

А.А. Муханбет<sup>1\*</sup>, М.Т. Накибаева<sup>1</sup>, Б.С. Дарибаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан  
\*e-mail: mukhanbetaksultan0414@gmail.com

## КВАНТТЫҚ АРИФМЕТИКАЛЫҚ АМАЛДАРДЫ КВАНТТЫҚ ФУРЬЕ ТҮРЛЕНДІРУ КӨМЕГІМЕН БҮТІН ТАҢБАЛАРМЕН ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ

*Аңдатпа*

Кванттық компьютер кейбір NP мәселелерін шешуде электронды компьютерден жоғары екендігі дәлелденді. Кванттық операциялар негізінде бұл мақалада жаңа кванттық қосынды және кванттық көбейту ұсынылады, содан кейін өзгермелі нүктелік кванттық көбейткіш және кванттық қосынды бекітілген нүктелік сандар операциялары негізінде жасалады. Бұл зерттеулер сандық сүзгілерді кванттық іске асырудың негізін қалайды. Бұл мақалада кванттық компьютерде сумматорды есептеудің жаңа әдісі келтірілген. Бұл әдіс кванттық Фурье түрлендіруін(QFT) қолданады және биттерді уақытша беру қажеттілігін жою арқылы қосу үшін қажет кубиттердің санын азайтады. Бұл тәсіл сонымен қатар кванттық регистрде классикалық санды кодтамай, кванттық суперпозицияға классикалық санды қосуға мүмкіндік береді. Бұл әдіс сонымен қатар оны орындау кезінде жаппай параллелизацияға мүмкіндік береді. QFT негізінде қосу және көбейту мүмкіндіктері кейбір өзгерістермен жақсарайды. Ұсынылған операциялар жақын кванттық арифметика операцияларымен салыстырылады.

**Түйін сөздер:** кванттық компьютер, кванттық операциялар, кванттық Фурье түрлендіруі, арифметика операциялар, сумматор.

*Аннотация*

А.А. Муханбет<sup>1</sup>, М.Т. Накибаева<sup>1</sup>, Б.С. Дарибаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

## РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ С ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМИ СИМВОЛАМИ С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Доказано, что квантовый компьютер превосходит электронный компьютер в решении некоторых задач NP. На основе квантовых операций в этой статье предлагается новая квантовая сумма и квантовое умножение, а затем квантовый множитель с плавающей точкой и квантовый делитель с фиксированной точкой создаются на основе операций фиксированных чисел с фиксированной точкой. Эти исследования лежат в основе квантовой реализации цифровых фильтров. В этой статье представлен новый метод вычисления сумматора на квантовом компьютере. Этот метод использует квантовое преобразование Фурье(QFT) и уменьшает количество кубитов, необходимых для соединения, устраняя необходимость временной передачи битов. Этот подход также позволяет добавлять классическое число в квантовую суперпозицию, не кодируя классическое число в квантовом регистре. Этот метод также позволяет проводить массивную параллелизацию при ее выполнении. Возможности сложения и умножения на основе QFT улучшаются с некоторыми изменениями. Предлагаемые операции сравниваются с операциями приближенной квантовой арифметики.

**Ключевые слова:** квантовый компьютер, квантовые операции, квантовое преобразование Фурье, арифметические операции, сумматор.

*Abstract*

## IMPLEMENTATION OF QUANTUM ARITHMETIC OPERATIONS WITH INTEGER CHARACTERS USING THE QUANTUM FOURIER TRANSFORM

Mukhanbet A.A.<sup>1</sup>, Nakibayeva M.T.<sup>1</sup>, Daribayev B.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

It has been proven that a quantum computer is superior to an electronic computer in solving some NP problems. Based on quantum operations, this article proposes a new quantum sum and quantum multiplication, and then a floating-point quantum multiplier and a fixed-point quantum divisor are created based on fixed-point number operations. These studies lay the foundation for the quantum implementation of digital filters. This article presents a new method for calculating the sumator on a quantum computer. This method uses the quantum Fourier Transform (QFT) and reduces the number of qubits needed for the connection, eliminating the need for temporary bit transfer. This approach also allows adding a classical number to a quantum superposition without encoding the classical number in a quantum register. This method

also allows for massive parallelization during its execution. The QFT-based addition and multiplication capabilities are improved with some changes. The proposed operations are compared with the operations of approximate quantum arithmetic.

