	-						
S1 жетегінің ілгермелі қозғалысы	-		600 Н	-						
бұрыштық орын ауыстыру (S2)	-		-	+11	-10					

Бұрыштық үдеу	-	-		85				
Жылдамдық	-	-			25	35		
Реакция күші ( $S1$ және $S2$ )							8 Н – 14 Н	
Ток (А)								0.1 А - 0.04 А

Бұл нәтижелер экзоскелеттің дизайнын жетілдіруде және оның нақты сипаттамаларын оңтайландыруда маңызды рөл атқарады. Киюге болатын робототехника саласын дамыта отырып, бұл дәл өлшемдер моторикасы жақсарған адамдарға көмектесуге жол ашады және сайып келгенде, олардың жалпы өмір сүру сапасын жақсартуға ықпал етеді.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыс тобық экзоскелетін жасанды бұлшық етті қолдану арқылы басқару және әзірлеу болып табылады.

Almaty экзоскелеті тобық буынының экзоскелеттері саласындағы аналогтардың арасында өзінің ұтқырлықта төңкеріс жасау және тобық буынының аурулары немесе жарақаттарынан зардап шегетін адамдардың жалпы өмір сүру сапасын жақсарту әлеуетінің арқасында елеулі назар аударады.

Эксперименттік тестілеу процесі экзоскелеттің мүмкіндіктерін объективті бағалауды жеңілдетті, ал функционалды тестілеу оның әртүрлі қозғалыстарға бейімделуі туралы баға жетпес ақпарат берді.

Жұмыстың негізгі ғылыми және практикалық нәтижелері келесідей:

1. Қолданыстағы экзоскелеттер, сондай-ақ олардың басқару жүйелері зерттелді және талданды. Нәтижесінде жасанды бұлшықеттермен экзоскелеттік құрылғыны қолданудың оңтайлы шешімі табылды. Атқарылған жұмыстар мен сынақтар туралы есеп мақала түрінде рәсімделеді.

2. Жасанды бұлшықеттері бар экзоскелеттік құрылғы зерттелді және экзоскелеттік құрылғының тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін жаңа шешімдер табылды, атап айтқанда жасанды бұлшықеттер зерттеліп, талданады. Атқарылған жұмыстар мен сынақтар туралы есеп ғылыми мақала түрінде рәсімделеді.

3. Жасанды бұлшықеттермен жасалған экзоскелет қауіпсіздік талаптарына сәйкес. Барлық компонент пен электр жетектер талаптарға және электр қауіпсіздігіне сәйкес таңдалды. Жасанды бұлшықеттермен тобық экзоскелетін құрудың ғылыми жаңалығы тірек-қимыл аппараты бұзылған адамдардың қозғалғыштығы мен өмір сүру сапасын жақсартуға, және оңалтуға арналған құрылғыны жасау болып табылды.

4. Экзоскелетте жасанды бұлшықеттерді қолдану - бұл бұлшықеттердің емделуіне және күшеюіне ықпал ететін бақыланатын қарсылықты қамтамасыз етудің және тобыққа көмектесудің жаңа тәсілі. Сенсорлар мен басқару жүйесінің интеграциясы жасанды бұлшықеттерді дәл және жеке басқаруға мүмкіндік береді, бұл экзоскелеттің инновациялық ерекшелігі.

5. Сонымен қатар, экзоскелет әртүрлі ұтқырлық бұзылыстары бар адамдардың нақты қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін бейімделуі мүмкін, бұл оңалту мен спорттық өнімділікті арттыруға жеке көзқарасты қамтамасыз етеді. Экзоскелетті емдеу процесінің прогрессиясына байланысты реттеуге болады, бұл жасанды бұлшықеттер ұсынатын қарсылық пен көмекті біртіндеп қалпына келтіруге және реттеуге мүмкіндік береді.

6. Тұтастай алғанда, зерттеудің ғылыми жаңалығы жасанды бұлшықеттер мен басқару жүйесін қамтитын экзоскелеттің жаңа дизайнын, сондай-ақ оның ұтқырлықты, оңалтуды және спорттық өнімділікті жақсарту әлеуетін әзірлеу болып табылады.

Осылайша, жасанды бұлшықеттермен жабдықталған тобық буын экзоскелетін басқару мен дамытудың маңыздылығын атап өту керек. Жасанды бұлшықеттер ұсынатын биомеханикалық артықшылықтарды тобық экзоскелет

технологиясымен біріктіру тиімдірек, бейімделгіш және пайдаланушыға ыңғайлы шешімдерге жол ашады. Бұл ұтқырлығы шектеулі адамдардың өмір сүру сапасын айтарлықтай жақсартуға уәде беріп қана қоймайды, сонымен қатар ассистивті технологияларды, әсіресе тобықты оңалтуда үздіксіз зерттеулер мен әзірлемелердің негізгі рөлін көрсетеді.

