

Рис. 1. Діаграма вейвлет сигналу і його спектрограми

Висновки

1. Перспективність опанування технологією використання вейвлет-перетворення пов'язана з проведення можливого розпізнавання локальних особливостей сигналів (функцій), що важливе в багатьох областях радіотехніки, зв'язку, радіоелектроніки, геофізики і інших галузях науки і техніки
2. Використання вейвлет-перетворення в порівнянні з розкладанням сигналів на ряди Фурье здатна надати з набагато вищою точністю представляти локальні особливості сигналів, аж до розривів 1-го роду
3. Перспективою вейвлет-перетворення є і той факт, що алгоритми вейвлет-перетворення представлені в широко поширених системах зображень для каналів з обмеженою пропускнуною спроможністю, наприклад, для Інтернет
4. Унікальністю вейвлет-перетворення є розробка однокристальних дешевих мікропроцесорів ADV6xx (ADV601, ADV601LC, ADV611, ADV612), заснованих на вейвлет-перетвореннях і призначені для стискування і відновлення відеоінформації в реальному масштабі часу.

Література

1. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб.: Изд-во ВУС, 1999. – 208 с.
2. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во 000 «МОДУС», 1999. – 152 с.
3. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. – СПб.: Изд-воСПбГТУ, 1999. – 132 с.
4. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 5. – С. 465– 501.
5. Кноте Карстен. Разработка и исследование быстрых параметрически перестраиваемых ортогональных преобразований в базисах «wavelet»-функций: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Спб., 2000. – 16 с.
6. Новиков Л.В. Спектральный анализ сигналов в базисе вейвлетов // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10. – № 3. – С. 70– 76.

Надійшла 16.2.2009 р.

УДК 681.518.3+519.218.82

О.А. ПАСТУХ

Європейський університет, м. Тернопіль

РОЗРОБКА ОСНОВ МОДЕЛЮВАННЯ ОБРОБКИ НЕЧІТКИХ ДАНИХ КВАНТОВИМИ ІНФОРМАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ

Вперше розроблено основи моделювання: множення та сумування нечітких чисел на основі множення та сумування квантових нечітких чисел, функціональних відображень нечіткої змінної на основі функціональних відображень квантової нечіткої змінної, тах–• композиційного правила виведення із Larsen імплікацією у нечітких інформаційних системах на основі квантових нечітких множин, алгебраїчного перетину нечітких множин на основі алгебраїчного перетину квантових нечітких множин у квантовому процесорі квантових інформаційних систем.

Design bases are first developed: increase and sad unclear numbers on the basis of increase and sad quantum unclear numbers, functional reflections of unclear variable on the basis of functional reflections of quantum unclear variable, composition rule of leadingout from Larsen by an ifthen in the unclear informative systems on the basis of quantum unclear plurals, crossings of algebra of unclear plurals on the basis of crossing of

Вступ

Використання нечітких інформаційних систем (f -систем) у розв'язуванні прикладних задач дає багато переваг у порівнянні з використанням інформаційних систем (ІС) для розв'язування цих же прикладних задач. До таких переваг відносяться – менші витрати обчислювальних ресурсів: менші витрати часових ресурсів та ресурсів пам'яті, більша адаптованість до вербального управління та логічного виведення та ряд ін. Поряд з цим, функціонування f -систем на основі використання, як основного обчислювального пристрою класичного процесора, в розрізі сучасних потреб обробки надвеликих об'ємів даних, потребує суттєвого покращення у швидкодії їх роботи. Це може бути досягнуто шляхом використання, як основного обчислювального пристрою, у їх роботі квантового процесора (q -процесора), який містить квантовий регістр (q -регістр) і цим самим f -системи переходять у квантові інформаційні системи (q -системи). Але f -системи працюють з нечіткими даними, а q -процесор працює з квантовими даними, зокрема, як вперше було введено у роботах [1-4] автором, квантовими нечіткими даними. Слушно відмітити, що вперше були у цих роботах [1-4] введені автором математичні моделі квантових нечітких даних у вигляді квантової нечіткої множини та її частинних видів – квантових нечітких чисел, зокрема, і квантових нечітких двійкових чисел. В даній роботі вперше вводяться основи математичного моделювання обробки нечітких даних q -системами на базі вперше введених автором у роботах [1-4] математичних моделей у вигляді квантових нечітких множин і квантових нечітких чисел, зокрема, квантових нечітких двійкових чисел та дії на них квантових унітарних операторів.

Огляд існуючих відомостей

Основи математичних моделей нечітких даних і їх обробки f -системами наведено в багатьох літературних джерелах, наприклад, [5-8], основи математичних моделей квантових нечітких даних і в свою чергу представлення нечітких даних у q -регістрі квантових інформаційних систем за допомогою квантових нечітких множин та квантових нечітких чисел наведено в [1-4].

Мета

Розробити та обґрунтувати основи математичного моделювання обробки нечітких даних q -системами на базі вперше введених автором у роботах [1-4] понять: квантової нечіткої множини та квантових нечітких чисел, зокрема, квантових нечітких двійкових чисел та дії на них квантових унітарних операторів.

Основна частина

1. Реалізація множення та сумування нечітких чисел на основі множення та сумування квантових нечітких чисел у квантовому процесорі q -систем.

Відомо [8], що математична формалізація арифметичних операцій над нечіткими числами має вид

$$I_{fA_3 = fA_1 \circ fA_2}(u_3) = \max_{\{(u_1, u_2) \in fR = fA_1 \times fA_2 : u_1 \circ u_2 = u_3\}} \{I_{fA_1}(u_1) \cdot I_{fA_2}(u_2)\}, \quad (1)$$

де fA_1 , fA_2 – нечіткі числа з індикаторними функціями $I_{fA_1}(u_1)$, $I_{fA_2}(u_2)$; \circ – арифметична операція.

Очевидно є можливість представлення наведеного математичного формалізму арифметичних дій, зокрема множення та сумування, над нечіткими числами за допомогою математичного опису цих дій над квантовими нечіткими числами, зокрема, квантовими нечіткими двійковими числами. Це даватиме можливість реалізувати операції над нечіткими числами за допомогою операцій над квантовими нечіткими числами, які можуть бути виконані завдяки роботі q -процесора q -систем.

Якщо у формулі (1) за операнди взяти не нечіткі числа fA_1 , fA_2 з індикаторними функціями відповідно $I_{fA_1}(u_1)$, $I_{fA_2}(u_2)$, а квантові нечіткі числа qfA_1 , qfA_2 з індикаторними функціями відповідно $I_{qfA_1}(u_1)$, $I_{qfA_2}(u_2)$. А також на основі можливості представлення n -арної операції $n+1$ -арним відношенням, тобто бінарної операції над квантовими нечіткими числами qfA_1 , qfA_2 з індикаторними функціями відповідно $I_{qfA_1}(u_1)$, $I_{qfA_2}(u_2)$ у вигляді тернарного квантового нечіткого відношення $qfA_1 \times qfA_2 \times qfA_3$ з індикаторною функцією $I_{qfA_1 \times qfA_2 \times qfA_3}(u_1, u_2, u_3) = I_{qfA_1}(u_1) \cdot I_{qfA_2}(u_2) \cdot I_{qfA_3}(u_3)$, між квантовими нечіткими числами qfA_1 , qfA_2 , qfA_3 з індикаторними функціями $I_{qfA_1}(u_1)$, $I_{qfA_2}(u_2)$, $I_{qfA_3}(u_3)$. То формулу (1) можна представити

$$I_{qf\tilde{A}_3 = qfA_1 \circ qfA_2}(u_3) = \max_{\{(u_1, u_2, u_3) \in qfA_1 \times qfA_2 \times qfA_3 : u_1 \circ u_2 = u_3\}} \left| \mathbf{U} \{ I_{qfA_1}(u_1) \cdot I_{qfA_2}(u_2) \cdot I_{qfA_3}(u_3) \} \right|,$$

де \mathbf{U} – універсальний унітарний оператор.

Останній вираз може виражати означення мультиплікативної та адитивної операцій, що діє на операнди, які є квантовими нечіткими числами.

ЛЕМА 1. Дію мультиплікативної та адитивної операцій \circ над нечіткими числами fA_1, fA_2 з індикаторними функціями відповідно $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)$ і результатом дії нечітким числом fA_3 з індикаторною функцією $I_{fA_3}(u_3)$, що виражається формулою

$$I_{fA_3=fA_1 \circ fA_2}(u_3) = \max_{\{(u_1, u_2) \in fR=fA_1 \times qfA_2: u_1 \circ u_2 = u_3\}} \{I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)\}$$

можна виразити через \circ , що діють над квантовими нечіткими числовими операндами qfA_1, qfA_2, qfA_3 з індикаторними функціями $I_{qfA_1}(u_1) = I_{fA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2) = I_{fA_2}(u_2), I_{qfA_3}(u_3) = I_{fA_3}(u_3)$ за допомогою

$$I_{qf\tilde{A}_3=qfA_1 \circ qfA_2}(u_3) = \max_{\{(u_1, u_2, u_3) \in qfA_1 \times qfA_2 \times qfA_3: u_1 \circ u_2 = u_3\}} |U\{I_{qfA_1}(u_1) \cdot I_{qfA_2}(u_2) \cdot I_{qfA_3}(u_3)\}|$$

U – універсальний унітарний оператор, наприклад, **Controlled-Controlled NOT оператор Тоффолі**; причому $I_{qf\tilde{A}_3}(u_3) = I_{fA_3}(u_3)$.

1.1. Множення нечітких чисел на основі множення квантових нечітких чисел у квантовому процесорі q -систем. Мультиплікативну операцію над нечіткими числами fA_1, fA_2 з індикаторними функціями $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2), u_1, u_2 \in \{0, 1\}$ можна реалізувати за допомогою квантового процесора q -систем, який виконує мультиплікативну операцію над квантовими нечіткими числами qfA_1, qfA_2 з індикаторними функціями $I_{qfA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2)$.

Для цього спершу необхідно про нормувати індикаторні функції $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)$ у гільбертовому просторі. Пізніше за квантові нечіткі числа qfA_1 та qfA_2 взяти відповідно нечіткі числа fA_1 та fA_2 , тобто $qfA_1 = fA_1, qfA_2 = fA_2$ і аналогічно за індикаторні функції $I_{qfA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2)$ взяти відповідно індикаторні функції $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)$, тобто $I_{qfA_1}(u_1) = I_{fA_1}(u_1)$ та $I_{qfA_2}(u_2) = I_{fA_2}(u_2)$.

За допомогою квантової мережі (рис. 1), що зображає дію **Controlled-Controlled NOT** оператора Тоффолі на квантовий регістр q -системи можна представити виконання мультиплікативної операції над квантовими нечіткими числами qfA_1, qfA_2 відповідно з індикаторними функціями $I_{qfA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2)$.

У перший кубіт $|x_1\rangle$ прописується квантове нечітке число qfA_1 $|\psi_{x_1}(u_1)\rangle = |I_{qfA_1}(u_1)\rangle$,

$u_1 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$, що досягається завдяки послідовній дії на нього операторів Адамара **H**, зміни фази $\Phi(\varphi_1)$, Адамара **H**, тобто

$$|\psi_{x_1}(u_1)\rangle = |I_{qfA_1}(u_1)\rangle = \cos(\varphi_1/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_1/2)|1\rangle, u_1 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}.$$

У другий кубіт $|x_2\rangle$ приписується квантове нечітке число qfA_2 $|\psi_{x_2}(u_2)\rangle = |I_{qfA_2}(u_2)\rangle$, $u_2 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$, що досягається завдяки послідовній дії на нього операторів Адамара **H**, зміни фази $\Phi(\varphi_2)$, Адамара **H**, тобто

$$|\psi_{x_2}(u_2)\rangle = |I_{qfA_2}(u_2)\rangle = \cos(\varphi_2/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_2/2)|1\rangle, u_2 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}.$$

Третій кубіт $|y\rangle$ залишається в ініціалізованому стані $|y\rangle = |0\rangle = |qfA_3\rangle$, тобто $|\psi_y(u_3)\rangle = |I_{qfA_3}(u_3)\rangle = |0\rangle, u_3 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$.

Таким чином на вхід ділянки мережі (рис. 1), що представляє дію оператора Тоффолі потрапляє стан

$$H \cdot \Phi(\varphi_1) \cdot H|0\rangle \otimes H \cdot \Phi(\varphi_2) \cdot H|0\rangle \otimes |0\rangle =$$

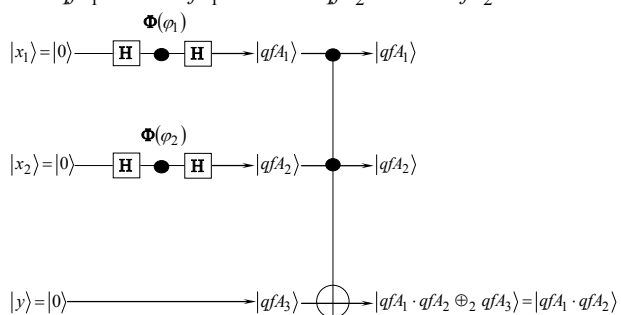


Рис. 1. Квантова мережа, що зображає дію мультиплікативної операції на квантові нечіткі числові операнди qfA_1 та qfA_2

$$\begin{aligned}
 &= (\cos(\varphi_1/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_1/2)|1\rangle) \otimes (\cos(\varphi_2/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_2/2)|1\rangle) \otimes |0\rangle = \\
 &= \cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|000\rangle - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|010\rangle - \\
 &\quad - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|100\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|110\rangle.
 \end{aligned}$$

Після дії **Controlled - Controlled NOT** одержується стан

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{Controlled - Controlled NOT} (\mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_1) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes \mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_2) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes |0\rangle) = \\
 &= \mathbf{Controlled - Controlled NOT} (\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|000\rangle - \\
 &\quad - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|010\rangle - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|100\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|110\rangle) = \\
 &= \cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|000\rangle - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|010\rangle - \\
 &\quad - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|100\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|111\rangle.
 \end{aligned}$$

За результат $I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=0}$ вибирається максимальне значення модуля із амплітуд, тобто

$$\max\{|\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|\},$$

при нульових значеннях кубіта $|y\rangle$, тобто максимум серед тих значень, що є амплітудами базисних

станів $|000\rangle, |010\rangle, |100\rangle$. За результат $I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=1}$ вибирається відповідно модульне значення амплітуди

$-\sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)$ при базисному стані $|111\rangle$, що відповідає значенню одиниці кубіта $|y\rangle$.

Таким чином можна здійснити зворотній перехід для отримання результату у вигляді нечіткого числа, а саме $f\tilde{A}_3 = q\tilde{A}_3$, тобто

$$\begin{aligned}
 I_{f\tilde{A}_3}|_{u_3=0} &= I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=0} = \\
 &= \max\{|\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|\}, \\
 I_{f\tilde{A}_3}|_{u_3=1} &= I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=1} = |-\sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|.
 \end{aligned}$$

1.2. Сумування нечітких чисел на основі сумування квантових нечітких чисел у квантовому процесорі q -систем. Сумування нечітких чисел fA_1, fA_2 з індикаторними функціями $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)$, $u_1, u_2 \in \{0, 1\}$ можна реалізувати за допомогою квантового процесора, який виконує операцію сумування квантових нечітких чисел qfA_1 та qfA_2 з індикаторними функціями відповідно $I_{qfA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2)$.

Для цього спершу необхідно про нормувати індикаторні функції $I_{fA_1}(u_1), I_{fA_2}(u_2)$ у гільбертовому просторі. Пізніше за квантові нечіткі числа qfA_1 та qfA_2 взяти відповідно нечіткі числа fA_1 та fA_2 , тобто $qfA_1 = fA_1, qfA_2 = fA_2$ і аналогічно за індикаторні функції $I_{qfA_1}(u_1)$ та $I_{qfA_2}(u_2)$ взяти відповідно індикаторні функції $I_{fA_1}(u_1)$ та $I_{fA_2}(u_2)$, тобто $I_{qfA_1}(u_1) = I_{fA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2) = I_{fA_2}(u_2)$.

За допомогою квантової мережі (рис. 2), що зображає дію квантового процесора можна представити операцію додавання квантових нечітких чисел qfA_1 та qfA_2 з індикаторними функціями $I_{qfA_1}(u_1), I_{qfA_2}(u_2)$.

У перший кубіт $|x_1\rangle$ прописується квантове нечітке число qfA_1 $|\psi_{x_1}(u_1)\rangle = |I_{qfA_1}(u_1)\rangle$, $u_1 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$, що досягається завдяки послідовної дії на нього однокубітних операторів Адамара \mathbf{H} , зміни фази $\Phi(\varphi_1)$, Адамара \mathbf{H} , тобто $|\psi_{x_1}(u_1)\rangle = |I_{qfA_1}(u_1)\rangle = \cos(\varphi_1/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_1/2)|1\rangle$, $u_1 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$.

У другий кубіт $|x_2\rangle$ прописується квантове нечітке число qfA_3 , а саме $|1\rangle$, тобто кубіт $|x_2\rangle$, який знаходиться у стані $|0\rangle$ після ініціалізації, під послідовною дією операторів Адамара \mathbf{H} , зміни фази на π

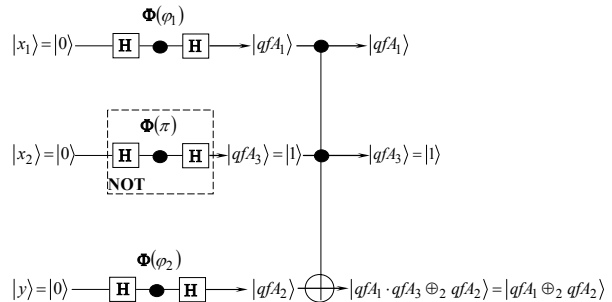


Рис. 2. Графічний вигляд квантової мережі, що зображає операцію сумування квантових нечітких чисел qfA_1 та qfA_2

радіан $\Phi(\pi)$ і ще раз оператора \mathbf{H} , що у своїй сукупності формують оператор **NOT**, переходить у стан $|1\rangle$.

$$|\psi_{x_2}(u_3)\rangle = |I_{qfA_3}(u_3)\rangle = \mathbf{H} \cdot \Phi(\pi) \cdot \mathbf{H}|0\rangle = \mathbf{NOT}|0\rangle = |1\rangle.$$

У третій кубіт $|y\rangle$ прописується квантове нечітке число qfA_2 $|\psi_y(u_2)\rangle = |I_{qfA_2}(u_2)\rangle$, $u_2 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$, що досягається завдяки послідовній дії на нього однокубітних операторів Адамара \mathbf{H} , зміни фази $\Phi(\varphi_2)$, Адамара \mathbf{H} $|\psi_y(u_2)\rangle = |I_{qfA_2}(u_2)\rangle = \cos(\varphi_2/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_2/2)|1\rangle$, $u_2 \in \{|0\rangle, |1\rangle\}$.

Таким чином на вхід ділянки мережі (рис. 2), що представляє дію оператора Гоффолі потрапляє стан

$$\begin{aligned} & \mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_1) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes \mathbf{H} \cdot \Phi(\pi) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes \mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_2) \cdot \mathbf{H}|0\rangle = \\ & = (\cos(\varphi_1/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_1/2)|1\rangle) \otimes |1\rangle \otimes (\cos(\varphi_2/2)|0\rangle - i \cdot \sin(\varphi_2/2)|1\rangle) = \\ & = \cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|010\rangle - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|011\rangle - \\ & - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|110\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|111\rangle. \end{aligned}$$

Після дії **Controlled - Controlled NOT** одержується стан

$$\begin{aligned} & \mathbf{Controlled - Controlled NOT}(\mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_1) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes \mathbf{H} \cdot \Phi(\pi) \cdot \mathbf{H}|0\rangle \otimes \mathbf{H} \cdot \Phi(\varphi_2) \cdot \mathbf{H}|0\rangle) = \\ & \mathbf{Controlled - Controlled NOT}(\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|010\rangle - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|011\rangle - \\ & - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|110\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|111\rangle) = \\ & = \cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|010\rangle - i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|011\rangle - \\ & - i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|111\rangle - \sin(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|110\rangle. \end{aligned}$$

За результат $I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=0}$ вибирається модульне значення амплітуди $\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)$ при базисному стані $|010\rangle$ при нульовому значенні кубіта $|y\rangle$. За результат $I_{q\tilde{A}_3}|_{u_3=1}$ вибирається максимальне значення модуля амплітуди, тобто $\max\{|-i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|\}$, коли кубіт $|y\rangle$ приймає значення одиниці, що є амплітудами базисних станів $|011\rangle$, $|111\rangle$. Таким чином можна здійснити зворотній перехід для отримання результату у вигляді нечіткого числа, а саме $\tilde{fA}_3 = q\tilde{fA}_3$, тобто

$$\begin{aligned} I_{\tilde{fA}_3}|_{u_3=0} &= I_{q\tilde{fA}_3}|_{u_3=0} = |\cos(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|, \\ I_{\tilde{fA}_3}|_{u_3=1} &= I_{q\tilde{fA}_3}|_{u_3=1} = \max\{|-i \cdot \cos(\varphi_1/2) \cdot \sin(\varphi_2/2)|, |-i \cdot \sin(\varphi_1/2) \cdot \cos(\varphi_2/2)|\}. \end{aligned}$$

2. Реалізація функціональних відображень нечіткої змінної на основі функціональних відображень квантової нечіткої змінної у квантовому процесорі q -систем.

При розв'язуванні прикладних задач важливою є можливість реалізації функціональних відображень нечіткої змінної на основі функціональних відображень квантової нечіткої змінної у квантовому процесорі q -систем.

Зв'язок між індикаторними функціями нечітких множин fA_1 та fA_2 , які функціонально зв'язані

$$fA_2 = g(fA_1),$$

де g – функціональне відображення, яке представляє собою один із видів нечіткого бінарного відношення fR заданого на $U_1 \times U_2$, тобто $fR \subset U_1 \times U_2$; математично формалізується за одним із наступних виразів

$$I_{fA_2=g(fA_1)}(u_2) = \sup_{u_1} \hat{g}\{I_{fA_1}(u_1), I_{fR}(u_1, u_2)\},$$

де \hat{g} – один із видів операції перетину, $I_{fA_1}(u_1)$ – індикаторна функція нечіткої множини fA_1 , $I_{fR}(u_1, u_2)$ – індикаторна функція нечіткого бінарного відношення fR , $fR \subset U_1 \times U_2$.

Очевидно для того, щоб здійснити функціональне відображення g , що представляється нечітким

бінарним відношенням fR з індикаторною функцією $I_{fR}(u_1, u_2)$, над нечіткою множиною fA_1 з індикаторною функцією $I_{fA_1}(u_1)$ у квантовому процесорі необхідно розглядати їх квантові аналоги – квантову нечітку множину qfA_1 з індикаторною функцією $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1)$, причому $I_{fA_1}(u_1) = I_{qfA_1}(\tilde{u}_1)$, $u_1 = \tilde{u}_1$, квантове нечітке бінарне відношення qfR з індикаторною функцією $I_{qfR}(u_1, u_2)$, причому $I_{fR}(u_1, u_2) = I_{qfR}(u_1, u_2)$.

Якщо \hat{g} є перетин алгебраїчний, то він представляється добутком індикаторних функцій. Тоді функціональне відображення g , яке реалізуватиме квантовий процесор математично формалізуватиметься

$$I_{fA_2}(u_2) = \sup_{\{(\tilde{u}_1, u_1, u_2) \in qfA_1 \times qfR: u_1 = \tilde{u}_1\}} |I_{qfA_1}(u_1) \cdot I_{qfR}(u_1, u_2)|.$$

Даним виразом можна послуговуватися при реалізації функціональних відображень нечіткою змінної на основі функціональних відображень квантової нечіткої змінної у квантовому процесорі q -систем.

ЛЕМА 2. Функціональне відображення

$$fA_2 = g(fA_1),$$

де g – функціональне відображення, яке задається нечітким бінарним відношенням $fR \subset U_1 \times U_2$ з індикаторною функцією $I_{fR}(u_1, u_2)$, fA_1 – нечітка змінна з індикаторною функцією $I_{fA_1}(u_1)$;

що зв'язує нечіткі змінні fA_1 та fA_2 між собою із відповідним зв'язком їх індикаторних функцій

$$I_{fA_2=g(fA_1)}(u_2) = \sup_{u_1} \hat{g}\{I_{fA_1}(u_1) \cdot I_{fR}(u_1, u_2)\},$$

можна виразити через квантову нечітку змінну qfA_1 з $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) = I_{fA_1}(u_1)$, $\tilde{u}_1 = u_1$ та квантове нечітке бінарне відношення qfR з $I_{qfR}(u_1, u_2) = I_{fR}(u_1, u_2)$ за формулою

$$I_{fA_2}(u_2) = \sup_{\{(\tilde{u}_1, u_1, u_2) \in qfA_1 \times qfR: u_1 = \tilde{u}_1\}} |I_{qfA_1}(u_1) \cdot I_{qfR}(u_1, u_2)|,$$

обчислення якої може бути реалізовано за допомогою квантового процесора q -системи.

3. Реалізація \max – • композиційного правила виведення із Larsen імплікацією у f -системах на основі квантових нечітких множин в квантовому процесорі q -систем.

Поряд з інтелектуалізованими ІС, які будують логічні виведення на основі правила *modus ponens* останнім часом широкого поширення у прикладних застосуваннях набувають інтелектуалізовані f -системи, що використовують у своїй роботі логіко-лінгвістичні методи і логічні виведення, яких базуються на узагальнені правила *modus ponens*, тобто на композиційному правилі виведення. Зокрема, серед них чинне місце займають інтелектуалізовано f -системи, що будують логічні виведення на \max – • композиційному правилі виведення із Larsen імплікацією. Тобто, якщо $I_{fA_1}(u_1)$, $u_1 \in U_1$ – індикаторна функція імплікації Larsen

$$I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2) = I_{fA}(u_1) \cdot I_{fB}(u_2), \quad fA \subset U_1, \quad fB \subset U_2, \quad u_1 \in U_1, \quad u_2 \in U_2, \quad (u_1, u_2) \in U_1 \times U_2,$$

де $I_{fB_1}(u_2)$ – індикаторна функція нечіткого виведення $fB_1 \subset U_2$; то логічне виведення

$$fB_1 = fA_1 \circ (fA \rightarrow fB),$$

що через індикаторні функції виражається

$$I_{fB_1}(u_2) = \max_{u_1} I_{fA_1}(u_1) \cdot I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2), \quad u_1 \in U_1, \quad u_2 \in U_2, \quad (u_1, u_2) \in U_1 \times U_2.$$

Для реалізації такого виду логічного виведення в q -системах слід розглядати квантові нечіткі аналоги: квантову нечітку множину qfA_1 з індикаторною функцією $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1)$, при чому $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) = I_{fA_1}(u_1)$, $\tilde{u}_1 = u_1$; квантові нечіткі множини qfA та qfB з індикаторними функціями відповідно $I_{qfA}(\hat{u}_1)$, $I_{qfB}(\hat{u}_2)$, при чому $I_{qfA}(\hat{u}_1) = I_{fA}(u_1)$, $\hat{u}_1 = u_1$ та $I_{qfB}(\hat{u}_2) = I_{fB}(u_2)$, $\hat{u}_2 = u_2$, а також квантова нечітка множина $qfA \rightarrow qfB$ з індикаторною функцією $I_{qfA \rightarrow qfB}(\hat{u}_1, \hat{u}_2) = I_{qfA}(\hat{u}_1) \cdot I_{qfB}(\hat{u}_2)$, при чому $I_{qfA \rightarrow qfB}(\hat{u}_1, \hat{u}_2) = I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2)$, $(\hat{u}_1, \hat{u}_2) = (u_1, u_2)$; квантову нечітку множину qfB_1 з індикаторною функцією $I_{qfB_1}(\hat{u}_2)$, при чому $I_{qfB_1}(\hat{u}_2) = I_{fB_1}(u_2)$, $\hat{u}_2 = u_2$.

Логічне виведення на \max – • композиційному правилі виведення із Larsen імплікацією, яке

реалізуватиметься на квантовому процесорі q -систем буде математично представитися:

$$\begin{aligned} I_{fB_1}(u_2) &= \left\{ (\tilde{u}_1, \hat{u}_1, \hat{u}_2) \in qfA_1 \times (qfA \rightarrow qfB) : \tilde{u}_1 = \hat{u}_1, \hat{u}_2 = u_2 \right\} \left| I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) \cdot I_{qfA \rightarrow qfB}(\hat{u}_1, \hat{u}_2) \right| = \\ &= \left\{ (\tilde{u}_1, \hat{u}_1, \hat{u}_2) \in qfA_1 \times (qfA \rightarrow qfB) : \tilde{u}_1 = \hat{u}_1, \hat{u}_2 = u_2 \right\} \left| I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) \cdot I_{qfA}(\hat{u}_1) \cdot I_{qfB}(\hat{u}_2) \right|. \end{aligned}$$

Даним виразом можна послуговуватися при реалізації логічного виведення, яке здійснюється в інтелектуалізованих f -системах, що ґрунтуються на \max -композиційному правилі виведення із Larsen імплікацією на основі квантового процесора q -систем.

ЛЕМА 3. Логічне виведення, яке ґрунтується на \max -композиційному правилі виведення із Larsen імплікацією

$$I_{fB_1}(u_2) = \max_{u_1} I_{fA_1}(u_1) \cdot I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2), \quad u_1 \in U_1, \quad u_2 \in U_2, \quad (u_1, u_2) \in U_1 \times U_2,$$

де $I_{fA_1}(u_1)$ – індикаторна функція нечіткого посилання $fA_1 \subset U_1$, $I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2)$ – індикаторна функція Larsen імплікації $fA \rightarrow fB \subset U_1 \times U_2$, $I_{fB_1}(u_2)$ – індикаторна функція нечіткого виведення fB_1 ;

виражається через

$$\begin{aligned} I_{fB_1}(u_2) &= \left\{ (\tilde{u}_1, \hat{u}_1, \hat{u}_2) \in qfA_1 \times (qfA \rightarrow qfB) : \tilde{u}_1 = \hat{u}_1, \hat{u}_2 = u_2 \right\} \left| I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) \cdot I_{qfA \rightarrow qfB}(\hat{u}_1, \hat{u}_2) \right| = \\ &= \left\{ (\tilde{u}_1, \hat{u}_1, \hat{u}_2) \in qfA_1 \times (qfA \rightarrow qfB) : \tilde{u}_1 = \hat{u}_1, \hat{u}_2 = u_2 \right\} \left| I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) \cdot I_{qfA}(\hat{u}_1) \cdot I_{qfB}(\hat{u}_2) \right|, \end{aligned}$$

де $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1)$ – індикаторна функція квантового нечіткого посилання $qfA_1 \subset U_1$, причому $I_{qfA_1}(\tilde{u}_1) = I_{fA_1}(u_1)$, $\tilde{u}_1 = u_1$, $I_{qfA}(\hat{u}_1)$, $I_{qfB}(\hat{u}_2)$ – індикаторні функції квантових нечітких множин відповідно $qfA \subset U_1$, $qfB \subset U_2$, причому $I_{qfA}(\hat{u}_1) = I_{fA}(u_1)$, $\hat{u}_1 = u_1$, $I_{qfB}(\hat{u}_2) = I_{fB}(u_2)$, $\hat{u}_2 = u_2$, які задають квантовий аналог Larsen імплікації $qfA \rightarrow qfB \subset U_1 \times U_2$ з індикаторною функцією $I_{qfA \rightarrow qfB}(\hat{u}_1, \hat{u}_2) = I_{qfA}(\hat{u}_1) \cdot I_{qfB}(\hat{u}_2) = I_{fA \rightarrow fB}(u_1, u_2) = I_{fA}(u_1) \cdot I_{fB}(u_2)$, $I_{fB_1}(u_2)$ – індикаторна функція нечіткого виведення $fB_1 \subset U_2$;

яке може бути реалізовано у квантовому процесорі q -систем.

4. Реалізація алгебраїчного перетину нечітких множин на основі алгебраїчного перетину квантових нечітких множин у квантовому процесорі q -систем.

Серед великої кількості операцій, зокрема, наприклад, максимінних, алгебраїчних, обмежених, які реалізують f -системи над нечіткими множинами, q -системи можуть реалізувати операцію алгебраїчного перетину

$$I_{fC=fA \cap fB}(u) = I_{fA}(u) \cdot I_{fB}(u),$$

де $I_{fA}(u)$, $fA \subset U$, $u \in U$ – індикаторна функція нечіткої множини fA , $I_{fB}(u)$, $fB \subset U$, $u \in U$ – індикаторна функція нечіткої множини fB , $I_{fC}(u)$, $fC \subset U$, $u \in U$ – індикаторна функція нечіткої множини fC (результату операції алгебраїчного перетину над операндами fA та fB); нечітких множин на основі квантових нечітких множин.

Розгляньмо випадок, коли задано дві нечіткі множини fA та fB універсуму U , тобто $fA \subset U$, $fB \subset U$ з індикаторними функціями відповідно $I_{fA}(u)$ та $I_{fB}(u)$, де $u \in U$.

Алгебраїчний перетин таких нечітких множин визначається за формулою

$$I_{fC=fA \cap fB}(u) = I_{fA}(u) \cdot I_{fB}(u).$$

Нехай універсум U складається з елементарних елементів $\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_N\}$.

Індикаторну функцію I_{fC} результуючої нечіткої множини fC в такому разі можна розглядати, як функцію, що задана на області визначення $U \times U = \{(u_i, u_j) : i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N}\}$ і приймає значення:

$$I_{fC}(u_i, u_j) = \begin{cases} I_{fA}(u_i) \cdot I_{fB}(u_j), & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

які відмінні від нуля лише на елементах головної діагоналі матриці

$$\tilde{U} = U \times U = \begin{pmatrix} (u_1, u_1) & (u_1, u_2) & (u_1, u_3) & \cdots & (u_1, u_N) \\ (u_2, u_1) & (u_2, u_2) & (u_2, u_3) & \cdots & (u_2, u_N) \\ (u_3, u_1) & (u_3, u_2) & (u_3, u_3) & \cdots & (u_3, u_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (u_N, u_1) & (u_N, u_2) & (u_N, u_3) & \cdots & (u_N, u_N) \end{pmatrix}.$$

Оскільки значення індикаторної функції I_{f_C} відмінні від нуля лише на елементах головної діагоналі матриці \tilde{U} , то зручно розглядати випадок, коли $(u_1, u_1) = u_1$, $(u_2, u_2) = u_2$, $(u_3, u_3) = u_3$, ..., $(u_N, u_N) = u_N$ та індикаторну функцію I_{f_C} заданою на одновимірному просторі $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_N\}$, як і індикаторні функції $I_{f_A}(u)$ та $I_{f_B}(u)$, а не на двовимірному просторі $U \times U = \{(u_i, u_j) : i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}\}$, тобто

$$I_{f_C}(u_1, u_1) = I_{f_C}(u_1) = I_{f_A}(u_1) \cdot I_{f_B}(u_1), I_{f_C}(u_2, u_2) = I_{f_C}(u_2) = I_{f_A}(u_2) \cdot I_{f_B}(u_2), \\ I_{f_C}(u_3, u_3) = I_{f_C}(u_3) = I_{f_A}(u_3) \cdot I_{f_B}(u_3), \dots, I_{f_C}(u_N, u_N) = I_{f_C}(u_N) = I_{f_A}(u_N) \cdot I_{f_B}(u_N).$$

Алгебраїчний перетин нечітких множин f_A та f_B універсуму U з індикаторними функціями відповідно $I_{f_A}(u)$ та $I_{f_B}(u)$, $u \in U$ можна реалізувати за допомогою квантового процесора q -систем, який виконує суперпозицію квантових бітів q -регістра.

Для цього спершу нормуються індикаторні функції $I_{f_A}(u)$ та $I_{f_B}(u)$, $u \in U$ у гільбертовому просторі $L_2(U)$. Тоді нечіткі множини f_A та f_B кодується у квантові нечіткі двійкові числа відповідно qf_A та qf_B наступним чином

$$u_1 = |00\dots 00\rangle, u_2 = |00\dots 01\rangle, u_3 = |00\dots 10\rangle, \dots, u_N = |11\dots 11\rangle; \\ I_{f_A}(u_1) = I_{qf_A}(|00\dots 00\rangle), I_{f_A}(u_2) = I_{qf_A}(|00\dots 01\rangle), \dots, I_{f_A}(u_N) = I_{qf_A}(|11\dots 11\rangle); \\ I_{f_B}(u_1) = I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle), I_{f_B}(u_2) = I_{qf_B}(|00\dots 01\rangle), \dots, I_{f_B}(u_N) = I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle).$$

Для прописування у квантовий регістр квантового процесора квантового нечіткого двійкового числа qf_A необхідно $\log_2 N$ квантових бітів, аналогічно й у випадку, щоб прописати у квантовий регістр квантове нечітке число qf_B необхідно також $\log_2 N$ квантових бітів. Загалом L -кубітний квантовий регістр повинен містити $L = \log_2 N + \log_2 N = 2 \log_2 N$ квантових бітів.

Об'єднуючи перших N кубітів і других N кубітів в єдину квантову систему – L -кубітний квантовий регістр одержується квантовий стан

$$|\psi_L\rangle = |I_{qf_A}\rangle \otimes |I_{qf_B}\rangle,$$

який наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Табличне представлення індикаторної функції $|\psi_L\rangle$, яка описує стан L -кубітного квантового регістра

	$I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle)$	...	$I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle)$
$I_{qf_A}(|00\dots 00\rangle)$	$I_{qf_A}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle)$	...	$I_{qf_A}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle)$
$I_{qf_A}(|00\dots 01\rangle)$	$I_{qf_A}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle)$	...	$I_{qf_A}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle)$
$I_{qf_A}(|00\dots 10\rangle)$	$I_{qf_A}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle)$	...	$I_{qf_A}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle)$
...
$I_{qf_A}(|11\dots 11\rangle)$	$I_{qf_A}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qf_B}(|00\dots 00\rangle)$	...	$I_{qf_A}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qf_B}(|11\dots 11\rangle)$

Якщо на значення комірок табл. 1 дивитися, як на елементи матриці

$$\tilde{U} = \begin{pmatrix} I_{qfA}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle) & \dots & I_{qfA}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle) \\ I_{qfA}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle) & \dots & I_{qfA}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle) \\ I_{qfA}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle) & \dots & I_{qfA}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle) \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{qfA}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle) & \dots & I_{qfA}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle) \end{pmatrix},$$

що представляє індикаторну функцію деякого квантового нечіткого числа, то з неї шляхом декодування певним чином можна одержати індикаторну функцію I_{fC} , $u \in U$, що повністю і однозначно представляє нечітку множину fC , яка є алгебраїчним перетином вхідних даних q -систем нечітких множин fA та fB .

Для цього базиси

$$|00\dots 00\rangle \otimes |00\dots 00\rangle, |00\dots 01\rangle \otimes |00\dots 01\rangle, |00\dots 10\rangle \otimes |00\dots 10\rangle, \dots, |11\dots 11\rangle \otimes |11\dots 11\rangle,$$

що відповідають значенням індикаторної функції $|\psi_L\rangle$, якої знаходяться на головній діагоналі матриці \tilde{U} декодуються відповідно у значення $u_1, u_2, u_3, \dots, u_N$ області визначення індикаторної функції $I_{fC}(u_i)$, $\{u_i : i = \overline{1, N}\}$, тобто $|00\dots 00\rangle \otimes |00\dots 00\rangle = u_1$, $|00\dots 01\rangle \otimes |00\dots 01\rangle = u_2$, \dots , $|11\dots 11\rangle \otimes |11\dots 11\rangle = u_N$. А модулі значень

$$\begin{aligned} & |I_{qfA}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle)|, |I_{qfA}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 01\rangle)|, \\ & |I_{qfA}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 10\rangle)|, \dots, |I_{qfA}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle)| \end{aligned}$$

елементів головної діагоналі матриці \tilde{U} декодуються відповідно у значення $I_{fC}(u_1), I_{fC}(u_2), I_{fC}(u_3), \dots, I_{fC}(u_N)$ індикаторної функції нечіткої множини fC , тобто

$$\begin{aligned} & |I_{qfA}(|00\dots 00\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 00\rangle)| = I_{fC}(u_1), |I_{qfA}(|00\dots 01\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 01\rangle)| = I_{fC}(u_2), \\ & |I_{qfA}(|00\dots 10\rangle) \cdot I_{qfB}(|00\dots 10\rangle)| = I_{fC}(u_3), \dots, |I_{qfA}(|11\dots 11\rangle) \cdot I_{qfB}(|11\dots 11\rangle)| = I_{fC}(u_N) \end{aligned}$$

Одержані таким чином з квантового регістра q -процесора значення індикаторної функції $I_{fC}(u_i)$, $\{u_i : i = \overline{1, N}\}$ повністю і однозначно задають нечітку множину fC , яка є алгебраїчним перетином нечітких множин fA та fB .

Висновки

Вперше розроблено основи моделювання: множення та сумування нечітких чисел на основі множення та сумування квантових нечітких чисел, функціональних відображень нечіткої змінної на основі функціональних відображень квантової нечіткої змінної, max -композиційного правила виведення із Larsen імплікацією у нечітких інформаційних системах на основі квантових нечітких множин, алгебраїчного перетину нечітких множин на основі алгебраїчного перетину квантових нечітких множин у квантовому процесорі, що може бути використано, як основа математичного забезпечення, для проектування програмного забезпечення квантових інформаційних систем, що здійснюватимуть обробку нечітких даних.

Література

1. Пастух О.А. Квантові нечіткі множини з комплексно значною характеристичною функцією і їх використання для квантового комп'ютера // Вісник Хмельницького національного у-ту. – 2006. – Т.1. – № 2. – С.158-161.
2. Пастух О.А. Квантова нечітка випадкова подія та її маргінальна амплітуда ймовірності // Вісник Хмельницького національного у-ту. – 2006. – № 5. – С.58-60.
3. Пастух О.А. Повний бінарний уніод квантових нечітких булевих підмножин на просторі $[0; \infty)$ // Вісник Хмельницького національного у-ту. – 2007. – № 1. – С.196-198.
4. Пастух О.А. Основи зв'язку між математичними формалізмами інформаційних систем, нечітких інформаційних систем та квантових інформаційних систем // Вісник Хмельницького національного у-ту. – 2008. – № 3. – С.87-98.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, v.8, p.338-353.
6. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике /Пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1990. – 288с.
7. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. – Ann. Math. Statist.

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, М.Л. ЕПЕЛЬФЕЛЬД
Хмельницький національний університет

ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Наведені результати моделювання роботи суперконденсатора Boostcap® 650 Ф при його підключенні до експериментального макету. Отримана повна теплова характеристика суперконденсатора.

The supercapacitor modeling results are shown for Boostcap® 650 F during his connection to the experimental model. The complete thermal characteristic of supercapacitor is obtained.

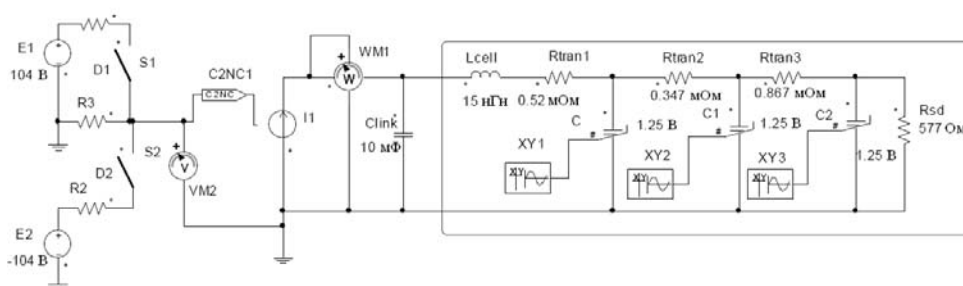
Вступ

Останнім часом значна увага сконцентрована на суперконденсаторах. В їх розвитку відбувається значний прогрес. Такі широко відомі компанії як «Maxwell», «Siemens Matsushita» («EPCOS»), «NEC», «Tokin» займаються дослідженням та виготовленням електрохімічних конденсаторів із подвійним електричним шаром. Проте досі проблема температурних властивостей суперконденсатора є недостатньо вивченою. Проводяться певні дослідження у даному напрямі, наприклад, у роботі [1] показано дослідження залежностей ємності та еквівалентного послідовного опору від температури методом електрохімічної імпедансної спектроскопії. У [2] досліджується теплова характеристика суперконденсатора. Вплив температурних змін на цикли заряду та розряду суперконденсатора, який встановлюється в пересувних пристроях чи автомобілях, розглянуто в [3]. У роботі [4] показаний вплив температурних коливань на ефекти старіння суперконденсатора.

Температура, при якій працює суперконденсатор, грає важливу роль при визначенні його терміну служби, кількості циклів заряду-розряду [1]. При роботі за межами визначеного температурного діапазону можливий швидкий вихід з ладу суперконденсатора. Тому створення математичних моделей для дослідження температурних властивостей суперконденсаторів є досить важливою задачею. Це дозволить виробникам надавати дані, які приблизно оцінюють термін служби суперконденсаторів для умов, що відрізняються від рекомендованих у специфікаціях (номінальна напруга, температура тощо). Такі дані дозволять значно зменшити витрати часу та матеріальних ресурсів, пов'язані із достроковим виходом з ладу суперконденсаторів.

Еквівалентна схема суперконденсатора для моделювання

Тестування проводилось на комірці ємністю 650 Ф і в моделюванні використовувалась повна та спрощена моделі, показані на рис. 1. Тестування цієї комірки займає приблизно 2 год при діючому значенні струму 90 А. Температура навколишнього середовища становила 26° С.



а) еквівалентна схема повної моделі комірки ємністю 650 Ф, на якій виділені 3 часових константи

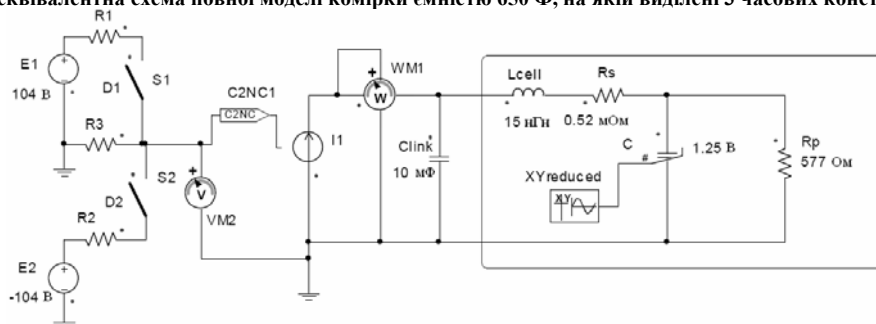
б) еквівалентна схема спрощеної моделі: $R_s = ESR_{dc}$ (вимірюванняза методом міжнародної електротехнічної комісії, МЕК) і $C(U) = \sum C_i(U)$

Рис. 1. Повна та скорочена еквівалентні схеми заміщення суперконденсатора