**ӨЖІКЕН АСЫЛБЕК ҚАСЫМБЕКҰЛЫ**

**«Тобық буыны экзоскелетіне арналған адаптивті басқару жүйесі бар электромеханикалық жетекті әзірлеу және зерттеу»**

6D060300 – «Механика» мамандығы бойынша
философия докторы (PhD) дәрежесін алуға
ұсынылған диссертациялық жұмысына

# АҢДАТПА


**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Тірек-қимыл аппаратының аурулары мен жарақаттары қазіргі таңда жаһандық медицинаның ең өзекті мәселелерінің бірі болып отыр. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (WHO) деректері бойынша, инсульт, нейроортопедиялық аурулар, спорттық жарақаттар мен қартайған шақтағы қозғалыс белсенділігінің шектелуі науқастардың күнделікті өмір сапасына тікелей әсер етеді. Әсіресе, тобық буынының зақымдануы жүріс-тұрыс функциясының бұзылуына әкеліп, толыққанды реабилитация жүргізуді талап етеді.

Қазіргі таңда классикалық физиотерапиялық әдістерді қолданумен қатар, роботтандырылған экзоскелеттерді пайдалану телереабилитация және үй жағдайында оңалтудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. Мұндай құрылғылардың басты артықшылығы – қозғалыстарды нақты қайталау, жүктемені бірқалыпты бөлу және науқастың жеке биомеханикалық ерекшеліктеріне бейімделу қабілеті.

Дегенмен, қолданыстағы экзоскелеттердің бірқатары қымбат, күрделі және тек клиникалық орталарға бейімделген. Бұл олардың кең ауқымда қолжетімділігін шектейді. Сондықтан да жеңіл, икемді, қашықтан басқарылатын, сонымен бірге биомеханикалық талаптарға сәйкес келетін тобық экзоскелетін әзірлеу – өзекті ғылыми әрі инженерлік міндет болып табылады.

Осы жұмыстың өзектілігі – тобық буынының физиологиялық қозғалыс диапазонын қайталайтын, қауіпсіздік элементтерімен жабдықталған және Bluetooth модулі негізінде қашықтан басқарылатын экзоскелет жүйесін ұсыну. Бұл құрылғы реабилитация процесін тек клиникада ғана емес, үй жағдайында да жүргізуге мүмкіндік береді, осылайша науқастардың өмір сапасын жақсартып, реабилитациялық шаралардың қолжетімділігін арттырады.

**Жұмыстың мақсаты** – тобық буынына арналған экзоскелеттің электромеханикалық жетегін жобалау, адаптивті басқару жүйесін әзірлеу және оның оңалту үдерісіндегі қозғалыс тиімділігін зерттеу.

**Зерттеу нысаны:** Адамның тобық буыны қозғалысын биомеханикалық талаптарға сәйкес қайталауға арналған оңалтуға бағытталған активті экзоскелет.

**Зерттеу пәні:** Тобық буыны экзоскелетінің электромеханикалық жетектері, адаптивті басқару жүйелері

**Зерттеу міндеттері:**

Диссертацияда қойылған мақсатқа сәйкес келесі міндеттер тұжырымдалған:

– тобық буынының анатомиялық құрылымын, қозғалыс диапазонын және клиникалық шектеулерін талдау негізінде тобық буыны экзоскелетін жобалау;

– құрылған модель негізінде тобық буыны экзоскелетінің бағдарламалық қозғалысын синтездеу;

– тобық буыны экзоскелетінің электромеханикалық жетектерінің қозғалыстарының динамикалық моделін құру;

– тобық буыны экзоскелетінің электромеханикалық жетектерінің адаптивті басқаруын зерттеу;

– тобық буыны экзоскелетінің прототипін жасау, эксперименттік зерттеу жүргізу және оңалту үдерісіндегі қозғалыс тиімділігін бағалау.

**Зерттеу әдістері:** Зерттеу барысында аналитикалық әдістер, биомеханикалық талдау және математикалық модельдеу қолданылды. Тобық буыны экзоскелетінің кинематикасы мен динамикасын сипаттау үшін қозғалыс теңдеулері және динамикалық модельдер құрылды.

Компьютерлік модельдеу SolidWorks 3D CAD бағдарламасында жүзеге асырылып, экзоскелеттің құрылымдық элементтерін жобалау және кинематикалық үйлесімділігін тексеруге мүмкіндік берді.

Жүйенің динамикалық мінез-құлқын зерттеу және адаптивті басқару алгоритмдерін верификациялау үшін MATLAB/Simulink ортасында имитациялық модельдеу жүргізілді.

Сонымен қатар, әзірленген экзоскелет прототипіне эксперименттік зерттеулер жүргізіліп, оның қозғалыс параметрлері, басқару дәлдігі және оңалту үдерісіндегі тиімділігі бағаланды.

