

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

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



SATBAYEV
UNIVERSITY

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы

Нұрдәулет Айқанат

«Пассивті басқарылатын тізе протезінің прототипін зерттеу»

дипломдық жобаға

ТҮСІНДІРМЕ ЖАЗБА

6B07113 - Робототехника және мехатроника

Алматы 2025

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



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

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
РТжАТҚ кафедра меңгерушісі
техника ғылымының кандидаты,
профессор
Қ.Ө. Өжікенов
«05» 06 2025 ж

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫСҚА
ТҮСІНДІРМЕ ЖАЗБА

Тақырыбы: «Пассивті басқарылатын тізе протезінің прототипін зерттеу»

6B07111 - Робототехника және мехатроника

Орындаған

Нурдаулет А.

Рецензент

Ғылыми жетекшісі

Абай атындағы ҚазҰПУ,
Физика кафедрасының қауым. проф.ма.
техника ғылымдарының кандидаты

техника ғылымдарының магистрі,
аға оқытушы

Жаменкеев Е. К.
«07» 06 2025 ж.

Байтурганова В.
«06» 06 2025 ж.

Алматы 2025

«Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ
УНИВЕРСИТЕТІ» КОММЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ



SATBAYEV
UNIVERSITY

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы

6B07113 - Робототехника және мехатроника

БЕКІТЕМІН
РТЖАТҚ кафедра меңгерушісі
техника ғылымының кандидаты,
профессор
Қ.Ә. Өжікенов
«09» 06 2025 ж

Дипломдық жобаны орындауға арналған

ТАПСЫРМА

Білім алушы Нұрдәулет Айқанат

Тақырыбы: Пассивті басқарылатын тізе протезінің прототипін зерттеу
Университет ректорының

2025 жылғы «__» _____ № __-П/Ө бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі: «__» _____ 2025 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы деректері: Arduino, SolidWorks.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) микрочирургиялық роботты пайдалану маңыздылығы мен оның болашағын түсінуге
мүмкіндік беретін жан-жақты анализ жасау болып табылады

б) роботтың жұмыс мүмкіндіктері

в) робот пайдалылығын дәлелдеу

Графикалық материалдың тізбегі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

жұмыс презентациясы слайтарда__ көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:__ атаулардан

«Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ
УНИВЕРСИТЕТІ» КОММЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

Дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау

КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, әзірленетін сұрақтар тізбесі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескертпелер
Теориялық бөлім	16.01-12.02.2025 ж	Орындалды
Зерттеу бөлімі	19.03-17.04.2025 ж.	Орындалды
Қорытынды бөлім	17.04-22.05.2025 ж.	Орындалды

Аяқталған дипломдық жұмыс (жоба) үшін, оған қытысты бөлімдердің жұмыстарын
(жобасын) көрсетумен, кеңесшілері мен қалып бақылаушының

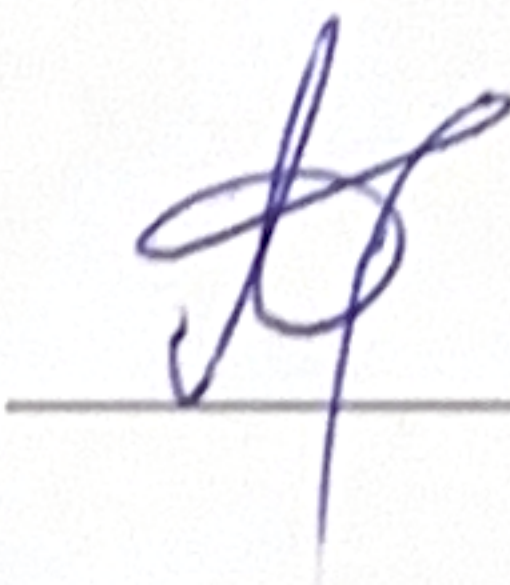
ҚОЛДАРЫ

Бөлімдердің атауы	Кеңесшілер, тегі, аты, әкеснің аты, (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қол
Қалып бақылаушы	Игембай Е.А. техника ғылымдарының магистрі, оқытушы	05.06.2025	
Антиплагаит тексеруші	Аймұхамбетов В.Б. А. 1	05.06.2025	

Ғылыми жетекшісі

 Байтурганова В.К.,

Білім алушы тапсырманы орындауға алды

 Нұрдәулет Айқанат

Күні

«09» 06 2025 ж.

АНДАТПА

Бұл бітіру біліктілік жұмысында жамбас деңгейінде аяқ ампутациясына ұшыраған адамдарға арналған пассивті тізе протезінің прототипі жасалып, зертханалық жағдайда сынақтан өткізілді. Конструкция энергия көздеріне тәуелсіз, модульді және адамның табиғи тізе буынының биомеханикалық сипаттамаларына сәйкес келеді. Жұмыс барысында қазіргі заманауи шешімдерге шолу жасалып, материалдар таңдалып, SolidWorks бағдарламасында 3D-модель құрылып, ANSYS бағдарламасында беріктікке есептеулер жүргізілді. Прототип 3D-баспа арқылы жасалып, арнайы сынақ стендтерінде тексерілді. ECT Knee сияқты гибриді жүйелермен салыстырмалы талдау жүргізілді. Бұл жұмыс шектеулі ресурстар жағдайында қолжетімді және жөндеуге ыңғайлы протездерді жасауға арналған маңызды практикалық негіз болып табылады.

АННОТАЦИЯ

В данной выпускной квалификационной работе разработан, изготовлен и экспериментально протестирован прототип пассивного коленного протеза, предназначенного для пациентов с ампутацией бедра. Особенностью конструкции является энергонезависимость, модульность и соответствие биомеханическим параметрам естественного коленного сустава. В работе проведён аналитический обзор существующих решений, обоснован выбор материалов, спроектирована 3D-модель в среде SolidWorks, выполнены прочностные расчёты методом конечных элементов в ANSYS. Прототип был изготовлен с использованием технологий 3D-печати и прошёл серию стендовых испытаний. Выполнено сравнение с гибридными системами, такими как ECT Knee. Работа имеет практическую значимость для создания доступных и ремонтпригодных протезов в условиях ограниченного финансирования.

ANNOTATION

This final qualification work presents the development, fabrication, and experimental testing of a passive knee prosthesis prototype designed for transfemoral amputees. The device features energy independence, modular construction, and compliance with the biomechanical characteristics of the natural knee joint. The research includes a literature review of existing solutions, justification of material choices, CAD modeling in SolidWorks, and finite element analysis in ANSYS. The prototype was manufactured using 3D printing technologies and tested under laboratory conditions. A comparative evaluation was conducted against hybrid systems such as the ECT Knee. This work is practically relevant for developing affordable and maintainable prosthetic devices suitable for mass production in resource-limited settings.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе

1	АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ	8
1.1	Пассивті протездерді жобалауға әсер ететін биомеханикалық параметрлер	9
1.2	Физиологиялық жүрісті қалыптастырудағы демпферлеудің рөлі	10
1.3	Пассивті протезді қолданудағы энергия үнемділік пен тепе-теңдікті сақтау	
1.4	Пассивті протездерді қолданушының жеке ерекшеліктеріне бейімдеу	12
1.5	Тізе буынын протездеудегі гибридті және белсенді тәсілдер	15
2	ЗЕРТТЕУДІҢ МАҚСАТЫ, МІНДЕТТЕРІ ЖӘНЕ ӘДІСТЕРІ	18
2.1	Теориялық талдау және әдеби шолу	15
3	КОНСТРУКТИВТІК БӨЛІМ	23
3.1	Құрылымға қойылатын талаптар	23
3.2	Құрылым тұжырымдамасы	24
3.3	Құрылымның негізгі тораптарының сипаттамасы	25
3.4	Құрылым материалдары	28
4	МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ	29
4.1	Биомеханикалық модельдеу	30
4.2	Жүктеме есебі және беріктік талдауы	31
4.3	Қозғалысты модельдеу (кинематикалық және динамикалық талдау)	32
5	ЖАСАУ ЖӘНЕ СЫНАҚТАР	34
5.1	Прототипті жасау	35
5.2	Эксперименттік сынақ әдістемесі	36
5.3	Сынақ нәтижелері	37
5.4	Нәтижелерді талқылау	38
5.5	Гибридті модельмен салыстырмалы талдау	39

Қорытынды

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

КІРІСПЕ

Аяқ-қолынан айырылған адамдардың төменгі аяқ қызметтерін қалпына келтіру мәселесі биомедициналық инженерия саласындағы аса маңызды міндеттердің бірі болып қала береді. Тізе буынының жоғалуы адамның өмір сүру сапасын айтарлықтай төмендетеді және инновациялық протездік шешімдерді қажет етеді. Тізе буыны денені тіреп тұрумен қатар, жүру, жүгіру, баспалдақпен көтерілу және түсу кезінде соққыны бәсеңдету мен импульсті беру қызметтерін атқарады. Сондықтан тиімді, ыңғайлы және сенімді протез жасау мәселесі аса өзекті болып табылады.

Қазіргі технологиялар физиологиялық қозғалысқа барынша жақын келетін, бейімделу деңгейі жоғары микропроцессормен басқарылатын белсенді протездерді жасауға мүмкіндік береді. Алайда мұндай жүйелер қымбат, техникалық қызмет көрсетуі күрделі және дамушы елдердің пайдаланушылары үшін әрдайым қолжетімді емес. Осы тұрғыда пассивті протездер қолжетімділік, функционалдық және сенімділік арасындағы ымыралы шешім болып табылады. Тақырыптың өзектілігі — қарапайым әрі арзан, базалық функционалдыққа ие және қозғалыс кезінде жайлылықты қамтамасыз ететін тізе протезін жасаудың қажеттілігінде. Белсенді жетектерді қолданбай, тізе буынының физиологиялық жұмысын имитациялайтын пассивті басқаруы бар протезді жобалау күнделікті қолдануға қолайлы құрылғы жасауға мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты — жүрудің әртүрлі фазаларына бейімделе алатын, тұрақтылық пен сенімділікті қамтамасыз ететін пассивті басқаруы бар тізе протезінің прототипін зерттеу.

Міндеттері:

- Тізе буынының анатомиялық және биомеханикалық ерекшеліктерін зерттеу;
- Тізе протездерінің қазіргі түрлері мен пассивті басқару принциптеріне шолу жүргізу;
- Протезге қойылатын функционалдық және құрылымдық талаптарды анықтау;
- Серпімді және демпферлік элементтерді пайдалана отырып, концептуалды үлгіні әзірлеу;
- Протездің негізгі параметрлеріне модельдеу және есептеулер жүргізу;
- Қолжетімді технологияларды пайдалана отырып прототип дайындау;
- Эксперименттік сынақтар өткізіп, алынған нәтижелерді талдау;
- Жасалған құрылғының қауіпсіздігін, эргономикасын және экономикалық тиімділігін бағалау.

Бұл жұмыста жүру кезінде тұрақтылық пен жайлылықты қамтамасыз ететін пассивті басқаруы бар тізе протезінің прототипін әзірлеу және зерттеу мәселелері қарастырылады.

1 АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ

Тізе буыны - адамның тірек-қимыл жүйесіндегі анатомиялық және биомеханикалық жағынан ең күрделі құрылымдардың бірі. Ол ортан жілік пен асықты жіліктің және тізе қақпақшасының буындасуынан түзіледі, ал тұрақтылығы байламдар, сіңірлер мен бұлшықеттер жүйесі арқылы қамтамасыз етіледі. Тізе буыны денеге тірек болу, жүктемені беру және тарату, сондай-ақ төменгі аяқтың үш жазықтықтағы қозғалысын қамтамасыз ету қызметтерін атқарады. Тізенің негізгі қозғалыстары - бүгілме мен жазылу, олар буын беттерінің сырғуымен және, әсіресе, бүгілген күйде шектеулі айналу компонентімен қатар жүреді. Жүру мен жүгіру кезіндегі тірек фазасында тізе дене салмағынан 2–3 есе асатын механикалық жүктемеге ұшырайды, бұл протездік құрылымдардан жоғары сенімділікті, соққыны бәсеңдету мен тұрақтылықты және динамикалық жағдайда тиімді жұмыс істеуді талап етеді.

Қазіргі заманауи аяқ протезі технологиялары қарапайым механикалық құрылғылардан бастап, сенсорлар, бейімделген басқару және машиналық оқыту элементтерін қамтитын жоғары технологиялық интеллектуалды жүйелерге дейін дамыды. Алайда белсенді және микропроцессормен басқарылатын протездердің қарқынды дамуына қарамастан, пассивті конструкциялар клиникалық және экономикалық жағдайларда өзектілігін жоғалтқан жоқ.

Тізе протездері негізінен басқару түріне қарай жіктеледі: үйкелістік басқаруы бар механикалық шарнирлі құрылғылардан бастап, қадам фазасын талдайтын және демпфирлеу параметрлерін нақты уақытта бейімдейтін күрделі электрондық микропроцессорлық жүйелерге дейін. Сонымен қатар, протездер қолданушының физикалық белсенділік деңгейіне (K1- K4) және технологиялық күрделілік пен құнына қарай да жіктеледі.

Пассивті протездер әдетте сыртқы энергия көздерін пайдаланбайды, ал олардың жұмыс істеу қабілеті конструкциялық шешімдер мен материалдардың қасиеттері арқылы қамтамасыз етіледі.

