

УДК 004.31, 538.945

І.Д. ВОЙТОВИЧ, О.А. ПАСТУХ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФОРМАЛІЗМ ВЗАЄМОДІЙ МЕДИЧНИХ КВАНТОВИХ НАНОРОБОТІВ З КВАНТОВИМИ НАНООБ'ЄКТАМИ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ НА КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРАХ

Анотація. Стаття присвячена математичному формалізму взаємодій між медичними квантовими нанороботами і квантовими нанооб'єктами та їх моделюванню на квантових комп'ютерах.

Ключові слова: медичний наноробот, нанооб'єкт, медичний квантовий наноробот, квантовий нанооб'єкт, підсистема квантових інтелектуальних сенсорів, квантовий біт, квантовий комп'ютер.

Аннотация. Статья посвящена математическому формализму взаимодействий между медицинскими квантовыми нанороботами и квантовыми нанообъектами, а также их моделированию на квантовых компьютерах.

Ключевые слова: медицинский наноробот, нанообъект, медицинский квантовый наноробот, квантовый нанообъект, подсистема квантовых интеллектуальных сенсоров, квантовый бит, квантовый компьютер.

Abstract. The paper is devoted to the mathematical formalism of the interaction between medical quantum nanorobots and quantum nanoobjects, and simulation of them on quantum computers.

Keywords: medical nanorobot, nanoobject, medical quantum nanorobot, quantum nanoobject, subsystem of quantum intelligent sensors, quantum bit, quantum computer.

1. Вступ

За останні роки рівень технологій виготовлення різних мініатюрних пристроїв досягнув діапазону нанорозмірів. Тому в XXI ст. можна говорити про нанотехнології.

Одним із актуальних напрямів нанотехнологій є розробка нанороботів (наномашин) для найрізноманітніших галузей народного господарства, особливо медицини (медичних нанороботів).

Основу розробки медичних нанороботів складають процеси: моделювання [1], проектування [2] та виготовлення [3]. Наведені процеси є важливими і тісно пов'язані між собою. Однак через те, що процес моделювання є початковим етапом у розробці медичних нанороботів, його якість впливає на якість процесів проектування та виготовлення, які слідує за ним. Серед множини чинників, що впливають на якість процесу моделювання, важливими є засоби математичного моделювання та засоби обчислювальної техніки. В свою чергу, важливими засобами математичного моделювання є математичні моделі, які повинні з високою точністю та повнотою описувати медичні нанороботи, зовнішнє середовище (яке формується з нанооб'єктів), в якому вони перебувають, та їх взаємодію, а засобами обчислювальної техніки є комп'ютери, які повинні володіти достатніми обчислювальними ресурсами для реалізації відповідних процесів математичного моделювання.

Вимогам повноти та високої точності для математичної формалізації медичних нанороботів, їх взаємодії з нанооб'єктами, які формують зовнішнє середовище для них, задовольняють шредінгерівські моделі квантової фізики та квантової хімії, зокрема, фемтохімії [4], оскільки у багатьох випадках фізичні розміри медичних нанороботів та нанооб'єктів, з якими вони взаємодіють, співрозмірні довжинам їх хвиль де Бройля.

Однак повнота і висока точність потребують своєї плати. Виконання процесів мате-

матичного моделювання для медичних нанороботів та їх взаємодії з нанооб'єктами на основі шредінгерівських моделей потребують надзвичайно великих обчислювальних ресурсів, якими не володіють навіть найкращі суперкомп'ютери світу: "Jaguar" (Національний центр комп'ютерних досліджень у м. Окриджі, штат Теннесі, США. Число процесорних ядер 224162, пікова продуктивність 2276Tflops, середня тактова частота 2,2ГГц, об'єм оперативної пам'яті 353,2ТБ, об'єм дискової пам'яті 10ПБ $\approx 10^{16}$ Б), "Nebulae" (Національний суперкомп'ютерний центр в м.Шеньчжень, Китай. Число процесорних ядер 120640, пікова продуктивність 2984Tflops, середня тактова частота 2,66ГГц, об'єм дискової пам'яті 10ПБ $\approx 10^{16}$ Б), "Roadrunner" (Лос-Аламосська національна лабораторія в Нью-Мексіко, США. Число процесорних ядер 122400, пікова продуктивність 1376Tflops, середня тактова частота 2,73ГГц, об'єм оперативної пам'яті 98ТБ, об'єм дискової пам'яті 166ТБ $\approx 10^{14}$ Б). Це пов'язано з тим, що шредінгерівські моделі враховують квантову суперпозицію, квантову інтерференцію та експоненціальне зростання розмірності фазового простору, в якому математично описуються стани медичного наноробота, нанооб'єкта і взаємодія між ними. А це, в свою чергу, вимагає експоненційно великих витрат часу та пам'яті.