**Keywords:** quantum computer, quantum operations, quantum Fourier transform, arithmetic operations, sumator.

## 1. Кіріспе

Соңғы жылдары кванттық есептеу классикалық есептеулердің күрделі мәселелерін шешудің қарапайымдылығымен назар аударыла бастады. Шор кванттық факторинг алгоритмін ұсынғаннан кейін зерттеушілердің кванттық арифметика операцияларына деген қызығушылығы артты. Кванттық арифметикалық амалдар кванттық сигналдарды өңдеу, кванттық Машиналық оқыту сияқты көптеген зерттеулерде қажет. Атап айтқанда, кванттық кескіндерді өңдеуде арифметикалық амалдар стеганография, шекараны анықтау және үлгіні тану сияқты көптеген процестерде қолданылады.

Фейнманның заманынан бері көптеген ғалымдар кванттық компьютердің есептеу қуаты электронды компьютерде теңдесі жоқ деп санайды [1]. 1992 жылы Дойч кванттық компьютер моделін ұсынды, ол Дойч мәселесін электронды компьютерге қарағанда кванттық компьютерде тезірек шешуге болатындығын растады [2]. Шордың кванттық факторизация алгоритмі де, гровердің іздеу алгоритмі де кванттық компьютерлердің кейбір аспектілерде дәстүрлі электронды компьютерлерге қарағанда үлкен есептеу артықшылықтарына ие екенін көрсетті [3]. Кванттық есептеу және кванттық компьютерлер ғалымдардың кең назарын аударды [4,5]. Кванттық есептеудің екі маңызды қосымшасы-кванттық криптография [6,7] және кванттық кескінді өңдеу [8]. Кванттық ақпарат клондауға жатпайтындықтан, кванттық интеграл қауіпсіз байланыстың маңызды физикалық кепілі болып табылады [9]. Кванттық желдету тізбектері арқылы жүзеге асырылатын кейбір хаотикалық жүйелер кванттық кескіндерді шифрлау мен шифрын шешуді жүзеге асыру үшін кескін криптожүйелерінде жалған кездейсоқ тізбектің генераторлары ретінде қолданыла алады. кванттық клапан тізбектерін қолдана отырып, негізгі арифметикалық құрылғыларды, әсіресе кванттық клапан тізбектерін қолдана отырып, тұрақты үтірлі санның көбейтіндісі мен бөлгішін қолдану әдісі. Зерттеу жұмысы кванттық компьютерді қолдана отырып, тіркелген нүктенің сандық операцияларын жүзеге асыруға жол ашады.

Шордың кванттық факторинг алгоритмінің уақыты мен жадының күрделілігін жақсарту үшін кванттық арифметиканың алғашқы элементар операциялары ұсынылған модульдік қосынды, модульдік мультипликатор және модульдік құрылыс операциялары. Госсетт классикалық компьютерде тасымалдау-сақтау әдісін қолдана отырып, кванттық клапандардан модульдік арифметикалық элементтерді қалай жобалау керектігін көрсетті. Драпер кванттық компьютерде сомаларды есептеудің жаңа әдісін ұсынды. Бұл әдіс кванттық Фурье түрлендіруін (QFT) қолданады және тасымалдау текшелерінің санын азайтады. Сызықтық тереңдіктің импульстарын беру арқылы кванттық қосудың жаңа схемасын ұсынды. Бұл жаңа қосылым схемасы алдыңғы қосылым тізбектерінде қолданылатын көптеген қосалқы кубиттердің орнына тек бір көмекші кубитті пайдаланады. Такахашин мен Кунихиро көмекші кубиттер қолданылмайтын екі  $N$  биттік екілік сандарды қосу үшін пульсацияны беру тәсіліне негізделген кванттық тізбекті ұсынды. Олар тереңдікті азайтуға назар аударды және классикалық трансферді болжау техникасын қолдана отырып, қосу үшін жылдам кванттық тізбек құрды. Такахашин мен Кунихиро кванттық қосқыштың модификацияланған нұсқасын кванттық қосқышты параллель қолдана отырып, біркелкі емес Такахашин тасымалымен біріктірді. Бұл модификацияланған қосқыш бірнеше кубиттерді қолданды және көмекші кубиттерді сақтап қалды.

