

Марта Л. Данилович-Кропивницька  
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ  
НА ЗАСАДАХ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

*У статті досліджено структуру міжорганізаційної мережі на основі математичного інструментарію теорії графів та їх нових структурних властивостей. За допомогою екстремальних параметрів графів обґрунтовано оптимальне число агентів мережі.*

*Ключові слова:* мережева економіка; міжорганізаційні мережі; графи; центральність; полярність.

*Форм. 2. Табл. 1. Літ. 15.*

Марта Л. Данилович-Кропивницькая  
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЕТИ  
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

*В статье исследована структура межорганизационной сети на основе математического аппарата теории графов и новых структурных свойств графов. С помощью экстремальных параметров графов обосновано оптимальное количество участников сети.*

*Ключевые слова:* сетевая экономика; межорганизационные сети; графы; центральность; полярность.

Marta L. Danylovych-Kropyvnytska<sup>1</sup>  
GRAPH THEORY-BASED STUDY  
OF A NETWORK STRUCTURE

*The article explores the structure of inter-organisational networks and their new structural features on the basis of the graph theory and the related mathematical approaches. Extremum parameters of graphs are used to estimate the optimum number of network members.*

*Keywords:* network economy; inter-organisational network; graphs; centrality; polarity.

*Peer-reviewed, approved and placed: 26.08.2016.*

**Постановка проблеми.** Найбільш вагомою особливістю сталого світового розвитку є тенденція формування мережевої економіки, яка базується на економіці знань та новітніх інформаційно-комунікаційних технологіях. Основною умовою становлення мережевої економіки стало витіснення з 1980-х рр. четвертого технологічного укладу (ТУ) п'ятим, за якого лідируючі позиції займають комп'ютерні та інформаційні технології, нові організаційні структури, засоби космічного зв'язку, опто-волоконні та біотехнології тощо. В результаті, в мережевій економіці автоматизоване виробництво, завдання, прилади, пристрої, машини та люди пов'язані між собою новими зв'язками. У 2010 р. паралельно зі світовою фінансово-економічною кризою, настав кінець стадії швидкого росту п'ятого технологічного устрою і почався перехід до технологій та формування відтворювального контуру шостого технологічного устрою, період домінування якого очікується починаючи з 2018 року.

У той же час в українській економіці домінують низькотехнологічні галузі виробництва, які відносяться до малонаукоємних галузей. Загалом, в Україні домінує відтворення виробництва 3-го технологічного укладу (гірнична металургія, залізничний транспорт, багатотоннажна неорганічна хімія тощо). Відповідно, майже 95% вітчизняної продукції належить до виробництв 3-го та

---

<sup>1</sup> National University "Lviv Polytechnics", Ukraine.

4-го технологічних укладів. Зростання ВВП за рахунок введення нових технологій в Україні оцінюється всього у 0,7–1% [6].

Попри це, сучасне суспільство, що розвивається в напрямку постіндустріального, все більше стає мережевим. Постійно збільшується кількість макрота мікроекономічних структур, які функціонують на мережевих принципах. Мережевий ефект взаємодії породжує нове явище зростаючої граничної корисності та зростаючої граничної продуктивності. Чим більший масштаб діяльності в таких умовах, тим вища ефективність використання додатково залучених ресурсів. Особливо яскраво ефект масштабу проявляється в межах мережі, яка використовує вироблені нею стандарти, що стає основним фактором конкурентоспроможності.

Об'єктом дослідження є міжорганізаційні мережі (МоМи) як альтернатива ієрархічним економічним системам організації бізнесу, що розглядаються у взаємовідносинах і взаємозв'язках між економічними агентами (підприємствами мережі), а їх центральною характеристикою є структура відношень між учасниками мережі.

Вагомість мережевої концепції та відповідне зростання уваги дослідників до цієї теми викликано можливістю використання міждисциплінарного підходу. Відношення між економічними агентами в міжорганізаційній мережі надалі будемо трактувати як інститути, що мають свою структуру, яка переважно стабільна в реальному часі та передбачувана, а тому піддається дослідженню [3; 7; 9]. Сукупність та конструкція відношень створює міжорганізаційну мережу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** МоМ є саморегулюючою системою, що побудовано на принципах синергії з метою оптимального використання ресурсів, включаючи знання та інтелектуальний потенціал і зменшення інвестиційних ризиків. Поштовх до дослідження мережевої взаємодії дала соціологія, зокрема, теорія соціального обміну Дж. Хоманса, яка побудована на ідеї обміну соціальними і матеріальними ресурсами як фундаментального способу формування на основі взаємодій у суспільстві [8]. М. Грановеттер [14] підкреслював, що економічний аналіз підсилює вагомість взаємовідносин для учасників бізнес-мережі за рахунок «вбудованості» самої мережі в соціальну структуру.