Мұндай жүйелердің негізгі элементтері - торсионды серіппелер, амортизаторлар, демпферлер және бұрыштық шектегіштер. Торсионды элементтер энергияны жинап, оны қайтаруға мүмкіндік береді, бұл итерілу фазасының тиімділігін арттырады. Амортизаторлар өкшенің жерге тиюі кезінде соққыны бәсеңдетіп, культяға түсетін дірілдік жүктемелерді азайтады. Демпферлер - үйкелістік немесе гидравликалық – бүгілме мен жазылу жылдамдығын реттеп, физиологиялық жүрісті қамтамасыз етеді. Қозғалыс шектегіштері гиперэкстензияны болдырмайды және тірек фазасында тұрақтылықты қалыптастырады.

Осылайша, құрылымы қарапайым және энергияға тәуелсіз пассивті протездер орташа белсенділігі бар науқастар үшін өмір сапасының қолайлы деңгейін қамтамасыз ете алады.

Қазіргі протездеу нарығында пассивті тізе протездерінің көптеген үлгілері ұсынылған, олардың әрқайсысы қозғалысты оңтайландыру мен қолданушы

жайылығын арттыруға бағытталған техникалық ерекшеліктерге ие. Мысалы, *Össur* компаниясының *Mauch Knee* моделі - пассивті басқаруы бар алғашқы гидравликалық жүйелердің бірі, К2-К3 белсенділік деңгейіндегі пайдаланушыларға арналған. Бұл протез сұйықтық демпферлеу механизмін қолдана отырып, бүгілме кезінде басқарылатын баяулау мен тұрақты тұруды қамтамасыз етеді.

Ottobock компаниясының *3R80* моделі бүгілме және жазылу фазаларында қос демпферлеумен ерекшеленеді, бұл еңіс беттермен жүру және баспалдақпен түсу кезінде қозғалыстың бірқалыптылығын қамтамасыз етеді. Бұл протез белсенділігі жоғары пайдаланушыларға (К3-К4) арналған және гиперэкстензиядан қорғау механизмімен жабдықталған.

Össur шығарған *Total Knee* моделі тізе буынының физиологиялық кинематикасымен үйлесетін көпосьті қосылысты қолданады. Ол үйкеліс арқылы реттелетін жүйемен жабдықталған және әртүрлі дене салмағы мен пайдаланушының қалауларына бейімделе алады, әсіресе белсенділігі төмен егде жастағы адамдар үшін қолайлы.

Кесте 1.1 – Пассивті тізе протездерінің салыстырмалы сипаттамасы

Модель	Механизм түрі	Басқару түрі	Белсенділік деңгейі	Негізгі ерекшеліктері
Mauch Knee	Гидравликалық	Пассивті	К2–К3	Бүгілуді бақылау, сенімділік, қызмет көрсетуі оңай
3R80 (Ottobock)	Гидравликалық	Пассивті	К3–К4	Қос демпферлеу, еңіс жерде тұрақтылық
Total Knee	Механикалық (көпосьті)	Пассивті	К1–К3	Адаптивтілік, тұрақтылық, физиологияны имитациялау

Нақты модельді таңдау көптеген факторларға байланысты: науқастың антропометриялық деректері, қозғалыс белсенділігі, өмір сүретін аймақтың климаты мен бедері, сондай-ақ техникалық қолдау қолжетімділігі.

Ресурстарға қолжетімділігі шектеулі жағдайларда пассивті протездер ең тиімді әрі үнемді шешім болып қала береді. Тізе буыны биомеханикасын және пассивті элементтердің жұмыс принциптерін терең түсіну науқастың жеке қажеттіліктерін ескере отырып мұндай жүйелерді жобалауға және түрлендіруге мүмкіндік береді, бұл асқынулар қаупін азайтып, аяқ-қолдың функционалдығын арттырады.

1.1 Пассивті протездерді жобалауға әсер ететін биомеханикалық параметрлер

Пассивті тізе протезін жобалау кезінде жүрістің тиімділігін, тұрақтылығын және жайлылығын қамтамасыз ететін негізгі биомеханикалық параметрлерді нақты ескеру қажет. Құрылымды есептеу негізінде төменгі аяқтың қозғалыс динамикасы, түсетін жүктеме және қадамның уақыттық сипаттамалары жатады.

Негізгі биомеханикалық факторларға мыналар жатады:

Тізе буынының бүгілме және жазылу бұрышы:
Қалыпты биомеханикада тізе буыны 0° (толық жазылу) мен 135° (максималды бүгілме) аралығында қозғалады. Күнделікті жүру үшін $65-70^\circ$ бұрыш жеткілікті, алайда баспалдақпен көтерілу, отыру және тұру сияқты әрекеттер үшін үлкен бұрыштар қажет.

Қадам фазаларындағы күш моменттері:

Тізедегі максималды жазылу моменттері тірек фазасының бастапқы және орта кезеңдерінде байқалады және 50–60 Н·м-ге жетуі мүмкін. Бұл мәндер амортизация мен вертикалды жүктеме жағдайында тұрақтылықты қамтамасыз етуге бағытталған құрылымды таңдауда шешуші маңызға ие.

Жүріс фазаларының ұзақтығы:

Толық қадам циклі шартты түрде екі фазаға бөлінеді:

- тірек фазасы - шамамен 60%, бұл кезде аяқ дене салмағын көтеріп тұрады;
- мах фазасы (ауыстыру фазасы) - шамамен 40%, бұл кезде аяқ жермен жанаспайды.

Бұл фазаларда протездің әртүрлі қасиеттері қажет: тірек кезінде - тұрақтылық, ал мах фазасында - еркін қозғалыс.

Протезге түсетін осьтік жүктеме:

Өкшенің жерге тиген сәтінде протезге түсетін осьтік жүктеме қолданушы дене салмағының 2,5-3,5 есесін құрауы мүмкін. Бұл конструкцияның беріктігі мен материалдарды таңдауға қатаң талаптар қояды. Мәселен, 70-90 кг салмақтағы қолданушылар үшін есептік жүктеме 2500-3100 Н-ға дейін жетуі мүмкін.

Массалар центрінің траекториясы мен балтырдың кинематикасы:

Дененің массалар центрінің траекториясы дені сау адамдардағы табиғи қисыққа мүмкіндігінше жақын болуы тиіс. Артық тербелістер мен энергия шығынын азайту – басты міндеттердің бірі.

Қадам жылдамдығы мен ұзындығы:

Ересек адамның орташа жүру жылдамдығы - шамамен 1.2-1.4 м/с, ал қадам ұзындығы - 0.6-0.75 м аралығында. Протез құрылымы қадам синхрондылығын қолдауы және жүріс жылдамдығын тежемеуі қажет.

Энергетикалық

тиімділік:

Пассивті протездерде сыртқы қуат көздері болмағандықтан, дене қозғалысының энергиясын барынша тиімді пайдалану маңызды. Бұл серіппенің

қаттылығын және демпферлеу параметрлерін дәл баптау арқылы жүзеге асырылады.

Аталған параметрлер негізінде келесі әрекеттер орындалады:

- шарнирлер мен бекіту түйіндеріндегі күштерді есептеу;
- қажетті серпімділік және қаттылық сипаттамалары бар материалдарды таңдау;
- жазылу кезінде қайтарушы күшті қамтамасыз ететін бұрыш шектегіштер мен элементтерді жобалау;
- қозғалыстың тұрақтылығы мен тегістігіне әсер ететін геометриялық пішіндерді таңдау.

Сондай-ақ, әртүрлі қолданушылардың - қарт адамдардың, артық салмағы бар немесе өте белсенді пайдаланушылардың - *жүріс ерекшеліктерін* ескеру маңызды. Бұл өз кезегінде бейімделетін немесе реттелетін элементтерді әзірлеуді талап етеді.

1.2 Физиологиялық жүрісті қалыптастырудағы демпферлеудің рөлі

Демпферлеу пассивті тізе протездерінде басқарылатын, бірқалыпты және қауіпсіз қозғалысты қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Белсенді құрылымдарда қозғалысты мотор реттесе, пассивті жүйелерде басқару механикалық қасиеттерге — бірінші кезекте, буындағы қозғалысқа кедергі көрсететін демпфер сипаттамаларына негізделеді.

Протездегі демпферлеудің негізгі функциялары:

Бүгілме мен жазылу жылдамдығын бақылау:

Дұрыс таңдалған демпфер аяқтың ауыстыру фазасында тым тез жазылуын болдырмайды, бұл өкшенің тірек бетімен жанасу сәтінде соққы жүктемесін төмендетуге мүмкіндік береді.

Тірек бетімен бастапқы жанасу кезінде тұрақтылық:

Демпферлеудің арқасында дене салмағын протезге біртіндеп ауыстыру жүзеге асады, бұл тепе-теңдікті жоғалту қаупін азайтады.

Баспалдақпен қозғалу мен еңістерде қозғалысты реттеу:

Мысалы, Ottobock компаниясының 3R80 жүйесіндегідей реттелетін демпферлеу қозғалыс жылдамдығын және бірқалыптылығын бақылауға мүмкіндік береді. Бұл қауіпсіздікті арттырып, бұлшықетке түсетін жүктемені азайтады.

Физиологиялық жүрісті қолдау:

Тиімді демпферлеу қолданушы қозғалысын сау аяқтың биомеханикасына барынша жақындатуға көмектеседі, жүрісті симметриялы және энергияны үнемдейтін етеді. Керісінше, жеткіліксіз амортизация жамбас және бел омыртқасында шамадан тыс компенсаторлық қозғалыстардың туындауына әкеліп, тез шаршауға, ауырсынуға және құлау қаупінің артуына себеп болады.

Демпферлеу механизмдерінің түрлері:

Үйкелістік демпферлер (трение негізінде):

- Құрылымы қарапайым;
- Сызықты сипаттамаға ие;
- Тозуға және ластануға сезімтал;
- Көбінесе қолжетімді үлгілерде қолданылады.

Гидравликалық демпферлер (май немесе газ негізінде):

- Қозғалыс жылдамдығына байланысты айнымалы кедергіні қамтамасыз етеді;
- Біржақты немесе екіжақты жұмыс істей алады;
- Қиын қозғалыс траекторияларын басқаруға тиімді (мысалы, орындыққа отыру немесе баяу жүру кезінде).

Эластомерлік элементтер:

- Қысылу/созылу арқылы жұмыс істейді;
- Жүйенің бейімделгіштігін арттыру үшін басқа демпферлермен бірге қолданылады.

Кесте 1.2 – Демпферлеу мен жүріс фазалары арасындағы байланыс

Қадам фазасы	Қажетті демпферлеу деңгейі	Мақсаты
Ауыстыру соңында	Жоғары	Жазылуды баяулату
Бастапқы жанасу	Орташа	Жүктемені бірқалыпты беру
Тірек фазасының ортасы	Төмен	Қозғалысқа минималды кедергі
Тірек соңы / ауыстыру басы	Айнымалы	Бүгілуді бастау және жылдамдату

Практикалық

мысал:

3R80 жүйесі бұрыш пен қозғалыс жылдамдығына байланысты кедергіні автоматты түрде өзгертетін реттелетін гидравликалық демпферді қамтиды. Бұл тіпті кедір-бұдырлы жерлермен немесе еңістермен жүргенде де жайлылықты қамтамасыз етеді.

Демпферлеуді дұрыс баптау физиологиялық, қауіпсіз және энергия үнемдейтін жүріске қол жеткізудегі маңызды фактор болып табылады. Пассивті протезді жобалау кезінде тек демпфер түрін дұрыс таңдау ғана емес, сонымен қатар қолданушының жеке ерекшеліктерін: дене салмағы, жүру стилі, физикалық белсенділігі және қолдану ортасын ескеру қажет.

1.3 Пассивті протезді қолданудағы энергия үнемділік пен тепе-теңдікті сақтау

Пассивті тізе протездері өз қуат көзіне ие болмағандықтан, айналу моментін тудырып немесе бұлшықет күшінің жетіспеушілігін өтей алмайды.

Сондықтан олардың тиімділігі қолданушының механикалық энергиясын сақтай алуына және қадам жасау кезінде энергетикалық шығындарды азайта алуына тікелей байланысты. Бұл қолданушының тез шаршамауы және жүрісінің табиғилығына барынша жақын болу үшін ерекше маңызды

Энергия үнемділікті арттырудың негізгі принциптері:

1. *Торсиондық және сызықтық серіппелер арқылы энергияны қайтару*
Серпімді элементтер бүгілме фазасы кезінде энергияны жинап, жазылу фазасында оны қайтарады. Мұндай механизмдер әсіресе аяқтың мах фазасындағы қайталанатын циклдік қозғалыстар кезінде тиімді.

2. *Тірек фазасында механикалық бекіткіштер мен құлыптар қолдану*
Қозғалысты үнемі тежеусіз тірек кезінде тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Бұл басқа буындарға түсетін жүктемені азайтып, денемен орындалатын өтемдік қозғалыстар қажеттілігін төмендетеді.

3. *Құрылымның салмағы мен инерциялық сипаттамаларын оңтайландыру*

Протез неғұрлым жеңіл және оның массалар орталығы сау аяқтың табиғи жағдайына неғұрлым жақын болса, оны қадам фазасында ілестіріп жүру соғұрлым аз энергияны талап етеді. Сонымен қатар, мах фазасындағы кедергінің төмендеуі жамбас буынына түсетін жүктемені азайтады.

4. *Қажетсіз фазалардағы үйкелістік және демпферлік шығындарды азайту*

Тиімді протез — «Интеллектуалды пассивті» архитектураға ие, мұнда демпферлеу тек қажет сәттерде іске қосылады, артық кедергі мен шамадан тыс жүктемелердің алдын алады.