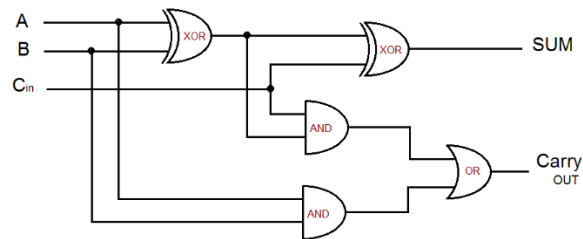
Дәстүрлі түрде, кванттық компьютерге арналған қосымша алгоритмдер өздерінің классикалық аналогтарын қайтымды есептеу үшін қажетті кеңейтімдермен көшірді. Кванттық қосудың жылдам алгоритмдері тасымалдау-сақтау әдістерін қолданады, бірақ классикалық модельге сәйкес келеді. Алайда, кванттық компьютер үшін керемет қосымша алгоритм оның классикалық әріптесіне ұқсамауы мүмкін. Бұл мақалада кванттық компьютерде қосудың жаңа парадигмасы келтірілген. Қолданылатын қосу әдісі  $a$  және  $b$  екі мәнін алады,  $F(A)$  Фурье кванттық түрлендіруді (QFT) есептейді, содан кейін  $F(A)$  - ны  $F(A + B)$  - ге түрлендіру үшін  $b$  қолданады. Содан кейін кері кванттық Фурье түрлендіруді қолдануға және қосындыны қалпына келтіруге болады. Жинақтауға дейінгі және кейінгі түрлендіруді есептеу белгілі бір шығындармен байланысты болғандықтан, есептеулердің максималды саны одан шығар алдында түрлендіру ауқымында орындалуы керек. Классикалық қосымша кванттық компьютерде қосымшаны жүзеге асыруға арналған бірқатар мақалалар жарияланды [2].

Барлық енгізулер екі  $N$  биттік сандарды қосу үшін кем дегенде  $3N$  кубитті қолданады. Мұнда ұсынылған әдіс [7] - де көрсетілген схемаға сәйкес келеді. Қосынды екі негізгі унитарлық есептеуіш

блоктардан тұрады. Сонымен қатар, QFT негізінде азайту, бөлу және дәрежеге көтерудің жаңа амалдары ұсынылған. Ұсынылған арифметикалық амалдар аз ресурстарды қолдана отырып, барлық сандармен модульдік емес операцияларды шектеусіз орындай алады. Сонымен қатар, екі, абсолютті және салыстыру үшін қосымша операциялардың жаңа кванттық схемалары QFT негізінде ұсынылған қосу және азайту операцияларын қолдана отырып ұсынылған.

## 2. Әдістеме

Классикалық және кванттық қосу. Толық сумматор - бұл классикалық компьютерлер 3 битке дейін қосуды жүзеге асыру үшін қолданатын логикалық схема. Толық сумматордың схемасында 3 кіріс бар: A, B және Cin (ағылшын тіліндегі "Carry in" сөзі қысқартылған, өйткені ол алдыңғы толық қосқыштан алынған, өйткені оларды бір-бірімен байланыстыруға болады). Сондай-ақ, Sum және Cout деп аталатын 2 шығысы бар (ағылшынша "Carry out" сөзінің аббревиатурасы, өйткені ол келесі сумматордың Cin-ге бит береді). Сумматордың классикалық схемасы 1 суретте көрсетілген.



Сурет 1. Классикалық сумматор схемасы

Сәйкесінше, 2 биттік мәндері бойынша шындық кестесін құруға болады. Нәтижесін 1 кестеден көруге болады.

Кесте 1. Классикалық сумматордың шындық кестесі

A	B	Cin	Cout	Sum
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Толық сумматорды кванттық компьютерде іске асыру үшін бізге 4 кубит қажет (яғни, толық сумматордың әр кірісі мен шығысы үшін 1).

- Нөлдік Q0 qubit: A енгізу үшін қажет;
- Бірінші Q1 qubit: B енгізу үшін қажет;
- Екінші Q2 qubit: Cin енгізу үшін қажет;
- Бірінші Q1 кубиті: Sum үшін қажет, бірінші кубит қолданылады;
- Төртінші Q4 qubit: Cout үшін қажет.

Қосымша операторды құру үшін бізге бірнеше негізгі кванттық логикалық клапандар қажет, оларды қосу процесінің қадамдық бөлігін орындау үшін қолданамыз:

- Кванттық клапан X классикалық емес әрекет етеді, кубитті күйден  $|0\rangle$  күйге  $|1\rangle$  және керісінше аударады;

- CX клапаны (бақыланатын – X) бірден екі кубитке әсер етеді, олардың біреуі басқарушы кубит деп аталады, ал екіншісі мақсатты кубит деп аталады. Бұл клапан X клапанын мақсатты кубитке қолданады, егер басқару кубиті  $|1\rangle$  күйінде болса;

- CCX (Controlled – Controlled – X) клапаны бір уақытта үш кубитке, екі басқару кубитіне және бір мақсатты кубитке әсер етеді. Ол x клапанын мақсатты кубитке қолданады, егер екі басқару кубиті  $|1\rangle$  күйінде болса.