Це означає, що при формуванні МоМ спочатку утворюється її основа у вигляді соціальної мережі як специфічної множини зв'язків між певною групою економічних агентів. Міждисциплінарна теорія соціальних мереж підсилила не лише мережеву концепцію, а й роль інструментарію теорії графів при дослідженні мереж, а також дала можливість зв'язати поняття теорії графів та структурні властивості мереж [3; 10–12].

**Невирішені раніше частини загальної проблеми.** Саме на основі аналізу основних положень теоретичних і емпіричних досліджень, що лежать в основі мережевої світової економіки, виникає необхідність теоретичного обґрунтування оптимальної структури мережі, механізмів мережевої взаємодії та координації дій окремих підприємств – учасників.

Трактування МоМів як мережі інститутів ототожнює їх з організаційними формами діяльності, де основна роль – зменшення невизначеності на основі

стійких структурних взаємозв'язків і взаємовідносин. Метою представлення МоМ як інститутів є встановлення норм і правил, що впорядковують конкретні взаємовідносини учасників мережі, роблять їх передбачуваними.

Дослідження структури мереж і механізмів координації дій учасників мережі дозволить аналізувати реальний бізнес-процес, і тоді МоМ виступає інструментом реалізації інноваційної-інвестиційної моделі.

Більшість сучасних наукових робіт присвячено дослідженню відмінностей між ринком, ієрархією та мережами, виявленню передумов формування, дослідженню класифікації та основних характеристик мережі. При дослідженні соціальних мереж вже застосовувався математичний інструментарій теорії графів. В рамках неінституційної теорії використовують тільки таку властивість графів, як центральність [3]. Автор використовує додаткові структурні властивості графів – інтеграцію та полярність (уніполярність). Ці нові структурні властивості графів подано в роботах [7; 13; 15], але вони вперше використані при дослідженні структури й організаційних форм міжорганізаційних мереж.

**Метою дослідження** є застосування математичного інструментарію теорії графів до дослідження основних понять структури мережі, що обґрунтовує оптимальне число учасників мережі і слугує основою практичної реалізації мережевої концепції.

**Основні результати дослідження.** В дослідженні пропонується основні поняття та інструментарій теорії графів зв'язати з базовими поняттями структуротворчої основи міжорганізаційної мережі. В практичних застосуваннях граф  $G = (M, E)$ , де ребро  $\langle x, y \rangle$  з'єднує вершини  $x$  і  $y$ , інтерпретують як мережу [1–2; 4–5]. Множина економічних агентів є елементами множини вершин графа  $M$ , множину всіх ребр позначимо  $E$ . МоМ як складну систему, що представлено у вигляді графа, вершини якого відповідають елементам системи, а ребра – наявності зв'язків між ними, можна звести до задачі математичної класифікації, суть якої полягає у визначенні оптимального розбиття множини вершин графа на неперетинаючі класи. При алгоритмізації задач і розв'язанні їх за допомогою комп'ютерних програм графи зображають матрицею інцидентності [4]. Відстань між вершинами – це мінімальне число ребер, по яких можна рухатися, щоб потрапити з однієї вершини в другу. Найбільшу відстань для даного графа називають діаметром і якщо вона скінченна, граф є зв'язним; в протилежному випадку – незв'язним. У випадку біноміальної моделі в роботі [15] доведено, що за достатньо великих  $n$  майже всі графи мають діаметр 2.

Вершина  $i$  графа називається центральною, якщо відстані від неї до решти вершин є невеликими. Параметр центральності вершини  $i$  повинен бути виміром центральності вектора відстаней  $(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$ .

Граф називається інтегрованим, якщо всі його вершини є центральні. Тому параметр інтеграції повинен характеризувати міру центральності на множині центральностей вершин. Граф називається уніполярним, якщо існує єдина центральна вершина. Параметр уніполярності повинен співпадати з мірою центральності найбільш центральної вершини, при цьому центр графа можна визначити як множину всіх вершин з мінімальними сумами відстаней.