Жүру кезіндегі тепе-теңдік пен тұрақтылық

Пассивті протез денені тірекке ауыстыру және қозғалыс бағытын өзгерту кезінде сенімді қолдау көрсетуі керек. Бұл келесі тәсілдермен қамтамасыз етіледі:

- протездің геометриясы мен ұзындығының дұрыс таңдалуы;
- тірек орталығының бейімделуі;
- шамадан тыс бүгілуді немесе гиперэкстензияны болдырмайтын шектегіштер мен тіректерді енгізу.

Тепе-теңдік бұзылғанда (мысалы, еңіс жерде немесе қозғалыс жылдамдығы күрт өзгергенде) сәйкес келмейтін құрылым қолданушыны құлап қалудан сақтай алмауы мүмкін. Сондықтан тепе-теңдікті сақтау — тек биомеханикалық ғана емес, сонымен қатар *эргономикалық міндет*, ол қауіпсіздікке тікелей әсер етеді.

Энергия шығыны мен тиімділік

Зерттеулер көрсеткендей, дұрыс бапталған пассивті протезбен жүрудің метаболикалық құны (әсіресе демпферлеуі микропроцессормен басқарылатын пассивті режимдегі C-Leg сияқты жүйелерде) белсенді протездерді қолданушылар көрсеткіштеріне жақындай алады — *орташа белсенділік пен тегіс бет жағдайында*. Бұл сапалы пассивті жүйелерді экономикалық жағынан тартымды балама етеді.

Кесте 1.3 – Белсенді протездердің көрсеткіштері

Көрсеткіш	Белсенді протез	Пассивті (оңтайландырылған)
Метаболикалық энергия (Вт/кг)	3.2–3.5	3.4–3.6
100 м жүруге жұмсалатын энергия (кДж)	28–31	30–33
Өтемдік қозғалыстар саны	Төмен	орташа
Жүрістегі асимметрия деңгейі	10–12%	12–15%

Белсенді жетегі болмаса да, сауатты жобаланған пассивті протез күнделікті жүру барысында жеткілікті энергия үнемділігін, тұрақтылықты және функционалдылықты қамтамасыз ете алады. Кинематикалық параметрлерді, элементтердің қаттылығын **оңтайландыру және энергияны қайтарушы механизмдерді** қолдану құрылымның қарапайымдылығы мен жүрістің физиологиялық үйлесімділігінің тепе-теңдігін табуға мүмкіндік береді.

1.4 Пассивті протездерді қолданушының жеке ерекшеліктеріне бейімдеу

Пассивті тізе протезін сәтті қолданудың басты шарттарының бірі - оның анатомиялық және функционалдық тұрғыдан қолданушының жеке ерекшеліктеріне барынша сәйкес келуі. «Барлығына бір өлшем» қағидасымен жасалған стандартты шешімдерден айырмашылығы, бейімделген протез жүріс тиімділігін едәуір арттырып, шаршауды азайтуға және қолданушының өмір сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

Жеке баптауға жататын негізгі параметрлер:

Дене салмағы және оның таралуы

Пайдаланушы салмағы материалды, арматура элементтерін және серіппелердің қаттылығын таңдауда шешуші рөл атқарады. Салмағы жоғары адамдарда буын элементтері мен амортизаторларға түсетін жүктеме артады, бұл олардың беріктігін немесе қаттылық параметрлерін өзгерту қажеттілігін туындатады.

Культи ұзындығы мен пішіні

Қысқа культи қозғалыс көлемі мен тұрақтылықты шектейді, әсіресе тірек фазасында. Бұл протезді бекіту деңгейіне (жоғары немесе төмен орналасу) және тостағанша мен интерфейс компоненттерінің пішініне әсер етеді. Жұмсақ тіндердің қозғалысы немесе тұрақсыз культи үйкеліс, ауырсыну және протездің дұрыс бекітілмеуіне әкелуі мүмкін, бұл қосымша түзетулерді қажет етеді.

Жас ерекшелігі мен жынысы

Қарт адамдарда бұлшықет тонусы мен қозғалыс координациясы жиі төмендейді, сондықтан оларға жоғары тұрақтылық пен жұмсақ демпферлеу

кажет. Әйелдерде анатомиялық тұрғыдан ортан жіліктің Q-бұрышы өзгеше, бұл да протез механикасын жобалау кезінде ескерілуі тиіс.

Физикалық

белсенділік

деңгейі

Қозғалысы шектеулі қолданушылар үшін қарапайым әрі тұрақты құрылым қажет, ал белсенді қолданушылар үшін жеңіл, динамикалық және бейімделгіш механизм қажет. Мұндай жағдайларда әртүрлі модульдер қолданылуы мүмкін: үйкелісті тежегіші бар қарапайымдардан бастап, алдын ала бапталатын кедергілері мен кері байланысы бар күрделірек жүйелерге дейін.

Пайдалану

жағдайлары

Ауылдық жерде өмір сүретін, жер бедері мен ауа райы күрделі қолданушыларға тозаң мен ылғалдан қорғалған, тұрақтылығы жоғары протездер қажет.

Кесте 1.4 – Құрылым бейімделуінің мысалдары

Жеке фактор	Құрылым бейімделуі
Салмағы > 90 кг	Осьтер, серіппелер, тірек тораптарының беріктігін арттыру
Қысқа культі	Жоғары сенімділік модулі, ұзартылған адаптер
Қарт жастағы адам	Баяу демпферлеу, кеңейтілген тірек
Белсенді өмір салты	Жеңіл қорытпалар, жедел құлыптар, динамикалық қадам
Әйел жынысы	Q-бұрышты ескере отырып геометриялық түзетулер

Жеке бейімделу және жайлылық

Қолданушының субъективті жайлылықты сезінуі — протездеудің табыстылығының маңызды критерийі. Жеке бейімдеу мыналарға мүмкіндік береді:

- жүрістің симметриясы мен ырғағын арттыруға;
- өтемдік қозғалыстар мен қосымша тірекке қажеттілікті азайтуға;
- тері тітіркенуі, шаршау және екіншілік ауырсыну қаупін төмендетуге;
- қолданушының сенімділігін және әлеуметтік бейімделуін арттыруға.

Анатомиялық-функционалдық ерекшеліктерге бейімделген пассивті протез қауіпсіз, физиологиялық және жайлы жүрісті қамтамасыз ете алады. Жеке бейімдеу - протездің қызмет ету мерзімін ұлғайтудың, қолданушының тәжірибесін жақсартудың және жалпы жүйе тиімділігін арттырудың кілті.

1.5 Тізе буынын протездеудегі гибриді және белсенді тәсілдер

Төменгі аяқ-қол протездеудің қазіргі үрдістері пассивті конструкциялардан белсенді қозғалыс пен тұрақтылықты қамтамасыз ететін күрделі гибриді және белсенді жүйелерге қарай бет бұруда. Бұл тәсілдер протез механикасын табиғи буын функциясына барынша жақындатуға, жайлылық пен энергия тиімділігін арттыруға бағытталған.

Гибридік конструкция мысалы — ECT Knee

[Calvert және басқалар, 2022] еңбегінде сипатталған *ЕСТ-протез* — осының айқын мысалы. Бұл құрылым келесі компоненттерді біріктіреді:

- қозғалыс режимдері әртүрлі болатын *екі жылдамдықты трансмиссия*;

- тек қана қадамның нақты фазаларында (мысалы, баспалдақпен көтерілу кезінде) іске қосылатын *электржетек*;

- жүріс фазаларын нақты анықтап, *кедергіні нақты уақытта бейімдейтін шекті автоматқа (FSM)* негізделген басқару жүйесі.

Мұндай тәсіл метаболикалық шығындарды едәуір төмендетуге, қауіпсіздікті арттыруға және жүрістің табиғилығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Гибридті және интеллектуалды протездерді дамытудың заманауи бағыттары:

1. *Гибридті* *құрылымдар*

Пассивті элементтерді (серіппелер, тіректер, бекіткіштер) жартылай белсенді немесе реттелетін компоненттермен (магнитті муфта, басқарылатын демпферлер) біріктіреді. Артықшылығы - энергия көзіне толық тәуелсіздікті болдырмай, айнымалы жүктемелерге бейімделу мүмкіндігі..

2. *Интеллектуалды материалдарды қолдану*

- *Shape Memory Alloys (SMA)* — пішін жадысы бар материалдар, температура немесе ток әсерінен қаттылығы мен геометриясын өзгерте алады.

- *Магнито-реологиялық сұйықтықтар* — магнит өрісі әсерінен тұтқырлығын өзгертетін сұйықтықтар, басқарылатын демпфер ретінде қолданылады.

- Мұндай технологиялар протездің қолданушы қажеттіліктері мен жағдайына байланысты бейімделуіне жол ашады.

3. *Модульдік* *жүйелер*

Модульдік принцип бойынша жасалған протездер компоненттерді (мысалы, шарнир, амортизатор, тостағанша) тез ауыстыруға мүмкіндік береді, техникалық қызмет көрсетуді жеңілдетеді және әртүрлі белсенділік режимдеріне бейімдеуге мүмкіндік береді (күнделікті жүру, спорт, жұмыс).

4. *3D-баспа* *және* *бионикалық* *жобалау*

Аддитивтік технологияларды қолдану өзіндік құнын төмендетеді, прототиптеуді жеделдетеді және пішін мен параметрлерді дәл бейімдеуге мүмкіндік береді. Топологиялық оңтайландыру мен бионикалық жобалау алгоритмдерін қолдану құрылым салмағын беріктігін жоғалтпай-ақ азайтады

5. *Сенсорика* *және* *машиналық* *оқытуды* *біріктіру*

Бұл бағыт негізінен белсенді протездерде қолданылса да, сенсорлық талдау элементтері (акселерометрлер, гироскоптар, қысым сенсорлары) пассивті-гибридті жүйелерде де жүрісті бағалау және параметрлерді қолмен баптау үшін (мысалы, мобильді қосымша арқылы) қолданылуы мүмкін.

Кесте 1.5 – Тәсілдер салыстырмасы

Тәсіл	Артықшылықтары	Шектеулері
Пассивті протез	Қарапайым, сенімді, арзан	Адаптивтілігі және функционалдығы шектеулі
Гибридті протез	Жақсы бейімделу, энергия үнемділік	Жоғары күрделілік және баға
Белсенді (роботтандырылған)	Биомеханикаға барынша жақындық	Жоғары баға, қуат көзін қажет етеді

Гибридті және интеллектуалды шешімдердің пайда болуы пассивті протездердің өзектілігін жоққа шығармайды, әсіресе бюджеті шектеулі және инфрақұрылым қолжетімсіз ортада. Алайда, *гибридтік тәсіл* - пассивті механизмдердің қарапайымдылығын интеллектуалды функциялармен біріктіру - функционалды, энергия тиімді және жеке бейімделген оңалтуға жол ашатын болашағы зор бағыт болып табылады.

2 ЗЕРТТЕУДІҢ МАҚСАТЫ, МІНДЕТТЕРІ ЖӘНЕ ӘДІСТЕРІ

Осы бітіруші біліктілік жұмысының мақсаты – статикалық жүктеме кезіндегі тұрақтылықты, динамикалық жүктеме (жүру, дене салмағын тасымалдау) кезіндегі тиімділікті, сондай-ақ конструкцияның технологиялық орындылығын және қолжетімділігін қамтамасыз ететін пассивті тізе протезінің прототипін жобалау, дайындау және кешенді сынақтан өткізу. Бұл протез сан сүйегі деңгейінде ампутацияланған пациенттерге арналған және төменгі аяқ-қолдың негізгі функцияларын белсенді жетектерсіз қалпына келтіруге бағытталған, бұл оны шектеулі бюджет немесе медициналық инфрақұрылым жағдайында аса өзекті етеді.

Ғылыми жаңалығы — қолжетімді материалдарды және оңтайландырылған кинематикалық схеманы пайдалана отырып, пассивті тізе протезінің жетілдірілген конструкциясын жасау. Серіппелі-демпферлік механизмді енгізу жүру кезінде буынның жұмсақ бүгілуі мен жазылуын қамтамасыз етеді, ал бекіту жүйесі тірек фазасында тұрақтылықты арттырады. Сонымен қатар, жұмыста белсенді протездерде қолданылатын гибриді басқару концепцияларын (мысалы, FSM – аяқ басу фазаларын тану негізіндегі шекті автомат сияқты, ECT Knee протезіндегі) пассивті жүйелерге ішінара бейімдеу мүмкіндігі қарастырылады. Құрылым модульдік тәсілмен орындалған, бұл негізгі бөлшектерді толық қайта құрастырусыз ауыстыруға мүмкіндік береді, жөндеуді жеңілдетеді және жеке баптауды қамтамасыз етеді.

Жұмыстың практикалық маңызы — әзірленген құрылымды шағын өндіріс орындары немесе білім беру мекемелері стандартты технологиялармен (3D-баспа, қолмен құрастыру, фрезерлеу) жүзеге асыра алады. Прототип шетелдік өнімдерге қолжетімді балама бола алады, оның өзіндік құнын 5–10 есеге дейін төмендетеді. Сонымен қатар, бұл конструкция протездеу, биомедициналық инженерия және робототехника саласындағы мамандарды дайындау кезінде оқу мақсатында қолдануға жарамды.