Тасымалдау битін есептеу үшін бізге үш кіріс кубитін алатын клапан қажет: алдыңғы бағаннан тасымалдау кубиті және әр терминнен бір кубит. Егер кем дегенде екі кіріс кубиті  $|1\rangle$  күйінде болса, клапан кубитті  $|1\rangle$  күйіне ауыстыру операциясын орындайды. Тасымалдау клапаны үшін шындық кестесін 2 кестеден көруге болады.

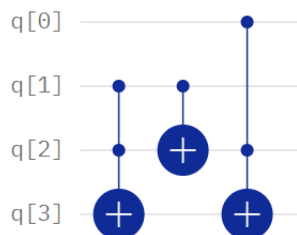
Кесте 2. Тасымалдау клапаны үшін шындық кестесі:

$A$	$B$	$Cin$	$Cout$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Бұл әрекетті бірнеше қадамға бөлуге болады:

- Алдымен  $Cin$  және  $A$  кубиттері салыстырылады, егер екеуі де  $|1\rangle$  күйінде болса,  $Cout$  битін керісінше өзгертіледі.
- Егер  $A$ -дан кубит  $|1\rangle$  күйінде болса,  $B$  регистрінің кубитін өзгертіледі.
- $Cin$  және  $B$  кубиттері салыстырады, егер екеуі де  $|1\rangle$  күйінде болса,  $Cout$  шығыс битін төңкеріледі.

Мұны тек  $X$ ,  $CX$  немесе  $CCX$  клапандарының біреуін қолдану арқылы жасау мүмкін емес, сондықтан біз бірнеше клапандарды қолдана отырып, 2 суреттегідей схемаға қол жеткізе аламыз:



Сурет 2.  $CX$  және  $CCX$  клапандарын қолдана отырып,  $Cout$  тасымалдау клапанын визуализациялау.

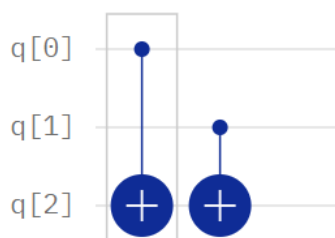
Кресттер мақсатты кубитті білдіреді, ал боялған шеңберлер бақылау кубиттерін білдіреді. Екі боялған шеңбермен және бір крест шеңберімен сызықтар  $CCX$  клапанын білдіреді, ал бір боялған шеңбермен бір крест шеңберімен сызық  $CX$  клапанын білдіреді. Соманың клапаны үшін бізге үш кіріс кубитін алатын клапан қажет: шығыс тасымалдау кубиті және әр терминнен бір кубит. Клапан 3 кестедегі шындық кестесімен бірдей нәтиже беретін операцияны орындайды:

Кесте 3.  $Sum$  клапаны үшін шындық кестесі:

$A$	$B$	$Cin$	$Sum$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Шығу-бұл регистрден шыққан кубит, сондықтан басқа регистрде сақтаудың орнына регистр мен соманы қайта жазу арқылы орын мен операцияларды үнемдей алуға болады. Шындық кестесіне қарап, операцияны кішігірім қадамдарға бөлуге болады:

- Егер кіріс тасымалдау кубиті  $|1\rangle$  күйінде болса, кубиті Б регистріне түрлендіріледі.
  - Егер А кубиті  $|1\rangle$  күйінде болса, оны қайтадан бұрылады.
- Осыдан соң осылай 3 суреттегідей СХ шлюздері арқылы қол жеткізе аламыз:



Сурет 3. СХ клапанын қолдана отырып, қосынды клапанды визуализациялау.

Кресттер мақсатты битті білдіреді, ал боялған шеңберлер бақылау биттерін білдіреді.

Мұнда сипатталған әдіс қарапайым және ыңғайлы болғанымен, ең тиімді емес, өйткені ол кванттық компьютерде классикалық компьютерлер қолданатын процестерді көбейтеді. Тағы бір жылдам әдіс-кванттық компьютерде кванттық Фурье түрлендіруі (QFT) арқылы қосу.