Граф називається централізованим, якщо центральність одних вершин значно відрізняється від інших. Параметр централізації  $H$  оцінює дисперсію на множині центральностей вершин графа.

Співвідношення між параметром централізації  $H$ , інтеграції  $S$ , центральності  $S_i$  та уніполярності  $V$  задається формулою:

$$H = 2S - nV = \sum_i (S_i - \min_i S_i), \quad (1)$$

де  $S = \frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij} = \frac{1}{2} \sum_i S_i$ ;  $S_i = \sum_j d_{ij}$ ;  $V = \min_i S_i$ .

Для дослідження структури мережі на основі графа виділяємо такі класи для порівняння, з яких класи 2–5 можна використовувати для аналізу як вершин графу, зв'язків вершин із ребрами, так і графів у цілому.

1. Клас вершин даного графа  $G$ .
2. Клас  $n$ -вершинних графів  $G(n)$ .
3. Клас графів з  $n$ -вершинами та  $k$ -ребрами  $G(n,k)$ .
4. Клас зв'язних  $n$ -вершинних графів  $C(n)$ .
5. Клас зв'язних графів з  $n$ -вершинами та  $k$ -ребрами  $C(n,k)$ .

Використання саме екстремальних властивостей параметрів графів дозволить встановити: оптимальну структуру мережі; оцінку ефективності нововведених агентів у мережу; врахування існуючих зв'язків при проектуванні у майбутньому; визначити, які агенти є центральними, а які – периферійними.

При дослідженні залежності екстремальних властивостей параметрів графа та його структури використовують «ланцюжок», «зірку», «циклічний» чи «повний граф». Обчислення максимальних і мінімальних значень структурних параметрів графа не завжди можливе і ті значення, коли це можливо, доцільно погрупувати. Екстремальні значення параметрів при лінійному нормуванні для  $n$ -вершинних графів досягаються у випадку графів «зірка» та «повний граф», що відповідає варіанту мережі з фокальним агентом і варіанту поліцентричної динамічної мережі з діадами зв'язків.

Будь-який зв'язний граф має принаймні  $(n - 1)$  ребро, тому для класів  $C(n,k)$ , якщо до «зірки» додати ребра, можна отримати граф, в якому всі відстані дорівнюють 1 або 2 для будь-якого із класів порівняння  $G(n,k)$  і  $C(n,k)$ ,  $k \geq n - 1$ . У цих графах інтеграція  $S$  приймає мінімальне значення, а інтеграція, обчислена на основі сум обернених віддалей графа – максимальне. Ці значення досягаються на «зірці», «ланцюжку» або «повному графі».

На основі властивостей структурних параметрів графів сформуємо твердження, які повинні стати теоретичною основою організаційної структури мережі та взаємозв'язків учасників мережі.

*Твердження 1.* Структурна організація мережі з  $n$  економічними агентами і можливими  $k$  зв'язками між ними визначає максимальне значення суми щільності зв'язків будь-якого агента з іншими виключно лише цими визначеними параметрами:

$$S \geq C, \quad \text{де} \quad C = C_n^2 + (n - k) - 1. \quad (2)$$

*Твердження 2.* Якщо МоМ сформовано з 5 учасників (пограничне значення кількості учасників), а максимальне значення зв'язків з іншими учасника-

ми  $k = 4$ , то один з учасників стає центральним (властивість фокальності) і зв'язки встановлюються з усіма іншими учасниками мережі.

*Твердження 3.* Якщо МоМ сформовано за умови  $n \geq 6$ , а діаметр щільності зв'язків дорівнює 2, то виділений учасник мережі як центральний встановлює взаємозв'язки з усіма іншими економічними агентами.

Максимальне значення центральності  $H$  залежить від інтеграції та уніполярності і досягається за мінімальної уніполярності у класі зв'язних графів з  $n$ -вершинами і  $k$ -ребрами (дугами-гілками).

*Твердження 4.* Структура МоМ, яка може бути відтворена зв'язним графом і може об'єднати не менше 6 учасників і з встановленими  $k$  зв'язками, тоді властивість максимальної централізації визначає структуру мережі як симетричне або максимально наближене до симетричного дерево з трьома гілками.

Можливі екстремальні значення основних параметрів міжорганізаційної мережі подано у табл. 1.

