

Жакипов Нажмитден Берекеліұлының

6D071800 – «Электр энергетикасы» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін орындаған диссертациясына АҢДАТПА

**Диссертация тақырыбы: «Автоматты басқарылатын желкенді жел
электр станциясының электр энергиясын өндіру жүйесінің тиімділігін
зерттеу»**

Актуальность исследования. Жаһандық жылынуға әкелетін парникті газдардың шығарындыларымен байланысты қазіргі әлемдегі экологиялық жағдай органикалық отынды жаңартылатын энергия көздеріне ауыстыру қажеттілігін туындатады (ВИЭ). Осыған байланысты жел электр станциялары түрінде жаңартылатын энергия көздерін қолдану және жел энергиясын электр энергиясына түрлендіру тиімділігін арттыру маңызды. Қазіргі таңда турбиналы жел электр станциялары (ТЖЭС) көлденең және тік ротор осьтері орналасуымен кеңінен таралған. Жел энергетикасы саласындағы әртүрлі техникалық шешімдер мен зерттеулердің жан-жақты және сыни талдауы олардың негізінен ТЖЭС жетілдіруге бағытталғанын көрсетеді. Көптеген зерттеулер жеке оң нәтижелерге жеткізгенімен, негізгі мәселелерді шешпейді. Екі түрдегі ТЖЭС үшін де мәселе — желдің болжамсыздығы, жылдамдығы мен күшті жел соққылары, олар қысқа уақыт аралығында жиі өзгеріп отырады, сондай-ақ ТЖЭС номиналды қуатпен жұмыс істейтін жел жылдамдығының төменгі шегі әдетте жоғары — шамамен 8 м/с, максималды ПЭК 0.3. ТЖЭС-тің ең қолайлы баламасы — автоматты басқарылатын кішігірім желкен жел электр станциясы (ЖЖЭС). ЖЖЭС ерекшелігі — ол алты қозғалмалы параллель манипулятордан және жел энергиясын қабылдайтын аэродинамикалық профилі бар желкеннен тұратын кеңістікке ауытқитын жұмыс органы (ЖО) мен манипулятордың жоғарғы платформасына қатты бекітілген мачтадан құралады. ЖЖЭС-тің маңызды артықшылығы — ол жел бағытының өзгеруіне тәуелсіз жұмыс істейді және манипулятордың алты актуаторы негізіндегі алты электр тоғы генераторларынан тұратын генерация жүйесі бар. Осыған байланысты параллель манипулятор платформаларында орналасқан ауытқитын парустарға негізделген кіші автономды жел энергетика көздері үшін электр энергиясын өндіру жүйелерін құруға бағытталған кешенді және интеграцияланған зерттеулер мен әзірлемелер жүргізу өзекті болып табылады. Бұл, әсіресе жел жылдамдығы төмен, сондай-ақ электр желілері желілерінен алыс аудандарда әлсіз энергетикалық инфрақұрылымы бар үлкен аумақтары бар Қазақстан үшін маңызды.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері.

ЖЭС құрылысы параллельді манипулятор SHOLKOR топологиясымен манипуляторлық түрлендіргіштен (МТ) және аэродинамикалық кескін профилі бар желкен (желкендер) пен МТ-нің жоғарғы платформасына қатты

бекітілген мачтадан құралған жұмыс органынан тұрады. Механикалық жел энергиясын электр энергиясына түрлендіру функциясын МТ орындайды, оның негізгі түйіні – алты актуатор, әрбір актуаторда электр тогының генераторы орнатылған. Осылайша, ЖЖЭС генерациялау жүйесінің тиімділігі механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіру тиімділігімен анықталады, ол актуаторлар арқылы жүзеге асады.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – Диссертациялық жұмыстың мақсаты – желкенді жел электр станциясының электр энергиясын өндіру жүйесін әзірлеу және жетілдіру. Қойылған мақсатқа жету үшін диссертацияда келесі **міндеттер** кезең-кезеңімен шешіледі:

- Жел жағдайының эксперименттік деректері негізінде жасанды интеллект әдістерін қолдана отырып, желдің жылдамдығы мен бағытын болжауға арналған математикалық-имитациялық модельдерді әзірлеу. ЖЖЭС-тің электр энергиясын өндіру жүйесінің тиімділігін кешенді зерттеу әдіснамасын әзірлеу, оған жел жағдайын болжау, құрылымның күштік талдауы және қондырғының жұмыс циклі барысында атқарушы механизмдердің кіріс қуатын анықтау кіреді.
- Құрамына электр генераторы енгізілген параллель манипулятор актуаторын зерттеуге арналған эксперименттік стендті әзірлеу және жүзеге асыру, сондай-ақ болжанатын жүктемені қайта жаңғырту кезінде зертханалық жағдайларда оның пайдалы әсер коэффициентін анықтау.
- Алты синхронды генератор мен алты аккумуляторлық батареяны пайдалана отырып, автоматты түрде басқарылатын желкенді жел электр станциясының электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесінің құрылымын әзірлеу және зерттеу.

Зерттеудің нысаны мен әдістері. Диссертациядағы зерттеу нысаны – шағын автоматты басқарылатын желкенді жел электр станциясының актуаторы. Жоғарыда аталған міндеттерді шешу үшін теориялық және эксперименттік зерттеу әдістері қолданылды, функционалдық тұрғыдан ең маңызды торап ретінде электр энергиясының көзі болып табылатын параллель манипулятор актуаторы үшін энергия балансының теңдеулері алынды. SolidWorks бағдарламасын қолдана отырып, ЖЖЭС-тің энергия өндіру жүйесінің тиімділігін зерттеуге арналған эксперименттік стенд жобаланып, жасалды. Электр энергиясын өндіру жүйесін компьютерлік модельдеу үшін MATLAB және Mathcad бағдарламалық пакеттері қолданылды. Әртүрлі жел жағдайлары (жел жылдамдығының диапозондары) үшін желдің жылдамдығы мен бағытының өзгеру заңдылықтары деректер массивтері түрінде алынды. Бұл деректер Python бағдарламасында көпқабатты нейрондық желіні құру және оқыту арқылы ПВЭС орнатылатын жерде жел жағдайын болжауға мүмкіндік берді.

Қорғауға ұсынылатын негізгі ғылыми тұжырымдар мен зерттеу нәтижелері.

- Эксперимент үшін сенімді бастапқы деректерді қалыптастыруды қамтамасыз ететін жасанды интеллект әдістерін қолдану арқылы жел

жүктемесін болжауға арналған математикалық-имитациялық модельдер.

- Әзірленген кешенді аналитикалық-эксперименттік әдіснамаға негізделеді құрамына электр генераторы енгізілген параллель манипулятор актуаторының энергетикалық тиімділігін бағалау және кіріс қуатты болжау, ЖЖЭС құрылымының күштік талдауы және актуатордың пайдалы әсер коэффициентін зертханалық жағдайда анықтау кіреді.
- Алты синхронды генератор мен алты аккумуляторлық батареяны қамтитын электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесі, сондай-ақ аккумуляторларды терең разрядтан қорғау жүйесі әзірленді.

Ғылыми жаңалығы.

- Жасанды интеллект әдістерін қолдану арқылы автоматты түрде басқарылатын желкенді жел электр станциясы үшін жел жүктемесін болжаудың математикалық-имитациялық модельдері әзірленді, олар жүйенің энергетикалық талдауын жүргізу үшін жел жылдамдығы мен бағытының болжамды мәндерін алуға мүмкіндік береді.
- Параллельді манипулятордың кіріктірілген электр генераторы бар актуаторының пайдалы әсер коэффициентін эксперименттік түрде анықтаудың кешенді әдіснамасы ұсынылып, зертханалық жағдайларда болжанған кіріс қуатын қайта өндіру негізінде іске асырылды.
- Желкенді жел электр станциясының электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесінің құрылымы қалыптастырылып, зерттелді. Ол алты синхронды генератор мен алты аккумуляторлық батареядан тұрады, сондай-ақ терең разрядтан қорғау жүйесі әзірленді.