**Диссертациялық жұмыста ұсынылған модельдердің, әдістемелердің, құрылымдық жобалардың және техникалық шешімдері жасанды бұлшықеттерді қолдана тобықты оңалтуға арналған экзоскелеттерді ілгерілетудің негізі болып табылады. Сонымен қатар, бұл зерттеу киілетін робототехника саласында ішкі және сыртқы нарықта бәсекеге қабілетті құрылғыны шығаруға ықпал етеді.**

## ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 K. Z. Takahashi, M. D. Lewek, and G. S. Sawicki, «A neuromechanics-based powered ankle exoskeleton to assist walking post-stroke: A feasibility study», *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 12, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- 2 Y. Bai, X. Gao, J. Zhao, F. Jin, F. Dai, and Y. Lv, «A portable ankle-foot rehabilitation orthosis powered by electric motor», *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 982–991, 2015. [Online]. Available: <http://benthamopen.com/ABSTRACT/TOMEJ-9-982>
- 3 Zhetenbayev Nursultan., Marco Ceccarelli., Gani Balbayev. «Design and Performance Analysis of Ankle Joint Exoskeleton», *New Trends in Medical and Service Robotics 2023 MESROB 2023, MMS 133*, pp. 152–159, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32446-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32446-8_17).
- 4 «Facts and figures about stroke», World Stroke Organization, n.d. [Online]. Available: <https://www.world-stroke.org/component/content/article/16-forpatients/84-facts-and-figures-about-stroke>
- 5 N. Alexander, G. Strutzenberger, L. M. Ameshofer, and H. Schwameder, «Lower limb joint work and joint work contribution during downhill and uphill walking at different inclinations», *Journal of Biomechanics*, vol. 61, pp. 75–80, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.07.001>
- 6 T.-w. P. Huang and A. D. Kuo, «Mechanics and energetics of load carriage during human walking», *Journal of Experimental Biology*, vol. 217, no. 4, pp. 605–613, 2014. [Online]. Available: <http://jeb.biologists.org/cgi/doi/10.1242/jeb.091587>
- 7 Исабеков Ж.Н., Ковальчук А. К., Жетенбаев Н.Т., «Төменгі шектеулер экзоскелеттері: қысқаша түсініктеме» *Вестник КазАТК №1 (108)*, 2019; г. Алматы, Казахстан, Бет. 78–84.
- 8 H. Weerasingha, W. P. K. Withanage, A. D. K. H. Praganathikala, R. K. P. S. Ranaweera, and R. A. R. C. Gopura, «Powered ankle exoskeletons: existent designs and control systems», *The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics*, pp. 76–83, 2018.
- 9 K. Staman, A. J. Veale, and H. V. D. Kooij, «The PREHydrA: a passive return, high for cedensity, electro-hydrostatic actuato rconcept for wearable robotics», pp. 1–6.
- 10 Z. Wang and E. T. Hsiao-Wecksler, «Design of a compact high-torque actuation system for portable powered ankle-foot orthosis», *Journal of Medical Devices*, vol. 10, no. 3, 2016
- 11 B. Zoss, H. Kazerooni, and A. Chu, «Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX),» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 11, no. 2, pp. 128–138, 2006.
- 12 B. Neubauer and W. Durfee, «Preliminary design and engineering evaluation of a hydraulic ankle-foot orthosis,» *Journal of Medical Devices*, vol. 10, no. 4, 2018. [Online]. Available: <http://medicaldevices.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4033327>

- 13 L. M. Mooney, E. J. Rouse, and H. M. Herr, “Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking during load carriage,” vol. 11, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- 14 C. Meijneke, W. van Dijk, and H. van der Kooij, “Achilles: an autonomous lightweight ankle exoskeleton to provide push-off power,” IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 918–923, 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6913898>
- 15 W. Van Dijk, C. Meijneke, and H. van Der Kooij, “Evaluation of the achilles ankle exoskeleton,” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 25, no. 2, pp. 151–160, 2017.
- 16 K. A. Van Dijk, J. Zhang, R. W. Jackson, and S. H. Collins, “Design of two lightweight, high-bandwidth torque-controlled ankle exoskeletons,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1223–1228, 2015.
- 17 M. Olinski., A. Gronowicz., A. Handke., M. Ceccarelli., «Design and characterization of a novel knee articulation mechanism», Int. J. Appl. Mech. Eng. 21 (3) (2016) pp. 611–622.
- 18 Li, T. and Ceccarelli M., «Design and simulated characteristic sofa new biped mechanism», Robotica, 33, 2015, pp 1568–1588.
- 19 Copilusi C., Ceccarelli M., and Carbone G., «Design and numerical characterization of a new leg exoskeleton for motion assistance», Robotica, 33, 2015, pp. 1147–1162.
- 20 Dumitru N., Copilusi C., Geonea I., Tarnita D., Dumitrache I., «Dynamic Analysis of an Exoskeleton New Ankle Joint Mechanism», New Trends in Mechanism and Machine Science Mechanisms and Machine Science, Vol. 24, Springer International Publishing, 2015, pp. 709–717.
- 21 Geonea I., Ceccarelli M., Carbone G., «Design and analysis of an exoskeleton for people with motor disabilities», in the 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, 2015, pp.
- 22 Copilusi C., Dumitru N., Margine A., «Modular Knee Orthosis FEM Analysis from Kinematic Considerations», New Trends in Mechanism and Machine Science Mechanisms and Machine Science. Vol. 7, 2012, pp 431-439.
- 23 Copilusi C., Marin M., Rusu L., Geonea I., «Design Considerations regarding a New Knee Orthosis», Journal of Applied Mechanics and Materials Vol. 162. 2012. Online available since 2012. Mar.27., at [www.scientific.net](http://www.scientific.net). pp 276-285.
- 24 Copilusi C., Marin M., Dumitru N., Rusu L., «Locomotion System Dynamic Analysis with Application on Children Orthotics and Prostheses Devices», Lecture Notes in Engineering and Computer Science: World Congress on Engineering. Vol. III. 2012. pp. 16631668.
- 25 Copilusi C., «Design of a New Knee Modular Orthotic Device from Cinematic Considerations», Lecture Notes in Engineering and Computer Science: World Congress on Engineering. Vol. III. 2012. pp. 2010-2015.
- 26 Copilusi C., Dumitru N., Marin M., Rusu L., «Human Lower Limb Kinematic Analysis with Application on Prosthesis Mechanical Systems», 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México. IMD-123. IfTOMM-2011. Paper ID: A22-343. ISBN 978-607-441-131-7.