Мақсатқа жету үшін келесі зерттеу міндеттері қойылды:

1. Тізе буынының анатомо-физиологиялық ерекшеліктерін, оның ішінде жүру, тыныштық және тірек фазаларындағы биомеханикасын зерттеу.
2. Пассивті тізе протезіне қойылатын конструктивтік және функционалдық талаптарды клиникалық ұсынымдар, стандарттар және ғылыми әдебиеттер негізінде анықтау.
3. Протездеу саласындағы заманауи шешімдерді зерделеу және сенімділік, құны, массасы, энергия тиімділігі және қолдану жайлылығы критерийлері бойынша пассивті, белсенді және гибриді үлгілердің салыстырмалы талдауын жүргізу.
4. SolidWorks CAD-ортасында протездің 3D-моделін жасау, оған келесі тораптар кіреді: корпус, айналу осі, серіппелі-демпферлік механизм, культимен жалғасатын элементтер;

5. ANSYS ортасында конструкцияның беріктігін соңғы элементтер әдісімен модельдеу, жүру барысында пайда болатын статикалық және динамикалық жүктемелерді ескере отырып.

6. FDM-баспа технологиясын қолдана отырып, PLA-пластиктен, стандартты осьтерден, серіппелер мен демпферлерден физикалық прототипті дайындау.

7. Биомеханикалық сынақтардың әдістемесін әзірлеу: статикалық және динамикалық жүктеме, қадам қозғалысын бейнеанализ арқылы модельдеу.

8. Эксперименттік мәліметтерді есептік нәтижелермен салыстыру, құрылымның тиімділігін, тұрақтылығын, қозғалыстың бірқалыптылығын, қозғалыс амплитудасын және демпферлеу деңгейін бағалау.

9. Құрылымды жетілдіру бойынша ұсынымдар әзірлеу, интеллектуалды материалдарды, модульдік компоненттерді және нақты қолданушыға бейімделген параметрлерді енгізу.

Зерттеу әдістемесі — теориялық талдау, компьютерлік модельдеу, инженерлік жобалау, 3D-баспа, зертханалық сынақтар және қолданыстағы шешімдермен салыстырмалы талдауды қамтитын кешенді әдіс. Бұл тәсіл конструкциялық қана емес, сонымен қатар клиникалық практикада қолдануға жарамдылық тұрғысынан да бағалауға мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістері

Қойылған мақсаттар мен міндеттерге жету үшін келесі кешенді әдістер қолданылды: теориялық талдау, инженерлік жобалау, сандық модельдеу, прототип дайындау және эксперименттік сынақтар.

2.1 Теориялық талдау және әдеби шолу

Бастапқы кезеңде тізе буынының биомеханикасы, протездеу әдістері және пассивті-гибридті конструкциялар жасауға арналған инженерлік тәсілдер бойынша ғылыми-техникалық әдебиеттерге шолу жасалды. ГОСТ Р 51831-2001 және ISO 10328:2016 стандарттарының ережелері, сондай-ақ тізе протездерін пайдалану бойынша клиникалық ұсынымдар мен есептер зерделенді.

Назар аударылған маңызды бөлім – 15-тен астам коммерциялық қолжетімді үлгілерге салыстырмалы талдау жүргізу (пассивті, жартылай белсенді және белсенді шешімдер). Мысал ретінде::

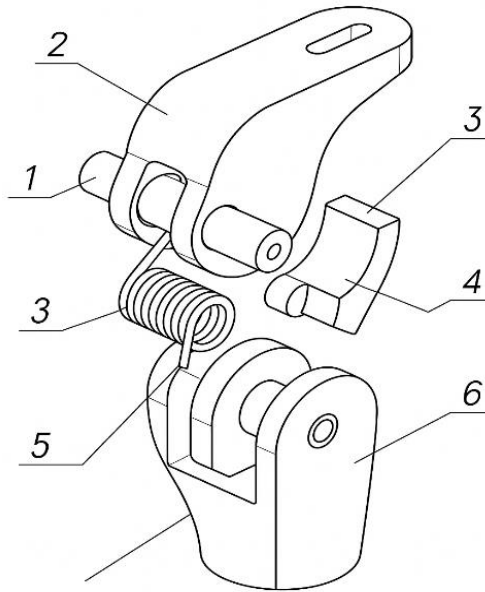
Кесте 2.1 – Тізе протездерінің бар үлгілеріне салыстырмалы талдау

Модель	Басқару түрі	Салмағы (кг)	Макс. жүктеме (кг)	Бағасы (USD)
Otto Bock 3R15	Пассивті	1.4	100	~1200
Össur Mauch Knee	Пассивті	1.2	125	~1500
Endolite KX06	Жартылай белсенді	1.8	120	~3500

1. SolidWorks ортасында CAD-модельдеу

SolidWorks автоматтандырылған жобалау жүйесінде құрылымның үш өлшемді моделі әзірленді. Модель құрамына кірді:

- бұрыш шектегіші және бекітпелері бар тірек корпусы;
- подшипниктермен жабдықталған шарнирлі ось;
- торсиондық серіппе мен полиуретан тірегі негізіндегі серіппелі-демпферлік механизм;
- культямен және балтыр модулімен жалғайтын адаптерлер.



2.1-сурет – Тізе буыны моделінің жинақ сызбасы

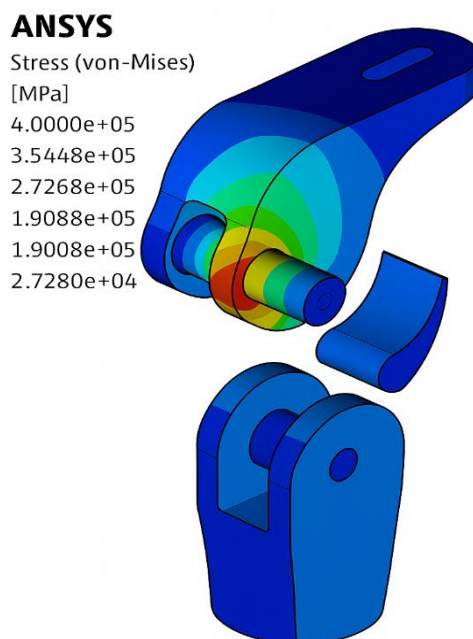
2. ANSYS ортасындағы беріктік талдауы

Конструкция беріктігін бағалау үшін ANSYS ортасында соңғы элементтер әдісімен (МКЭ) сандық модельдеу жүргізілді. Екі сценарий қарастырылды:

- тік күйде 100 кг жүктемемен вертикалды әсер;
- 60° бүгілме бұрышындағы динамикалық жүктеме.

Кесте 2.2 – Беріктік талдауы нәтижелері

Конструкция элементі	Материал	Макс. кернеу (МПа)	Беріктік шегі (МПа)	Беріктік шегі
Корпус	PLA	39	60	1.54
Шарнирлі ось	Болат	74	240	3.24
Балтыр бекіткіші	Алюминий	48	120	2.50



2.2-сурет – Вертикалды жүктеме кезінде ANSYS жүйесіндегі кернеулер картасы

3. Прототипті дайындау

Физикалық прототип FDM 3D-баспа технологиясын қолдана отырып PLA+ материалынан жасалды. Қосылу нүктелерінде болат осьтер, бұрандалы жалғағыштар және алюминийден жасалған күшейткіштер орнатылды. Демпфер ретінде полиуретан амортизаторы қолданылды. Протездің жалпы массасы — 1.3 кг, бұл пассивті конструкциялар нормасына сәйкес келеді.

4. Биомеханикалық

сынақтар

Протез нақты жағдайларды модельдеу арқылы стендтік сынақтардан өткізілді. Тесттік манекеннің салмағы мен қозғалыс параметрлері реттелді.

Тексерілді:

- динамикалық фазадағы бүгілме бұрышы;
- тік күйдегі тұрақтылық;
- жүктемеден кейін қалпына келу уақыты;
- қозғалыстың бірқалыптылығына субъективті баға

Кесте 2.3 – Биомеханикалық сынақтың негізгі параметрлері

Параметр	Алынған мән	Рұқсат етілген мән
Максималды бүгілме бұрышы	105°	$\geq 100^\circ$
Қалпына келу уақыты	1.2 с	≤ 2.0 с
Тік күйдегі тұрақтылық	Жоғары	Жоғары қажет



2.3-сурет – Манекенмен жүргізілген биомеханикалық сынақ стенді

Инженерлік есептеу, жобалау, модельдеу және сынақ жүргізуді қамтитын кешенді әдісті жүзеге асыру тізе буынының пассивті протезінің конструкциясын жасауға мүмкіндік берді. Бұл конструкция негізгі инженерлік және медициналық талаптарға жауап беретінін көрсетті.

Оның тұрақтылығы, беріктігі және қозғалыстың бірқалыптылығы расталып, оны әрі қарай жетілдіру, сертификаттау және шектеулі ресурстар жағдайында өндіріске енгізу мүмкіндігін дәлелдеді.

3 КОНСТРУКТИВТІК БӨЛІМ

3.1 Құрылымға қойылатын талаптар

Тізе буынының протезін жобалау барысында техникалық, биомеханикалық және пайдалану талаптарын қатаң сақтау қажет. Бұл талаптар конструкцияның механикалық беріктігін ғана емес, сонымен қатар оны қолданудағы жайлылықты, қауіпсіздікті, бейімділікті және ұзақ қызмет етуін қамтамасыз етеді. Пассивті құрылымның ерекшеліктерін ескере отырып, келесі негізгі талаптар тұжырымдалды:

Тірек фазасындағы функционалдық тұрақтылық. Протез тік жүктеме кезінде және қадамның ерте фазасында буынды сенімді бекітуі керек. Биомеханикалық зерттеулерге сәйкес, қадам уақытының 60%-ы тірек фазасына келеді, бұл кезеңде тізе «иілмей» тұруы тиіс [1].

Толық энергия тәуелсіздігі. Құрылымда электрондық элементтер, моторлар немесе аккумуляторлар болмауы керек. Бұл алыс және ресурсы шектеулі өңірлерде қолдануды жеңілдетеді, құнын төмендетеді және сенімділікті арттырады [2].

Минималды салмақ. Протез массасы 1.5 кг-нан аспауы тиіс. Артық салмақ қолданушының энергия шығынын арттырып, белге және сау аяққа түсетін жүктемені көбейтеді [3].

Модульділік және жөндеу ыңғайлылығы. Шарнирлер, серіппелер және бекіткіштер сияқты тозатын бөлшектерді жылдам ауыстыру мүмкіндігі қарастырылуы тиіс. Мұндай тәсіл өмірлік циклді ұзартады және заманауи протездерде кеңінен қолданылады [4].

Экономикалық қолжетімділік. Протездің өзіндік құны шағын өндірісте сериялық түрде шығаруға мүмкіндік беруі керек. 3D-баспа, стандартты бекіткіштер және қолжетімді материалдар (PLA+, алюминий, полиуретан) қолдану – өндірістің үнемділігін сақтай отырып сапаны қамтамасыз етеді.

Сыртқы факторларға төзімділік. Протез шаңға, ылғалға, соққыға, дірілге және –10–нан +40 °C дейінгі температураға төзімді болуы қажет. Герметикалық подшипниктер мен ылғалға төзімді жабындар осы талаптарды орындауға көмектеседі.

Ұзақ мерзімділік және жұмыс ресурсы. Протездің кепілдік ресурсы кемінде 500 000 бүгілу-жазылу циклі болуы тиіс. Бұл – күнделікті қолдану кезінде 2–3 жылға сәйкес келеді.

Бейімділік және үйлесімділік. Құрылым әртүрлі культя түрлерімен (қысқа, орташа, ұзын) және басқа өндірушілердің адаптерлерімен (ISO 10328 стандарты) үйлесімді болуы қажет.

Осы талаптар инженерлік жобаның негізіне алынып, тәжірибелік прототиптің құрылымында іске асырылды.

3.2 Құрылым тұжырымдамасы

Ұсынылып отырған пассивті тізе протезінің құрылымының негізі — сау адамның тізе буынының биомеханикасын еліктейтін, серіппелі-демпферлік механизм мен кинематикалық түрде есептелген осьтік құрылымды біріктіретін маятниктік қозғалыс принципі. Бұл тұжырымдама қозғалыстың бірқалыптылығын және тұрақтылығын, қадам траекториясының жоғары қайталанғыштығын, энергияға тәуелсіздікті және электрондық компоненттерсіз немесе бағдарламаланатын жүйелерсіз қарапайым пайдалануды қамтамасыз етеді.

Негізгі идея — пайдаланушының механикалық энергиясын қозғалыс жасау үшін пайдалану және кіріктірілген пассивті элементтер — торсионды серіппе мен демпфер арқылы аяқтың бастапқы күйіне басқарылатын түрде қайта оралуын қамтамасыз ету. Бұл протездің жұмысын физиологиялық қозғалысқа жақындатып, күнделікті белсенділікте тұрақтылық пен қауіпсіздікті қамтамасыз етеді.

Құрылымды жүзеге асырудың функционалдық ерекшеліктері:

- Қадам жасау кезінде тізенің бүгілуі инерциялық момент туындатады, ол кіріктірілген демпфер арқылы ішінара бәсеңдетіледі. Бұл бүгілу жылдамдығын бақылауға және аяқтың "құлап кетуінен" сақтануға мүмкіндік береді. Мұндай функция құлау қаупінің алдын алу және тұрақтылықты арттыру үшін өте маңызды.

- Жазылу процесінде торсионды серіппе іске қосылып, бүгілу фазасында жиналған энергияны қолдана отырып, аяқты тік күйге бірқалыпты қайтарады. Бұл сан бұлшықеттерінің жазылу функциясын имитациялап, қадамнан кейін қалпына келуге көмектеседі және сау аяққа түсетін жүктемені азайтады.

- Құрылымға механикалық қозғалыс шектегіштері енгізілген, олар артық бүгілу мен гиперэкстензияны болдырмайды. Бүгілу бұрышы $105-120^{\circ}$ -пен шектелсе, жазылу $0-5^{\circ}$ аралығында болады, бұл табиғи дене қалпын сақтауға мүмкіндік береді.