Практикалық маңызы. Диссертациялық жұмыстың нәтижесінде МП актуаторының КПД-ын арттыру арқылы ЖЖЭС энергетикалық тиімділігін жақсарту міндеттерін шешуге арналған құралдар алынды. Бұл құралдар 5 кВт қуатты шағын ЖЖЭС тәжірибелік конструкциясын жасау кезінде пайдаланылды.

Нәтижелердің сенімділігі. Түпнұсқа деректер ретінде эксперименттік жолмен алынған мәліметтерді пайдалану арқылы жел жағдайын талдау жүргізілгені нәтижелердің сенімділігін растайды. Қазіргі заманғы қолданбалы бағдарламалар пакеттері — Python, Mathcad, MATLAB — түріндегі бағдарламалық қамтамасыз ету қолданылған. Зерттеу нысанының эксперименттік талдауы арнайы құрастырылған стендте жүргізілді, онда деректерді дайындау, сынақтарды өткізу және эксперимент нәтижелерін өңдеу Arduino контроллерінің көмегімен бағдарлама бойынша жүзеге асырылды.

Автордың жеке үлесі. Автор диссертациялық жұмыста қойылған міндеттерді жеке өзі орындады. Атап айтқанда, ол Python және Mathcad бағдарламалық өнімдерін қолдану дағдыларын пайдаланып, Arduino IDE әзірлеу ортасында скетч дайындады. Автор ЖЖЭС актуаторының ПӘК-ін анықтауға арналған эксперименттік зерттеуді жүргізудің кешенді әдістемесін әзірледі. Ол сынақ стендін құрастырып, дайындық және баптау жұмыстарын

жүргізді, сондай-ақ актуатордың ПӘК-ін анықтау бойынша эксперименттік сынақтарды жүзеге асырды. Жарияланған ғылыми еңбектерде автордың үлесі айтарлықтай болып табылады. Жарияланған ғылыми еңбектердің басым бөлігі авторға тиесілі.

Диссертация тақырыбының мемлекеттік бағдарламалармен және университеттің жұмыс жоспарымен байланысы. Работа выполнялась Жұмыс «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ-да орындалды және ИРН АР14869386 гранттық қаржыландыру жобасын орындау барысында жүзеге асырылды: «Тербелмелі жұмыс органы бар автоматты түрде басқарылатын желкенді жел электр станциясының конструкциялар кешенін зерттеу, әзірлеу және тәжірибелік үлгісін жасау». Осы жоба аясында және жүргізілген зерттеулер нәтижесінде ЖЖЭС-тің тәжірибелік конструкциясы жасалып, **енгізу актісі** алынған.

Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін апробациялау.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер мен диссертациялық жұмыстың негізгі ережелері Scopus дерекқорында индекстелетін, 85 процентильтеге ие журналда бір мақала түрінде жарияланды. Үш мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда жарияланды. Сонымен қатар, диссертация материалдары ГФ ИРН АР14869386 тақырыбы бойынша қорытынды есепке (мемлекеттік тіркеу № 0122РК00575, 2025 ж.) енгізілді.

Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі. Диссертация Диссертация 101 беттік компьютерлік мәтін түрінде ұсынылған, ол кіріспеден, 5 тараудан, қорытындыдан және 5 қосымшадан тұрады. Оның құрамына 26 сурет, 7 кесте, қорытынды, 100 дереккөзден тұратын пайдаланылған әдебиеттер тізімі және 5 қосымша енгізілген.

Диссертациялық жұмыстың кіріспе бөлімінде тақырыптың өзектілігі негізделген, зерттеудің мақсаты мен міндеттері тұжырымдалған. Негізгі идеясы, ғылыми жаңалығы, сондай-ақ зерттеу нәтижелері мен жарияланымдар түріндегі апробациясы келтірілген.

