«8D06102 – Компьютерлік инженерия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену үшін ұсынылған Муханбет Ақсултан Айтуарұлының «Бейнелерді тануға арналған гибридті кванттық-классикалық алгоритмдерді зерттеу және әзірлеу» тақырыбындағы диссертациялық жұмысына ресми

РЕЦЕНЗЕНТТІҢ ЖАЗБАША ПІКІРІ

р/н №	Өлшемшарттар	Өлшемшарттарға сәйкестігі (жауап нұсқаларының бірін сызу)	Ресми рецензенттің ұстанымына негіздеме (ескертуді курсивпен көрсету)
1.	Диссертация тақырыбының (бекіту күніне) ғылымның даму бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкес болуы	1.1 Ғылымды дамытудың басым бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкестігі: диссертация мемлекет бюджетінен қаржыландырылатын жобаның немесе нысаналы бағдарламаның аясында орындалған (жобаның немесе бағдарламаның атауы мен нөмірін көрсету); 2) диссертация басқа мемлекеттік бағдарлама аясында орындалған (бағдарламаның атауын көрсету); 3) диссертация Қазақстан Республикасының Үкіметі жанындағы Жоғары ғылыми-техникалық комиссия бекіткен ғылым дамуының басым бағытына сәйкес (бағытын көрсету) келеді.	Ізденушінің «Бейнелерді тануға арналған гибридті кванттық-классикалық алгоритмдерді зерттеу және әзірлеу» тақырыбындағы диссертациялық жұмысы Қазақстан Республикасының Үкіметі жанындағы Жоғары ғылыми-техникалық комиссия бекіткен ғылым дамуының – «Цифрлық және ғарыштық технологиялар» басым бағытына сәйкес келеді. Диссертация кванттық есептеу мен жасанды интеллект технологияларын біріктіру бағытында орындалған.
2.	Ғылым үшін маңыздылығы	Жұмыс ғылымға елеулі үлесін қосады/қоспайды, ал оның маңыздылығы ашылған/ашылмаған.	Жұмыс ғылымға елеулі үлесін қосады, ал оның маңыздылығы ашылған. Диссертациялық зерттеу заманауи ғылымдағы аса өзекті бағыт – кванттық машиналық оқыту әдістерін бейнелерді тану есептерінде қолдануды қарастырады. Гибридті кванттық-классикалық нейрондық желілерді дәлірек модельдеу қазіргі кезде тек Қазақстан үшін емес, бүкіл әлемдік

			ғылыми қауымдастық үшін маңызды. Докторант ұсынған HQCNN және HQCNN-REGA архитектуралары кванттық машиналық оқытудың шектеулерін жоя отырып, есептеу шығындарын азайтуға және жоғары дәлдікке қол жеткізуге жол ашады.
3.	Өзі жазу принципі	Өзі жазу деңгейі: жоғары; 2) орташа; 3) төмен; 4) өзі жазбаған.	Диссертациялық жұмыс авторлық өз қолымен орындалғаны айқын байқалады. Жұмыстың құрылымында, зерттеу әдістерін таңдауда және нәтижелерді талқылауда авторлық көзқарас анық көрінеді. Әдебиетке шолу барысында шетелдік және отандық еңбектер кеңінен қамтылып, соларға сүйене отырып, зерттеудің бағыты айқындалған. Сонымен бірге, HQCNN және HQCNN-REGA архитектуралар негізінде оқыту, оларды бейне тануға қолдану және нәтижелерін салыстырмалы талдау – бұл жұмыстың докторанттың жеке ізденісі мен ғылыми ойлау қабілетінің айқын көрінісі болып табылады. Диссертацияның негізгі нәтижелері халықаралық конференцияларда және жоғары импакт-факторлы журналдарда жарияланып, ғылыми қауымдастық тарапынан мойындалған.
4.	Ішкі бірлік принципі	4.1 Диссертация өзектілігінің негіздемесі: негізделген; 2) ішінара негізделген; 3) негізделмеген.	Зерттеу өзектілігі қазіргі ғылым мен өндірістің талаптарына толық сәйкес келеді. Классикалық CNN архитектураларының шектеулілігі мен NISQ-дәуіріндегі кванттық есептеудің мүмкіндіктері нақты дәлелдермен баяндалған.