- 27 Copilusi C., Marin M., Rusu L., «A New Knee Prosthesis Design Based on Human Lower Limb Cinematic Analysis», in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: World Congress on Engineering Vol. III*. 2011. pp. 2491–2496.
- 28 Copilusi C., Dumitru N., Rusu L., Marin M., «Cam Mechanism Kinematic Analysis used in a Human Ankle Prosthesis Structure», *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: World Congress on Engineering. Vol. II*. 2010. pp. 1316-1320.
- 29 Copilusi C., «Research regarding some mechanical systems applicable in medicine», PhD Thesis, Faculty of Mechanics, University of Craiova. Romania. 2009.
- 30 Dumitru N., Copilusi C., Marin M., Rusu L., «Human Lower Limb Dynamic Analysis with Applications to Orthopedic Implants», *Mechanisms and Machine Science–New Trends in Mechanism Science. Analysis and Design*. Springer Berlin Heidelberg Publishing house. Vol. V. 2010. pp. 327-334.
- 31 Copilusi C., Ceccarelli M., Carbone G., «Design and numerical characterization of a new leg exoskeleton for motion assistance», *Robotica* 2015; 33(5): 1147–1162.
- 32 Copilusi C., Ceccarelli M., Carbone G., «Mechanism of a leg exoskeleton for walking rehabilitation purposes», In: *New advances in mechanisms, transmissions and applications*, Vol. 17, 2014, pp. 107–114. Dordrecht: Springer.
- 33 Copilusi C., Ceccarelli M., Dumitru N., «Design and simulation of a leg exoskeleton linkage for a human rehabilitation system», In: *The 11th IFToMM international symposium on science of mechanisms and machines*, 2014, pp. 117–125.
- 34 Copilusi C., Ceccarelli M., Carbone G., «Design and numerical characterization of a new leg exoskeleton for motion assistance», *Robotica*, 2014, 33, 1–16.
- 35 Rupal B. S., Singla A., Virk G. S., «Lower limb Exoskeletons: A Brief Review», *Conference on Mechanical Engineering and Technology (COMET2016)*, IIT (BHU), Varanasi, India, 2016, pp.
- 36 Singh G., Singla A., Virk G. S., «Modeling and Simulation of a Passive Lower-body Mechanism for Rehabilitation», *Conference on Mechanical Engineering and Technology (COMET-2016)*, IIT (BHU), Varanasi, India, 2016, pp.
- 37 Cenciarini M. and Dollar A. M., «Biomechanical Considerations in the Design of Lower Limb Exoskeletons», *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICoRR)*, 2011. pp.1-6.
- 38 Ferrati F., Bortoletto R., Pagello E., «Virtual modelling of a real exoskeleton constrained to a human musculoskeletal model», in: *Living Machines*, 2013, pp.96–107.
- 39 Agarwal P., Narayanan M. S., Lee L.F, Mendel F., Krovi V.N., «Simulation-based design of exoskeletons using musculoskeletal analysis», in: *Proc. of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Canada, 2010, pp.
- 40 Gallagher W., Ding M., Ueda J., «Relaxed individual control of skeletal muscle forces via physical human–robot interaction», *Multibody Syst. Dyn.* 30 (1) (2013) pp. 77–99.
- 41 Hernandez S., Raison M., Baron L., Achiche S., «Refinement of exoskeleton design using multibody modeling: An overview», in: *CCToMM Mechanisms, Machines, and Mechatronics Symposium*, 2015, pp.1–10.
- 42 Lenzi T., Vitiello N., Rossi S., Roccella S., Vecchi F., Carrozza M., «NEUROExos: a variable impedance powered elbow exoskeleton», in: *Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011, pp.1419–1426.
- 43 Bai S. and Rasmussen J., «Modelling of physical human-robot interaction for exoskeleton designs», in: J.C. Samin, P. Fiset (Eds.), *Proc. of Multibody Dynamics 2011, ECCOMAS Thematic Conference*, Brussels, Belgium, 2011, pp.1–7.