Бірінші бөлімде жел энергетикасы және, атап айтқанда, Қазақстан энергетикасы саласындағы қолданыстағы ғылыми зерттеулерге талдау жүргізілген. Электр энергетикасы мен жел энергетикасы саласындағы әдеби шолу зерттеулері негізінде қазіргі заманғы ТВЭС-тің кемшіліктері көрсетілген. Аталған ТВЭС-ке тән кемшіліктерді ескере отырып, диссертацияда ЖЖЭС электр энергиясын өндіру жүйесін әзірлеу және жетілдіру мақсаты қойылған.

ЖЖЭС-ті пайдалану тиімділігін арттыру және оны жетілдіру мақсатында алты синхронды генераторы бар және есептік мөлшердегі аккумуляторлардан тұратын энергия өндіру және жинақтау жүйелерін зерттеу арқылы жүйенің тиімділігін арттыру ұсынылады. Мұндай шешім жел жылдамдығы төмен кең аумақтары бар, сондай-ақ энергетикалық инфрақұрылымы әлсіз, әсіресе электр беру желілерінен алыс орналасқан өңірлері көп Қазақстан үшін ерекше маңызды. Осылайша, қазіргі жағдайларда ЖЖЭС-тің электр энергиясын

өндіру жүйесінің тиімділігін арттыру негізінде тербелмелі желкендері бар автоматты түрде басқарылатын желкенді жел электр станцияларын жетілдіру өзекті әрі маңызды міндет болып табылады.

Кең ауқымды қолдану үшін ЖЖЭС жел бағытының өзгеруіне тәуелсіз, төмен жел жылдамдықтарынан бастап жұмыс істеп, жоғары тиімділікке, яғни жеткілікті жоғары ПӘК-ке ие болуы қажет. ЖЖЭС тиімділігі көп жағдайда оның маңызды түйіні — механикалық қозғалыс энергиясын тікелей электр энергиясына түрлендіру функциясын орындайтын актуатордың тиімділігіне байланысты. Актуатордың тиімділігін бағалау үшін жұмыста актуатордың пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) сияқты көрсеткішті қолдану ұсынылады..

Диссертациялық жұмыстың 2-бөлімінде негізгі назар жел жағдайының сипаттамалары бойынша эксперименттік деректерді өңдеуге аударылады. Жел жағдайы стохастикалық сипатқа ие болғандықтан, жұмыста желдің заңдылықты және болжамды сипатын қалыптастыруға мүмкіндік беретін жасанды интеллект әдісі қолданылады. Бұл бөлімде жел сипаттамаларының (жылдамдығы мен бағытының) болжамды заңдылықтарын қалыптастыруға қатысты зерттеу материалдары қамтылған.

Нәтижесінде 14 м биіктікте өлшенген жел жылдамдығы мен бағытының бұрын алынған секундтық мәндері пайдаланылды. Бұл деректер өлшеу құралдары арқылы контроллер көмегімен қалыптастырылған Excel форматындағы кең деректер базасын құрайды.

Кейін Python тілінде әзірленген бағдарлама қолданылады, оның көмегімен бұрын алынған деректер базасынан іріктеу жүргізіліп, жел жылдамдығының 4 диапазоны бойынша деректер базасы қалыптастырылады: [0–5], [5–10], [10–15], [15-тен жоғары]. Бұл деректер базалары кездейсоқ сипаттағы шамалардан тұрады. Осы себепті, кейінгі кезеңде Python тілінде көпқабатты нейрондық желіні құру және оқыту арқылы әртүрлі жел жағдайлары (жел жылдамдығы диапазондары) үшін жел жылдамдығының өзгеру заңдылықтары массивтер түрінде алынды. Бұл деректер массиві әрі қарай ЖЖЭС-ті есептеу үшін, сондай-ақ тыныш (штиль) және энергетикалық уақытты анықтау үшін қолданылады.

