

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

УДК 621.391

КВАНТОВА МОДЕЛЬ ВІДКРИТОЇ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

ТИХОНОВ В.І.

Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

THE QUANTUM MODEL OF THE OPEN INFO-COMMUNICATION SYSTEM

TIKHONOV V.I.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov

Анотація. Побудована узагальнена модель відкритої інфокомунікаційної системи як розподіленого об'єкта спостереження і контролю, в якій взаємодія ідентифікованих часток системи здійснюється окремими квантами інформаційного продукту. Модель формалізована у вигляді комплексної матриці взаємодії часток системи. Матриця взаємодії інтерпретована як тензор неевклідового простору.

Abstract. A general model provided for the open info-communication system as a distributed object of observation and control, where the system particles interaction performed by information product quanta. The model formalized due to the complex interaction matrix for system particles. The interaction matrix interpreted as a tensor of non-Euclidian space.

ВСТУП

Однією з актуальних проблем у галузі інформаційних технологій є моделювання розподілених інфокомунікаційних систем, в яких взаємодія ідентифікованих часток системи здійснюється окремими квантами інформаційного продукту. Квантами продукту можуть виступати біти і байти, IP-пакети, повідомлення, документи, транзакції, файли даних, грошові одиниці, інші структуровані одиниці інформації або семантичні форми. Моделі розподілених інфокомунікаційних система спираються на теорію графів [1] і мереж Петрі [2], теорію масового обслуговування [3...5], фрактальний аналіз [6], вейвлет аналіз [7], штучні нейронні мережі [8] тощо. Перспективним підходом до аналізу потоків у мережах є тензорна методологія [9...12]. Тензорні методи дозволяють комплексно відображати структурні та функціональні властивості інфокомунікаційної системи як об'єкта спостереження і контролю. У цьому напрямку досягнуто певних результатів [13...16].

Відомі моделі інфокомунікаційних систем переважно досліджують конкретні фізичні параметри (затримка пакетів, довжина черги обслуговування, імовірність втрати пакетів тощо) у замкнених розподілених системах. Однак розробка і формалізація узагальненої квантової моделі взаємодії розподілених часток відкритої інфокомунікаційної системи для різних типів і одиниць інформаційного продукту потребує подальшого розвитку.

Метою даної статті є розробка і формалізація узагальненої квантової моделі відкритої інфокомунікаційної системи, незалежної від конкретного типу її одиниць виміру інформаційного продукту.

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛЕНОГО ОБ'ЄКТА

Визначимо узагальнену модель $\mathbf{S}(O)$ розподіленого об'єкта спостереження і контролю (O) як систему відношень f між об'єктом спостереження (O), суб'єктом-спостерігачем (W) і полем комунікації (\emptyset):

$$\mathbf{S}(O) = f(O, W, \emptyset). \quad (1)$$

Узагальнену модель $\mathbf{S}(O)$ назвемо коротко розподіленою системою або просто системою \mathbf{S} . Кожна з трьох компонент O, W, \emptyset в (1) розуміється як структурована частина системи \mathbf{S} . Наприклад, інфокомунікаційна мережа як об'єкт спостереження і контролю може бути структурована на хости, термінальні пристрої, робочі станції, сервери, клієнти, локальні мережі тощо. Суб'єкт може бути гру-

пою технічної підтримки, розподіленою на окремі складові. Поле комунікації, яке уможлиблює дистанційну взаємодію складових часток об'єкта і суб'єкта, є відкрита телекомунікаційна мережа. Таким чином, узагальнена модель розподіленого об'єкта (1) представляє не тільки об'єкт O , а також відношення між об'єктом, спостерігачем і полем комунікації.

Будемо вважати, що система S моделює кінцеву частину необмеженого фізичного простору W ; ця частина не може бути повністю ізольована від зовнішнього впливу, але за певних умов цей вплив можна мінімізувати і навіть знехтувати ним у рамках похибки моделювання. З цієї точки зору, вважатимемо S замкнено-відкритою розподіленою системою.

На рисунку 1 система S окреслена незамкненою оболонкою, яка умовно виділяє її із простору W . Отвір оболонки системи S має шлюз Gw взаємодії системи S зі своїм оточенням. Система S містить у собі об'єкт O , суб'єкт W і поле комунікації \emptyset , яке з'єднане шлюзом Gw з оточенням системи S .

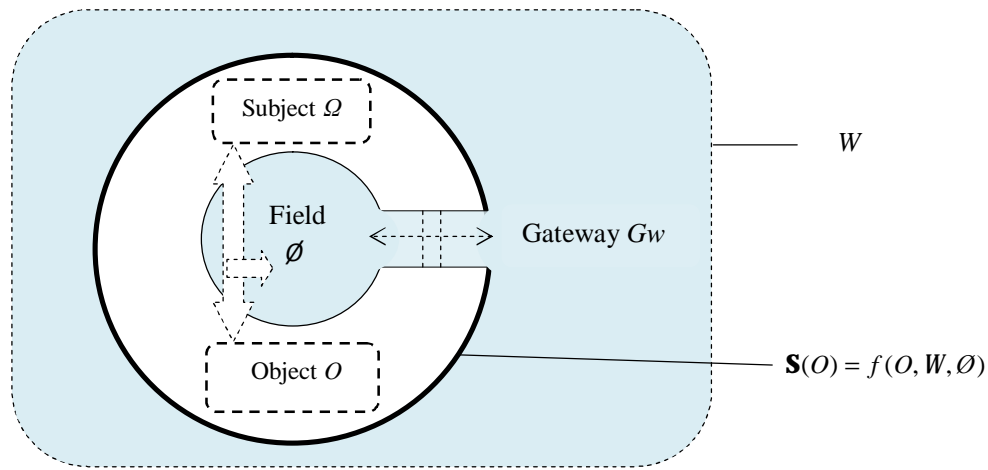


Рисунок 1 – Узагальнена модель розподіленого об'єкта спостереження і контролю

Будемо розглядати такі типи відношень у системі S :

- а) відношення між будь якими частками об'єкта чи суб'єкта;
- б) відношення між частками об'єкта чи суб'єкта і полем комунікації \emptyset ;
- в) відношення між частками об'єкта чи суб'єкта і невизначеними наявне сутностями в оточенні системи S через посередництво поля \emptyset .

ПОБУДОВА МАТРИЦІ ВЗАЄМОДІЇ ЧАСТОК СИСТЕМИ

Відповідно до розглянутої вище узагальненої моделі $S(O)$ розподіленого об'єкта O , позначеної коротко як система S , побудуємо формалізований опис системи S .

Нехай X^0 – множина ідентифікованих часток об'єкта O ; X^1 – множина ідентифікованих часток суб'єкта W . Об'єднаємо ці дві множини в одну замкнену множину $\bar{X} = X^0 \cup X^1$. Доповнимо множину \bar{X} полем комунікації \emptyset , що зв'язує усі частки $x_n \in \bar{X}$ між собою, а також із зовнішнім оточенням системи S . Поле \emptyset вважатимемо відкритим елементом. Позначимо розширену множину як $X = \bar{X} \cup \emptyset$ і назвемо її відкритою множиною часток $x_n \in X$; $n=0, 1, 2, \dots, N$, системи S . Елемент $x_0 = \emptyset$ відповідає за змістом поняттю “відкритий пустий елемент множини” в теорії множин і топології [17,18].

Припустимо, що частки $x_n \in X$ здатні генерувати і/або споживати деякий продукт p дискретними одиницями – квантами Δp . Квантами Δp можуть бути частки енергії, інформації тощо. Взаємодія часток $x_n \in X$; $n = 0, 1, 2, \dots, N$, між собою і з зовнішнім оточенням здійснюється шляхом обміну квантів продукту Δp . Припустимо також, що елемент \emptyset (поле комунікації) може бути нейтральним до квантів Δp (пропускати кванти Δp транзитом), активним (генерувати кванти Δp) або пасивним (споживати кванти Δp). Наприклад, телекомунікаційна мережа транспортує корисне інформаційне навантаження (транзит продукту), а також генерує і споживає службовий трафік.

Процеси обміну квантами Δp для кожної пари різних часток $(x_n, x_m) \in X$; $n, m = 0, 1, 2, \dots, N$; $n \neq m$, назовемо *внутрішніми потоками* системи **S**. Потоки між частками $x_n \in X$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$, і зовнішнім оточенням системи **S** назовемо *зовнішніми потоками* системи **S**.

Формалізацію моделі пояснимо на прикладі системи **S** з трьома частками: \emptyset , x_1 , x_2 , рисунок 2. Частки x_1 і x_2 мають двосторонні канали взаємодії з полем \emptyset , позначені як c_1 , c_2 . Поле \emptyset має відкритий двосторонній зовнішній канал c_0 .

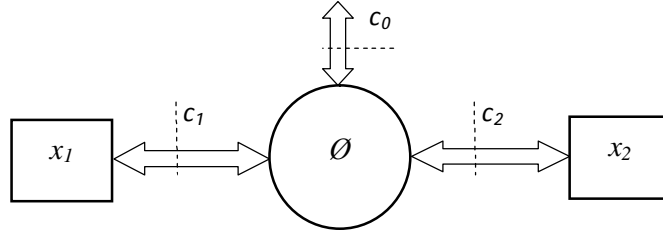


Рисунок 2 – Система з трьома частками: \emptyset , x_1 , x_2

Припустимо, що за певний циклічний періоду часу T (доба, тиждень тощо) поле \emptyset (по всіх каналах c_0, c_1, \dots, c_N) перетнуло L пар квантів Δp . Величину

$$\underline{P} = L \cdot \Delta p / T \quad (2)$$

назовемо середньою (за період T) *потужністю системи*, виражену у фізичних одиницях $2 \cdot \Delta p$ продукту p .

Нехай $E = \underline{P} \cdot T$ – загальний продукт, який перетнув поле \emptyset протягом інтервалу T ; $L/T = g$ – середня частота, з якою пари квантів перетинали поле \emptyset ; $T \cdot \Delta p = h$ – нормувальна константа. Тоді з формули (2) випливає:

$$\begin{aligned} E &= h \cdot g \\ \underline{P} &= E/T = h \cdot g / T = \Delta p \cdot g \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо Δp є квант енергії, то h є відомою з фізики константою Планка в одиницях *Дж·с* [19].

Виберемо нормувальну одиницю виміру продукту Δp такою, щоб мало місце $\underline{P} = \Delta p \cdot g = (N+1)^2$. Очевидно, що цій умові відповідає $\Delta p = (N+1)^2 / g$. Звідси константа h дорівнює:

$$h = T \cdot \Delta p = (N+1)^2 \cdot (T^2 / L). \quad (4)$$

Безрозмірну величину $P = (N+1)^2$ назовемо *нормованою потужністю системи S*.

Нехай L_n , $n=0, 1, \dots, N$ є кількість пар квантів Δp , що пройшли через перетин каналу c_n , за період часу T . Визначимо *щільність потоку квантів* у перетині каналу c_n довільної частки $x_n \in X$; $n=0, 1, 2, \dots, N$, як функцію \underline{p}_n :

$$\underline{p}_n = L_n / L. \quad (5)$$

Величину $p_n = \rho_n \cdot P$; $n=1, \dots, N$, назовемо *нормованою потужністю частки x_n* , а величину $p_0 = \rho_0 \cdot P$ назовемо *нормованою зовнішньою потужністю системи S*. Додаток потужностей усіх часток замкненої множини \bar{X} назовемо *нормованою внутрішньою потужністю системи P_I* :

$$P_I = \sum_{n=1}^N p_n. \quad (6)$$

Очевидно, що має місце рівняння:

$$P = p_0 + P_I. \quad (7)$$

Систему **S**, у якій $P_0 = 0$, назовемо *умовно замкненою системою* (у тому сенсі, що принципово система **S** є відкритою, але в конкретному випадку зовнішня потужність системи не зареєстрована, або знаходиться на рівні похибки спостереження). Інакше систему **S** будемо називати *відкритою системою*. Представимо відкриту систему **S** відповідно до рисунку 2 у вигляді квадратної *таблиці потоків* $F(n, m) = \{f_{nm}\}$, рисунок 3.

$F(n, m) =$

m	0		1		2	
n						
0	$\emptyset \rightarrow$	$\emptyset \leftarrow$	$\emptyset \rightarrow x_1$		$\emptyset \rightarrow x_2$	
1	$x_1 \rightarrow \emptyset$		$x_1 \rightarrow$	$x_1 \leftarrow$	$x_1 \rightarrow x_2$	
2	$x_2 \rightarrow \emptyset$		$x_2 \rightarrow x_1$		$x_2 \rightarrow$	$x_2 \leftarrow$

Рисунок 3 – Таблиця потоків відкритої системи

Діагональні клітини f_{nn} таблиці F розділені на лівий і правий елементи (l_n, r_n). Кожен елемент l_n позначає кількість квантів Δp , що передані від частки $x_n \in X; n=0, 1, 2, \dots, N$, за межі системи \mathbf{S} через зовнішній канал c_0 ($\emptyset \rightarrow, x_1 \rightarrow, x_2 \rightarrow$). Кожен елемент r_n , навпаки, позначає кількість квантів Δp , що передані із зовні системи \mathbf{S} до відповідної частки $x_n \in X; n=0, 1, 2, \dots, N$ через зовнішній канал c_0 ($\emptyset \leftarrow, x_1 \leftarrow, x_2 \leftarrow$).

Недіагональні клітини таблиці потоків F на рисунку 3 позначають кількість квантів Δp , що передані від частки $x_n \in X; n=0, 1, 2, \dots, N$ до частки $x_m \in X; m=0, 1, 2, \dots, N$ де $m \neq n$. Всього в таблиці потоків F (для випадку $N=2$) має бути $(N+1)^2 + (N+1) = 12$ складових потоків системи \mathbf{S} . Окремі складові потоки f_{nm} в таблиці F (рисунку 3) назвемо *симплексними потоками системи \mathbf{S}* , або коротко *симплексами* системи (вираженими в одиницях Δp).

Розглянемо систему із симетричними потоками. Припустимо, що всі симплекси однакові і дорівнюють одиниці: $f_{nm} = 1; n, m=0, 1, 2, \dots, N$. Одиничний симплекс означає передачу одного кванта Δp . Відповідна таблиця потоків F зображена на рисунку 4-а. Кількість квантів Δp , що перетнули довільний канал $c_n, n=0, 1, 2, \dots, N$, в напрямку “від частки c_n ” є додаток лівого діагонального симплекса l_n і недиагональних симплексів рядка n таблиці F . Для всіх часток системи з симетричними потоками на рисунку 4-а цей додаток дорівнює 3.

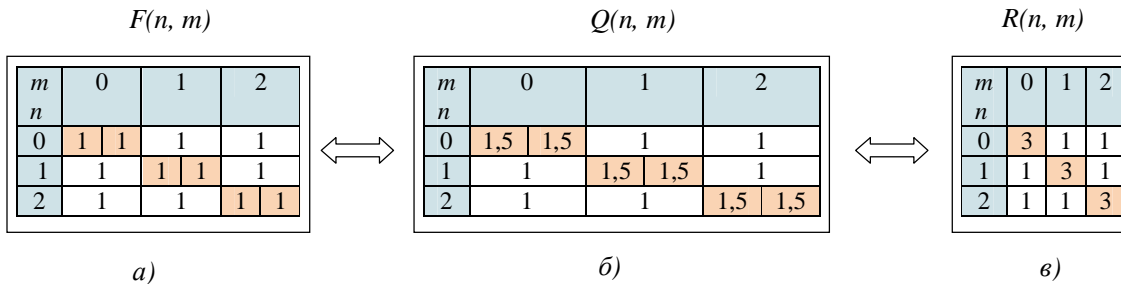


Рисунок 4 – Побудова симетричної матриці взаємодії відкритої системи

Аналогічно, кількість квантів Δp , що перетнули довільний канал $c_n, n=0, 1, 2, \dots, N$, в напрямку “до частки c_n ” є додаток правого діагонального симплекса r_n і недиагональних симплексів стовпця n таблиці F . Для всіх часток системи з симетричними потоками на рисунку 4-а цей додаток також дорівнює 3.

Через перетин кожного з каналів $c_n, n=0, 1, 2$, відповідно до таблиці F на рисунку 4-а, пройшло 6 квантів. Загальна кількість L пар квантів, що перетнули усі три канали $c_n, n=0, 1, 2$ дорівнює $L = 9$. Потужність системи \mathbf{S} в даному випадку співпадає з L , тобто $P = (N+1)^2 = 9 = L$. Щільність потоку квантів Δp у кожному з трьох каналів $c_n, n=0, 1, 2$ дорівнює $3/9 = 1/3$. Звідси потужність кожної з трьох часток $x_n, n=0, 1, 2$ також дорівнює 3. Оскільки всі три частки мають симетричні потоки, то загальну потужність $p_n = 3$ кожної частки розподілимо порівну між активною складовою (генерація пар квантів у напрямку “від частки”) і пасивною складовою (споживання пар квантів у напрямку «до частки»):

$$p_n = (\overset{\mathbf{r}}{p}_n, \overset{\mathbf{l}}{p}_n) = (1,5, 1,5). \tag{8}$$

Перетворимо таблицю F потоків f_{nm} (рисунку 4-а) у таблицю Q взаємодії часток системи \mathbf{S} (рисунку 4-б). Для цього замінимо кожну пару діагональних клітин (l_n, r_n) таблиці F на пару складових (активну і пасивну) потужності відповідної частки $(\overset{\mathbf{r}}{p}_n, \overset{\mathbf{l}}{p}_n)$. Оскільки активна і пасивна складові потужності кожної частки однакові, таблицю Q представимо квадратною матрицею R (рисунку 4-в), де кожний діагональний елемент матриці R дорівнює загальній потужності відповідної частки $x_n, n=0, 1, 2$.

Розкладемо загальну потужність системи **S** на окремі складові потужностей взаємодії компонентів системи згідно з розглянутою вище узагальненою моделлю системи **S** :

- а) $P(\bar{X} \leftrightarrow \bar{X})$ – потужність взаємодії часток $x_n, n=1, 2, \dots, N$ замкненої множини \bar{X} ;
- б) $P(\bar{X} \leftrightarrow \emptyset)$ – потужність взаємодії часток $x_n, n=1, 2, \dots, N$ з полем комунікації \emptyset ;
- в) $P(X \leftrightarrow)$ – потужність взаємодії часток $x_n, n=0, 1, 2, \dots, N$ із зовнішнім оточенням системи.

Визначимо складові “а”, “б”, “в” у вигляді:

$$\begin{aligned}
 P(\bar{X} \leftrightarrow \bar{X}) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N f_{nm}, \quad n \neq m; \\
 P(\bar{X} \leftrightarrow \emptyset) &= \sum_{n=1}^N f_{n0} + \sum_{n=1}^N f_{0n}; \\
 P(X \leftrightarrow) &= \frac{1}{2} (\sum_{n=0}^N \mathbf{r}_n + \sum_{n=0}^N \mathbf{s}_n).
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Для таблиці *F* на рисунку 4-а, маємо $P(\bar{X} \leftrightarrow \bar{X}) = f_{12} + f_{21} = 1 + 1 = 2$; $P(\bar{X} \leftrightarrow \emptyset) = 4$; $P(X \leftrightarrow) = 3$.

Очевидно, що для системи **S** має місце баланс потужностей:

$$\begin{aligned}
 P(X \leftrightarrow) &= p_0; \\
 P(\bar{X} \leftrightarrow \bar{X}) + P(\bar{X} \leftrightarrow \emptyset) &= P_1; \\
 P(\bar{X} \leftrightarrow \bar{X}) + P(\bar{X} \leftrightarrow \emptyset) + P(X \leftrightarrow) &= p_0 + P_1 = P.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Розглянемо випадок асиметричних потоків у системі **S**, рисунок 5.

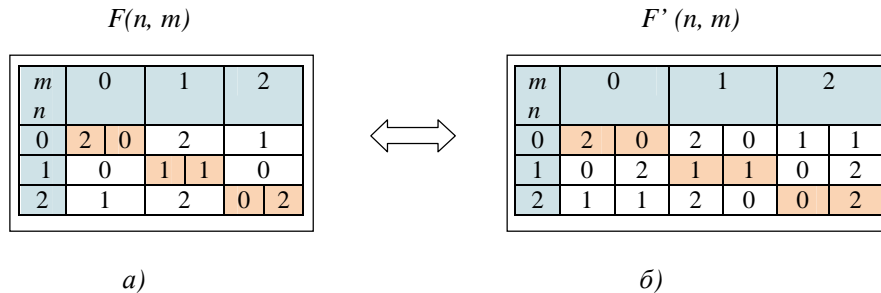


Рисунок 5 – Реорганізація таблиці асиметричних потоків відкритої системи

Порівняно з таблицею *F* симетричних потоків на рисунку 4-а, таблиця потоків *F* (рисунок 5-а) має асиметричні складові. Потік $f_{00}=(l_0, r_0)=(2, 0)$. Це означає, що поле \emptyset , або частка x_0 , відкритої множини X , по відношенню до оточення системи **S** є генератором продукту p у вигляді двох квантів Δp . Продукт $2 \cdot \Delta p$ “випромінюється” полем \emptyset у навколишній простір відкритої системи **M** через канал c_0 (рисунок 1 і рисунок 2). По відношенню до частки x_1 , частка x_0 (поле \emptyset) також асиметрична – віддає частці x_1 два кванти Δp . По відношенню до частки x_2 , поле \emptyset є симетричним – обмінюється з нею по одному кванта Δp .

Потік $f_{11}=(l_1, r_1)=(1, 1)$. Це означає, що частка x_1 зберегла симетричні відношення з оточенням системи. Однак у відношенні з полем \emptyset частка x_1 є асиметричною (вона “поглинає” два кванти від поля \emptyset і два кванти від частки x_2).

Потік $f_{22}=(l_2, r_2)=(0, 2)$. Це означає, що частка x_2 відкритої множини X є споживачем продукту p у вигляді двох квантів Δp : частка x_2 “поглинає” продукт $2 \cdot \Delta p$ з навколишнього простору відкритої системи **S** через канал c_0 , поле \emptyset і канал c_2 . Частка x_2 симетрична у своїх відношеннях з полем \emptyset (обмінюється з полем \emptyset по одному кванта Δp), однак асиметрична у відношеннях з часткою x_1 (віддає їй два кванти).

Представимо таблицю *F* у вигляді *F'*, рисунок 5-б. Далі перетворимо *F'* у *Q'*, рисунок 6.

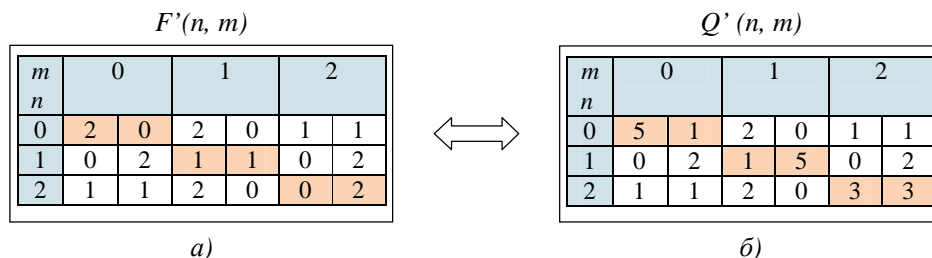


Рисунок 6 – Побудова таблиці взаємодії для асиметричних потоків відкритої системи

Перетворимо таблиці F' і Q' у комплексні матриці. Спочатку побудуємо відповідні таблиці F'' і Q'' , рисунок 7. Для цього кожен пару чисел $F'(n, m)$ або $Q'(n, m)$ позначимо як (a, b) і представимо її парою симетричної і антисиметричної складових (p_R, p_I) що виражені у безрозмірних одиницях потужності [20]:

$$\begin{aligned} p &= (a + b) / 2; \\ q &= \arccos \sqrt{a / (a + b)}; \\ j &= q - p / 4; \\ p_R &= p \cdot \cos^2 j \cdot \text{sign}(\cos j); \\ p_I &= p \cdot \sin^2 j \cdot \text{sign}(\sin j). \end{aligned} \tag{11}$$

Поворот фази θ на кут $\pi/4$ в (11) означає, що складова p_R є симетричною частиною для пари чисел (a, b) , а складова p_I є антисиметричною складовою для пари чисел (a, b) . Нескладно довести, що в окремому випадку, коли кут θ є кратним $\pi/4$ (тобто складові a і b співпадають, або одна з них дорівнює нулю) формули перетворення (11) спрощуються:

$$\begin{aligned} p_R &= (a + b) / 2; \\ p_I &= (b - a) / 2. \end{aligned} \tag{12}$$

Наприклад, якщо $a=b$, то маємо $\theta=\pi/4$; $p_R=p$; $p_I=0$. Якщо $a=0$, то $\theta=\pi/2$; $\varphi=\pi/4$; $p_R=p/2=\beta/4$; $p_I=p/2=\beta/4$. У разі $\beta=0$, маємо $\theta=0$; $\varphi=-\pi/4$; $p_{Ru}=p/2=\beta/4$; $p_I=-p/2=-\beta/4$.

В результаті цих перетворень, таблиці F' і Q' (рисунок 6) перетворюються на таблиці F'' і Q'' , рисунку 7.

	$F''(n, m)$		$Q''(n, m)$
--	-------------	--	-------------

m	0	1	2
n			
0	0,5	-0,5	0,5
1	0,5	0,5	1
2	1	0	0,5

↔

m	0	1	2
n			
0	2,62	-0,38	0,5
1	0,5	0,5	2,62
2	1	0	0,5

Рисунок 7 – Реорганізація таблиці потоків і таблиці взаємодії відкритої системи

Запишемо таблиці F'' і Q'' (рисунок 7) у вигляді умовних комплексних матриць (потоків Φ' і взаємодії C'), рисунок 8. Для цього кожен пару (a, b) умовно представимо комплексною парою

$$(a, b) \rightarrow p_R + i \cdot p_I. \tag{13}$$

Операція (13) є умовною у тому сенсі, що модуль кожної комплексної пари в матрицях Φ' і C' обчислюється не як модуль звичайного комплексного числа, а за формулами (11), тобто:

$$p = |p_R| + |p_I|. \tag{14}$$

	$\Phi'(n, m)$		$C'(n, m)$
--	---------------	--	------------

m	0	1	2
n			
0	$0,5 - i \cdot 0,5$	$0,5 - i \cdot 0,5$	1
1	$0,5 + i \cdot 0,5$	1	$0,5 + i \cdot 0,5$
2	1	$0,5 - i \cdot 0,5$	$0,5 + i \cdot 0,5$

↔

m	0	1	2
n			
0	$2,62 - i \cdot 0,38$	$0,5 - i \cdot 0,5$	1
1	$0,5 + i \cdot 0,5$	$2,62 + i \cdot 0,38$	$0,5 + i \cdot 0,5$
2	1	$0,5 - i \cdot 0,5$	3

a)
b)

Рисунок 8 – Умовні комплексні матриці потоків Φ' і взаємодії C'

Переведемо умовні комплексні пари чисел в матрицях Φ' і C' у квадрати звичайних комплексних чисел, що записані в експоненціальній формі: $\mu = \rho \cdot \exp(i \cdot \varphi)$. З формул (11) маємо

$$r = \sqrt{p} = (|p_R| + |p_I|)^{0.5} \tag{15}$$

$$p_R + i \cdot p_I \rightarrow \mathbf{m}^2 = [r \cdot e^{i(q-\frac{p}{4})}]^2 = p \cdot e^{i(2q-\frac{p}{2})}$$

З урахуванням (15), матриці Φ і C виглядатимуть як звичайні комплексні матриці Φ і C :

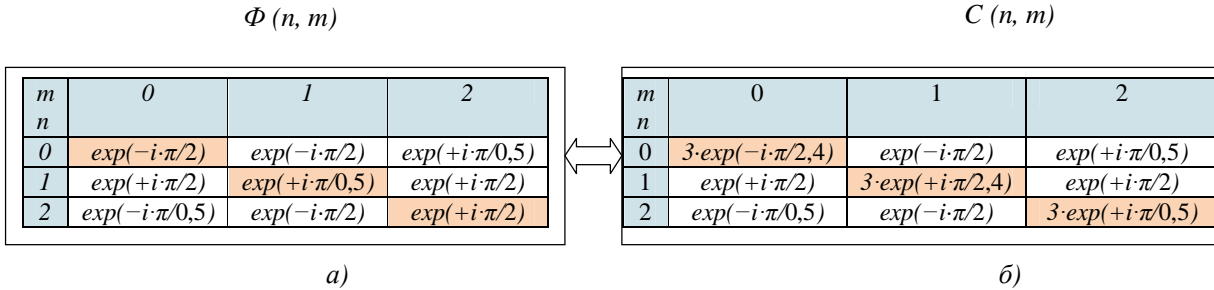


Рисунок 9 – Комплексна матриця потоків (а) і матриця взаємодії (б) для відкритої системи

Обчислення комплексних експонент елементів для матриць Φ і C проілюструємо на прикладі елемента $c_0=C(0,0)$. З рисунку 6-б маємо $Q'(0, 0) = (5, 1)$. За формулами (11): $\alpha=5, \beta=1$. Далі, $p=(\alpha+\beta)/2=3; q = \arccos(\sqrt{a / (a + b)}) = \arccos(0.913) = 0.134; \varphi = \theta - \pi/4 = 0.134 - 0.785 = - 0.651$; Далі з формули (15): $\mu^2 = \rho^2 \cdot [\exp(i \cdot \varphi)]^2 = p \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \varphi)$; $2\varphi = 2 \cdot (- 0.651) = - 1.302 = - 0.414 \cdot \pi = - \pi/2.4$. Звідси $c_0 = 3 \cdot \exp(-i\pi/2.4)$.

Матриці Φ і C на рисунку 9 за своїми властивостями схожі на ермітові матриці. А саме: матриці Φ і C є самоспряженими за всіма елементами, окрім елементів головної діагоналі. Для ермітової матриці усі елементи головної діагоналі повинні бути дійсними числами. Тому матриці Φ і C не є ермітовими (самоспряженими матрицями), оскільки деякі або навіть усі діагональні елементи у цих матриць у загальному випадку є комплексними числами. Комплексну матрицю, яка самоспряжена за всіма елементами окрім діагональних, назвемо *квазіермітовою* матрицею.

Таким чином, відкрита система \mathbf{S} , яка має N ідентифікованих складових часток, може бути представлена однією з двох еквівалентних форм опису: квадратною комплексною матрицею потоків Φ розміром $(N+1) \times (N+1)$, або квадратною комплексною матрицею взаємодії C такого самого розміру $(N+1) \times (N+1)$.

Представимо квазі-ермітову матрицю C такою, що складається з двох структурних компонент:

- а) ермітова матриця H , яка утворена з квазі-ермітової матриці C шляхом заміни усіх діагональних елементів матриці C на модулі цих елементів (які є дійсними числами);
- б) вектор $\psi = \{\psi_n\}, n=0, 1, \dots, N$, який описує фази кожного з діагональних елементів матриці C .

В свою чергу, кожній ермітовій матриці H відповідає деякий комплексний оператор A такий, що $A \cdot A^* = A^* \cdot A = H$. Комплексний оператор A визначає деякий векторний базис комплексного евклідового простору E^H , тобто матрицю A можна представити як сукупність векторів-строк A_n : $A = \{A_n\}, n=0, 1, \dots, N$. З іншого боку, ермітова матриця H є інваріантною формою опису евклідового простору E^H (метричним тензором, або метрикою, простору E^H).

Відповідно до розглянутої вище моделі інфокомунікаційної системи \mathbf{S} , базисні вектори A_n будемо розглядати як геометричну інтерпретацію властивостей часток x_n відкритої множини X , яка утворює систему \mathbf{S} . У цьому сенсі, квадрат довжини базисного вектора A_n має зміст потужності частки x_n , тобто $|A_n|^2 = p_n = \rho_n^2$.

Матрицю C завжди можна побудувати, якщо задана ермітова матриця H (метричний тензор евклідового простору E^H) і вектор фаз ψ , тобто матриця C є певна функція f від аргументів H і ψ : $C = f(H, \psi)$. Вектор фаз ψ назвемо *фазовою кривизною* неевклідового простору C , що утворений з евклідового простору E^H шляхом його фазового викривлення вектором ψ . Будемо вважати, що квазі-ермітова комплексна матриця взаємодії C для відкритої системи \mathbf{S} описує неевклідовий простір з кривизною ψ і дотичним евклідовим простором E^H . Таким чином, квантова модель відкритої інфокомунікаційної системи як розподіленого об'єкта (позначена вище як система \mathbf{S}) може бути представлена об'єднанням двох складових частин: метричного тензора H і вектора фазової кривизни ψ :

$$\mathbf{S}(O) = f(O, W, \psi) = C = f(H, \psi). \tag{16}$$

ВИСНОВОК

В роботі побудовано узагальнену квантову модель відкритої інфокомунікаційної системи як розподіленого об'єкта спостереження і контролю. Система \mathbf{S} утворена об'єднанням часток об'єкта спостереження, суб'єкта-спостерігача і поля комунікації. Згідно з моделлю, окремі частки системи \mathbf{S} взаємодіють між собою шляхом обміну квантованими одиницями інформаційного продукту Δp . Поле комунікації відіграє в моделі роль інтегруючого середовища, що забезпечує можливість взаємодії часток системи, а також забезпечує можливість взаємодії часток об'єкта і суб'єкта з зовнішнім оточенням системи.

Узагальнена модель формалізована у двох еквівалентних табличних формах: таблиця потоків F і таблиця взаємодії Q . Таблиця потоків F і таблиця взаємодії Q відображені у квазі-ермітові комплексні матриці потоків (Φ) і взаємодії (C). Квазі-ермітова комплексна матриця взаємодії C представлена як об'єднання ермітової матриці H і вектора фазової кривизни ψ . Ермітова матриця H визначена як метричний тензор евклідового простору E^H . Вектор фазової кривизни ψ визначає міру відхилення простору C від евклідового простору E^H .

Комплексна матриця взаємодії C відображує модель інфокомунікаційної системи у геометричний простір з неевклідовою метрикою, в якому тензор H задає евклідовий дотичний простір E^H , а вектор ψ – фазову кривизну. Отримана в роботі квантова модель є адекватним відображенням процесів інформаційної взаємодії об'єктів контролю і суб'єктів спостереження в інфокомунікаційних мережах, а також інших типів взаємодії у відкритих системах різної природи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
2. Зайцев Д.А. Синтез моделей Петри телекоммуникационных протоколов / Д.А.Зайцев // Научные труды ОНАЗ им. О.С.Попова. – 2005. – № 2. – С. 36–42.
3. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Клейнрок Л. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
4. Guizani M. Queuing Theory, in Network Modeling and Simulation: A Practical Perspective / M. Guizani, A. Rayes, B. Khan, Al-Fuqaha A. // Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010. – Chapter 9. – P. 197–233. – doi: 10.1002/9780470515211.ch9.
5. Arnold O. Allen. Probability, Statistics, and Queuing Theory with Computer Science Applications. – Orlando, FL, USA: Academic Press, Inc., 1978. – ISBN: 0120510502.
6. Громов Ю.Ю. Фрактальный анализ и процессы в компьютерных сетях : учеб. пособие / [Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, О.Г. Иванова, А.В. Лагутин, В.М. Тютюнник]. – [2-е изд., стереотип]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 108 с.
7. A Practical Guide to Wavelet Analysis. – Режим доступа: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>
8. A Brief Introduction to Neural Networks. David Kriesel. [http://www.dkriesel.com/en/science/neural Networks](http://www.dkriesel.com/en/science/neural%20Networks)
9. Петров А. Е. Тензорная методология в теории систем / Петров А. Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 152 с.
10. Петров А.Е. Тензорный метод Крона, LT метод Баргини-Кузнецова и двойственные сети / А.Е. Петров.– Режим доступа: http://uni-mera.ru/wp-content/uploads/005_Petrov.pdf
11. Євсєєва О.Ю. Теоретичні основи забезпечення якості обслуговування при управлінні графіком з використанням діакоптичних і тензорних моделей телекомунікаційних систем: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня. докт. техн. наук: спец. 05.12.02 – “Телекомунікаційні системи та мережі” / О.Ю. Євсєєва. – Харків, 2010. – 35 с.
12. Кугергин В.А. Тензорный метод построения моделей пространства инфокоммуникационных сетей / В.А. Кугергин, А.С. Шадрин // Электронный журнал “Вычислительные сети. Теория и практика”. – 2009. – № 2(15): 4.3. – Режим доступа: <http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?!=ru&n=15&pa=4&ar=3>.
13. Kuratowski K. and Mostowski A. Set theory. North-Holland Publishing Company. Amsterdam . Pwn – Polish Scientific Publishers . Warszawa. 1967. – 416 p.
14. Келли Дж. Общая топология / Келли Дж. – М., Наука. 1968, 384 с.
15. Steven Weinberg. The Quantum Theory of Fields. Vol. I – Foundations. University of Texas at Austin. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. 1995 – 609 p. Режим доступа: <http://www.ft.uam.es/personal/hernandez/QFT/Weinberg--The-Quantum-Theory-of-Fields-Vol-1-Foundations.pdf>
16. Тихонов В.И. Построение тензорной модели асимметричных цифровых потоков в комплексном пространстве [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 42–53. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_tikhonov_tensor.pdf.