		4.2 Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды: айқындайды; 2) ішінара айқындайды; 3) айқындамайды. 4.3. Мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына сәйкес келеді: сәйкес келеді; 2) ішінара сәйкес келеді; 3) сәйкес келмейді. Диссертацияның барлық бөлімдері мен ережелері логикалық байланысқан: толық байланысқан; 2) ішінара байланысқан; 3) байланыс жоқ. 4.5 Автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған: сыни талдау бар; 2) талдау ішінара жүргізілген; 3) талдау өз пікіріне емес, басқа авторлардың сілтемелеріне негізделген; 4) талдау жоқ.	Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды. Әр тарау тақырыпты ашуға бағытталған: бірінші тарауда ғылыми негіздер мен әдеби шолу, екінші тарауда PQC және деректерді кодтау, үшінші тарауда HQCNN архитектурасы, төртінші тарауда HQCNN-REGA моделінің оңтайландырылуы мен салыстырмалы талдауы берілген. Диссертациялық жұмыстың мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына толық сәйкес келеді. Ізденуші нақты мақсатқа жету үшін ғылыми шолу, машиналық оқыту, кванттық есептеу, әдістерді салыстыру және нәтижелерді валидациялау сияқты міндеттерді орындаған. Кіріспеден бастап қорытындыға дейін диссертация логикалық жүйеде құрылған. Әр тарау алдыңғы бөлімнің жалғасы іспеттес және нәтижелер бір-бірін толықтырады. Жаңа әдістердің енгізілуі мен салыстырмалы талдауы логикалық дәйектілікті көрсетеді. Диссертацияда автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған және олардың сыни талдауы бар. HQCNN және HQCNN-REGA архитектураларын бейімдеу барысында олар өзара және әдебиеттерде кездесетін тәсілдермен

			салыстырылып, артықшылықтары дәлелдер арқылы көрсетілген. Дәлдіктің жоғарылауы және параметрлер санының азаюы ұсынылған шешімдердің тиімділігін айқын көрсетеді.
5.	Ғылыми жаңашылдық принципі	5.1 Ғылыми нәтижелер мен ережелер жаңа ма? толығымен жаңа; 2) ішінара жаңа (25-75% жаңа); 3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем). 5.2 Диссертацияның қорытындылары жаңа ма? толығымен жаңа; 2) ішінара жаңа (25-75% жаңа); 3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем). 5.3 Техникалық, технологиялық, экономикалық немесе басқару шешімдері жаңа және негізделген бе? толығымен жаңа; 2) ішінара жаңа (25-75% жаңа); 3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	Зерттеу барысында ұсынылған тәсілдер толықтай жаңа болып табылады. QConv2D + QDense қабаттарын деректерді қайта жүктеу стратегиясымен біріктіру және генетикалық алгоритм арқылы кванттық схема архитектурасын автоматты іздеу – ғылыми тұрғыдан тың бағыт болып саналады. Қорытындылар диссертацияда алынған нәтижелерге сүйеніп жасалған және олардың жаңалығы талдау арқылы дәлелденген. CIFAR-100 деректер жинағында 97,40% дәлдікке қол жеткізу – бұрынғы кванттық тәсілдердің (70–85%) нәтижелерінен айтарлықтай жоғары. Бұл көрсеткіштер жұмыстың қорытындыларының бірегейлігін айқтайды. Техникалық, технологиялық, экономикалық немесе басқару шешімдері толығымен жаңа. Жұмыста ұсынылған шешімдер тек ғылыми теорияда ғана емес, практикада да жаңа мүмкіндіктер береді. HQCNN-REGA архитектурасының параметрлер санын 47 есеге дейін қысқарту мүмкіндігі есептеу шығындарын азайтуға және модельдеудің тиімділігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