- 44 Krut S., Benoit M., Dombre E., Pierrot F., «Moonwalker, a lower limb exoskeleton able to sustain bodyweight using a passive force balancer», In Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on 2010 May 3, pp. 2215-2220.
- 45 Chen G., Guo Z., Yu H., «Mechanical Design and Evaluation of a Novel Knee-Ankle - Foot Robot for Rehabilitation», In ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2015 Aug 2, pp. V003T14A015-V003T14A015.
- 46 Mukul Talaty., Alberto Esquenazi., Jorge E Briceno., «Differentiating ability in users of the ReWalk powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics», In: Proceedings of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Seattle, USA; 2013. p. 1-5.
- 47 Chen B., Ma H., Qin LY., Guan X., Chan KM., Law SW., «Design of a lower extremity exoskeleton for motion assistance in paralyzed individuals», In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Zhuhai, China; 2015. p. 144-9.
- 48 Letier P., Motard E., and Verschuere J.P., «EXOSTATION: Haptic exoskeleton-based control station», 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- 49 Unluhisarcikli O., Pietrusinski M., Weinberg B., Bonato P., and Mavroidis C., «Design and control of a robotic lower extremity exoskeleton for gait rehabilitation», 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- 50 Yin Y., Fan Y., and Xu L., «EMG & EPP Integrated Human machine Interface between the Paralyzed and Rehabilitation Exoskeleton», IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2012. vol. PP, no. 99, pp. 1.
- 51 Farris R.J., Quintero H.A., and M. Goldfarb., «Preliminary Evaluation of a Powered Lower Limb Orthosis to Aid Walking in Paraplegic Individuals», IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 652-659.
- 52 Chetcuti G., «Control of A Robotic Upper Limb Exoskeleton for Use in Muscular Strength Augmentation and Rehabilitation», 2011, University of Technology Sydney: Sydney. p. 92.
- 53 Kiguchi K. and Y. Hayashi., «An EMG-Based Control for an Upper Limb Power Assist Exoskeleton Robot», IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2012, vol. PP, no. 99, pp. 1-8.
- 54 Gomes M., Silveira G., and Siqueira A., «Gait Pattern Adaptation for an Active Lower Limb Orthosis Based on Neural Networks», Advanced Robotics, 2011, vol. 25, no. 15, pp. 1903-1925.
- 55 Wolbrecht E.T., Reinkensmeyer D.J., and Bobrow J.E., «Pneumatic control of robots for rehabilitation», The International Journal of Robotics Research, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 23-38.
- 56 Miller, L.M. and J. Rosen, «Comparison of multi-sensor admittance control in joint space and task space for a seven degree of freedom upper limb exoskeleton», 2010, 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob).
- 57 Wen Y., Rosen J., and Xiaou L., «PID admittance control for an upper limb exoskeleton», 2011, American Control Conference (ACC).
- 58 Culmer P.R., Jackson A.E., Makower S., Richardson R., Cozens J.A., Levesley M.C., and Bhakta B.B., «A Control Strategy for Upper Limb Robotic Rehabilitation with a Dual Robot System», Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 575-585.

- 59 Aguirre-Ollinger G., Colgate J.E., Peshkin M.A., and Goswami A., «Design of an active one-degree-of-freedom lower-limb exoskeleton with inertia compensation», *The International Journal of Robotics Research*, 2011, vol. 30, no. 4, pp. 486-499.
- 60 Aguirre-Ollinger G., Colgate J.E., Peshkin M.A., and Goswami A., «Inertia Compensation Control of a One – Degree – of - Freedom Exoskeleton for Lower - Limb Assistance: Initial Experiments», *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 68-77.
- 61 Balasubramanian S., and He J., «Adaptive control of a wearable exoskeleton for upper - extremity neurorehabilitation», *Applied Bionics and Biomechanics*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 99-115.
- 62 Brochu P. and Pei Q., «Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles», *Macromolecular Rapid Communications*, 2010, Vol.31, No.1, pp. 10-36.
- 63 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Ғ.Қ. Чеккарелли М., «Экзоскелеттердің терминологиясы мен жіктелуі» ҚазҰТЗУ ХАБАРШЫСЫ 2019 №6; ж. Алматы, Қазақстан Бет. 285–292.
- 64 Kocis P. and Knoflicek R., «Artificial Muscles», Part 2: Pneumatic Muscles (in Czech). ISSN 1212-2572. Praha: MM Prumyslove spektrum, 2016.
- 65 Gregorczyk K.N., Hasselquist L., Schiffman J.M., Bensek C.K., Obusek J.P., Gutekunst D.J., «Effects of a lower-body exoskeleton device on metabolic cost and gait biomechanics during load carriage», *Ergonomics* 53 (10) (2010) pp. 1263– 1275.
- 66 Kim K., Kang M., Choi Y., Jang H., Han J., Han C., «Development of the exoskeleton knee rehabilitation robot using the linear actuator», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13(10) (2012) pp. 1889–1895.
- 67 Wu Q., Wang X., Du F., Zhang X., «Design and control of a powered hip exoskeleton for walking assistance», *Int.J.Adv.Rob.Syst.*12(3), 2015, pp. 18.
- 68 Celebi B., Yalcin M., Patoglu V., «Assiston - Knee: A self-aligning knee exoskeleton», in:2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2013, pp. 996–1002.
- 69 Chandrapal M., «Intelligent Assistive Knee Orthotic Device Utilizing Pneumatic Artificial Muscles», *Mechanical Engineering 2012, University of Canterbury Proceedings of the 14th Mechatronics Forum International Conference, Mechatronics*, 2014.
- 70 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Ғ.Қ. Чеккарелли М., Исабеков Ж.Н., «Экзоскелеттерді құрастырудың қысқаша тарихы» ҚазҰТЗУ ХАБАРШЫСЫ 2019 №6; ж. Алматы, Қазақстан, Бет. 293–295.
- 71 Yoshiyuki Sankai., «HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics», *Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 66*, 2011, pp 25-34.
- 72 L. Wang., van Asseldonk E., van der Kooij H., «Actively Controlled Lateral Gait Assistance in a Lower Limb Exoskeleton», 2013 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- 73 Flynn L., J. Geeroms R., Jimenez – Fabian., Vanderborght B., Vitiello N., and Lefeber D., «Ankle – knee prosthesis with active ankle and energy transfer: Development of the CYBERLEGS AlphaProsthesis», *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, vol. 73, pp. 4-15, 2015.
- 74 Lo H. S., and Xie S. Q., «Exoskeleton robots for upper - limb rehabilitation: state of the art and future prospects», *Med Eng Phys*, Apr 2012, vol. 34, pp. 261-8.
- 75 Cheng X., Zhou Y., Zuo C., and Fan X., «Design of an Upper Limb Rehabilitation Robot Based on Medical Theory», *Procedia Engineering*, 2011, vol. 15, pp. 688-692.