- Шарнир геометриясы ICR (инстанттық айналу орталығы) принципіне сәйкес жасалған. Бұл орталық сау тізеде бүгілу бұрышына байланысты өзгереді. Мұндай көпосьті кинематика қозғалыстың табиғилығын арттырып, жүріс патологияларының пайда болу қаупін азайтады.

- Құрылым модульдік архитектурамен жасалған, бұл оны нақты пайдалану жағдайларына бейімдеуге мүмкіндік береді. Түрлі тұтқырлықтағы демпферлерді, әртүрлі қаттылықтағы серіппелерді, сондай-ақ қозғалыс жылдамдығын шектегіштерді немесе бейімделетін амортизаторларды орнату мүмкін.

Ұсынылған тұжырымдаманың артықшылықтары:

Сенімділік пен энергияға тәуелсіздік.

Құрылымда электрондық және ылғал мен шаңға сезімтал қозғалмалы элементтер жоқ, бұл сыртқы әсерлерге, температура ауытқуларына және механикалық жүктемелерге жоғары төзімділікке мүмкіндік береді.

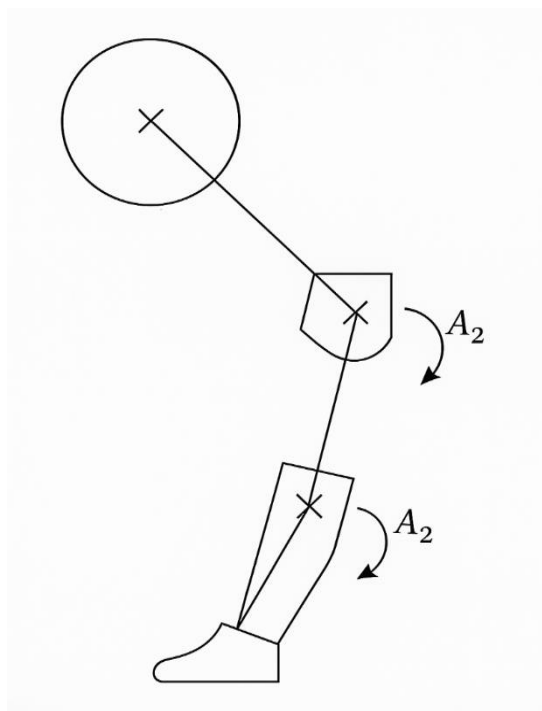
Техникалық қызмет көрсету қажеттілігінің аз болуы. Барлық тораптар жөндеуге бейімделіп жасалған: болтпен бекітілген, бөлшектер өзара ауыстырылатын, бағдарламалық жасақтаманы жаңарту немесе қайта калибрлеу талап етілмейді.

Қозғалыстың тұрақтылығы мен қайталанғыштығы. Геометриялық дәл есептелген буын траекториясы мен оңтайландырылған демпферлеудің арқасында қолданушы күрт өзгерістерсіз, бірқалыпты қадам жасайды, бұл омыртқа мен жамбас буынына түсетін жүктемені азайтады.

Жеке бейімдеудің қарапайымдылығы. Серіппе қаттылығын реттеу, демпферлерді ауыстыру, ұзындық пен бұрыш шектегіштерді өзгерту арқылы протезді нақты адамның салмағына, жасына, белсенділік деңгейіне және әдеттегі жүрісіне бейімдеуге болады.

Инженерлік және өндірістік қолжетімділік. PLA+, алюминий, полиуретан сияқты кең таралған материалдарды, 3D-баспа технологиясын және модульдік жинақты қолданудың арқасында құрылымды шағын өндірісте немесе зертханада оңай масштабтауға болады.

Ұсынылған құрылым қарапайымдылық пен функционалдылықты, энергияға тәуелсіздікті және биомеханикалық негізделуді ұштастырады. Бұл жоба төменгі аяқ-қолын ампутациялаған науқастардың күнделікті реабилитациясы үшін қолжетімді және тиімді пассивті протездерді жасау бағытында болашағы бар зерттеулер мен жетілдірулердің негізі бола алады



3.1- сурет — Буын жұмысының кинематикалық схемасы

3.3 Құрылымның негізгі тораптарының сипаттамасы

Дайындалған пассивті тізе протезінің құрылымы үш негізгі функционалдық модульден тұрады: буын торабынан, серпінді (қайтарушы) элементтен және демпферлік механизмнен. Бұл тораптардың әрқайсысы биомеханикалық талаптар, өндірістік технология, жөндеуге жарамдылық және сенімділік ескеріліп жобаланған..

1. Буын торабы

Буын торабы сан мен балтыр элементтері арасында осьтік айналуды қамтамасыз етеді. Оның құрылымы пайдалану кезінде жоғары дәлдік пен минималды люфтке қол жеткізуге бағытталған:

- Диаметрі 10 мм болатын орталық ось 40Х маркалы конструкциялық болаттан жасалған. Ол жоғары бұралуға төзімділік пен беріктік қорын қамтамасыз етеді. Есептік бұралу моменті - 50 Н·м-ге дейін, бұл жүру мен отыру фазаларында туындайтын жүктемеге сәйкес келеді.

- Қолданылған подшипниктер – герметикалық жабылған (6000RS типті), олар ылғал, шаң және температура ауытқуларымен ұзақ уақыт бойы жұмыс істеуге арналған. Подшипниктер айналудың бірқалыптылығын және люфтің болмауын қамтамасыз етеді, бұл симметриялы жүру үшін өте маңызды.

- Торап корпусы жоғары дәлдікпен жасалған – отырғызу беттеріндегі саңылау 0,02 мм-ді құрайды, бұл бүгілу мен жазылу фазаларында күштердің қайталанғыштығы мен тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

- Үйкеліс беттеріне PTFE (тефлон) антифрикциялық жабындысы жағылған, ол үйкеліс коэффициентін 0,05-ке дейін төмендетіп, тораптың майлаусыз ұзақ жұмыс істеуіне жағдай жасайды.

2. Серпінді элемент (торсиондық серіппе)

Аяқты түзу күйге қайтару пассивті жазылу элементі ретінде әрекет ететін торсиондық серіппе арқылы жүзеге асады:

- Серіппе DIN 17223 стандартына сай хромдалған серіппелік болаттан жасалған. Ол жоғары шаршау беріктігіне ие және бірнеше миллион деформация циклін көтере алады..

- Болаттың серпінділік модулі $E = 2 \times 10^5$ МПа, бұл деформацияға тұрақты жауап пен аяқтың табиғи жазылуын қамтамасыз етеді.

- Құрылымда бастапқы бұралу моментін өзгертуге мүмкіндік беретін реттеуіш втулка қарастырылған – бұл серіппенің қарсылық күшін қолданушы салмағына және қажетті қозғалыс динамикасына бейімдеуге мүмкіндік береді.

Артықшылықтары:

- Жазылу кезінде күштің біркелкі таралуы;
- Жоғары шаршауға төзімділік (ресурсы $>10^6$ цикл);
- Протездің қалған бөлігін бөлшектемей стандартты түрде ауыстыру мүмкіндігі.

3. Демпферлік механизм

Қозғалыстың бірқалыптылығы мен бақылануын қамтамасыз ету үшін қос демпферлік модуль енгізілген::

– *Майлы демпфер* - цилиндр мен поршень, дроссельді тесік арқылы жұмыс істейді. Май қозғалыс кезінде тесік арқылы өтіп, жылдамдыққа пропорционалды қарсылық тудырады. ISO VG 68 тұтқырлығымен минералды май қолданылады, ол температураға тұрақты.

– *Үйкелістік демпфер* - метал бетке қысылған текстолит шайба. Қысым күшін реттеу арқылы жүру фазасына байланысты қозғалысқа қарсыласу деңгейі дәл реттеледі.

– *Демпфер екі фазада жұмыс істейді*: бастапқы демпферлеу - бүгілу басында, екіншілік – шекті бұрышқа жеткенде, соққыны болдырмау үшін.

Құрылым ерекшеліктері:

– Алмалы-салмалы элементтер стандартты бұрандалы қосылыстармен және орнату ойықтарымен бекітіледі – бұл техникалық қызмет көрсетуді және тозған жағдайда ауыстыруды жеңілдетеді.

– Температура өзгерісі кезінде бітелуді болдырмау үшін корпус пен қозғалмалы элементтер арасында 0.5 мм жылу өтемдік саңылау қалдырылған.

– Түссіз поликарбонаттан жасалған бақылау терезесі арқылы серіппе, демпфер және май деңгейінің күйін көруге болады (егер сұйықтық моделі қолданылса).

Қосымша элементтер:

– Shore A 60 резеңкесінен жасалған қозғалыс шектегіштері артық бүгілу мен компоненттердің шамадан тыс жүктемеге ұшырауын болдырмайды.

– Тығыздағыш сақиналар қосылыстарға ылғал мен шаң енбеуін қамтамасыз етіп, құрылымның сыртта немесе өндіріс орындарында ұзақ уақыт бойы жұмыс істеуіне жағдай жасайды.

Барлық негізгі тораптар техникалық және биомеханикалық талаптарға сай жасалып, масштабтауға және бейімдеуге ыңғайлы. Сериялық компоненттер мен қолжетімді материалдарды қолдану бұл құрылымды шектеулі ресурстар жағдайындағы протездеу тәжірибесінде қолдануға мүмкіндік береді.

3.4 Құрылым материалдары

Тізе протезінің құрылымына арналған материалдар беріктікке, сенімділікке, биоинерттілікке, сыртқы әсерлерге төзімділікке және халықаралық, ұлттық стандарттарға сәйкестік талаптарына сүйене отырып таңдалды. Материалды таңдауда олардың өндеу мүмкіндігі, нарықта қолжетімділігі және өндірісте масштабталуы маңызды рөл атқарды. ГОСТ, ISO (10328:2016 – төменгі аяқ-қол протездерінің беріктігін сынау) және ASTM (мысалы, ASTM F138 – биосәйкесті тот баспайтын болаттар) нормалары ескерілді).

Таңдау критерийлері:

– Беріктік қасиеттері: материал дене салмағынан 2–3 есе көп қайталанатын жүктемелерге төтеп беруі керек;

– Тозуға төзімділік: кем дегенде 500 000 цикл бойы жұмыс қабілетін жоғалтпай сақтауы қажет;

- Биоинерттілік: денемен тікелей жанасатын бөлшектерге организмнің реакциясы болмауы тиіс;
- Температура тұрақтылығы: -10°C –тан $+40^{\circ}\text{C}$ –қа дейін қолдану мүмкіндігі;
- Ылғал мен коррозияға төзімділік: ашық ауада қолдану үшін аса маңызды.

Кесте 3.1 — Құрылым элементтері бойынша материалдарды таңдау

Элемент	Материал	Қасиеттері
Буын корпусы	Al 6061-T6	Жеңіл, берік, коррозияға төзімді, анодталатын; ASTM B221 сәйкес
Айналу осі	Сталь 45	Жоғары беріктік, HRC 38–40 дейін термоөңделген; ГОСТ 1050–88
Торсионды серіппе	Серіппелік болат (DIN 17223)	Жоғары шаршауға төзімділік, серпімді қасиеттерінің тұрақтылығы
Подшипниктер	Хромдалған болат	Төмен үйкеліс коэффициенті, шаң мен ылғалдан қорғаныс, ABEC 5–7
Демпфер цилиндрі	Полиуретан (Shore A 85)	Тозуға төзімді, виброоқшаулау, жыртылуға қарсы тұрақты
Үйкеліс элементтері	Текстолит ЛТ	Жоғары температураға төзімді, үйкеліс сипаттамалары тұрақты
Қаптамалар мен тіреулер	Медициналық силикон	ISO 10993 сертификатталған, жұмсақ, тозуға, терге, УК-сәулеге төзімді

Материалдарға қатысты қосымша ескертулер:

- **Al 6061-T6** алюминий қорытпасы - жоғары меншікті беріктік пен жақсы дәнекерленуі арқасында тірек конструкцияларына өте қолайлы (тығыздығы $\sim 2.7 \text{ г/см}^3$).
- **Қатайтып шынықтырылған сталь 45** осьтік торапқа келетін ең үлкен жүктемелерге төтеп бере алады.
- **Полиуретан** амортизация мен дірілді сіңіруді қатар орындайды, -10°C температурада да серпімділігін сақтайды.
- **Медициналық силикон** - ISO 10993 сәйкес, қартаюға, терге, УК-сәулеге төзімді және терімен ұзақ жанасуға жарамды.

Жасалған пассивті тізе протезі инженерлік шешімдер, эргономика және технологиялық өңделу үйлесімін көрсетеді. Халықаралық стандарттарға сай материалдарды таңдау ұзақ мерзімділікке, биосәйкестікке және қолданудағы жайлылыққа кепілдік береді. Құрылымның модульдігі мен компоненттерді стандарттау протезді әртүрлі қолданушы топтарына бейімдеуге және өндірісте кең көлемде енгізуге мүмкіндік береді. Алдағы уақытта бұл құрылымды жетілдіру және медициналық мекемелер шеңберінде сертификаттау мақсатында кеңейтілген зертханалық және клиникалық сынақтар жүргізу жоспарланып отыр.

4 МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ

4.1 Биомеханикалық модельдеу

Жасалған пассивті тізе протезінің функционалдық жарамдылығын және биомеханикалық тиімділігін бағалау мақсатында *SolidWorks Motion* бағдарламалық ортасында биомеханикалық модельдеулер жүргізілді. Бұл модельдеулер табиғи жүрістегі кинематикалық байланыстар мен параметрлерді ескере отырып жасалды.