6.	Негізгі қорытындылардың негізділігі	Барлық негізгі қорытындылар ғылыми тұрғыдан қарағанда ауқымды дәлелдемелерде негізделген/негізделмеген (qualitative research (куолитатив ресеч) және өнер және гуманитарлық ғылымдар бойынша даярлық бағыттары үшін).	Барлық қорытындылар MNIST, FashionMNIST және CIFAR-100 деректер жинақтарындағы эксперименттік нәтижелермен, статистикалық метрикалармен және салыстырмалы кестелермен расталған. Scopus/Web of Science журналдарындағы жарияланымдар да нәтижелердің рецензиялаудан өткенін дәлелдейді.
7.	Қорғауға шығарылған негізгі ережелер	Әрбір ереже бойынша келесі сұрақтарға жеке жауап беру қажет: 7.1 Ереже дәлелденді ме? дәлелденді; 2) шамамен дәлелденді; 3) шамамен дәлелденбеді; 4) дәлелденбеді; 5) бұл тұжырымда ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес. 7.2 Тривиалды ма? 1) ия; жоқ; 3) бұл тұжырымда ереженің тривиалды екенін тексеру мүмкін емес. 7.3 Жаңа ма? ия; 2) жоқ;	Қорғауға екі негізгі тұжырымдама ұсынылған: **Тұжырым 1** QConv2D және QDense қабаттарына негізделген гибридті кванттық-классикалық нейрондық желі (HQCNN) CIFAR-100 деректер жинағында 97,4% жіктеу дәлдігін қамтамасыз етеді, бұл баламалы кванттық тәсілдерден 9–10 пайыздық пунктке жоғары. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. MNIST, FashionMNIST және CIFAR-100 деректер жинақтарында жүргізілген сандық эксперименттердің нәтижелері дәлдігі бойынша 85% көрсеткіштен 97,4%-ға дейін жеткен. 7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. Бұған дейін стандартты кванттық тәсілдер CIFAR-100-де 85%-дан жоғары дәлдік беруі ғылыми тәжірибеде көрсетілмеген. 7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. QConv2D қабатын деректерді қайта жүктеу стратегиясы және генетикалық алгоритммен ұштастыру

		3) бұл тұжырымда ереженің жаңашылдығын тексеру мүмкін емес. 7.4 Қолдану деңгейі: 1) тар; орташа; 3) кең 4) бұл тұжырымда ереженің қолдану деңгейін тексеру мүмкін емес. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? ия; 2) жоқ 3) бұл тұжырымда мақаладағы ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес.	арқылы жаңа тәсіл ұсынылып, оның тиімділігі негізделген. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Орташа. Әдіс ғылыми зерттеулерде және инженерлік есептеулерде қолдануға жарамды, алайда оны жүзеге асыру үшін нейрондық желілер мен кванттық есептеулер саласында кәсіби дайындықты талап етеді. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. Бұл тұжырым диссертация авторының жарияланған еңбектерінде нейрондық желілердің салыстыруларымен және модельдердің нәтижелерімен бекітілген. **Тұжырым 2** Кванттық тізбек архитектурасын автоматты анықтауға арналған эволюциялық алгоритм (HQCNN-REGA) CIFAR-100 деректерінде оқытылатын параметрлер санын 39 689-ға дейін азайтады, бұл классикалық CNN-мен салыстырғанда 47 есе қысқарту. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. Салыстырмалы талдау барысында HQCNN-REGA CIFAR-100 деректерінде оқытылатын параметрлер санын 39 689-ға жуық шаманы көрсеткен. 7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. Себебі басқа архитектуралардың мұндай есептерде