Таблиця 1. **Можливі екстремальні значення основних параметрів мережі, авторська розробка**

Вершини графа, $n$	Мінімальне значення ребер, $k$	Максимальне значення ребер, $k$	Максимальне значення централізації $H$ в класі, $C(n, k)$	Мінімальне значення централізації $H$ в класі, $C(n, k)$
5	4	6	12 ( $k = 4$ )	10
6	6	10	20 ( $k = 3$ )	16
7	8	15	33 ( $k = 3$ )	28
8	10	21	48 ( $k = 3$ )	39
9	12	28	69 ( $k = 3$ )	56
10	14	36	96 ( $k = 3$ )	7

Аналіз даних табл. 1 показує, що саме при 6 і більше економічних партнерів в МоМ встановлюються стійкі зв'язки за 3 головними інформаційно-комунікаційними каналами. Процес функціонування мережі має еволюційний характер, а тому, згідно тверджень 2 і 3, кількість організацій у МоМ повинно бути не менше 6 і може зростати. Крім цього, серед всіх можливих структурних утворень міжорганізаційної взаємодії найбільш важливими є структура «зірка» і «повний граф».

**Висновки.** У процесі еволюційного функціонування мережі поліцентрична мережа зі структурою у виді повного графа може переходити у структуру з виділеною центральною вершиною (організацією), тобто структурно – це «зірка». Однак цей процес можливий і у зворотному напрямі. Процес виокремлення центру або декількох центрів зовсім не означає побудови вертикальної ієрархії, а лише виділення у структурі мережі організацій із вищими інноваційними, творчими, фінансовими можливостями.

Аналіз опублікованих результатів емпіричних досліджень показує, що поліцентричність МоМ не завжди є стійкою. У мережі виділяється умовний центр, який або бере на себе функції координатора, управляючого центра. Така еволюція МоМ зводиться до зміщення сил у співвідношенні з більшими ресурсними можливостями, з появою сил з більшою ринковою владою і зміною структури та організаційної форми мережі. Задачі координації дій і управ-

ління проектами часто передаються спеціальному центру-координатору, а не окремим партнерам мережі. Такий центр, як агент-координатор, виокремлює партнерів з найкращими компетенціями для конкретних проблем і задач, узгоджує конфлікти внаслідок динамічної конкуренції між економічними агентами, які ведуть боротьбу за участь у проектах. Рішення розподілу компетенцій між партнерами за допомогою аутсорсингу дозволить зосередитися на розробці інноваційних проектів, продуктів і на діяльності, яка є ключовою відповідно до стратегічної мети мережі.

Дослідження мережевої концепції дозволить Україні створити нові економічні та технологічні реалії, які необхідно втілити в інноваційній стратегії національного розвитку. Це має стимулювати галузеву реструктуризацію і зміни технологічної платформи національної економіки в її переході до інноваційної моделі. Є конкретно визначені підходи і кількісні орієнтири здійснення структурних змін – в проекті Стратегії розвитку України в період до 2020 р. та у Стратегії інноваційного розвитку України на 2010–2020 роки. Зокрема, це збільшення частки більш технологічно високих виробництв до 35–40%; частки наукоємної продукції в економіці – до 25–30%; частки підприємств, що впроваджують інновації – в 3–3,5 рази; внеску інновацій – в 1,5–2 рази, що приведе до зростання ВВП до 12–15 тис. дол. США на душу населення [7].

Теоретично, Стратегія базується на розвитку національних та регіональних інноваційних систем, технологічному форсайті, активізації приватного партнерства у сфері комерціалізації технологій та формуванні інвестиційного попиту на інновації. Але, в практичному аспекті, зазначені положення не знайшли реалізації, навіть щодо формування інфраструктури, в якій представлено лише окремі типи інноваційних структур – технопарки, наукові центри, бізнес-інкубатори, науково-технічні підприємства, фонди. Причому діяльність лише незначної їх частини відповідає завданням, які мають вирішуватися ними, виходячи із світового досвіду організації таких інноваційних структур. Водночас, назріла необхідність реалізації концепції «технологічного прориву» на базі нових форм локальних утворень – кластерів, особливих економічних зон, технополісів та побудови нової мережевої форми економіки.