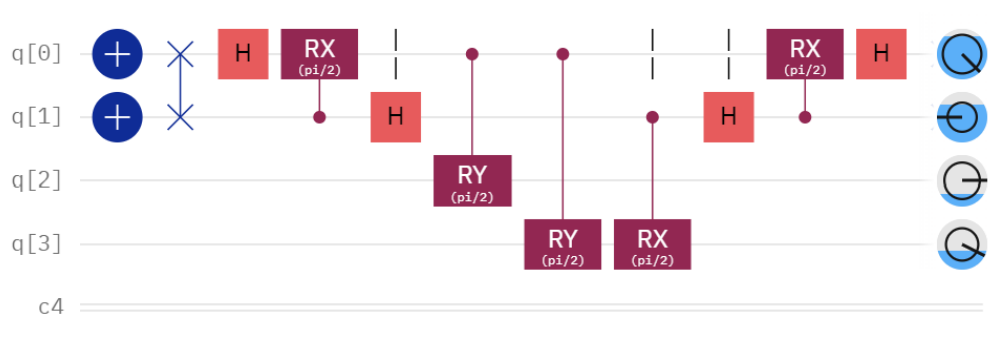
N-биттік қайтымды сумматор дизайны 3 биттік қосқыштың тікелей кеңеюі болып табылады. Қосымша N кубит уақытша тасымалдау биттері ретінде қолданылады. Бұл кубиттер оларды қолданғаннан кейін нөлге оралады, сондықтан оларды кейінгі есептеулер үшін пайдалануға болады. Сондықтан кіріс және шығыс деректерін тек  $2n$  кубит көмегімен сақтауға болатын болса да, есептеу үшін  $3N$  кубит пайдалану керек.

### 3. Нәтижелер

#### Жетілдірілген кванттық сумматор.

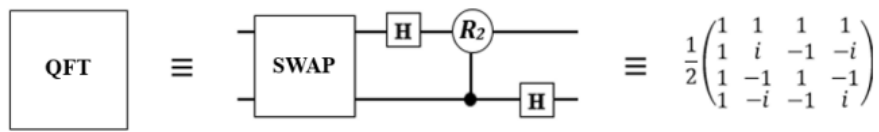
Ведралдың жұмысына сүйене отырып, кванттық толық сумматорды жасау үшін үш Тоффоли қақпасы және екі басқарылмайтын қақпа қолданылады. Кванттық тізбектердің көмегімен салынған қосқыш пен азайту. 4 суретте көрсетілген. 5 және сур. 6 сәйкес компьютерде азайту схемасы жоқ. Электронды компьютер қосу және азайтуды қосу формасы арқылы қосу амалына біріктіреді. Кванттық компьютерде қосу мен алуды электронды компьютердегі сияқты толықтауыш формасы арқылы қосу операциясына біріктіруге болады. Натурал бүтін санның толықтаушысы бастапқы бүтін санмен бірдей, ал теріс бүтіннің толықтаушысы 1-ден кейінгі таңба битінен басқа әрбір биттің кері мәні болып табылады. Таңбалы бүтін санды толықтауыш түріне түрлендіруге арналған кванттық схема көрсетілген. 7-суретте. 7-суретте кіріс бастапқы код а болса, шығыс а-ның толықтауышы болады; егер кірісте а толықтаушысы болса, шығыс а-ның бастапқы коды болады. 8-суретте қосу және азайту амалдары толықтауыш өңдеу блогы бар қосу амалдарына біріктірілген.

Жоғарыда айтылғандай, бірінші кванттық қосу алгоритмдері қайтымды есептеулер үшін қажетті кеңейтімдері бар классикалық аналогтарын көрсетті. Кванттық қосудың келесі алгоритмдері кубиттерді қосымша тасымалдауды пайдалануға негізделген, бірақ бәрібір классикалық модельді ұстанды. Кванттық компьютер үшін идеалды қосу алгоритмі оның классикалық аналогына ұқсамауы мүмкін, сондықтан кванттық Фурье түрлендіруіне (QFT) негізделген кванттық сумматор ойлап табылды (4-сурет).



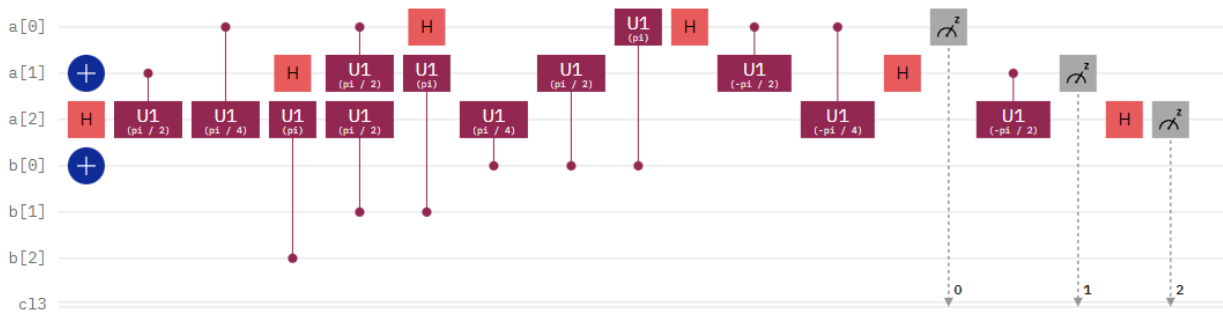
Сурет 4. Фурье кванттық түрлендіруге негізделген кванттық қосу схемасы