			жеткілікті дәлдік беруі бұрын ғылыми тәжірибеде көрсетілмеген. 7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. Бұл жұмыста алғаш рет HQCNN-REGA архитектурасы генетикалық алгоритм арқылы оңтайландырылып, оның артықшылықтары дәлелденді. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Орташа. Әдістеме ғылыми зерттеулер мен инженерлік тәжірибеде қолдануға қолайлы, бірақ оны тиімді пайдалану үшін машиналық оқыту және кванттық есептеу саласында терең дайындық қажет. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. Бұл тұжырым диссертация авторының жарияланған еңбектерінде нейрондық желілердің салыстыруларымен және модельдердің нәтижелерімен бекітілген.
8.	Дәйектілік қағидаты. Дереккөздер мен ұсынылған ақпараттың дәйектілігі	8.1 Әдіснаманы таңдау – негізделген немесе әдіснама нақты жазылған: ия; 2) жоқ. 8.2 Диссертация жұмысының нәтижелері компьютерлік технологияларды қолдану арқылы ғылыми зерттеулердің қазіргі заманғы әдістері мен деректерді өңдеу және интерпретациялау әдістемелерін пайдалана отырып алынған: ия;	Зерттеуде қолданылған әдістемелік тәсілдер зерттеу міндеттерімен тікелей байланысты. PennyLane, TorchQuantum және Qiskit платформаларын қолдана отырып, кванттық схемаларды модельдеудің күрделі мәселелерін шешуге мүмкіндік берді. Параметрленген кванттық схемалар (PQC), деректерді қайта жүктеу, генетикалық алгоритм - барлық әдіснамалық таңдаулар теориялық негіздермен дәйектелген.

		2) жоқ. 8.3 Теориялық қорытындылар, модельдер, анықталған өзара байланыстар және заңдылықтар эксперименттік зерттеулермен дәлелденген және расталған (педагогикалық ғылымдар бойынша даярлау бағыттары үшін нәтижелер педагогикалық эксперимент негізінде дәлелденеді): ия; 2) жоқ. 8.4 Маңызды мәлімдемелер нақты және сенімді ғылыми әдебиеттерге сілтемелермен расталған / ішінара расталған / расталмаған. 8.5 Пайдаланылған әдебиеттер тізімі әдеби шолуға жеткілікті/жеткіліксіз.	Диссертация жұмысының нәтижелері компьютерлік технологияларды қолдану арқылы ғылыми зерттеулердің қазіргі заманғы әдістері мен деректерді өңдеу және интерпретациялау әдістемелерін пайдалана отырып алынған. Нәтижелер заманауи машиналық және кванттық машиналық оқыту алгоритмдерін, GPU есептеулерін және кванттық симуляторларды қолдану арқылы алынған. Бұл ғылыми зерттеулердің қазіргі кезеңдегі жоғары талаптарына толық сәйкес келеді. Теориялық қорытындылар, модельдер, анықталған өзара байланыстар және заңдылықтар эксперименттік зерттеулермен дәлелденген және расталған. Теориялық тұрғыда алынған модельдер мен тұжырымдар эксперименттер арқылы тексерілген. HQCNN және HQCNN-REGA әдістерінің нәтижелері салыстырылып, олардың дұрыстығы дәлелденген. Диссертацияда жасалған негізгі тұжырымдар халықаралық деңгейде мойындалған ғылыми еңбектерге сүйеніп жазылған. Әдебиеттер тізіміне соңғы жылдардағы беделді журналдардағы мақалалар енгізілген, бұл зерттеу нәтижелерінің дәйектілігін күшейтеді. Әдебиеттер тізімінде 63-тен астам дереккөз қамтылған. Олардың ішінде халықаралық индексделген журналдардағы мақалалар,