**Зерттеудің ғылыми жаңалығы:**

– тобық буынының биомеханикалық қозғалыс ерекшеліктерін ескеретін электромеханикалық жетекті экзоскелеттің жаңа құрылымдық шешімі ұсынылды;

– Ұсынылған механизм үшін тобық буынының физиологиялық қозғалысын қамтамасыз ететін кинематикалық модель әзірленді.

– ұсынылған экзоскелеттің электромеханикалық жетектері үшін динамикалық модель құрылып, оның параметрлері анықталды;

– қозғалысты дәл және тұрақты қамтамасыз ететін адаптивті басқару алгоритмі әзірленді;

– ұсынылған модель негізінде тәжірибелік прототип жасалып, оның тиімділігі эксперименттік түрде дәлелденді.

**Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы.**

Әзірленген экзоскелет тобық буынының жарақаттан кейінгі немесе неврологиялық бұзылыстар кезіндегі қозғалысын қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Ұсынылған басқару алгоритмдері нақты уақыт режимінде тұрақты және дәл қозғалысты қамтамасыз етеді. Жасалған прототип медициналық реабилитация орталықтарында қолдануға бейімделген. Зерттеу

нәтижелері отандық медициналық робототехника саласын дамытуға негіз бола алады.

**Қорғауға ұсынылатын негізгі тұжырымдар**.

– тобық буынының физиологиялық және биомеханикалық қозғалыс заңдылықтарына сәйкес келетін экзоскелет құрылымы;

– экзоскелеттің кинематикалық және динамикалық модельдері және қозғалыс дәлдігін қамтамасыз ететін математикалық тәуелділіктер;

– электромеханикалық жетектерді басқаруға арналған адаптивті алгоритм және оның орнықтылық қасиеттері;

– ұсынылған экзоскелет прототипінің оңалту үдерісіндегі қозғалыс тиімділігін дәлелдейтін эксперименттік нәтижелері.

**Диссертациялық жұмыстың ғылыми нәтижелерінің дұрыстығы мен негізділігі.** Диссертацияда келтірілген ғылыми нәтижелердің негізділігі классикалық механика, биомеханика және автоматты басқару теориясының әдістерін қолдану арқылы қамтамасыз етілген. Зерттеу барысында MATLAB/Simulink және SolidWorks бағдарламалық кешендері пайдаланылып, экзоскелеттің кинематикалық және динамикалық модельдері әзірленді.

Алынған ғылыми нәтижелердің шынайылығы әзірленген экзоскелет прототипінде жүргізілген эксперименттік зерттеулермен расталған. MATLAB/Simulink ортасында алынған модельдеу нәтижелерінің эксперименттік нәтижелермен жақсы сәйкестігі ұсынылған математикалық модель мен адаптивті басқару алгоритмінің дұрыстығын дәлелдейді.

**Зерттеу нәтижелерінің ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы**. Ұсынылған нәтижелер ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің BR24992820 «Ортопедия және медициналық оңалту саласында протездеу және реабилитация кезінде хирургиялық араласуларды жетілдіруге арналған инновациялық медициналық технологиялар мен құрылғылар» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жобасы (01.10.2024 ж. №376 келісімшарт) аясында алынған. Автор сонымен қатар AP22688590 «Роботтық манипулятордың қозғалтқыштарын басқару динамикасын зерттеу» атты Жас Ғалым гранты бойынша ғылыми жобаның жетекшісі болып табылады.

**Зерттеу жұмысының нәтижелерінің апробациясы.** Диссертацияның негізгі нәтижелері келесі халықаралық және республикалық ғылыми-техникалық конференцияларда баяндалды, сондай ақ беделді ғылыми басылымдарда жарияланды:

1. Өжікен А.Қ., Рахметова П.М. Разработка математической модели адаптивного управления роботом манипулятора // Труды Международных Сатпаевских чтений «Научное наследие Шахмардана Есенова». – 2017. – С. 626–629.
2. Ozhiken A., Ivanov K., Gonzalez-Cruz C.A., Ceccarelli M., Cafolla D. Design and Experiences of a Planetary Gear Box for Adaptive Drives //

EuCoMeS 2018. Mechanisms and Machine Science. Vol. 59. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98020-1_33

3. Өжікен А.Қ., Рахметова П.М. Исследование и разработка динамики движения систем адаптивного управления робота манипулятора // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники». – Алматы, 2018. – С. 124.