Тому на даний час широко використовуються напівемпіричні та інші моделі [1], які не володіють достатньою повнотою та точністю опису, але до певної міри на основі них можна виконувати процеси математичного моделювання для медичних нанороботів, їх взаємодії з нанооб'єктами, використовуючи суперкомп'ютери.

Але за останні роки відбулися принципові досягнення в обчислювальній техніці. На різних елементних базах, що представляють собою квантові системи, експериментально реалізовано дослідні зразки квантових комп'ютерів [5], які володіють квантовими ефектами: квантовою суперпозицією, квантовою інтерференцією та експоненціальним зростанням розмірності фазового простору. Саме ці ефекти дають принципові переваги квантовим комп'ютерам в обчислювальних можливостях над найсучаснішими суперкомп'ютерами, які використовують у своїй роботі закони класичної фізики. Таким чином, для квантових комп'ютерів не існує перешкод у вигляді квантової суперпозиції, квантової інтерференції та експоненціального зростання розмірності фазового простору. Тому логічною є ідея виконання процесів математичного моделювання для медичних нанороботів та їх взаємодії з нанооб'єктами, які базуються на шредінгерівських моделях (а тому враховують їх квантову природу) на квантових комп'ютерах. А це, в свою чергу, можливо за умови розв'язання такої задачі.

Постановка задачі

Розглянути математичний формалізм взаємодій між медичними нанороботами і нанооб'єктами та їх моделювання на квантових комп'ютерах.

2. Перехід від медичних нанороботів до медичних квантових нанороботів

2.1. Медичні нанороботи

Оскільки вичерпна інформація стосовно медичних нанороботів наведена у роботах [1–3], то розглянемо лише частину її, яка є найважливішою для даної роботи, а саме компоненти, що повинні входити до складу медичних нанороботів.

Як відомо [6], до складу медичних нанороботів повинні входити такі компоненти (рис. 1): 1 – захоплювач маніпулятора, 2 – телескопічний маніпулятор, 3 – наноманіпулятор, 4 – центральний наноманіпулятор, 5 – сенсор біомолекул, 6 – акустичний сенсор, 7 – сенсор параметрів середовища, 8 – дипольна радіоантена, 9 – стикувальний конвектор, 10 – джгутик переміщення, 11 – присосок джгутика, 12 – гнізда наноманіпуляторів.

Для даної роботи важливими є сенсорні компоненти та комп'ютер (рис. 2), а тому розглядатимемо їх як єдину підсистему і називатимемо її, відповідно до роботи [7], інтелектуальні сенсори.

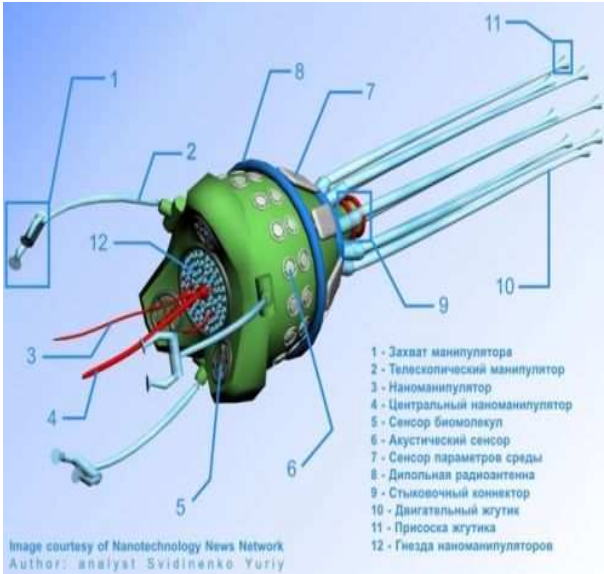


Рис. 1. Загальний вид медичного наноробота [6]