4 суреттегі бастапқы блок QFT-ді білдіреді. Оның математикалық формуласы 5 суретте көрсетілген.



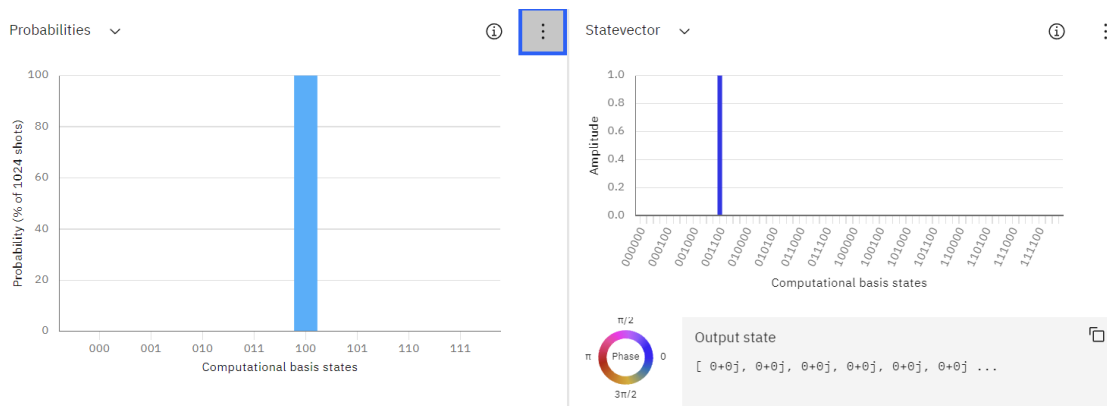
Сурет 5. Фурье кванттық түрлендіру схемасы және оның математикалық формасы.

QT көмегімен екі санды қорытындылау мысалы қарастырылады. 6-суретте IBM Composer негізіндегі QFT көмегімен екі санды қосудың кванттық схемасы көрсетілген. IBM Quantum Composer-бұл кванттық тізбектерді құру үшін операцияларды сүйреп апаруға және оларды нақты кванттық жабдықта немесе тренажерлерде іске қосуға мүмкіндік беретін кванттық бағдарламалаудың графикалық құралы.



Сурет 6. IBM Composer негізіндегі QFT көмегімен екі санды қосудың кванттық схемасы

Нақты уақыттағы визуализациялар бір күй векторының тренажерынан келеді, ол бірнеше рет атылуы мүмкін іске қосу параметрлерінде көрсетілген жүйеден өзгеше. Тренажер бастапқы санға негізделген нәтижелер жасау арқылы кездейсоқтық жасайды. Бастапқы мән-алгоритмге енгізілген бастапқы мән, ол жалған кездейсоқ сандарды шығарады және кванттық кездейсоқтықты имитациялайды.



Сурет 7. Нәтижені және statevector-ды визуализациялау және 5 кубиттік шектеу

Артқы опция ретінде берілетін statevector әдісі-бұл Aer схеманы модельдеу үшін қолданатын модельдеу әдісі, бірақ ол әлі де qasm симуляторы болып табылады, ол мемлекеттік вектордан гөрі өлшеу есептегіштерін қайтарады деп күтілуде.

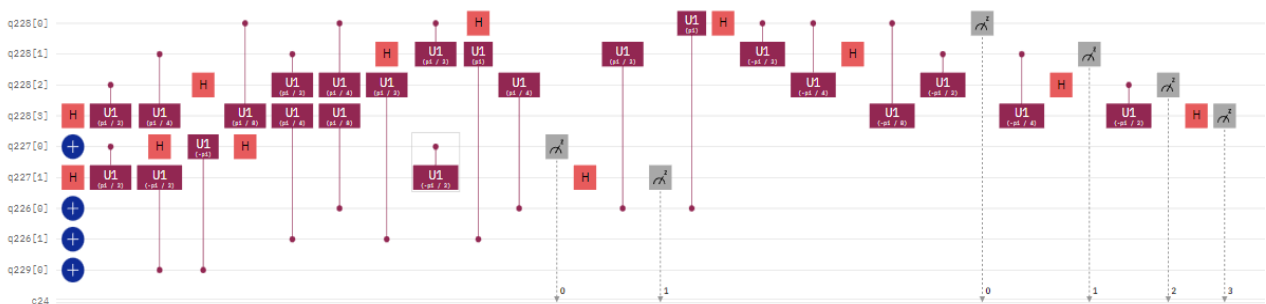
Әр түрлі кванттық тренажерлерде екі санды қосу және көбейту жүзеге асырылды және есептеу уақыты есептелді.