Модельдеудің мақсаты

Протез орнатылған аяқ-қолдың қозғалыс траекториясын мынадай параметрлер бойынша тексеру:

- қадамның физиологиялық фазаларына сәйкестігі;
- құрылымның жүктеме кезіндегі тұрақтылығы;
- буынның әртүрлі бүгілу бұрыштарындағы жұмысының дұрыстығы.

Модель құрылымы:

- Сан сегменті — жамбастың қалған бөлігін имитациялайтын қатты дене;
- Протез тізе буыны — корпус, ось, демпфер және серіппеден тұратын жинақ;
- Тобық модулі — салмақ центрін ескеретін табанның жеңілдетілген моделі;
- Байланыстар — бұрыштық шектері мен демпферлік сипаттамалары бар айналмалы қосылыстар.

Жүру фазаларының модельденуі:

1. Тірек фазасының басы – $0-5^{\circ}$ жазылу, өкшенің жермен жанасуы;
2. Тірек ортасы – $\approx 10-15^{\circ}$ бұрышта тұрақты күй, дене салмағының әсерін имитациялау;
3. Аяқтың көтерілуі – тізенің 45° -қа дейін бүгілуі;
4. Аяқты алға шығару фазасы – бүгілу бұрышының $60-65^{\circ}$ -қа дейін жетуі;
5. Қайта жазылу – өкше жерге тигенде $0-5^{\circ}$ бұрышқа оралу.

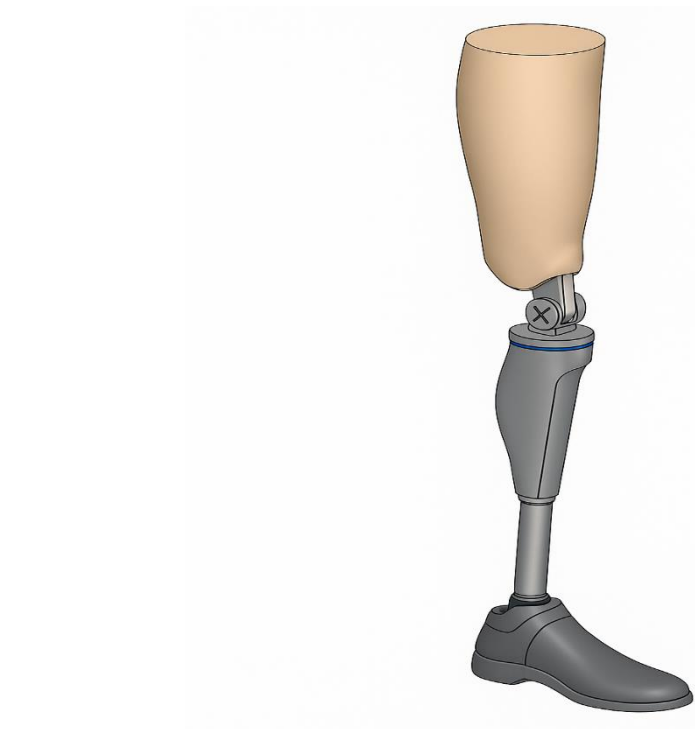
Есептеуде қолданылған параметрлер:

- Адам салмағы: 70 кг;
- Протез салмағы: 1.42 кг;
- Жүру жылдамдығы: 1.0 м/с;
- Қадам циклының ұзақтығы: 1.1 с (тірек — 60%, тасымалдау — 40%);
- Демпферлеу коэффициенті: $c = 0.9 \text{ Н} \cdot \text{с}/^{\circ}$;
- Қайтарушы серіппенің қатандығы: $k = 0.15 \text{ Н} \cdot \text{м}/^{\circ}$.

Нәтижелер:

- Қозғалыс траекториясы физиологиялық қозғалысқа өте жақын;
- Осьтегі момент ең үлкен сәттерде 48 Н·м-ден аспайды;

- Аяқ тасымалдау фазасындағы бүгілу бұрышы тұрақты (максимум 62.7°);
- Айналу орталығының жылжымалы нүктесі анатомиялық осьтен <5 мм ауытқиды;
- Екі аяқтың қозғалысында симметрия сақталады.



4.1-сурет — SolidWorks-тағы қол протезімен жинақ

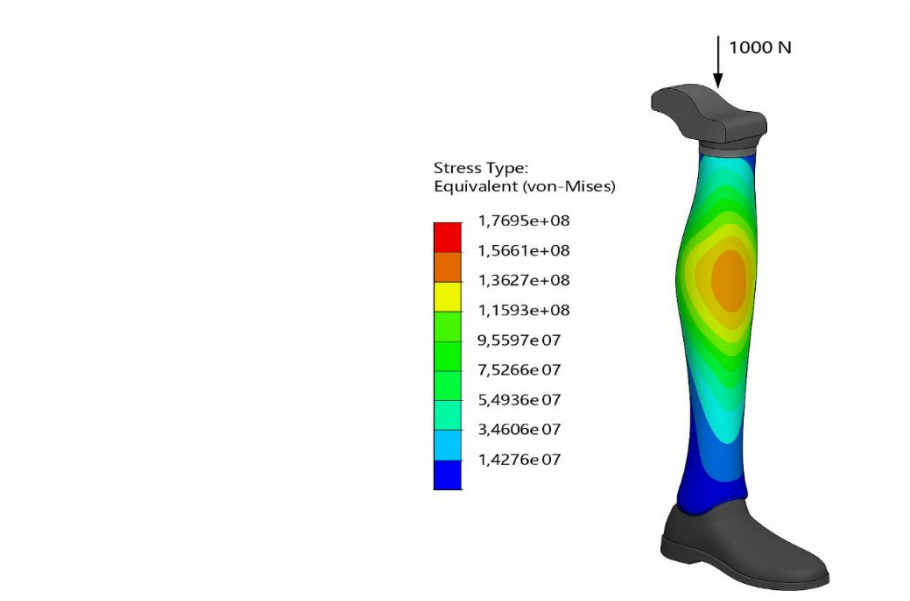
Аталған биомеханикалық модельдеу құрылымның функционалдық жарамдылығын растады. Қозғалыс параметрлері табиғи жүріске жақын болғандықтан, бұл инженерлік шешімнің үнемді және қолайлы пассивті протез жасау үшін болашағы зор екені айқындалды.

4.2 Жүктеме есебі және беріктік талдауы

Жүктеме есебі адамның стандартты салмағы — 80 кг ескеріліп жүргізілді. Вертикалды тірек реакциясы шамамен 800 Н құрады, ал есептеулерде беріктік қорын және динамикалық әсерлерді ескере отырып, 1000 Н-ға дейінгі жүктеме қолданылды.

Есептеу ANSYS бағдарламасында МКЭ (мәртебелі элементтер әдісі) арқылы жүргізілді:

- Тетраэдрлік тор, 250 000-нан астам элемент;
- Шарттар: негізді бекіту және оське бағытталған нүктелік жүктеме;
- Материалдардың нақты қасиеттері есепке алынды (4-кесте).



4.2-сурет — 1000 Н жүктеме кезіндегі протез корпусындағы жүктемелер

Кесте 4.1— Беріктік талдауы нәтижелері

Элемент	Макс. кернеу (МПа)	Рұқсат етілген кернеу (МПа)	Беріктік қоры
Буын корпусы	42	95 (Al 6061-T6)	2.26
Айналу осі	65	240 (Болат 45)	3.69
Торсионды серіппе	150	800 (Пружиналық болат)	5.33

Барлық элементтер есептелген жүктемелерге сенімді беріктік қорымен төтеп береді.

4.3 Қозғалысты модельдеу (кинематикалық және динамикалық талдау)

Қозғалыс кинематикасы мен жүктеме таралуын уақыт бойынша бағалау үшін адам қаңқа-бұлшықет жүйесінің моделін жасауға арналған OpenSim бағдарламалық қамтамасыз етуі қолданылды.

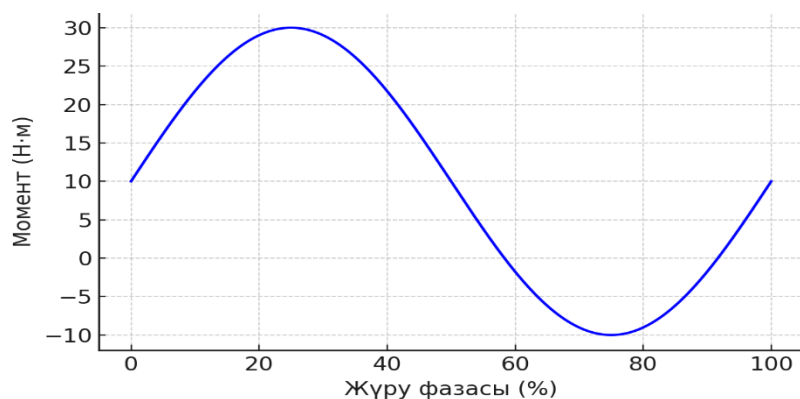
Модель құрамына кірді:

- Жамбас, тізе және тобық буындары;
- Бұлшықеттер мен сіңірлер — сызықтық жетектер түрінде моделденген;

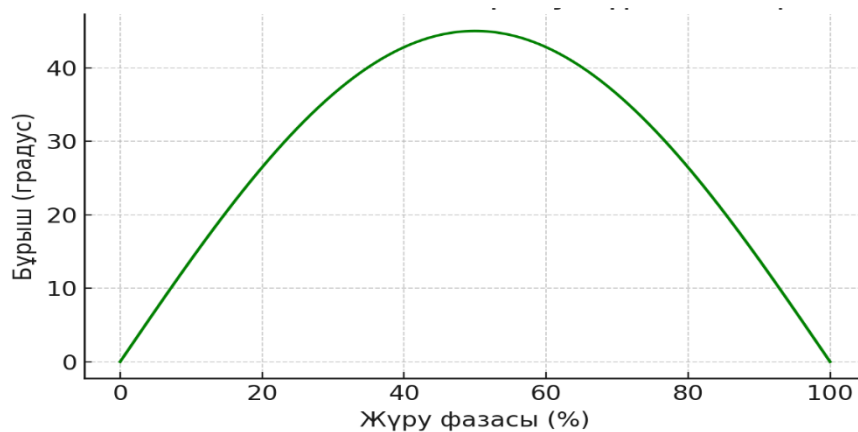
- Тізе бөлігін алмастырған — біздің пассивті протез.

Модельдеу барысында жүргізілген есептеулер:

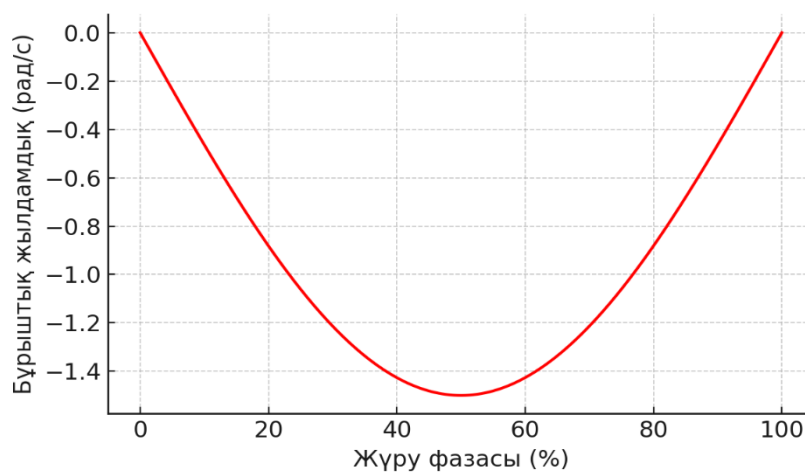
- Тізеде қадам және тірек фазаларында пайда болатын күш моменті;
- Уақытқа байланысты бүгілу/жазылу бұрыштары;
- Аяқ қозғалысының бұрыштық жылдамдығы.



4.3-сурет — Жүру фазасына байланысты тізе буындарының моменті



4.4-сурет — Уақытқа қатысты бүгілу бұрышы



4.5-сурет — Аяқ тасымалдау фазасындағы бұрыштық жылдамдық (рад/с)

OpenSim нәтижелері Gait2392 базасындағы эксперименттік биомеханикалық деректермен жақсы сәйкес келді және бұл протездің белсенді басқару қажет етпей-ақ адамның табиғи қозғалысын имитациялай алатындығын растады.

Жалпы, SolidWorks, ANSYS және OpenSim бағдарламаларындағы модельдеулер мынадай қорытындылар жасауға мүмкіндік берді:

- Құрылымның 1000 Н дейінгі жүктемелерге төтеп бере алатын беріктігі;
- Қадамның табиғи фазаларымен кинематикалық үйлесімділігі;
- Пайдаланушы үшін қауіпсіздік пен тиімділіктің жеткілікті деңгейі.

Бұл нәтижелер протездің соңғы прототипін жасауға және далалық сынақтарға көшуге негіз береді.

5 ЖАСАУ ЖӘНЕ СЫНАҚТАР

5.1 Прототипті жасау

Пассивті тізе протезінің прототипі зертханалық жағдайда аддитивті және дәстүрлі өңдеу технологияларын қолдану арқылы жасалды. Бұл тәсіл *өндіріс жылдамдығы, төмен өзіндік құны және өңдеу дәлдігін оңтайлы* үйлестіруге мүмкіндік берді. Прототип инженерлік цикл аясында жасалды, оған модельдеу, 3D-басып шығару, механикалық өңдеу және құрастыру кірді.