			конференция материалдары және отандық ғылыми еңбектер бар. Бұл әдебиет шолуында мәселенің толық әрі жан-жақты қарастырылғанын дәлелдейді.
9.	Практикалық құндылық қағидаты	9.1 Диссертацияның теориялық маңызы: бар; 2) жоқ. 9.2 Диссертацияның практикалық маңызы бар және алынған нәтижелерді практикада қолдану мүмкіндігі жоғары: ия; 2) жоқ. Практикалық ұсыныстар жаңа ма? толығымен жаңа; 2) ішінара жаңа (25-75% жаңа); 3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	Диссертацияның теориялық маңызы бар. Зерттеу нәтижелері кванттық машиналық оқыту әдістерінің теориялық негізін кеңейтеді. PQC оңтайландыруы мен генетикалық алгоритмдерді кванттық схемаларға қолдану арқылы кванттық машиналық оқытудың жаңа мүмкіндіктері айқындалған. Диссертацияның практикалық маңызы бар және алынған нәтижелерді практикада қолдану мүмкіндігі жоғары. Ұсынылған әдістерді бейне тануды болжау және оңтайландыру процестеріне енгізуге болады, бұл олардың нақты өндірістік жағдайларда қолданылу ықтималдығын арттырады. HQCNN-REGA архитектурасын қолдану арқылы параметрлер санын айтарлықтай қысқарту және түрлі-түсті суреттерде жоғары дәлдікті алу бейнені тану есептерінде жаңа практикалық құрал ретінде бағаланады.
10.	Жазу және ресімдеу сапасы	Академиялық жазу сапасы: жоғары; 2) орташа; 3) орташадан төмен;	Академиялық жазу сапасы жоғары. Диссертация академиялық талаптарға сай жазылған. Тақырыптың мазмұны мен құрылымы жүйелі түрде баяндалып, мәтіннің ғылыми стилі

		4) төмен.	сақталған. Кестелер мен суреттер түсінікті рәсімделген. Әдебиеттер тізімі халықаралық стандарттарға сәйкес рәсімделген. Құжаттың жалпы тілі түсінікті әрі ресми-ғылыми сипатта рәсімделген.
11.	Диссертацияға ескертулер		1. Диссертацияда FashionMNIST деректер жинағындағы нәтижелер аталса да, көп кестелерде тек MNIST және CIFAR-100 бойынша нәтижелер берілген. FashionMNIST-тің жеке нәтижелерін нақты кесте ретінде ұсыну жұмысты толықтырар еді. 2. Симулятор нәтижелері нақты кванттық аппаратта қайта тексерілсе нәтиженің практикалық маңызы арта түсер еді. 3. Кванттық шу мен декогеренция жағдайындағы архитектураның тұрақтылығы тәжірибелік тұрғыдан зерттелсе, жұмысты толтырар еді.
12.	Докторант мақалаларының зерттеу тақырыбы бойынша ғылыми деңгейі (диссертация мақалалар сериясы нысанында қорғалған жағдайда ресми рецензенттер докторанттың зерттеу тақырыбы бойынша әр мақаласының ғылыми деңгейін зерделейді)		Докторанттың жарияланған мақалаларының зерттеу тақырыбы бойынша ғылыми деңгейі жоғары. ҚР ҒЖБМ Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда, Web of Science және Scopus базасына енген рецензияланатын халықаралық журналдарда жарық көрген мақалалар бар. Сонымен қатар, халықаралық конференцияларда баяндамалар жасалып,

			нәтижелер ғылыми қауымдастық тарапынан оң бағаланған.
13.	Ресми рецензенттің шешімі (осы Үлгі ереженің 28-тармағына сәйкес)		Компьютерлік инженерия білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға лайық деп санаймын.

Ресми рецензент:
PhD, техника ғылымдарының кандидаты,
қауымдастырылған профессор
«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» _____ **Бекманова Гульмира Тылеубердиевна**

ҚОЛЫН КУӘЛАНДЫРАМЫН
«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ
ҚЫЗМЕТКЕРЛЕР БАСҚАРМАСЫ
«____» _____ 20___ ж.
қолы _____