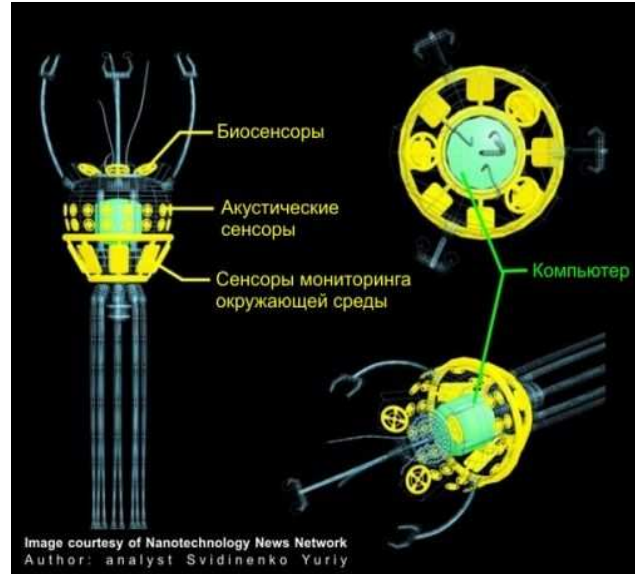


Рис. 2. Компоненти, які утворюють підсистему інтелектуальних сенсорів медичного наноробота [6]

2.2. Математичний формалізм медичних квантових нанороботів та їх взаємодії з квантовими нанооб'єктами, які утворюють для них зовнішнє середовище

Підхід до математичного опису медичних нанороботів, нанооб'єктів (які утворюють зовнішнє середовище для медичних нанороботів) та взаємодії між ними, який базується на класі шредінгерівських моделей, обумовлює розгляд медичних нанороботів і нанооб'єктів як квантові системи, а взаємодію між ними – як взаємодію між квантовими системами. Щоб відобразити це у семантиці слів, медичні нанороботи називатимемо медичними квантовими нанороботами, а нанооб'єкти – квантовими нанооб'єктами.

З розгляду медичних квантових нанороботів як квантових систем випливає, що їх підсистеми інтелектуальних сенсорів, через які вони безпосередньо взаємодіють з квантовими нанооб'єктами, слід розглядати також як квантові системи, а тому називатимемо їх підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів.

Взаємодії між підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та квантовими нанооб'єктами поділяються на два види: активні взаємодії (впливи станів підсистем квантових інтелектуальних сенсорів на стани квантових нанооб'єктів, що відповідають процесам лікування квантових нанооб'єктів та керування їх станами з боку медичних квантових нанороботів) і пасивні взаємодії (впливи станів квантових нанооб'єктів на стани підсистем квантових інтелектуальних сенсорів, що відповідають процесам моніторингу середовища, в якому перебувають медичні квантові нанороботи).

Як відомо [8, 9], математично повним описом станів квантових систем є їх хвильові функції $|\psi\rangle$ ($|\psi\rangle$ – символіка П. Дірака [10]). Множина $\{|\psi\rangle\}$ можливих станів квантових систем утворює фазовий простір, який є гільбертовим простором. Стани підсистем квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та квантових нанооб'єктів не є виключеннями, а тому математично повно вони можуть бути описані у вигляді точок фазового простору, які є хвильовими функціями.

Очевидним є те, що процеси взаємодії між підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та квантовими нанооб'єктами математично представляють квантову динаміку об'єднаних з них квантових систем у фазовому просторі, який утворюється з тензорного добутку фазового простору станів підсистем квантових

інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів і фазового простору станів квантових нанооб'єктів.

Уперше математичний опис квантового робота (частковим видом якого можна вважати підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів і квантові нанооб'єкти) та його взаємодії із зовнішнім квантовим середовищем, базуючись на математичному формалізмі квантових обчислень, запропонував П.Беньов у 1998 р. [11]. Цим самим він розробив теоретичні засади моделювання на квантових комп'ютерах процесів еволюції квантового робота та взаємодії квантового робота із зовнішнім квантовим середовищем.