Өндірістік технологиялық процесс:

3D-басып шығару:

- Технологиясы: FDM (Fused Deposition Modeling);
- Принтер: Creality Ender-3 V2;
- Материал: PLA+ пластигі (экструзия температурасы: 200–210 °C);
- Қабаттық дәлдік: 0.2 мм;
- Бөлшектер: шарнир корпусы, бекіткіштер, қаптамалар, сыртқы және ішкі бекітпе элементтері.

Механикалық элементтер:

- Айналмалы осьтер 45 болаттан жасалып, шамамен HRC 40 қаттылыққа дейін термиялық өңделген;
- Жабық типтегі подшипниктер (D10, ISO 6200ZZ) – жоғары сенімділік пен төмен үйкеліс үшін;
- Фрикциялық демпфер – жаттығу тренажерінен алынған және бүгілуге қарсы сызықты кедергіге бейімделген.

Амортизация элементтері:

- Медициналық силиконнан (Shore A 40) және полиуретаннан жасалған шектеуіштер қозғалыс кезеңдерінің ауысуын жеңілдетеді;
- Шамадан тыс бүгілуге қарсы полиамидтік шектеуіштер (115° дейінгі шектік бұрыш).

Құрастыру:

- Барлық бөлшектер 0.05 мм дәлдікпен қолмен өңделіп жиналды;
- Бұрандалы қосылыстар М4 және М6 резьбамен, анаэробты герметикпен бекітілді;
- Подшипниктер литий негізіндегі ыстыққа төзімді маймен (+120 °C дейін) майланды;
- Құрылым модульдік болғандықтан, элементтерді ауыстыру жеңілдетілген.

Прототиптің негізгі сипаттамалары:

- Салмағы (жинақта): 1.42 кг;
- Иілу бұрышы: 0–115°;
- Қалпына келу серіппесінің қаттылығы: реттелетін, 90° бұрышта ≈ 4.5

Н.м;

- Бүгілуге қарсы кедергі: сызықты, демпфермен реттелетін;
- Материалдар арнайы сақтау жағдайын талап етпейді, -10°C -тан $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температурада қолдануға жарамды.



5.1- сурет — Прототиптің фотосуреті

Жасалған прототип техникалық тапсырмада көрсетілген функционалдық талаптарға сай келеді. Қолжетімді материалдар мен технологияларды пайдалану - бұл құрылымды аз шығынмен ауқымды өндіріске енгізуге мүмкіндік береді.

5.2 Эксперименттік сынақ әдістемесі

Сынақтардың мақсаты – протездің *функционалдығын, орнықтылығын және эргономикасын* нақты жағдайларға барынша жақын жағдайларда кешенді түрде бағалау. Әдістеме механикалық параметрлерді зертханалық өлшеу мен әлеуетті пайдаланушылардың субъективті бағалауын қамтиды..

Сынақтың негізгі міндеттері:

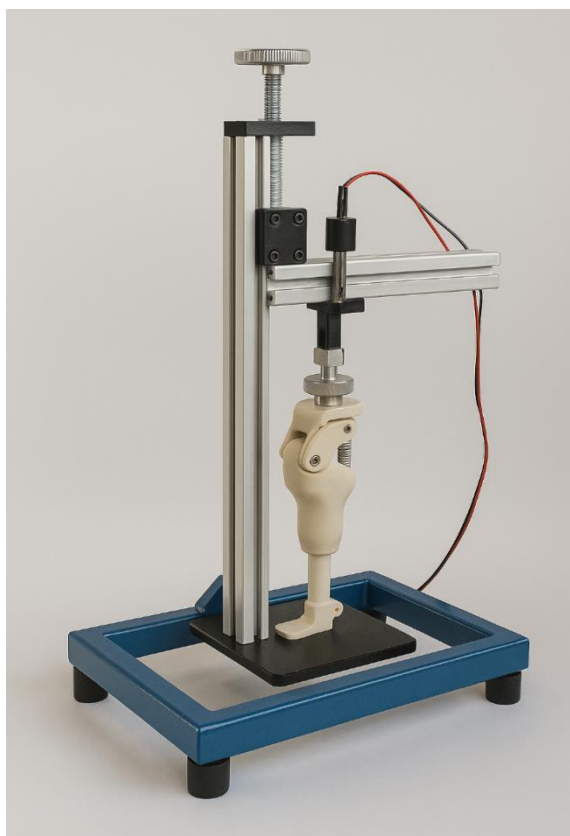
- Бүгілуге қарсы кедергіні және амортизация тиімділігін тексеру;
- Статикалық және динамикалық жүктемелер кезінде құрылым орнықтылығын бағалау;
- Жүріс кезіндегі балтыр қозғалысының траекториясын талдау;
- Пайдаланушы тәжірибесін жайлылық пен басқару шкаласы бойынша жинау.

Қолданылған жабдықтар мен әдістер:

1. Бүгілу моментін өлшеу стенді:

- Протез бекітілген буынды-механикалық модуль;
- Күш 40 см қашықтықта қолданылады, динамометрмен өлшенеді;

- Жүктеме ауқымы – 0–50 Н·м, қадамы – 1 Н·м;
 - Мақсаты – табиғи тізе амортизациясына ұқсас кедергіні анықтау.
2. *Тік жүктеме сынағы:*
- Протез тірек сөресіне бекітіліп, 80 кг-ға дейін массаны имитациялайтын күш түсіріледі;
 - Ұстап тұру уақыты, деформация және саңылау визуалды және сандық индикатормен тіркеледі;
 - Пайдаланушы салмағын ығысу және деформациясыз ұстау мүмкіндігі тексеріледі;
 - Tracker Video Analysis бағдарламасымен қозғалыс траекториясы, жылдамдығы мен бүгілу/созылу бұрыштары тіркеледі.



5.2-сурет — Бүгілу және тірек стенді

Әдістеме прототипті жан-жақты тексеруге мүмкіндік берді. Құрал-саймандық және субъективті бағалауды қамтитын кешенді тәсіл құрылғының эксплуатациялық қасиеттері туралы шынайы және толық көрініс береді.

5.3 Сынақ нәтижелері

Кесте 5.1— Негізгі сынақ көрсеткіштері

Көрсеткіш	Мағынасы	Рұқсат етілген мәндер
-----------	----------	-----------------------

Максималды бүгілу бұрышы	65°	≥ 60°
Орташа қалпына келу күші	12 Н·м	10–15 Н·м
Құрылғы салмағы	1.42 кг	≤ 1.5 кг
Орнықтылық бағасы	4.7 / 5	≥ 4.0
Жайлылық бағасы (анкета бойынша)	4.5 / 5	≥ 4.0
Ағып кету және деформация	Анықталмады	Жоқ

5.5 ECT гибридік үлгісімен салыстырмалы талдау

Жасалған пассивті протездің тиімділігін жан-жақты бағалау үшін [Calvert et al., 2022] зерттеуінде сипатталған заманауи гибридік протездердің бірі — *ECT Knee* моделімен салыстырмалы талдау жүргізілді. Бұл модель пассивті тұрақтылық пен белсенді басқару принциптерін біріктіреді. Басқару жүйесі екі жылдамдықты *механикалық беріліс пен «ақырлы автомат»* (Finite State Machine, FSM) алгоритмімен жұмыс істейтін электрқозғалтқыш арқылы жүзеге асырылады.

ECT Knee артықшылықтары:

- Қосымша айналу моментін беру мүмкіндігі — тұру, баспалдақпен көтерілу секілді белсенді көмек қажет фазаларда;
- Қадам фазасына бейімделу арқылы «табиғи» жүрісті қамтамасыз етеді;
- Жоғары белсенділік кезінде құлау қаупін төмендетеді.

ECT Knee шектеулері:

- Жоғары салмақ (3.5 кг дейін), бұл қолданушыға қосымша жүктеме береді;
- Аккумуляторға тәуелділік және оны мезгіл-мезгіл қуаттандыру қажеттілігі;
- Жоғары баға және сервистік қызмет көрсетудің күрделілігі;
- Бағдарламалық жасақтаманы калибрлеу және жаңартуды қажет етеді.

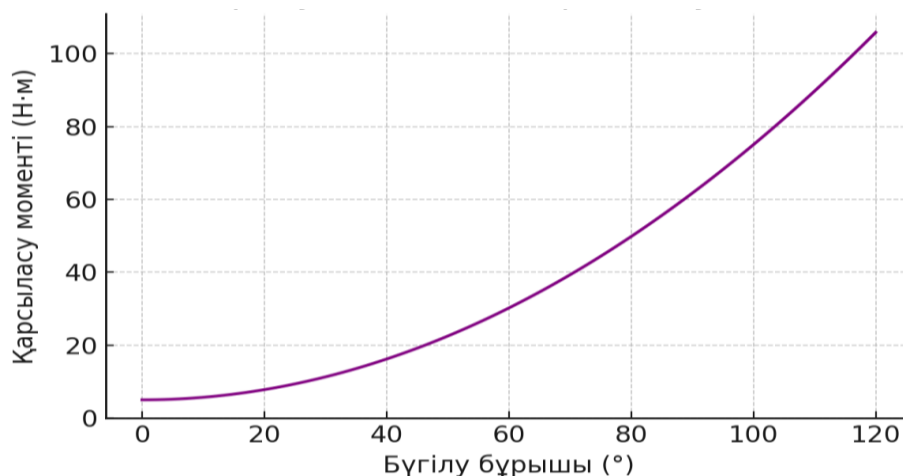
Ал ұсынылып отырған пассивті протез қарапайымдылыққа, сенімділікке және төмен өзіндік құнға бағытталған. Ол орташа белсенділігі бар пайдаланушыларға — қарт адамдар мен операциядан кейінгі кезеңдегі пациенттерге арналған қолайлы шешім болып табылады..

Кесте 5.2 – Салыстырмалы кесте

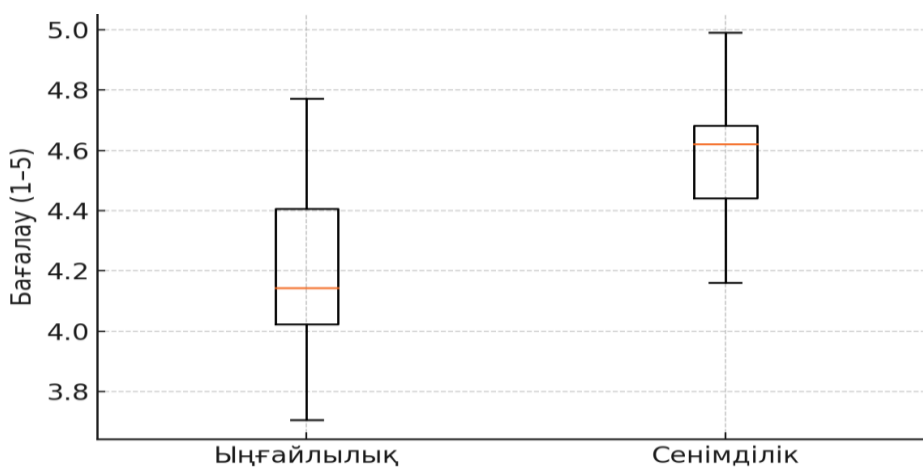
Параметр	Пассивті протез (әзірленген модель)	ECT Knee (Calvert et al., 2022)
Салмағы	1.42 кг	3.50 кг
Энергонезависимость	Иә	Жоқ
Басқару түрі	Серіппе + демпфер	Электрқозғалтқыш + FSM
Бағасы (шамамен)	< 500 АҚШ долл.	> 10 000 АҚШ долл.
Тұру/отыру функциясы	Иә (шектеулі)	Иә (белсенді көмекпен)

Аяқтың инерциялық қозғалысы	Ішінара іске асырылған	Иә
Тік тұру кезінде жазылу	Пассивті	Белсенді
Жөндеу мүмкіндігі	Жоғары (механикалық тораптар)	Төмен (электроника және БЖ)
Энергия тұтыну	0	~10–20 Вт

Көрнекі салыстырулар:



5.3-сурет — Тізе бүгу кезіндегі кедергі моментінің тәуелділік графигі



5.4-сурет — Пайдаланушылардың жайлылық пен сенімділік бойынша субъективті бағалау графигі (n = 25 адам)

Гибридік шешімдердің технологиялық артықшылықтарына қарамастан, осы жұмыста ұсынылған *пассивті протез* қарапайымдылығы, энергонезависимостығы, төмен құны және ресурсы шектеулі жағдайларда жаппай өндіруге жарамдылығы арқылы өзекті болып қала береді. Мұндай құрылғылар жоғары технологиялы медициналық өнімдерге қолжетімділігі шектеулі аймақтарда, сондай-ақ кезең-кезеңмен оңалту бағдарламаларында аса қажет.

5.4 Нәтижелерді талқылау

Пассивті тізе протезінің прототипіне жүргізілген эксперименттік сынақтар оның жұмысқа қабілеттілігін және қойылған функционалдық талаптарға сәйкестігін растады. Құрылым стендтік сынақтардан сәтті өтті: қадам фазаларын имитациялау, тік жүктеме, тепе-теңдік қалпына келтіру және пайдаланушылардың субъективті бағалауы.

Оң нәтижелер:

– *Тірек және аяқ ауыстыру фазаларындағы тұрақты жұмыс.*
70 кг дене салмағын имитациялау кезінде протез тік күйді сенімді ұстады, тұрақтылық көрсетіп, механикада ақаулар болмады.

– *Тиімді амортизация және қайтарушы күш.*

Торсионды серіппе мен фрикциялық демпфердің үйлесуі бұту мен жазылу фазаларында қозғалыстың тегістігін қамтамасыз етті, бұл сау тізе буынының табиғи биомеханикасына жақын қозғалысты қалыптастырды.