- 76 Zhang S., Guo S., Fu Y., Boulardot L., Huang Q., Hirata H., «Integrating Compliant Actuator and Torque Limiter Mechanism for Safe HomeBased Upper-Limb Rehabilitation Device Design», *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2017, vol. 37, pp. 357-364.
- 77 Ito S., Kawasaki H., Ishigure Y., Natsume M., Mouri T., and Nishimoto Y., «A design of fine motion assist equipment for disabled hand in robotic rehabilitation system», *Journal of the Franklin Institute*, 2011, vol. 348, pp. 79-89.
- 78 Viteckova S., Kutilek P., and Jirina M., «Wearable lower limb robotics: A review», *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2013, vol. 33, pp. 96-105.
- 79 Akdoğan E. and Adli M. A., «The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherapist», *Mechatronics*, 2011, vol. 21, pp. 509-522.
- 80 Kang H. B. and Wang J. H., «Adaptive control of 5 DOF upper-limb exoskeleton robot with improved safety», *ISA Trans*, Nov 2013, vol. 52, pp. 44-52
- 81 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Г.К., «Последние разработки и проблемы экзоскелетов нижних конечностей» ВЕСТНИК Торайгыров университета Энергетическая серия, 2020 №4; г. Павлодар, стр. 156–167.
- 82 Auberger R., Breuer - Ruesch C., Fuchs F., Wismer N., and Riener R., «Smart Passive Exoskeleton for Everyday Use with Lower Limb Paralysis: Design and First Results of Knee Joint Kinetics», in 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), to be published, Enschede, 2018, pp.
- 83 Bouteraa Y. and Ben Abdallah I., «Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation», 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Leipzig, pp 1-6.
- 84 Gopura R.A.R., Bandara D.S., Kiguchi K., Mann G.K.I., «Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review», *Robot. Auton. Syst.* 75 (2016) pp. 203–220.
- 85 Н.Т. Жетенбаев., «Экзоскелет роботы для нижних конечностей», «Ғылым, білім және өндіріс интеграциясы – Ұлт жоспарын жүзеге асырудың негізі» (№12 Сағынов оқулары) Халықаралық ғылыми-практикалық online конференциясы Е Ң Б Е К Т Е Р І 18–19 маусым 2020 ж. 1 бөлім, бет 839-841 ISBN 978-601-320-209-9.
- 86 Lee H., Kim W., Han J., Han C., «The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13 (2012) pp 1491–1497.
- 87 Ou Y., Li Z., Li G., Su C.Y., «Adaptive fuzzy tracking control of a human lower limb with an exoskeleton», in: 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE, 2012, pp.1937–1942.
- 88 Yan T., Cempini M., Oddo C.M., Vitiello N., «Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons», *Robot. Auton. Syst.* 64, 2015, pp.120–136.
- 89 Wang Letian., Shiqian Wang., van Asseldonk E.H.F., van der Kooij H., «Actively controlled lateral gait assistance in a lower limb exoskeleton», in:2013 IEEE/RSJInt.Conf.Intell.Robot.Syst., IEEE, 2013, pp.965–970.
- 90 Marcheschi S., Salsedo F., Fontana M., Bergamasco M., «Body extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation», in: Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2011, pp. 611–616.
- 91 Sasaki D., Noritsugu T., Takaiwa M., «Development of pneumatic lower limb power assist wear driven with wearable air supply system», in:2013IEEE/RSJ Int.Conf.Intell.Robot.Syst., IEEE,2013, pp.4440–4445.