Осы кезеңде алынған нәтижелер жаңашыл болып табылады және басқа зерттеушілер тарапынан кез келген жел электр станцияларына қатысты, мысалы, автономды жел электр станцияларының аккумулятор сыйымдылығын анықтау үшін қолданылуы мүмкін. Бұл ретте бастапқы деректер ретінде метеостанциялардан алынған басқа да мәліметтерді пайдалануға болады.

Сонымен қатар, осы бөлімде желдің болжамды сипаттамасы негізінде штиль уақытын анықтау әдістемесі ұсынылған. Максималды штиль уақытын анықтау ЖЖЭС энергия жинақтау жүйесі үшін аккумуляторлардың сыйымдылығын таңдауға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Диссертациялық жұмыстың **3-бөлімінде** осы зерттеуде қабылданған әдіснамаға сәйкес жүйенің генерациялау жүйесін эксперименттік зерттеуге бағытталған жұмыстар жалғастырылады. Манипуляторлық түрлендіргішке (МТ) болжамдалған жел жүктемесінің әсерін имитациялау мәселесі шешіледі, бұл арқылы актуаторға түсетін болжамды кіріс қуатын анықтау көзделеді.

Бұл ретте бұрын әзірленген SHOLKOR параллельді манипуляторының күштік талдау алгоритмі қолданылады. Есептеулер үшін Python көмегімен алынған желдің болжамды сипаттамалары және ПВЭС-тің нақты тәжірибелік үлгісінің конструкциялық деректері бастапқы мәліметтер ретінде алынды. Математикалық-имитациялық модельдеу үшін Mathcad бағдарламалық пакеті пайдаланылды.

Бұл тараудағы есеп бірнеше кезеңмен шешілді: алдымен кинетостатика әдісімен МТ-ның күштік талдауы үшін математикалық модель құрылды. Нәтижесінде алты актуатордағы реакция күштерінің құрамдас бөліктерін анықтауға мүмкіндік беретін теңдеулер жүйесі алынды.

Кейін жұмыс органы (ЖО) — мачта мен желкеннен тұратын жүйе және МТ кинематикасы қарастырылып, біртекті матрицаларды түрлендіру әдісі қолданылды. Соның нәтижесінде ЖО-ның тік бағыттан аз ауытқуы кезінде және маятник тәрізді алға-артқа тербелмелі қозғалысында актуатор кареткаларының орын ауыстыру өсімшелері анықталды.

Алынған нәтижелер кеңістіктегі ЖО қозғалысы кезінде ең аз жүктелген таңдалған манипулятордың кіріс болжамды қуатын анықтауға мүмкіндік берді. Ең аз жүктелген актуаторды таңдау себебі — электр тогын генерациялау кезінде актуатордың ПӘК-і ең төмен мәні бойынша бағаланады. Авторлар бұрын құрған ЖЖЭС-тің аналитикалық моделі негізінде Mathcad бағдарламалық пакетін қолдана отырып, зонтик тәрізді ЖЖЭС-тің күштік талдау алгоритмі жетілдірілді. Бұл алгоритмнің ерекшелігі — бастапқы деректер ретінде 2-бөлімде жасанды интеллект әдісімен алынған берілген жел жағдайына сәйкес жел сипаттамалары пайдаланылады, сондай-ақ Mathcad бағдарламасының Excel кестелік процессорымен ақпарат алмасу функциясы қолданылады.

Сонымен қатар, есептеу үшін бастапқы деректер құрамына қуаты 5 кВт болатын ЖЖЭС тәжірибелік үлгісінің параметрлері енгізілген. Құрылған бағдарлама жел сипаттамаларына байланысты алты актуатордың әрқайсысының кірісіне әсер ететін болжамды жүктемелер мен олардың қуатын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл бағдарлама кейіннен бөлшектердің, тораптардың және жалпы ЖЖЭС-тің беріктігі мен сенімділігін есептеуде қолданылуы мүмкін.

Mathcad бағдарламасында ақпарат алмасу функциясын қолдану арқылы әртүрлі болжамдалған жел жылдамдығы мен бағыты мәндері кезінде актуаторлардың кіріс болжамды қуаты бойынша есептелген деректер Excel бағдарламасына экспортталады.

Диссертациялық жұмыстың **4-бөлімінде** актуатордың ПӘК-ін эксперименттік зерттеуге арналған автоматты түрде жұмыс істейтін стенд құрастырылып, ұсынылды. Оның құрамына актуатор, компрессормен бірге

болжамдалған кіріс жүктемені іске асыратын, Arduino контроллері арқылы автоматты түрде басқарылатын пневматикалық жүйе, сондай-ақ бақылау-өлшеу аппаратурасы кіреді.

Осы жерде ЖЖЭС-тің ең аз жүктелген актуаторы үшін ПӘК мәні эксперименттік жолмен анықталып, оның мәні ...-ге тең екені белгіленді. Бұл нәтиже желдің болжамды сипаттамалары негізінде математикалық-имитациялық модельдеу арқылы алынған бұрын қалыптастырылған кіріс қуат деректерін пайдалану арқылы алынды.

Эксперименттік зерттеу процесі, сондай-ақ деректерді жинау және өңдеу толықтай автоматтандырылған. Ол үшін Arduino контроллері және Arduino IDE ортасында әзірленген бағдарлама қолданылды.

Алынған нәтижелердің дұрыстығын растау мақсатында ПӘК-тің алыну ықтималдығын сипаттайтын гистограмма және тығыздық функциясының графигі, сондай-ақ Вейбулл үлестірім функциясы тұрғызылды. Олар актуатор ПӘК-ін анықтау бойынша эксперимент нәтижелерін растады. Мұндай эксперимент актуатордың таңдалған конструктивтік параметрлерінің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Қолданылған әдіснама жел энергиясын электр энергиясына түрлендіру кезінде ең жоғары тиімділікті қамтамасыз ететін параметрлерді таңдау арқылы ЖЖЭС құрылымын жетілдіруге мүмкіндік береді. Жалпы алғанда, актуатордың ПӘК-ін эксперименттік түрде анықтау арқылы ЖЖЭС-тің энергетикалық тиімділігін бағалау бойынша техникалық мәселенің шешімі табылғанын атап өткен жөн.

Диссертациялық жұмыстың **5-бөлімінде** зерттелетін ПВЭС-тің айрықша ерекшелігі — актуатордың тісті-реекті берілістен тұратын екі буынды қуат іріктеу жүйесі бар екендігі, сондай-ақ электр тогын өндіретін электр машинасының болуы көрсетілген. Осыған байланысты бұл бөлімде электр машиналарына талдау жүргізіліп, PMSG үлгісіндегі синхронды генератор таңдалды: Naier Wind Power 1000W 24V/500rpm.

Әрбір актуаторда генератор орнатылғандықтан, алты үш фазалы айнымалы ток синхронды генераторы таңдалды. Генератор білігіндегі айналдыру моменті кездейсоқ сипатқа ие болғандықтан, әр генератор өндіретін электр тогының сипаттамалары да әртүрлі болады.

Сондықтан бұл бөлімде айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруге және оны электрохимиялық қайталама элементтермен ортақ шинаға параллель қосуға негізделген электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесінің принциптік сұлбасы жасалды. Бұл жүйе инвертор арқылы тұтынушыға қажетті қуаттағы айнымалы электр тогын қамтамасыз етеді.

Әзірленген принциптік сұлба негізінде электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесінің эксперименттік моделі жасалып, аккумуляторларды терең разрядтан автоматты түрде қорғау ішкі жүйесі енгізілді. Эксперименттік модельде сынақтар жүргізілді.

Сынақ нәтижелері әзірленген энергия өндіру және жинақтау жүйесі, терең разрядтан қорғау ішкі жүйесімен бірге, жасалған желкенді жел электр станциясының тәжірибелік үлгісінде қолдануға болатынын көрсетті.