Суть його ідеї полягає в тому, що стан квантового робота кодується у хвильову функцію однієї частини квантових біт регістра квантового комп'ютера, а стан зовнішнього

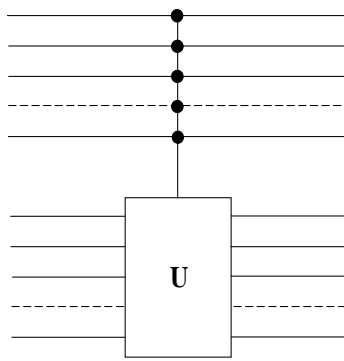


Рис. 3. Квантова логічна схема, яка зображує квантові обчислювальні процеси у квантовому комп'ютері, що моделюють активні та пасивні взаємодії між квантовим роботом і зовнішнім квантовим середовищем

квантового середовища кодується у хвильову функцію іншої частини квантових біт регістра квантового комп'ютера. Процеси взаємодії між ними описуються квантовими логічними елементами виду Controlled-U, які діють на квантові біти регістра квантового комп'ютера і цим самим реалізують у ньому квантові обчислювальні процеси. В залежності від конкретного виду взаємодії матриця квантового логічного елемента Controlled-U набуває того чи іншого виду. У випадку моделювання активної взаємодії квантового робота із зовнішнім квантовим середовищем квантові біти, що відповідають квантовому роботу, є керуючими у Controlled-U, а квантові біти, що відповідають зовнішньому квантовому середовищу, є керованими у Controlled-U (рис. 3). І навпаки, у випадку моделювання пасивної взаємодії квантового робота із зовнішнім квантовим середовищем, квантові біти, що відповідають зовнішньому квантовому середовищу, є керуючими у Controlled-U, а квантові біти, що відповідають квантовому роботу, є керованими у Controlled-U (рис. 3).

Таким чином, на основі результатів П.Беньова [11], розглядаючи замість квантового робота підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів, а замість квантового середовища квантові нанооб'єкти, на квантових комп'ютерах можна моделювати впливи станів підсистем квантових інтелектуальних сенсорів на стани квантових нанооб'єктів, що відповідають процесам лікування квантових нанооб'єктів та керування їх станами з боку медичних квантових нанороботів; впливи станів квантових нанооб'єктів на стани підсистем квантових інтелектуальних сенсорів, що відповідають процесам моніторингу середовища, в якому перебувають медичні квантові нанороботи.

3. Математичний формалізм взаємодій між медичними квантовими нанороботами та квантовими нанооб'єктами і моделювання їх на квантових комп'ютерах

Оскільки підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та квантові нанооб'єкти є квантовими системами, то параметри, якими вони характеризуються, містять невизначеність у їх значеннях (причиною є принцип невизначеності В. Гейзенберга) і представляють собою квантові нечіткі дані [12, 13]. А тому процеси взаємодій (активних, пасивних) між ними слід розглядати як обмін квантовими нечіткими даними. Важливим є й те, що реальні умови, в яких повинні працювати медичні квантові нанороботи, є настільки складними, що неможливо врахувати навіть найбільш значимі фактори, які впливають на процеси взаємодії між ними та квантовими нанооб'єктами. Це спричиняє невизначеність у прийнятті рішень лікарями під час проведення процесів ліку-

вання над квантовими нанооб'єктами за допомогою медичних квантових нанороботів і, як наслідок, відображається у нечітких даних команд для активної взаємодії між підсистемою квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та квантовими нанооб'єктами. Також це обумовлено тим, що знання лікарів часто є статистичними і тому містять невизначеність у даних. Все це вказує на актуальність розробки математичного формалізму для моделювання на квантових комп'ютерах вводу нечітких даних у підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів та їх активну взаємодію на основі квантових нечітких даних з квантовими нанооб'єктами. Це стосується і математичного формалізму для моделювання на квантових комп'ютерах процесів пасивної взаємодії, які відповідають моніторингу зовнішнього квантового середовища, що здійснюється медичними квантовими нанороботами (процесів вимірювання підсистемою квантових інтелектуальних сенсорів параметрів квантових нанооб'єктів). Актуальність у розробці такого роду математичного формалізму зазначається також у роботі [14], в якій одержано ряд важливих результатів.

Такий підхід може забезпечити повноту та високу точність моделювання взаємодій між медичними квантовими нанороботами та квантовими нанооб'єктами на квантових комп'ютерах.