Кесте 4. Екі санды қосу

Кванттық симуляторлар	Кубиттер	Косу уақыты
<i>ibmq_gasm_simulator</i>	32	3.6816170215
<i>simulator_statevector</i>	32	4.4676377218
<i>simulator_extended_stabilizer</i>	63	4.1823140211

**Өзгермелі нүктелі санның кванттық көбейту**

Кванттық компьютерде ондық бөлшектерді тұрақты үтірмен көбейту әдісі ондық бөлшектерді бекітілген нүктелермен өңдеу үшін калибрлеу әдісін қолдану болып табылады. Калибрлеу әдісі  $Q_m$  арқылы белгіленеді, мұндағы  $m + n + 1$ -компьютердің сыйымдылығы. Мысалы,  $-0.52$  калибрлеу үшін қолданады,  $1,851E$  тіркелген нүкте санын алады (он алтылық форматта), ал  $0.680, Ae14$  (он алтылық форматта) тіркелген нүкте санын алу үшін калибрлеу үшін  $Q_{0,15}$  қолданады. Бұл екі  $Q_0$  ұсынылған бастапқы кодтың екі ондық таңбасының көбейтіндісі.  $(n-1)$ ,  $Q_0$  көмегімен масштабталған ондық сан.  $(2n-1)$  болып табылады.



Сурет 8. IBM Composer негізіндегі QFT көмегімен екі санды көбейтудің кванттық схемасы

8 суретте бір уақытта бір текшеде Фурье кванттық түрлендіруі есептеледі. Кванттық регистрдің  $n$ -ші кубитіне бір Хадамард клапанын қолдана отырып, содан кейін  $P_i$ -ге тең параметрлері бар қайталанатын фазалық бұрылыстар қолданылады, олар өсіп келе жатқан деңгейге бөлінеді.

Күй  $|F(\psi(\text{reg}_a))\rangle |F(\psi(\text{reg}_a + \text{reg}_b))\rangle$  кубитті  $\text{reg}_b$ -ге тәуелді кванттық Фурье түрлендіруді қолдана отырып түрлендіреді. Кванттық схеманы құрғаннан кейін бүкіл алгоритм Python тілінде IBM Quantum Lab-да жүзеге асырылды. Кванттық кодты жазу үшін Qiskit кітапханалары қолданылды. Qiskit-бұл кванттық компьютерлермен импульстар, схемалар және қолданбалы Модульдер деңгейінде жұмыс істеуге арналған ашық SDK болып табылады. Qiskit құрамына кванттық клапандардың толық жиынтығы және көптеген дайын схемалар кіреді, сондықтан оны Qiskit-ті зерттеу және қосымшаларды әзірлеу үшін пайдалануға болады. Оны нақты кванттық процессорларда жұмыс істеуге және жоспарлауға болады және бұлтты процессорларда, CPU және GPU-де кванттық бағдарламаларды басқару үшін Qiskit Runtime қолданылады.

```

Enter the multiplicand. 100
Enter the multiplier. 101

/tmp/ipykernel_59/2096073847.py:17:
er than 3 months after the release
  qc.cu1(pie / float(2**(i + 1)), 1
/tmp/ipykernel_59/2096073847.py:32:
er than 3 months after the release
  qc.cu1(factor*pie / float(2**(i))
/tmp/ipykernel_59/2096073847.py:43:
er than 3 months after the release
  qc.cu1(-1 * pie / float(2**(n - i

{'010100': 2}
Время: 4.1626787185668945
    
```

Сурет 9. IBM Quantum Leap негізіндегі QT көмегімен екі санды көбейту нәтижесі

9 суретте көрсетілгендей, екі санды көбейту үшін екілік жүйеде 4 және 5 сандары алынды. Уақыт бойынша 4 секунд ішінде нәтижесінде 010100 санын шығарды. Оны 16лық жүйеге ауыстыратын болсақ, 20 санын береді.