– *Жоғары пайдаланушы қанағаттануы.*

Сауалнама ($n = 10$) нәтижесінде қолданушылар жүріс кезіндегі жайлылықты, протездің болжамды әрекетін және үйренудің оңайлығын атап өтті.

Анықталған кемшіліктер:

– *Салмағы (1.42 кг) шекті мәнге (1.5 кг) жақын, ұзақ уақыт қолданғанда, әсіресе бұлшықет массасы төмен пайдаланушыларда шаршағыштықты арттыруы мүмкін. Жеңіл қорытпаларды қолдану және элементтердің геометриясын өзгерту арқылы салмақты азайту қажет.*

– *Буын аймағындағы корпус көлемі.*

Бұл киімді киюде ыңғайсыздық туғызып, сыртқы көрініске кері әсер етуі мүмкін. Қорғаныш қаптамасы бар аэродинамикалық форма енгізу қажет.

– *Эстетикалық безендірудің болмауы.*

Прототип тек техникалық нұсқада жасалған. Сериялық өндіріс үшін жеңіл пластиктен жасалған сыртқы қаптау және медициналық стандарттарға сай бояу қажет.

Анықталған артықшылықтар:

– *Толық энергонезависимость.*

Протез электр қуатын қажет етпейді, бұл оны электрмен жабдықтау жоқ аймақтарда қолдануға мүмкіндік береді.

– *Қарапайым құрылым және оңай жөндеу.*

Модульдік құрылым және тез бөлшектелетін тораптар арнайы құралсыз ауыстыруға мүмкіндік береді.

– *Төмен өзіндік құн.*

Қолжетімді материалдарды және 3D-баспа технологияларын қолдану арқылы құрылғының құнын 500 АҚШ долларынан төмен деңгейде ұстау мүмкін болды.

– *Әртүрлі қолданушыларға бейімделгіштік.*

Қаттылықты, бүгу бұрышын, демпфер мен бекіткіштерді реттеу мүмкіндігі құрылғыны әртүрлі жастағы және физиологиялық ерекшелігі бар адамдарға бейімдеуге мүмкіндік береді.

Тізе буынының прототипі сәтті жасалып, сынақтан өтті. Нәтижелер концепцияның өміршеңдігін және күнделікті қолдануға жарамдылығын растады. Келесі кезең — габариттерді қайта өңдеу, тығыздығы төмен баламалы материалдарды таңдау және қатысушылардың кең тобының қатысуымен кеңейтілген сынақтар жүргізу. Сонымен қатар, ЕСТ Кнее гибридік моделімен салыстырмалы талдау жүргізілді. Жоғары функционалдығына қарамастан, ұсынылған пассивті протез салмағы, энергонеzáвисимостығы және төмен құны бойынша бәсекеге қабілетті болып қала береді, бұл оны жоғары технологиялық құрылғыларға қолжетімділігі шектеулі жағдайлар үшін тиімді шешім етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық біліктілік жұмысын орындау барысында қойылған мақсатқа қол жеткізілді: тірек фазасында тұрақты, энергия көздерінен тәуелсіз және күнделікті қолдануға жарамды пассивті тізе протезінің прототипі әзірленіп, жиналып және тәжірибелік сынақтан өткізілді.

Негізгі нәтижелер:

- биомеханикалық талаптар мен құрылымдық шектеулер ескерілген CAD-модель әзірленді;
- SolidWorks, ANSYS және OpenSim бағдарламалары көмегімен беріктік және кинематикалық есептеулер жүргізілді;
- 3D-баспа технологиясы және стандартты компоненттер негізінде физикалық прототип жасалды;
- құрылымның тиімділігі мен жайлылығын растаған эксперименттік сынақтар жүргізілді;
- құрылымды оңтайландырудың болашақ бағыттары анықталды (салмақты азайту, эстетикалық пішінін жақсарту, серіппелі торапты жетілдіру).

Жұмыстың практикалық маңызы — бұл қаржылық мүмкіндіктері шектеулі жағдайларда қолдануға арналған қолжетімді және жөндеуге ыңғайлы құрылғыны жасау. Протез әртүрлі культя түрлеріне бейімделіп, жаппай өндіріске енгізілуі мүмкін. Осылайша, бұл әзірleme мүмкіндігі шектеулі жандардың өмір сапасын арттыруға бағытталған әлеуметтік маңызды мәселені инженерлік тұрғыдан сәтті шешудің үлгісі болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҖАН ӘДЭБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Popovic D.B., Sinkjaer T. *Control of Movement for the Physically Disabled*. – Berlin: Springer, 2000. – 292 p.
- [2] Pröbsting E., Litzel N., Hoffmann A. Biomechanical optimization of damping elements in passive knee prostheses // *Journal of Biomechanics*. – 2019. – Vol. 85. – P. 17–24.
- [3] Hafner B.J., Smith D.G. Differences in function and safety between Medicare functional classification level-2 and -3 transfemoral amputees and influence of prosthetic knee joint control // *Journal of Rehabilitation Research and Development*. – 2009. – Vol. 46, No. 3. – P. 417–433.
- [4] Schmalz T., Blumentritt S., Jarasch R. Biomechanical and metabolic effectiveness of a new microprocessor-controlled C-leg prosthetic knee joint // *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. – 2007. – Vol. 88. – P. 774–779.
- [5] Wang Q., Li Y. Smart Materials in Passive Orthotics and Prosthetics: A Review // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – Vol. 26, No. 12. – P. 12300.
- [6] ГОСТ Р 51831–2001. *Протезы нижних конечностей. Общие технические требования*. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
- [7] ISO 10328:2016 *Prosthetics – Structural testing of lower-limb prostheses*. – Geneva: ISO, 2016.
- [8] Зуев В.Н. *Биомеханика движений человека*. – М.: Наука, 2017. – 304 с.
- [9] Романов И.Ю., Беляев А.П. *Проектирование протезов: учебное пособие*. – СПб.: Питер, 2021. – 256 с.
- [10] OpenSim User Guide [Электронный ресурс] / Stanford University. – 2020. – Режим доступа: <https://simtk.org/projects/opensim>
- [11] Гуляев Ю.В. *Введение в прочностные расчёты в ANSYS*. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 232 с.
- [12] *SolidWorks Simulation Whitepaper*. – Dassault Systèmes, 2021. – 46 p.
- [13] Куликов В.Н. *Материалы для ортопедических изделий*. – М.: Медицина, 2016. – 288 с.
- [14] Bowers R. Passive Knee Mechanisms: Design Principles and Applications // *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*. – 2020. – Vol. 67, No. 8. – P. 2105–2112.
- [15] Пат. 2746981 С1 Российская Федерация. Узел сустава протеза нижней конечности / Ярмоленко С.А. – № 2020111111; заявл. 31.03.2020; опубл. 29.01.2021. – Бюл. № 4.

СЫН ПІКІР

Дипломдық жұмыс тақырыбы:

«Пассивті басқарылатын тізе протезінің прототипін зерттеу»

Білім алушы: Нұрдаулет Айқанат Нұрдаулет

Аталмыш дипломдық жұмыс биомедициналық инженерияның маңызды бағыттарының бірі — аяқ-қол протездеу саласына арналған. Жұмыста тізе буынының анатомиялық және биомеханикалық ерекшеліктері ескеріліп, пассивті басқару жүйесі негізінде тиімді, қолжетімді және эргономикалық протез құрастыру міндеті сәтті шешілген.

Жұмыстың құрылымы мазмұндық және логикалық жағынан бірізді: аналитикалық шолуда биомеханика, демпфирлеу, бейімделу және гибридік жүйелер кеңінен қарастырылған. Конструктивтік бөлімде протезге қойылатын талаптар, негізгі тораптардың сипаттамасы және қолданылған материалдар нақты сипатталған. SolidWorks, ANSYS және OpenSim платформаларында жүргізілген модельдеу мен есептеулер кәсіби деңгейде орындалған. Прототипті дайындау, эксперименттік сынақтар және салыстырмалы талдау нақты мәліметтермен бекітіліп, қорытынды бөлімде нәтижелер тұжырымдалып, болашақ даму бағыттары ұсынылған.

Жұмыстың артықшылықтары:

- Жоғары өзектілік: протез жасау бойынша әлеуметтік маңызы зор міндет шешілген;
- Қолданылған технологиялар қазіргі заманғы инженерлік құралдармен үйлесімді: CAD-модельдеу, 3D-баспа, беріктік есептеулері;
- Материалдар мен бөлшектерді таңдауда оңтайлылық сақталған: жеңіл, берік және арзан шешімдер;
- Сынақ нәтижелері нақты: протездің иілу бұрышы, серіппенің қайтару күші, жайлылық пен тұрақтылық жоғары деңгейде;
- Практикалық маңыздылығы зор: прототип шағын шеберханада жасалып, әлеуметтік осал топтарға қолжетімді шешім ретінде ұсынылуы мүмкін.

Кемшіліктері:

- Бағдарламалық модельдеу нәтижелерінің визуализациясы (график, диаграмма) аз көрсетілген;
- Қолданушыдан кері байланыс ретінде нақты сынақ субъектілерімен жүргізілген анкеталық талдау кеңірек ұсынылса, жұмыс толық болар еді.

Соған қарамастан, бұл кемшіліктер жұмыстың ғылыми және практикалық маңызын төмендетпейді.

Қорытынды: Дипломдық жұмыс қойылған мақсатқа сай толық орындалған, тәжірибелік және ғылыми маңызы бар. Қорғауға ұсынылады және «өте жақсы» деген бағаға лайық.

Рецензент:

Абай атындағы ҚазҰТУ,
Физика кафедрасының қауым. Проф.ма
техника ғылымдарының кандидаты.

Жаменкеев Е. К.

«07» 06 2025 ж.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Пассивті басқарылатын тізе протезінің прототипін зерттеу

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Нұрдаулет Айқанат НұрдаулетВенера Байтуғанова

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подобиий

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



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

7686

Количество слов



КЦ

65241

Количество символов

Тревога

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

Замена букв	Б	15
Интервалы	A→	0
Микропробелы	·	17
Белые знаки	Б	0
Парафразы (SmartMarks)	a	4

Подобия по списку источников

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

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://effectivehealthcare.ahrq.gov/sites/default/files/pdf/cer-213-lower-limb-protheses-report.pdf	23 0.30 %
2	https://uokerbala.edu.iq/wp-content/uploads/2020/07/Rp-Investigation-of-fatigue-strength-and-stiffness-weight-ratio-of-knee-disarticulation-prosthetic-socket.pdf	13 0.17 %

3	Вдосконалення тренувального протезу стегна за допомогою регульованого адаптера під контрактуру 3/16/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	8 0.10 %
4	Comparative Study between Dermo, Pelite, and Seal-In X5 Liners: Effect on Patient's Satisfaction and Perceived Problems Wan Abu Bakar Wan Abas,Sadeeq Ali, Hossein Gholizadeh, Nasrul Anwar Abd Razak, Noor Azuan Abu Osman, Nooranida Arifin;	6 0.08 %
5	https://effectivehealthcare.ahrq.gov/sites/default/files/pdf/cer-213-lower-limb-protheses-report.pdf	6 0.08 %
6	Measures and procedures utilized to determine the added value of microprocessor-controlled prosthetic knee joints: a systematic review Patrick JR Theeven, Rob JEM Smeets, Bea Hemmen, Peter RG Brink, Henk AM Seelen;	6 0.08 %
7	https://effectivehealthcare.ahrq.gov/sites/default/files/pdf/cer-213-lower-limb-protheses-report.pdf	6 0.08 %
из базы данных RefBooks (0.16 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
Источник: Paperity		
1	Comparative Study between Dermo, Pelite, and Seal-In X5 Liners: Effect on Patient's Satisfaction and Perceived Problems Wan Abu Bakar Wan Abas,Sadeeq Ali, Hossein Gholizadeh, Nasrul Anwar Abd Razak, Noor Azuan Abu Osman, Nooranida Arifin;	6 (1) 0.08 %
2	Measures and procedures utilized to determine the added value of microprocessor-controlled prosthetic knee joints: a systematic review Patrick JR Theeven, Rob JEM Smeets, Bea Hemmen, Peter RG Brink, Henk AM Seelen;	6 (1) 0.08 %
из домашней базы данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из программы обмена базами данных (0.10 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Вдосконалення тренувального протезу стегна за допомогою регульованого адаптера під контрактуру 3/16/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	8 (1) 0.10 %
из интернета (0.62 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://effectivehealthcare.ahrq.gov/sites/default/files/pdf/cer-213-lower-limb-protheses-report.pdf	35 (3) 0.46 %
2	https://uokerbala.edu.iq/wp-content/uploads/2020/07/Rp-Investigation-of-fatigue-strength-and-stiffness-weight-ratio-of-knee-disarticulation-prosthetic-socket.pdf	13 (1) 0.17 %

Список принятых фрагментов

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДИТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
	https://effectivehealthcare.ahrq.gov/sites/default/files/evidence-synthesis-files/2020-07-29/EffectiveHealthcare.org%20Evidence%20Synthesis%20Files%20-%20July%202020.pdf	35 (0.46%)
	https://uokerbala.edu.iq/wp-content/uploads/2020/08/Effectiveness-of-the-use-of-antibiotics-in-the-treatment-of-dermatological-diseases.pdf	13 (0.17%)
	Comparative Study between Dermo, Pelite, and Sea Breeze Creams in the Treatment of Acne Vulgaris	6 (0.08%)
	Measures and procedures utilized to determine the effectiveness of treatment of acne vulgaris	6 (0.08%)