- 92 Yeh T.J., Wu M.J., Lu T.J., Wu F.K., Huang C.R., «Control of McKibben pneumatic muscles for a power-assist, Lower-Limb Orthosis», *Mechatronics* 20, 2010, pp. 686–697.
- 93 Aguilar - Sierra H., Yu W., Salazar S., Lopez R., «Design and control of hybrid actuation lower limb exoskeleton», *Adv.Mech.Eng.*7, 2015, pp.1–13.
- 94 Tran H., Cheng H., Duong M., Zheng H., «Fuzzy-based impedance regulation for control of the coupled human-exoskeleton system», in:2014IEEEInt.Conf. Robot. Biomimetics (ROBIO2014), IEEE, 2014, pp.986–992.
- 95 Vorobyev A.A., Petrukhin A.V., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M., «Exoskeleton as a new means in habilitation and rehabilitation of invalids (Review)», *Sovrem. Tehnol.VMed.*7(2015) pp.185–197.
- 96 Н.Т. Жетенбаев., «Дизайн экзоскелета для нижних конечностей», XI Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» посвященная 45-летию образования Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева Материалы конференции 16–18 октября 2020 г. Стр. 358-360.
- 97 Talaty M., Esquenazi A., Briceno J.E., «Differentiating ability in users of the ReWalk™ powered exoskeleton: An analysis of walking kinematics», in: 2013 IEEE13thInt.Conf. Rehabil.Robot., IEEE, pp.1–5.
- 98 Mendoza - Crespo R., Gordillo J.L., Soto R., «Wearable human lower limb prototype exoskeleton: An operative approach», in:11th IEEE Int. Conf. Control Autom., IEEE, 2014, pp. 267–272.
- 99 Onen U., Botsali F.M., Kalyoncu M., Tinkir M., Yilmaz N., Sahin Y., «Design and actuator selection of a lower extremity exoskeleton», *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* 19, 2014, pp. 623–632.
- 100 Park J., Lee J., Shin J., Cho B., «Design of a lower limb exoskeleton including roll actuation to assist walking and standing up», in:2015IEEE-RAS15thInt. Conf. Humanoid Robot., IEEE, 2015, pp. 359–364.
- 101 Верейкин А. А., Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семенов С. Е., Каргинов Л. А., Кулаков Б. Б., Яроц В. В. «Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета», *Актуальные вопросы науки.* – 2014. – № XIII. – С. Стр. 68–76.
- 102 ReWalk – More than Walking, – URL: <http://www.rewalk.com/>
- 103 ЭкзоАтлет, Медицинский экзоскелет для реабилитации. – URL: <http://www.exoatlet.ru/>.
- 104 Николенко М. Н. «Подходы к разработке электромеханического узла медицинского экзоскелета коленного сустава», *Всерос. науч. практ. конф. (Новокузнецк, 23–24 нояб. 2016 г.).* – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2016. – С. 187–192.
- 105 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Ф.К., «Робототехника және өнеркәсіптегі жасанды бұлшық еттер», *ҚазҰТЗУ ХАБАРШЫСЫ* 2020 ж. №2; Алматы, Қазақстан, бет 447–455.
- 106 Борисов А. В. «Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов», *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2014. № 10. С. 29—33.
- 107 Agarwal P., Kuo P. H., Neptune R. R., Deshpande A. D. «A novel framework for virtual prototyping of rehabilitation exoskeletons», *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* 2013, Jun; 2013 pp.
- 108 Berkeley robotics and human engineering laboratory: URL, <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2>

- 109 Elliott G., Sawicki G. S., Marecki A., Herr H. «The biomechanics and energetics of human running using an elastic knee exoskeleton», IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun, 2013, pp.
- 110 Knaepen K., Beyl P., Duerinck S., Hagman F., Lefeber D., Meeusen R. «Human-robot interaction: kinematics and muscle activity inside a powered compliant knee exoskeleton», IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2014. Nov.; 22 (6), 1128- 37. pp.
- 111 Mooney L. M., Rouse E. J., Herr H. M. «Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking», J Neuroeng Rehabil. 2014, Nov. 3, pp.
- 112 Murray S. A., Ha K. H., Hartigan C., Goldfarb M. «Assistive Control Approach for a Lower-Limb Exoskeleton to Facilitate Recovery of Walking following Stroke», IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2014, Aug 12. pp.
- 113 Shamaei K., Cenciarini M., Adams A. A., Gregorczyk K. N., Schiffman J. M., Dollar A. M. «Design and evaluation of a quasi-passive knee exoskeleton for investigation of motor adaptation in lower extremity joints», IEEE Trans Biomed Eng. 2014, Jun; 61(6) pp.
- 114 Talaty M., Esquenazi A., Briceno J. E. «Differentiating ability in users of the ReWalk (TM) powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics», IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun, pp.
- 115 Wang S., Meijneke C., van der Kooij H. «Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint», IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun, pp.
- 116 Yong Lae Park, «Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle, foot rehabilitation», Bioinspir. Biomim. 2014, 9, P. 45—51.
- 117 Yu H., Huang S., Thakor N. V., Chen G., Toh S. L., Sta Cruz M., Ghorbel Y., «Zhu C. A novel compact compliant actuator design for rehabilitation robots», IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun, pp.
- 118 Akdoğan E., Adli M.A., «The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation», Physiotherobot, Mechatronics 21, (2011) 509– 522.
- 119 Gui K., Ren Y., Zhang D., «Online brain computer interface controlling robotic exoskeleton for gait rehabilitation», in: 2015 IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot., IEEE, 2015, pp. 931–936.
- 120 Zhetenbayev Nursultan, Gani Balbayev., «Modeling a linear actuator for an ankle joint device» Материалы Международной конференции «Инновации в образовании, науке, транспортно логистической и телекоммуникационной отраслях» стр. 210–214.
- 121 Şahin Y., Botsali F.M., Kalyoncu M., Tinkir M., Önen Ü., Yilmaz N., Baykan Ö.K., Çakan A., «Force feedback control of lower extremity exoskeleton assisting of load carrying human», Appl. Mech. Mater. 598, 2014, pp. 546–550.
- 122 Н. Т. Жетенбаев., Е.С. Нұрғизат., Г.К. Балбаев., Б.Т. Шингисов., Г. Д. Естемесова., «Исследование применения пневматических искусственных мышц» ВЕСТНИК КазНУТУ 2021 №1; г. Алматы, Казахстан, Стр. 217–225 <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.v143.i1.27>.
- 123 Kim H., Seo C., Shin Y.J., Kim J., Kang Y.S., «Locomotion control strategy of hydraulic lower extremity exoskeleton robot», in: 2015 IEEE Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, IEEE, 2015, pp.577–582.
- 124 Strausser K.A., Swift T.A., Zoss A.B., Kazerooni H., «Prototype medical exoskeleton for paraplegic mobility: First experimental results», in: ASME 2010 Dyn. Syst. Control Conf., vol. 1, ASME, 2010, pp. 453–458.
- 125 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Г.К., «McKibben жасанды бұлшықеті» МАТЕРИАЛЫ международной научной конференции студентов и молодых учёных

«ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Алматы, Қазақстан, 6–9 сәуірі 2020 ж. РАЗДЕЛ 2. МЕХАНИКА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ 69 стр.

126 Miao Y., Gao F., Pan D., «Mechanical design of a hybrid leg exoskeleton to augment load-carrying for walking», *Int. J. Adv. Robot. Syst.* (2013) pp. 1-11.

127 Miao Y., Gao F., Pan D., «Prototype design and size optimization of a hybrid lower extremity exoskeleton with a scissor mechanism for load-carrying augmentation», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C* 229, 2015, pp. 155–167.

128 Banchadit W., Temram A., Sukwan T., Owatchaiyapong P., Suthakorn J., «Design and implementation of a new motorized-mechanical exoskeleton based on CGA patternized control», in: 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE, 2012, pp. 1668–1673.

129 Жетенбаев Н.Т., Аманқосов Т. Г., Сақаев А.Д., Балбаев Г.К., «Разработка и тестирование искусственных мышцы» ТРУДЫ «САТПАЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2020» Алматы 2020 Том II Секция «Робототехника и мехатроника» стр. 113–116.

130 Aguilar-Sierra H., Lopez R., Yu W., Salazar S., Lozano R., «A lower limb exoskeleton with hybrid actuation», in: 5th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, IEEE, 2014, pp. 695–700.

131 Beil J., Perner G., Asfour T., «Design and control of the lower limb exoskeleton KIT-EXO-1», in: 2015 IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot., IEEE, 2015, pp. 119–124.

132 Sai-Kit Wu, Jordan M., Xiangrong Shen, «A pneumatically - actuated lower limb orthosis», in: 2011 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., IEEE, 2011, pp. 8126–8129.

133 Hussain S., Xie S.Q., Jamwal P.K., Control of a robotic orthosis for gait rehabilitation, *Robot. Auton. Syst.* 61(2013) pp. 911–919.

134 Wang S., Wang L., Meijneke C., van Asseldonk E., Hoellinger T., Cheron G., Ivanenko Y., La Scaleia V., Sylos-Labini F., Molinari M., Tamburella F., Pisotta I., Thorsteinsson F., Ilzkovitz M., Gancet J., Nevatia Y., Hauffe R., Zanow F., van der Kooij H., «Design and control of the mindwalker exoskeleton», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 23, 2015, pp. 277–286.

135 Long Y., Du Z., Wang W., Dong W., «Robust sliding mode control based on GA optimization and CMAC compensation for lower limb exoskeleton», *Appl. Bionics Biomech.* 2016 (2016) pp. 1–13.

136 Dzahir M., Yamamoto S., «Recent trends in lower-limb robotic rehabilitation orthosis: Control scheme and strategy for pneumatic muscle actuated gait trainers», *Robotics* 3 (2014) pp. 120–148.

137 Жетенбаев Н.Т., Балбаев Г.К., «Бионика мен робототехникадағы жасанды бұлшық еттер», «Сатпаевские чтения» по секции: «Робототехнические системы и приборостроение», г. Алматы, Қазақстан, 11 сәуірі 2019 г., Труды Сатпаевских Чтений, 2019. 1138–1142 стр. ISBN 978-601-323-145.

138 Chen G., Chan C. K., Guo Z., and Yu H., «A review of lower extremity assistive robotic exoskeleton in rehabilitation therapy», *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 2013.41, pp. 343–363.