Україна не може ігнорувати такий стратегічний напрямок розвитку економіки, оскільки це закріпить за нею статус країни-аутсайдера з усім спектром негативних наслідків. Тому держава має розробляти стратегію із врахуванням захисту національних інтересів, надбання нових ключових технологій та завоювання нетипових для себе сегментів світового ринку. Поруч із пріоритетною підтримкою передових технологій та секторів, а також створенням нової виробничої інфраструктури, найважливішим напрямком інноваційної політики повинен стати розвиток мережевої кооперації та мережевих взаємодій.

1. *Басакер Р., Саати Т.* Конечные графы и сети. – М.: Наука, 1974. – 368 с.  
*Basaker R., Saati T.* Konechnye grafy i seti. – М.: Nauka, 1974. – 368 s.
2. *Берж К.* Теория графов и ее применения. – М.: ИЛ, 1962. – 319 с.  
*Berzh K.* Teoriia grafov i ee primeneniia. – М.: IL, 1962. – 319 s.

3. Кузьминов Я.И., Бендукидзе К.А., Юдкевич М.М. Курс институциональной экономики: институты, сети, трансакционные издержки, контракты: Учебник для студентов вузов. – М.: ГУ ВШЭ, 2006. – 443 с.  
*Kuzminov Ia.I., Bendukidze K.A., Iudkevich M.M.* Kurs institucionalnoi ekonomiki: instituty, seti, transakcionnye izderzhki, kontrakty: Uchebnik dlia studentov vuzov. – М.: GU VShE, 2006. – 443 s.
4. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Шербина Ю.М. Дискретна математика. – К.: ВНУ, 2007. – 368 с.  
*Nikolskyi Yu.V., Pasichnyk V.V., Shcherbyna Yu.M.* Dyskretna matematyka. – К.: VNV, 2007. – 368 s.
5. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – 336 с.  
*Ore O.* Teoriia grafov. – 2-e izd. – М.: Nauka, 1980. – 336 s.
6. Стратегія інноваційного розвитку України на 2010–2020 роки в умовах глобалізаційних викликів / Авт.упоряд.: Г.О. Андрощук, І.Б. Жиляєв, Б.Г. Чижевський, М.М. Шевченко. – К: Парламентське вид-во, 2009. – 632 с.  
*Stratehiia innovatsiinoho rozvytku Ukrainy na 2010–2020 roky v umovakh hlobalizatsiinykh vyklykiv / Avt.uporiad.:* H.O. Androshchuk, I.B. Zhyliaiev, B.H. Chyzhevskiy, M.M. Shevchenko. – К: Parlamentske vyd-vo, 2009. – 632 s.
7. Фуруботн Э., Рихтер Р. Институты и экономическая теория. – СПб.: СПбГУ, 2005 – 736 с.  
*Furubotn E., Rikhter R.* Instituty i ekonomicheskaiia teoriia. – Spb.: SPbGU, 2005 – 736 s.
8. Хоманс Дж. Социальное поведение как обмен // Современная зарубежная социальная психология: Тексты / Под ред. Г.М. Андреевой, Н.Н. Богомоловой, Л.П. Петровской. – М.: МГУ, 1984. – С. 82–91.  
*Khomans Dzh.* Sotcialnoe povedenie kak obmen // Sovremennaia zarubezhnaia sotcialnaia psikhologiia: Teksty / Pod red. G.M. Andreevoi, N.N. Bogomolovoi, L.P. Petrovskoi. – М.: MGU, 1984. – S. 82–91.
9. Эггертссон Т. Экономическое поведение и институты. – М.: Дело, 2001. – 408 с.  
*Eggertsson T.* Ekonomicheskoe povedenie i instituty. – М.: Delo, 2001. – 408 s.
10. Berkowitz, S.D., Wellman, B. (1988). Social structures: a Network approach. Cambridge: Cambridge University Press. 513 p.
11. Davis, J.A. (1967). Clustering and Structural Balance in Di-graphs. Human Relations, 20(May): 181–187.
12. Flament, C. (1963). Applications of Graph Theory of Group Structure. Englewood Cliffs, Prentice Hall. 142 p.
13. Gleditsch, N.P., Hoivik, T. (1971). Simulating Structural Parameters of Graphs Quality and Quantity, 5: 224–227.
14. Granovetter, M. (1985). Economic Acrion and Social Structure: the Problem of Embeddedness. American Journal of Sociology, 91(3): 481–510.
15. Hoivik, T. (1970). Parameters of Graph Structure. Quality and Quantity, 4(1): 193–209.