#### 4. Қорытынды

Бұл мақалада кванттық компьютерде енгізілген арифметикалық амалдар қарастырылады және де сәйкесінше, арифметикалық операциялар кванттық компьютерде орындалды. Алдымен кванттық қосынды және қосымша кванттық қосынды жасалды. Содан кейін тұрақты нүктелі сандарды ұсыну және есептеу әдістері талқыланды. Осыдан кейін жалпы кванттық көбейткіш және тұрақты нүктелі сандық бөлгіш жасалды. Кванттық арифметиканың дамыған блоктарына сүйене отырып, жоғары дәлдіктегі ондық көбейту мен бөлуді орындауға болады. Жұмыс нәтижесінде кванттық компьютерде сумматорды есептеудің жаңа әдісі келтірілді. Бұл әдіс кванттық Фурье түрлендіруін(QFT) қолданды және биттерді уақытша беру қажеттілігін жою арқылы қосу үшін қажет кубиттердің санын азайтады. Бұл тәсіл кванттық регистрде классикалық санды кодтамай, кванттық суперпозицияға классикалық санды қосуға мүмкіндік береді. Жұмыс нәтижесінде екі санды қосу және көбейту операциялары IBM Quantum Lab-та кванттық симуляторларда жүзеге асырылды. Кванттық схемалар IBM Composer-де салынды. Осы жұмыстың негізінде біз болашақта өзгермелі нүктелік сандық операциялардың кванттық нұсқаларын әзірлеуді және қарапайым электронды компьютерлерде қолданылатын сандық жүйелердің кванттық нұсқаларын жүзеге асыруды жоспарлап отырмыз.

#### Алғыс

Зерттеу жұмыстары Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің № AP09260564 жобасы бойынша гранты есебінен қаржыландырылды.

#### Список использованных источников:

- 1 P.W. Shor, *Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer*, *SIAM J.Sci.Statist.Comput.* 26(5) (1997) 1484–1509.
- 2 V. Vedral et al., *Quantum networks for elementary arithmetic operations*, *Phys. Rev. A* 54(1) (1996) 147–153.
- 3 P. Gossett, *Quantum carry-save arithmetic*, arXiv: quant-ph/9808061v2 (1998) 1–12.
- 4 T.G. Draper, *Addition on a quantum computer*, arXiv: quant-ph/0008033v1 (2000) 1–8.
- 5 S.A. Cuccaro et al., *A new quantum ripple-carry addition circuit*, arXiv: quant-ph/0410184v1 (2004) 1–9.
- 6 Y. Takahashi and N. Kunihiro, *A linear-size quantum circuit for addition with no ancillary qubits*, *Quantum Info. Comput.* 5(6) (2005) 440–448.
- 7 T.G. Draper et al., *A logarithmic-depth quantum carry-lookahead adder*, *Quantum Info. Comput.* 6(4) (2006) 351–369.
- 8 Y. Takahashi and N. Kunihiro, *A fast quantum circuit for addition with few qubits*, *Quantum Info. Comput.* 8(6) (2008) 636–649.
- 9 J.J. Alvarez-Sanchez et al., *A quantum architecture for multiplying signed integers*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 128(1) (2008) 012013.

#### References:

- 1 P.W. Shor, *Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer*, *SIAM J.Sci.Statist.Comput.* 26(5) (1997) 1484–1509.
- 2 V. Vedral et al., *Quantum networks for elementary arithmetic operations*, *Phys. Rev. A* 54(1) (1996) 147–153.
- 3 P. Gossett, *Quantum carry-save arithmetic*, arXiv: quant-ph/9808061v2 (1998) 1–12.
- 4 T.G. Draper, *Addition on a quantum computer*, arXiv: quant-ph/0008033v1 (2000) 1–8.
- 5 S.A. Cuccaro et al., *A new quantum ripple-carry addition circuit*, arXiv: quant-ph/0410184v1 (2004) 1–9.
- 6 Y. Takahashi and N. Kunihiro, *A linear-size quantum circuit for addition with no ancillary qubits*, *Quantum Info. Comput.* 5(6) (2005) 440–448.
- 7 T.G. Draper et al., *A logarithmic-depth quantum carry-lookahead adder*, *Quantum Info. Comput.* 6(4) (2006) 351–369.
- 8 Y. Takahashi and N. Kunihiro, *A fast quantum circuit for addition with few qubits*, *Quantum Info. Comput.* 8(6) (2008) 636–649.
- 9 J.J. Alvarez-Sanchez et al., *A quantum architecture for multiplying signed integers*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 128(1) (2008) 012013.