139 Kao P. C., Lewis C. L., and Ferris D. P., «Invariant ankle moment patterns when walking with and without a robotic ankle exoskeleton», *J. Biomech.*, 43, pp. 203–209, 2010.

140 Lajeunesse V., Vincent C., Routhier F., Careau E., and Michaud F., «Exoskeletons design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury», *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, 11, 2016, pp. 535–547.

- 141 Ranjeet Ranjan, Dr. P.K Upadhyay, Dr. Arbind Kumar, Dr. Praveen Dhyani «Theoretical and experimental modelling of air muscle» ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 4, April 2012, pp.27.
- 142 Escobar F., Diaz S., Gutierrez C., Ledeneva Y., Hernández C., Rodríguez D., Lemus R., «Simulation of control of scara robot actuated by pneumatic artificial muscles using RNAPM» Vol.12, México, October 2014, pp.2-6.
- 143 Schmitt Jan., Grabert Frank and Annika Raatz «Design of hyper flexible assembly robot using artificial muscles» Tianjin, China, December 1418, 2010, pp.3-4.
- 144 Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G., and Manesis S., «A survey on applications of pneumatic artificial muscles», in Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on. IEEE, 2011, pp. 1439–1446.
- 145 Park Y.L., Chen B.R., Perez-Arancibia N. O., Young D., Stirling L., Wood R. J., Goldfield E. C., and Nagpal R., «Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle–foot rehabilitation», *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, no. 1, pp. 016007, 2014.
- 146 Miao Y, Gao F, Pan D., «Mechanical design of a hybrid leg exoskeleton to augment load - carrying for walking», *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10, pp. 502–512.
- 147 Miao Y, Gao F, Pan D. «Compound pendulum modeling and resonant frequency analysis of the lower limbs for the wearer and exoskeleton», *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12, pp. 372–381.
- 148 Zhetenbayev Nursultan, Alexander Titov, Marco Ceccarelli, Gani Balbayev. Design and Performance of a Motion - Assisting Device for Ankle ASIAN MMS 2021, MMS 113, pp. 659–668, 2022.
- 149 Yu S, Han C, Cho I. «Design considerations of a lower limb exoskeleton system to assist walking and load-carrying of infantry soldiers», *Applied Bionics & Biomechanics*, 2014, 11, pp. 119–134.
- 150 Nursultan Zhetenbayev., Algazy Zhauyt., Gani Balbayev., Beibit Shingissov., «Robot device for ankle joint rehabilitation: a review» 55th International JVE Conference, Almaty, Kazakhstan, April 21, 2022 - Vibroengineering PROCEDIA pp. 96-102.
- 151 Baek Eunyong., Song Seok-Ki., Sehoon Oh., Samer Mohammed., Doyoung Jeon and Kyoungchul Kong., «A Motion Phasebased Hybrid Assistive Controller for Lower Limb Exoskeletons», IEEE, pp. 197-202, 2014.
- 152 Nursultan Zhetenbayev., Gani Balbayev., Algazy Zhauyt., Beibit Shingissov., «Design and Performance of the New Ankle Joint Exoskeleton», *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 12, № 3, May 2023 DOI: 10.18178/ijmerr.12.3.151-158.
- 153 Nursultan Zhetenbayev., Gani Balbayev., Teodor Iliev., Balzhan Bakhtiyar., «Exoskeleton for the Ankle Joint Design and Control System» International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES 2022) 24 – 26 November 2022, Veliko Tarnovo, Bulgaria.
- 154 Dhand Saurav., Ashish Singla., Gurvinder Singh Virk., «A brief review on human-powered lower - limb exoskeletons», *Conference on Mechanical Engineering and Technology (COMET-2016)*, IIT (BHU), Varanasi, India, 2016 (Accepted).
- 155 Zhetenbayev Nursultan, Marco Ceccarelli, Gani Balbayev., «Design of an Exoskeleton for Rehabilitation Ankle Joint» 13th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines & XXV International Conference on Robotics. Proceedings of SYROM 2022 & ROBOTICS 2022 DOI: 10.1007/978-3-031-25655-4\_23.



Қосымша А  
Қазақстан Республикасының патенттеріне өнертабыстың сипаттамасы



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ  
PATENT

№ 6672

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2021/0714.2

(22) 15.07.2021

(45) 15.07.2022

(54) Сызықты электр жетектерімен басқарылатын тобық экзоскелеті  
Экзоскелет стопы, управляемый линейными электрическими приводами  
Exoskeleton of the foot controlled by lineal electric actuators

(73) Балбаев Гани Кудайбергенович (KZ)  
Balbayev Gani Kudaibergenovich (KZ)

(72) Балбаев Гани Кудайбергенович (KZ) Balbayev Gani Kudaibergenovich (KZ)  
Чеккарелли Марко (ИТ) Ceccarelli Marco (IT)  
Жетенбаев Нұрсұлтан Талғатұлы (KZ) Zhetenbayev Nursultan Talgatuly (KZ)  
Елемесова Акбота Ахылбековна (KZ) Elemesova Akbota Akhylbekovna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды  
Подписано ЭЦП  
Signed with EDS

Е. Куантыров  
Е. Куантыров  
Y. Kuantyrov

«Үлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE