УДК 004.722

О.І. Тиртишніков, Ю.М. Корж, О.О. Ботвін

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

КЛАСИФІКАЦІЯ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ КОМПЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНОГО ПОНЯТТЯ РОЗМІРНОСТІ

Розглянуті причини суперечливості та неповноти існуючих практичних класифікації комунікаційних мереж багатопроцесорних комп'ютерних систем на основі поняття розмірності топологічної структури. Проаналізована проблема багатоваріантності візуалізації топологічних структур та її вплив на практичні класифікації комунікаційних мереж. Введено уточнене поняття розмірності комунікаційної мережі як її мінімальної абсолютної зв'язності. Запропоновано підхід до побудови несуперечливої та практично значимої (інженерної) класифікації топологічних структур комунікаційних мереж багатопроцесорних комп'ютерних систем, а також базовий варіант такої класифікації.

Ключові слова: *комунікаційна мережа, класифікація комунікаційних мереж, розмірність комунікаційної мережі, візуалізація топологічних структур, багатопроцесорна комп'ютерна система.*

Вступ

У сучасних багатопроцесорних комп'ютерних системах (БПКС) комунікаційна мережа (КМ) є ключовою підсистемою з точки зору забезпечення високої продуктивності та відмовостійкості системи в цілому. Базовим етапом проектування КМ є її топологічний синтез, тобто вибір топології (графа міжмодульних зв'язків), або декількох топологій при ієрархічній побудові мережі, та, відповідно, оцінювання метрик і властивостей отриманої топологічної структури (ТС) [1 – 5].

Незважаючи на велику розмаїтість структур КМ, реалізованих у різних БПКС, а також очевидну тенденцію їх ускладнення зі збільшенням кількості процесорів в сучасних системах, у доступних авторам джерелах відсутня загальновизнана та практично значима їх топологічна класифікація.

Математичні класифікації КМ [1, 4, 5], у зв'язку з прагненням їх авторів до максимальної узагальненості та повноти, виглядають надто ускладненими, класифікаційні ознаки, як правило, не співвідносяться з практично значимими топологічними метриками КМ. У кращому випадку вони можуть лише підказати інженеру-конструктору або проектувальнику наближений напрямок пошуків, із чим погоджуються деякі автори подібних класифікацій [1].

З іншого боку, поширені у спеціальній та навчальній літературі «практичні» класифікації КМ [1, 6 – 8], виглядають надто спрощеними, неповними та суперечливими.

На наш погляд, актуальність розробки несуперечливої, достатньо повної для розв'язання інженерних завдань та практично значимої класифікації ТС КМ БПКС (далі будемо називати її інженерною класифікацією), що може стати підґрунтям для розв'язання завдань, пов'язаних з проблемами формалізації та автоматизації топологічного синтезу КМ не викликає сумнівів.

В даній публікації аналізуються причини суперечливості і неповноти існуючих практичних класифікацій КМ, а також формулюються деякі пропозиції щодо побудови інженерної класифікації КМ БПКС на основі уточненого поняття розмірності КМ.

Суперечливість практичних класифікацій комунікаційних мереж на основі поняття розмірності

У більшості практичних класифікацій топологічних структур КМ в якості класифікаційної ознаки використовується такий показник, як їх розмірність [6 – 8]. Поняття розмірності (вимірності або мірності) простору широко застосовується в загальній топології, однак інтерпретація математичних результатів, отриманих в даній області, може бути дуже неоднозначною – у тому числі й в топології КМ. Наприклад, в [6] розмірність КМ визначається як кількість можливих варіантів переходу від вузла-відправника до вузла-приймача, тобто кількістю альтернативних шляхів, що з'єднують ці вузли та не перетинаються. Також пропонується вважати мережу нульвимірною, якщо існує тільки один шлях між будь-якими двома вузлами, при наявності двох варіантів переходу – одновимірною [6].

Відповідно, якщо є чотири альтернативні напрямки (дві «осі», по кожній з яких можна переміщуватися в одному з двох напрямків), КМ вважається двовимірною і т.д.

Однак, цей простий та однозначний, на перший погляд, підхід вимагає суттєвих уточнень, тому що приводить до суперечливих результатів вже при спробі класифікувати за вказаною ознакою навіть найбільш прості та широко розповсюджені ТС КМ.

Наприклад, [6] пропонується вважати нульвимірними не тільки простіші структури типу «зірка» та «дерево», в яких дійсно для будь-яких двох вузлів існує тільки один шлях, що їх з'єднує, але й повнозв'язну структуру, хоча очевидно, що в ній між будь-якими двома вузлами є N-1 (N – кількість вузлів, розмір КМ) альтернативних шляхів, а саме – один найкоротший шлях одиничної довжини та N-2 шляхів подвійної довжини через всі інші вузли, які не є відправником або приймачем.

Покажемо, що урахування тільки найкоротших шляхів між вузлами може привести до труднощів при визначенні розмірності КМ не тільки у випадку з повнозв'язною структурою.

Як приклад, розглянемо класичну решітчасту (прямокутну стільникову або сітчасту) структуру, яка в [6] (як і в більшості інших подібних класифікацій) віднесена до двовимірних ТС. Реалізація даної структури розміром N=4×4 вузлів показана на рис. 1.

Дійсно, для з'єднання будь-яких двох внутрішніх вузлів решітчастої структури (на рис. 1 позначені літерами *а*), можна запропонувати чотири альтернативні шляхи, але тільки один з них має мінімальну (одиничну) довжину, що, однак, справедливо не вважається підставою для визнання даної ТС нульвимірною.

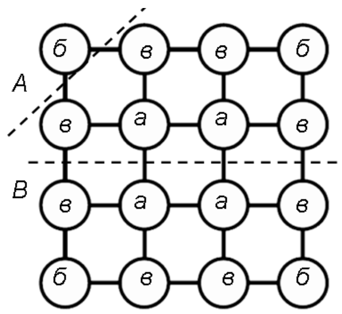

Рис. 1. Двовимірна решітка, N = 16

Взагалі, двовимірна решітка є типовим представником широкого класу ТС, вузли яких мають різній ступінь (порядок). У спеціальній літературі таки структури іноді називають асиметричними або нерегулярними. На наш погляд, обидві назви не можна вважати вдалими – очевидно, що решітчаста структура має властивості геометричної симетрії та регулярності (під останньою часто розуміють багаторазове повторення в структурі того ж самого базового фрагменту). Більш прийнятним виглядає застосування назви «унівалентні» [1] для структур, всі вузли яких мають однаковий порядок, та, відповідно, «неунівалентні» для ТС, що не мають даної властивості.

Всі периферійні вузли решітчастої структури мають менший порядок, порівняно з внутрішніми (на рис.1 літерами *б* позначені вузли другого порядку, літерами *в* – третього). Зрозуміло, що кількість альтернативних шляхів між двома вузлами не може перевищувати порядок цих вузлів; причому, якщо вони мають різні порядки, то кількість альтернативних шляхів визначається меншим значенням порядку.

Із розглянутого прикладу можна зробити висновок, що визначення розмірності структури як кількості альтернативних шляхів між двома вузлами, без уточнення, про які саме вузли йде мова, є некоректним, принаймні, для неунівалентних ТС.

В [7, 8] пропонується розрізняти:

– одновимірні топології (лінійний масив);

– двовимірні топології (кільце, зірка, дерево, решітка або сітка);

– трьохвимірні топології (повнозв'язна, хордальне кільце [7], кубічні структури [8]);

– гіперкубічні топології.

Тут повнозвя'зна топологія віднесена вже до трьохвимірних, що також не виглядає переконливим. Недосконаліcть даного варіанту класифікації можна пояснити в такий спосіб. Гіперкуби тут виділені в окремий клас, можливо, на підставі того, що їх розмірність зростає зі збільшенням розміру КМ, тобто вони є ТС змінної розмірності. Проте не викликає сумнівів той факт, що будь-які неповнозв'язні ТС (в тому числі і гіперкубічні) можуть бути отримані з повнозв'язної структури відповідного розміру шляхом видалення, згідно визначеного правила, «надлишкових» зв'язків. Видалення будь-якої кількості зв'язків, у свою чергу, зменшує кількість альтернативних шляхів, принаймні, між деякими вузлами структури.

Відповідно, по-перше, жодна ТС не може мати більшу (або хоча би ту ж саму) розмірність, чим повнозв'язна структура з той самою кількістю вузлів.

По-друге, повнозв'язна структура також має змінну розмірність, що зростає зі збільшенням її розміру (причому значно швидше, чим це відбувається в неповнозв'язних ТС змінної розмірності, до яких відносяться і гіперкуби).

Класифікація, запропонована в [9], відрізняється від попередніх тим, що тут гіперкуби не виділені в окремий клас, а віднесені, поряд з повнозв'язною та кубічними, до трьохвимірних топологій, тобто розмірність ТС КМ, без достатніх на це підстав, ототожнюється з вимірністю класичного евклідового простору та, відповідно, жорстко обмежується останньою.

В аналітичній геометрії розмірність фігури дорівнює кількості координат, необхідних для визначення положення точки, що належить цієї фігурі. Так, положення точки на прямій лінії визначається єдиною координатою, на поверхні – двома координатами, в трьохвимірному просторі, відповідно, трьома. З одного боку, очевидна об'єктивна необхідність трьох вимірів для однозначної характеристики «об'ємного» тіла. З іншого боку, трьохвимірність простору є суб'єктивним способом сприйняття (візуалізації) людиною об'єктів навколишнього світу, причому реалізація цього способу може бути, в багатьох випадках, неоднозначною (багатоваріантною).

На підставі проведеного аналізу можна вважати повністю обґрунтованим припущення про те, що джерелом розглянутих труднощів та протиріч у практичних класифікаціях КМ (в тому числі, некоректного використання поняття розмірності ТС) є відомий «апаратний недолік» людського мислення, а саме схильність до візуалізації абстрактних ТС (які, по суті, є лише можливими способами з'єднання вузлів БПКС лініями зв'язку) у вигляді «звичних» геометричних фігур. Відповідно, не викликають сумнівів, з одного боку, суб'єктивність такої візуалізації, з іншого – обмеженість її можливостей.

Багатоваріантність візуалізації топологічних структур комунікаційних мереж

Багатоваріантність візуалізації ТС визначається, по-перше, різними способами уявного розташування вузлів на площині або у трьохмірному просторі, по-друге, різними способами представлення міжвузлових з'єднань. Існують декілька способів зображення ребер графів [10, 11]. Найбільш природними з точки зору простоти та зручності уявлення, слід вважати зображення зв'язків у вигляді відрізків прямих ліній або дуг кіл. Відповідно ці два способи можуть застосовуватися як окремо, так і спільно.

На рис. 2 зображені чотири еквівалентні, з точки зору ідентичності топологічних властивостей, форми візуального подання трьохвимірного булевого куба (порядкові номери вузлів подані трьохрозрядним бінарним рефлексивним кодом Грея). Неважко переконатися, що всі чотири графи мають однакову матрицю зв'язності (представлена табл. 1), що і доводить їх еквівалентність. Зрозуміло, що кількість цих еквівалентних форм можна збільшити. Наприклад, структури, позначені літерами а і б можна зобразити, відповідно, у вигляді сфери та вкладених кілець зі з'єднаннями «сходового» типу, причому для цього навіть немає необхідності змінювати просторове розташування вузлів.

Таблиця 1

Матриця зв'язності булевого куба

	000	001	011	010	110	111	101	100
000	0	1	0	1	0	0	0	1
001	1	0	1	0	0	0	1	0
011	0	1	0	1	0	1	0	0
010	1	0	1	0	1	0	0	0
110	0	0	0	1	0	1	0	1
111	0	0	1	0	1	0	1	0
101	0	1	0	0	0	1	0	1
100	1	0	0	0	1	0	1	0

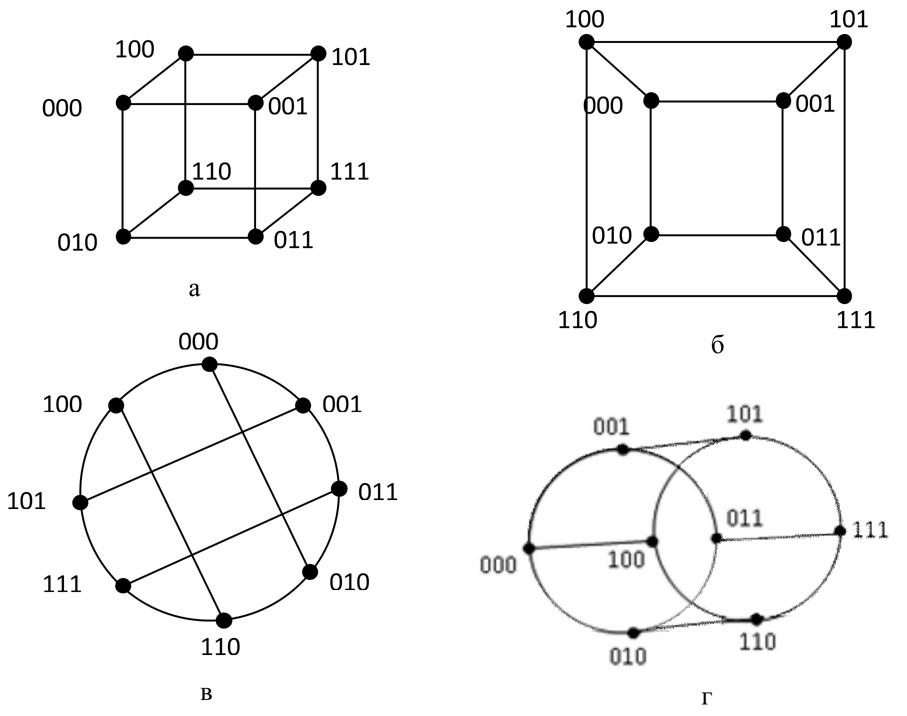

Рис. 2. Еквівалентні форми візуального подання трьохвимірного булевого куба

На рис. 3 представлені деякі еквівалентні форми візуального подання ТС, яку в рамках різних підходів називають чотирьохвимірним гіперкубом, трьохвимірним або двовимірним тором, а також хордальним кільцем (порядкові номери вузлів тут подані чотирьохрозрядним бінарним рефлексивним кодом Грея). Можна запропонувати і інші варіанти, але пошук всіх можливих форм візуалізації складних ТС, як і докладне вивчення особливостей процесу їх візуалізації не є предметом нашого дослідження і відноситься, найскоріше, до предметної області когнітивної психології [12].

Тому обмежимося тільки деякими стислими зауваженнями.

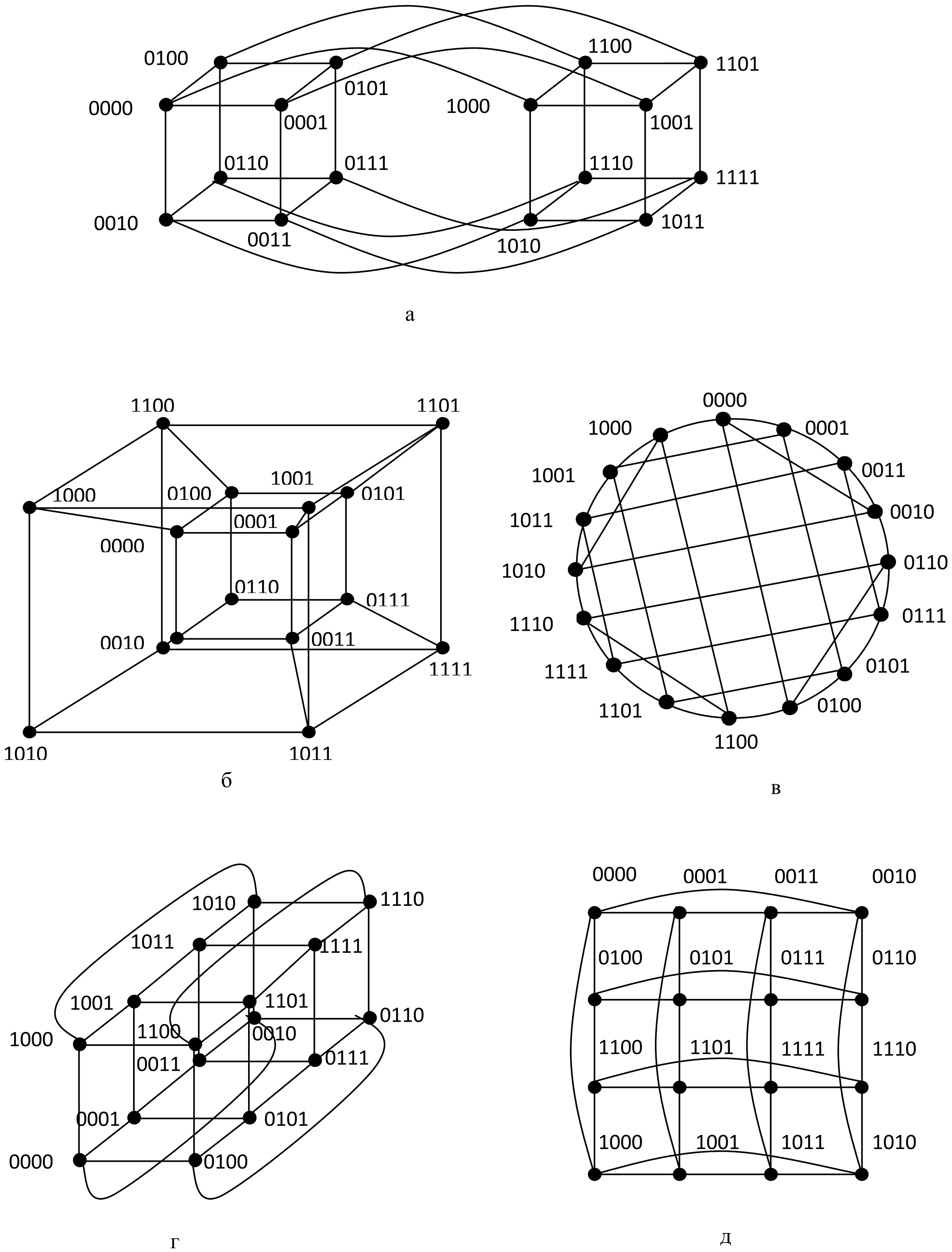

Рис. 3. Еквівалентні форми візуального подання чотирьохвимірного гіперкуба

На наш погляд, припущення про те, що кількість можливих форм візуалізації ТС суттєво зростає зі збільшенням розміру та зв'язності КМ, не слід вважати правильним. В зв'язку з принциповою неможливістю візуалізації будь-яких фігур у просторі, що має вимірність більше трьох, ми здатні уявляти лише деякі суб'єктивні «проекції» структур великої розмірності в трьохвимірний простір або на площину.

Наприклад, для повного графу досить великого розміру можна запропонувати лише дві найбільш «природні» форми візуалізації – у вигляді повнозв'язного хордального кільця або у вигляді сфери з рівномірним розташуванням вузлів на її поверхні та відповідними з'єднаннями (деяка частина зв'язків тут буде уявлятися у вигляді дуг окружностей, інша – у вигляді відрізків прямих ліній), причому уявити першу форму значно простіше.

Можна впевнено стверджувати, що для будь-якої топологічної структури, з кількістю вузлів більше трьох, існує не менше двох еквівалентних форм візуалізації – у вигляді найбільш «природних» (або «привабливих») трьохвимірної та двовимірної фігур.

Класифікація комунікаційних мереж на основі уточненого поняття розмірності структури

Розглянуті недоліки та протиріччя існуючих класифікацій КМ можуть бути усунені уточненням поняття розмірності ТС мережі та відмови від його ототожнення з традиційним уявленням про вимірність евклідового простору.

Пропонується визначити розмірність ТС КМ R як мінімальну абсолютну зв'язність структури, тобто кількість альтернативних шляхів, що не перетинаються, будь-якої довжини між будь-якими двома вузлами, що мають мінімальний для даної структури ступінь d_{min} (мінімальний порядок).

Геометрично мінімальну зв'язність можна представити як ширину того розрізу КМ, який перетинає мінімальну можливу кількість зв'язків (на відміну від ширини бісекції, що визначається як ширина того розрізу структури, що розділяє її приблизно навпіл та перетинає мінімальну кількість зв'язків).

Розрізи, що визначають мінімальну абсолютну зв'язність структури (позначений літерою А) та ширину бісекції (позначений літерою Б) для решітчастої структури показані на рис. 1. Якщо КМ побудована «правильно» (вузли мінімального порядку розташовані тільки на периферії структури, як у решітки, що зображена на рис. 1), то для неї не можна побудувати розріз, що має ширину меншу за d_{min}. Тоді $R = d_{min}$.

Звернемо увагу на те, що уточнене таким чином поняття розмірності ТС комунікаційних мереж є об'єктивним показником, значення якого не залежить від способу візуалізації структури.

З іншого боку, воно є і практично значимим показником, тому що для найбільш розповсюджених в сучасних БПКС унівалентних комунікаційних мереж співпадає з порядком вузлів, тобто кількістю їх комунікаційних портів.

На основі уточненого поняття розмірності ТС комунікаційних мереж можна класифікувати таким чином:

– нульрозмірна (тривіальний граф або точка);

– однорозмірні (лінійний масив, прості дерева, зірка) – прості графи, що мають принципово різні топологічні властивості та розглядаються звичайно як базові графи для побудови більш складних структур [13, 14];

– дворозмірні (кільце, дворозмірні реалізації n- розмірних топологій – наприклад, дворозмірна решітка);

– n-розмірні, тобто структури змінної розмірності, конкретні реалізації яких мають різну розмірність, що визначається кількістю вузлів $n<N-1$ (багаторозмірні решітки або гіперрешітки та тори на їх основі [15, 16]; гіперкуби; складні структури, що побудовані на основі деревовидних та зіркоподібних базових графів, тобто гіпердерева [16], кільцево-хордальні або циркулянтні мережі [17] і т.д.);

– N-1-розмірна (повнозв'язна) – структура змінної, максимально можливої для заданого розміру КМ, розмірності. Це єдина топологія розмірність реалізацій якої змінюється в максимально широкому діапазоні $0 \leq R \leq N-1$.

Наприклад, тривіальний граф можна вважати нульрозмірною реалізацією, «відрізок» з двох вузлів та одного ребра – однорозмірною, кільце з трьох вузлів – двохрозмірною реалізацією повнозв'язної топології.

Висновки

Недоліки та протиріччя існуючих практичних класифікацій комунікаційних мереж багатопроцесорних комп'ютерних систем обумовлені, в основному, суб'єктивністю (багатоваріантністю) візуалізації ТС КМ та, як наслідок, некоректним застосуванням у якості класифікаційної ознаки такого показника, як їх розмірність.

Ці недоліки та протиріччя можна усунути уточненням поняття розмірності ТС та відмовою від ототожнення його з традиційним уявленням про вимірність евклідового простору.

Запропонований підхід до класифікації КМ на основі уточненого поняття розмірності ТС, як її мінімальної абсолютної зв'язності, усуває розглянуті недоліки та протиріччя існуючих практичних класифікацій КМ.

Подальшим напрямком досліджень може бути розроблення більш розвиненої та деталізованої, порівняно з запропонованим початковим (базовим) варіантом, інженерної класифікації КМ з метою створення підґрунтя для розв'язання завдань формалізації та автоматизації топологічного синтезу комунікаційних мереж багатопроцесорних комп'ютерних систем.

Список літератури

1. Артамонов Г.Т. Топология регулярных вычислительных сетей и сред [Текст]/ Г.Т. Артамонов. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.

2. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы [Текст] / В.В. Корнеев. – М.: Нолидж, 1999. – 320 с.

3. Dally W.J. Principles and practices of interconnection networks [Text] / W.J. Dally, B. Towles. – Elsevier, 2004. – 550 p.

4. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды [Текст] / Э.В. Евреинов. – М.: Радио и связь, 1981. – 207 с.

5. Артамонов Г.Т. Топология сетей ЭВМ и микропроцессорных систем [Текст] / Г.Т. Артамонов, В.Д. Тюрин. – М.: Радио и связь, 1991. – 248 с.

6. Таненбаум Э. Архитектура компьютера [Текст]: пер с англ. / Э. Таненбаум, Т. Остин. – СПб.: Питер, 2013. – 816 с.

7. Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем [Текст]: учебник для вузов / С.А. Орлов, Б.Я. Цилькер. – СПб.: Питер, 2011. – 688 с.

8. Мелехин В.Ф. Вычислительные машины, системы и сети [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.Ф. Мелехин, Е.Г. Павловский. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560 с.

9. Мельник А.О. Архітектура комп'ютера [Текст]: Наукове видання: підручник / А.О. Мельник. – Луцьк: Волинська обласна друкарня, 2008. – 470 с.

10. Харари Ф. Теория графов: [Текст] / Ф. Харари; пер с англ. В. П. Козырева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.

11. Дистель Р. Теория графов [Текст]: пер с англ. / Р. Дистель. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2002. – 336 с.

12. Солсо Р. Когнитивная психология [Текст]: пер с англ. / Р. Солсо. – СПб.: Питер, 2002. – 590 с.

13. Тиртишніков О.І. Оцінювання ступеню асиметричності та топологічної вартості статичних комунікаційних мереж [Текст] / О.І. Тиртишніков, О.О. Ботвін, В.В. Сенько // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 1 (126). – С. 162-165.

14. Пинчук В.П. Базовые графы для построения топологии многопроцессорных систем [Текст] / В.П. Пинчук // Искусственный интеллект. – 2004. – № 4. – С. 46-58.

15. Тиртишніков О.І. Властивості статичних комунікаційних мереж тороїдально-кубічних топологій [Текст] / О.І. Тиртишніков, І.В. Додух // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – Вип. 2 (30). – С. 60-63.

16. Kotsis G. Interconnection topologies and routing for parallel processing systems [Text] / G. Kotsis. – Wien: ACPC, Technical Report Series, ACPC / TR 92-19, 1992. – 95 p.

17. Монахова Э.А. Структурные и коммуникативные свойства циркулянтных сетей [Текст] / Э.А. Монахова // Прикладная дискретная математика. – 2011. – № 3. – С. 92-115.

Надійшла до редколегії 24.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаєв, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

КЛАССИФИКАЦИЯ КОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОГО ПОНЯТИЯ РАЗМЕРНОСТИ

А.И. Тыртышников, Ю.Н. Корж, А.А. Ботвин

Рассмотрены причины противоречивости и неполноты существующих практических классификаций коммуникационных сетей многопроцессорных компьютерных систем на основе понятия размерности топологической структуры. Проанализирована проблема многовариантности визуализации топологических структур и ее влияние на практические классификации коммуникационных сетей. Введено уточненное понятие размерности коммуникационной сети как ее минимальной абсолютной связности. Предложен подход к построению непротиворечивой и практически значимой (инженерной) классификации топологических структур коммуникационных сетей многопроцессорных компьютерных систем, а также базовый вариант такой классификации.

Ключевые слова: *коммуникационная сеть, классификация коммуникационных сетей, размерность коммуникационной сети, визуализация топологических структур, многопроцессорная компьютерная система.*

CLASSIFICATION OF COMMUNICATION NETWORKS MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS WHICH BASED ON THE SPECIFIED CONCEPT OF DIMENSION

O.I. Tyrtyshnikov, Y.M. Korzh, O.O. Botvin

The reasons of inconsistency and incompleteness in existing practical classifications of communication networks for multiprocessor computer systems based on the notion of dimension topological structure. The problem of multivariate visualization topological structures and influencing on the practical classification of communication networks was analyzed. The specified concept of dimension in communication network entered as minimum absolute connectedness. Offered approach to the construction of self-consistent and practically meaningful (by an engineer) classification of topological structures of communication networks multiprocessor computer systems and also base variant of such classification.

Keywords: *communication network, classification of communication networks, dimension of communication network, visualization of topological structures, multiprocessor computer system.*