3.1. Математичний формалізм активних взаємодій та їх моделювання на квантових комп'ютерах

Суть лікувальних процесів (а також процесів керування) над квантовими нанооб'єктами за допомогою медичних квантових нанороботів полягає у перетворенні їх початкових станів у стани, що описуються апіорно заданими хвильовими функціями, які відповідають нечітким даним (знанням) лікаря. Оскільки такі процеси представляють активні взаємодії підсистем квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів із квантовими нанооб'єктами, то їх моделювання на квантових комп'ютерах представляє послідовність дій: нечіткі дані (знання) лікаря кодуються у відповідні стани підсистем квантових інтелектуальних сенсорів, а пізніше цих станів набувають квантові нанооб'єкти. Для конструктивності пояснення розглядається приклад.

Нехай нечіткі дані fA лікаря задаються індикаторною функцією (функцією належності) $I_{fA}(u_i)$, $i = 1, 2$. Тоді достатньо одного керуючого квантового біта q_1 у реєстрі квантового комп'ютера для моделювання процесу кодування їх у стан підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів. Нехай стан квантового нанооб'єкта можна представити також одним квантовим бітом q_2 реєстра квантового комп'ютера, який буде керованим квантовим бітом. Використовуючи квантовий логічний елемент Controlled-NOT (що моделює процес активної взаємодії), який є одним з множини квантових логічних елементів Controlled-U, та квантовий логічний елемент $U_{f \rightarrow qf}$ [15], можна розглянути математично формалізований алгоритм квантово-логічної програми для квантового комп'ютера з реєстром, який містить два квантових біти q_1 , q_2 , що моделює лікувальний процес (або процес керування) над квантовим нанооб'єктом за допомогою підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота.

Алгоритм квантово-логічної програми:

1) стани керуючого квантового біта q_1 та керованого квантового біта q_2 реєстра квантового комп'ютера підлягають ініціалізації, тобто переводяться у стан $|0\rangle$;

2) на керуючий квантовий біт q_1 діє квантовий логічний елемент:

$$U_{I_{fA}} = U_{f \rightarrow qf} \cdot W,$$

де W – квантовий логічний елемент Уолша-Адамара [16–18];

$U_{f \rightarrow qf}$ – квантовий логічний елемент, матриця якого має вид

$$\begin{pmatrix} I_{fA}(u_1) \cdot \sqrt{2} & 0 \\ 0 & I_{fA}(u_2) \cdot \sqrt{2} \end{pmatrix},$$

елементами головної діагоналі якої є відповідні значення індикаторної функції $I_{fA}(u_i)$, $i = 1, 2$ нечітких даних fA , помножені на нормуючий множник $\sqrt{2}$ [15];

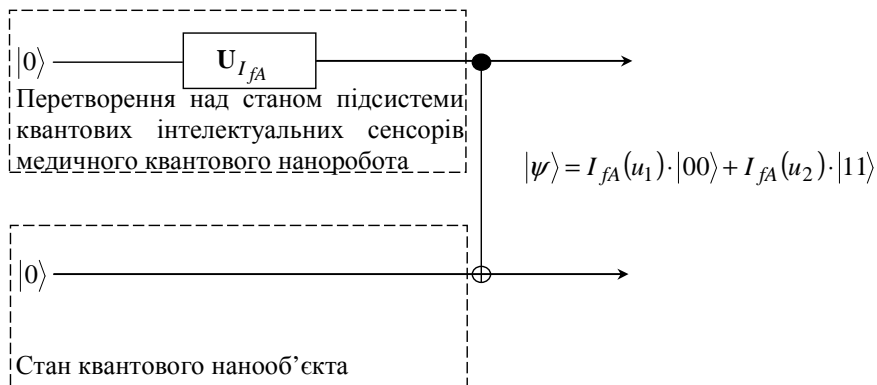


Рис. 4. Квантова логічна схема для моделювання на квантових комп'ютерах лікування квантових нанооб'єктів підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів хвильовою функцією

$$|\psi\rangle = I_{fA}(u_1) \cdot |00\rangle + I_{fA}(u_2) \cdot |11\rangle,$$

з якої видно, що квантовий біт q_2 , який моделює стан квантового нанооб'єкта, описується аналогічно до квантового біта q_1 , що моделює стан підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового робота і відповідає індикаторній функції $I_{fA}(u_i)$, $i = 1, 2$ нечітких даних fA . Щоб й необхідно було виконати.