4. Tuleshov A., Ozhiken A. және т.б. // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2025. – 11(4). – P.946–960. DOI: https://doi.org/10.22055/jacm.2024.47902.4833 *(Scopus Q1).*

5. Өжікен А.Қ., Тулешов А.Қ. және т.б. Адаптивная система управления движением манипулятора // Вестник НИА РК. – 2025. – №1(95). – С.160–169. DOI: https://doi.org/10.47533/2025.1606-146X.17 *(КОКНВО).*

6. Өжікен А.Қ., Тулешов А.Қ. және т.б. Манипулятор үшін беріктілігі жоғары басқарудың адаптивті жүйесін әзірлеу // Вестник КазАТК. – 2025. – №137(2). – С.133–141. DOI: https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-137-2-133-141 *(КОКНВО).*

7. Sergazin G., Ozhiken A. және т.б. Development of an Ankle Exoskeleton: Design, Modeling, and Testing // Sensors. – 2025. – 25(7):2020. DOI: https://doi.org/10.3390/s25072020 *(Scopus Q1).*

8. Ozhiken A., Sergazin G. және т.б. Research and Experimental Testing of a Remotely Controlled Ankle Rehabilitation Exoskeleton Prototype // Sensors. – 2025. – 25(21):6784. DOI: https://doi.org/10.3390/s25216784 *(Scopus Q1).*

9. Karasheva M., Ozhiken A. және т.б. Sensor-Driven Control Strategies for Post-Stroke Shoulder Rehabilitation Exoskeletons: A Systematic Review // MethodsX. – 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103648 *(Scopus Q1).*

**Автордың жеке үлесі**. Диссертацияда келтірілген негізгі ғылыми нәтижелер мен қорытындылар автордың тікелей қатысуымен және дербес орындалған ғылыми зерттеулердің нәтижесінде алынған. Автор тобық буыны экзоскелетінің құрылымдық шешімін әзірледі, оның кинематикалық және динамикалық математикалық модельдерін құрды, адаптивті басқару алгоритмін әзірледі және MATLAB/Simulink ортасында модельдеу жұмыстарын орындады. Сонымен қатар экзоскелеттің тәжірибелік прототипін жобалауға және әзірлеуге, басқару жүйесін іске асыруға, SolidWorks ортасында беріктік талдауын жүргізуге және эксперименттік зерттеулерді ұйымдастыру мен орындауға тікелей қатысты.

Бірлескен авторлықпен жарияланған ғылыми еңбектерде автор әдебиеттерге талдау жүргізуге, математикалық модельдерді әзірлеуге, эксперименттік зерттеулерді орындауға, алынған нәтижелерді өңдеуге және ғылыми жарияланымдарды дайындауға негізгі үлес қосты.

**Жұмыс нәтижелерін жүзеге асыру және енгізу**. Жұмыс авторының қатысуымен әзірленген аяқ экзоскелетінің прототипі Сәтбаев университетінде білім беру барысында қолданылады және Алматы қаласындағы №4 Қалалық клиникалық ауруханасында апробациядан өткізіліп жатыр.

**Диссертация құрылымы**. Диссертацияда қойылған ғылыми мақсат пен міндеттер толық орындалған. Диссертация титулдық беттен, нормативтік сілтемелерден, қысқартулар тізімінен, кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады.

**Тараулар бойынша қысқаша мазмұны**

Бірінші бөлімде тобық буынына арналған реабилитациялық экзоскелеттердің қазіргі даму жағдайына талдау жүргізілген. Тобық буынының анатомиялық және биомеханикалық ерекшеліктері, қазіргі заманғы экзоскелеттердің түрлері, жетектері, қашықтан басқарылатын реабилитациялық технологиялар және электромеханикалық жетек түрлері қарастырылған.

Екінші бөлімде тобық буыны экзоскелетін жобалау мәселелері қарастырылған. Экзоскелеттің биомеханикалық талаптары анықталып, кинематикалық және динамикалық математикалық модельдері әзірленген. Сонымен қатар бағдарламалық басқару алгоритмі ұсынылып, электромеханикалық жетектің адаптивті басқару жүйесі әзірленіп, MATLAB/Simulink ортасында динамикалық модельдеу жүргізілген.

Үшінші бөлімде экзоскелет конструкциясы, оның негізгі элементтері және басқару жүйесі сипатталған. Бұрандалы жетектің жұмыс принципі негізделіп, оның артықшылықтары көрсетілген. Сонымен қатар SolidWorks Simulation ортасында конструкцияның беріктігіне талдау жүргізілген.

Төртінші бөлімде электромеханикалық жетектің адаптивті басқару жүйесіне эксперименттік зерттеулер жүргізіліп, сынақ стенді сипатталған. Эксперименттік нәтижелер MATLAB/Simulink модельдеу нәтижелерімен салыстырылып, ұсынылған басқару жүйесінің тиімділігі бағаланған.

Диссертацияның қорытынды бөлімінде жүргізілген зерттеулердің негізгі ғылыми нәтижелері жинақталып, теориялық және практикалық қорытындылар ұсынылған.