3.2. Математичний формалізм пасивних взаємодій та їх моделювання на квантових комп'ютерах

Поряд з функцією медичних квантових нанороботів активно впливати на стани квантових нанооб'єктів (здійснювати над ними квантове лікування, квантове керування) за допомогою підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів важливою функцією є моніторинг (діагностика) їх станів. Тобто, важливою функцією медичних квантових нанороботів, точніше їх підсистем квантових інтелектуальних сенсорів, є вимірювання (томографія) станів квантових нанооб'єктів. Такими квантовими нанооб'єктами можуть бути, наприклад, білки-мішені (які відповідають тим чи іншим видам захворювань), а саме їх активні центри, через які вони взаємодіють; білки, що представляють зовнішню оболонку вірусів; різні ізомери органічних молекул, що знаходяться в організмі людини (наприклад, коли органічні молекули з відповідними хвильовими функціями сприймаються організмом, а їх ізомери з відповідними їм хвильовими функціями розглядаються як чужорідні об'єкти для організму людини).

Для конструктивності пояснення процесів моделювання на квантових комп'ютерах таких пасивних взаємодій між підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медич-

3) на систему квантових біт q_1 і q_2 діє квантовий логічний елемент Controlled-NOT, у якому квантовий біт q_1 є керуючим, а квантовий біт q_2 є керованим.

Наочно це зображується за допомогою квантової логічної схеми, яка наведена на рис. 4.

На виході стан регістра квантового комп'ютера описується

них квантових нанороботів та квантовими нанооб'єктами розглядається приклад.

Нехай потрібно змодельювати на квантовому комп'ютері процес вимірювання невідомого стану

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

квантового нанооб'єкта за допомогою підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота.

Тоді достатньо одного керуючого квантового біта q_1 у регістрі квантового комп'ютера для моделювання стану $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ квантового нанооб'єкта та одного керуваного квантового біта q_2 для моделювання стану підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота. Використовуючи квантовий логічний елемент Controlled-NOT, що моделює процес пасивної взаємодії, можна розглянути математично формалізований алгоритм квантово-логічної програми для квантового комп'ютера з регістром, який містить два квантових біти q_1, q_2 , що моделює процес вимірювання стану $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ квантового нанооб'єкта за допомогою підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота.

Алгоритм квантово-логічної програми:

1) стан $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ керуючого квантового біта q_1 , який моделює стан квантового нанооб'єкта, може бути утворений, наприклад, за допомогою послідовної дії квантових логічних елементів Адамара H та зміни фази Φ на попередню його ініціалізацію $|0\rangle$ [19–21];

2) стан керуваного квантового біта q_2 підлягає ініціалізації, тобто переводиться в $|0\rangle$;



Рис. 5. Квантова логічна схема для моделювання на квантових комп'ютерах процесу вимірювання стану квантових нанооб'єктів підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів

з якої видно, що квантовий біт q_2 , який моделює стан підсистеми квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота, описується аналогічно до квантового біта q_1 , що моделює стан квантового нанооб'єкта, тобто відповідає вимірюваному стану.

Як відомо [15], зчитування даних з регістра квантового комп'ютера – це процес перетворення квантових нечітких даних у формат нечітких даних, який описується композицією операторів

$$\text{SQRT} \circ \text{SQR} \circ \text{ABS},$$

де ABS – оператор обчислення абсолютного значення;

3) на систему квантових біт q_1 і q_2 діє квантовий логічний елемент Controlled-NOT, у якому квантовий біт q_1 є керуючим, а квантовий біт q_2 є керуваним.

Наочно це зображується за допомогою квантової логічної схеми, яка наведена на рис. 5.

На виході стан регістра квантового комп'ютера описується хвильовою функцією

$$|\tilde{\psi}\rangle = \alpha \cdot |00\rangle + \beta \cdot |11\rangle,$$

SQR – оператор піднесення до квадрата;

SQRT – оператор добування квадратного кореня.

Таким чином, результат моделювання на квантовому комп'ютері вимірювання стану квантового нанооб'єкта підсистемою квантових інтелектуальних сенсорів медичного квантового наноробота представляється нечіткими даними, які є частковим видом квантових нечітких даних [15].

4. Висновки

1. Розглянуто математичний формалізм активних взаємодій медичних квантових нанороботів з квантовими нанооб'єктами та їх моделювання на квантових комп'ютерах, що дозволило сформулювати науково-технічні основи моделювання процесів лікування (та керування) підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів станів квантових нанооб'єктів.

2. Розглянуто математичний формалізм пасивних взаємодій медичних квантових нанороботів з квантовими нанооб'єктами та їх моделювання на квантових комп'ютерах, що дозволило сформулювати науково-технічні основи моделювання процесів вимірювання (моніторингу) станів квантових нанооб'єктів підсистемами квантових інтелектуальних сенсорів медичних квантових нанороботів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтович И.Д. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов. Ч. 1 / И.Д. Войтович, А.И. Золот, Н.И. Ходаковский // Математичні машини і системи. – 2009. – № 4. – С. 147 – 160.
2. Войтович И.Д. Основные принципы проектирования и изготовления медицинских нанороботов / И.Д. Войтович, А.И. Золот, Н.И. Ходаковский // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 95 – 104.
3. Войтович И.Д. Основные принципы изготовления медицинских нанороботов / И.Д. Войтович, А.И. Золот, Н.И. Ходаковский // Математичні машини і системи. – 2010. – № 2. – С. 122 – 133.
4. Еремин В.В. Фемтохимия: квантовая динамика или химическая кинетика / В.В. Еремин, Н.Е. Кузьменко // Природа. – 2005. – № 8. – С. 3 – 10.
5. Нильсен М. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг; под ред. М.Н. Вялого, П.М. Островского. – М.: Мир, 2006. – 822 с.
6. Свидиенко Ю.Г. Нанороботы: взгляд изнутри [Электронный ресурс] / Ю.Г. Свидиенко. – Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru>.
7. Войтович И.Д. Интеллектуальные сенсоры / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 626 с.
8. Вакарчук І.О. Квантова механіка / Вакарчук І.О. – Львів: ЛДУ ім. І. Франка, 2007. – 848 с.
9. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки / Юхновський І.Р. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.
10. Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики / Дирак П.А.М. – М.: Наука, 1979. – 480 с.
11. Бенев П. Квантовые роботы и окружающая среда / П. Бенев // Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. – 1999. – № 1. – С. 167 – 181.
12. Пастух О.А. Квантові нечіткі множини з комплексно значною характеристичною функцією і їх використання для квантового комп'ютера / О.А. Пастух // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – Т. 1, № 2. – С. 158 – 161.
13. Пастух О.А. Уточнення означення поняття квантової нечіткої множини на основі уточнення області значення її індикаторної функції / О.А. Пастух // Науковий вісник НЛТУ України. – 2009. – Вип. 19.9. – С. 286 – 291.
14. Каган Е.В. Нечеткость квантового сознания: опыт реализации Animat [Электронный ресурс] / Е.В. Каган. – Режим доступа: http://vfc.org.ru/rus/events/conferences/consciousness_2009/theses/kagan.doc.
15. Пастух О.А. Архітектура та функціонування квантових нечітких інформаційних систем / О.А. Пастух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2009. – № 4 (51).

– С. 164 – 172.

16. Imai H. Quantum computation and information / H. Imai, M. Hayashi. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 279 p.

17. Крохмальський Т. Квантові комп'ютери: основи й алгоритми (короткий огляд) / Т. Крохмальський // Журнал фізичних досліджень. Інститут фізики конденсованих систем НАНУ. – 2004. – Т. 8, № 1. – С. 1 – 15.

18. Стин Э. Основы квантовых вычислений / Э. Стин // Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. – 2001. – Т. 2, № 2. – С. 3 – 57.

19. Квантовый компьютер и квантовые вычисления / Под ред. В.А. Садовниченко. – И.: Ижевская республиканская типография, 1999. – 288 с.

20. Китаев А. Классические и квантовые вычисления / Китаев А., Шень А., Вялый М. – М.: МЦНМО, 1999. – 192 с.

21. Ожигов Ю.И. Квантовые вычисления: учебно-методическое пособие / Ожигов Ю.И. – М.: МГУ, 2003. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2011