

УДК 656.71.02.(045)

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ МЕРЕЖІ АЕРОПОРТІВ

К. В. Марінцева, канд. техн. наук, доц.

Національний авіаційний університет

kristin22@ua.fm

Викладено методичні підходи до аналізу мережі аеропортів з погляду теорії складних мереж. Наведено результати експериментальних розрахунків на фрагменті мережі аеропортів України.

Ключові слова: складні мережі, ступень вузла, кластерний коефіцієнт вузла, мережа аеропортів.

The methodological approaches to the analysis of airports network on the theory of complex networks based are described. Results of experimental calculations on a fragment of airports network of Ukraine are presented.

Keywords: complex networks, degree node, node clustering coefficient, airports network.

Постановка проблеми

Дані ІСАО щодо сумарної прибутковості та собівартості авіаперевезень українських авіакомпаній свідчать про прибутковість одиниці авіаперевезення (пас-км), однак, фактичний коефіцієнт завантаження менше рівня точки беззбитковості (рис. 1). Така сама динаміка спостерігається і в інших країнах, наприклад, Росії та Польщі [1].

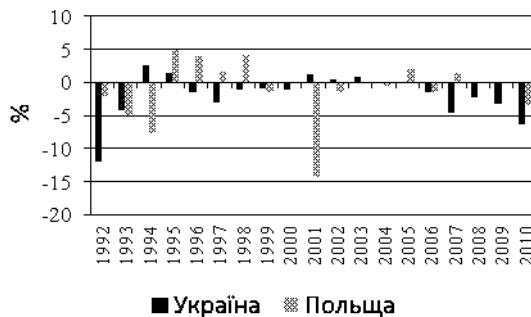


Рис. 1. Різниця між фактичним коефіцієнтом завантаження і точкою беззбитковості, за даними праці [1]

Якщо спиратися на дані ІСАО, то авіаційна діяльність авіакомпаній в Україні є збитковою. Дану тенденцію можна пов'язати з «незрілістю» авіаринку, відсутністю українських лізингових компаній, що надають у лізинг повітряні судна, низькою купівельною спроможністю населення України, скороченням чисельності населення та іншими соціально-економічними проблемами. Як зазначено в праці [2], економіка України повернулася до зростання в 2010 р., але відновлення залишається слабким.

Незважаючи на значну кількість досліджень в області економіки та географії транспорту, питання подальшого розвитку та раціонального функціонування авіатранспортної системи України залишаються невирішеними.

Нині не існує фундаментальних досліджень, які б закладали методику визначення перспективної мережі авіасполучень у країні, масштабів

необхідного розвитку інфраструктури авіаційної галузі. Все ще є труднощі об'єктивної оцінки ступеня розвитку існуючої мережі авіаперевезень як у географічному, так і в економічному, технічному та технологічному аспектах.

Аналіз досліджень і публікацій

Авіатранспортна система — це складна система, і з цим поняттям тісно пов'язане поняття «транспортна мережа» — мережа шляхів сполучення (в даному випадку авіасполучення).

Наприкінці 1990 р. для вивчення складних систем розвивається новий ефективний інструмент дослідження — теорія складних мереж.

Вузли в таких мережах являють собою елементи цих складних систем, а зв'язки між вузлами — взаємодію між елементами [3].

Такі мережі утворюють своєрідний каркас відповідних складних систем, а дослідження властивостей цих мереж дає змістовну інформацію про властивості складних систем у цілому, що дозволяє подолати деякі недоліки, властиві редуцціонізму.

У дослідженні [4] аналізується топологія і структура мережі аеропортів Індії за допомогою показників аналізу складних мереж.

Розрахунки показали, що даний аналіз корисний не тільки при плануванні інфраструктури та розширенні мережі авіаліній, але також в управлінні потоком перевезень у надзвичайних ситуаціях, таких як випадкові відмови аеропорту, закриття аеропорту через несподівану зміну клімату, терористичних атак та ін.

У статті [4] також відзначено, що щільно з'єднані мережі авіаперевезень відігравали головну роль у поширенні інфекційних захворювань, а саме: пташиного грипу, свинячого грипу та ін., переходячи від епідемії в пандемію.

За висновками авторів дослідження [4], розробка шаблону прийняття рішень для скорочення рейсів на деяких маршрутах може сприяти зменшенню поширення хвороби.

Мета статті — визначення теоретичних засад аналізу мережі аеропортів України з погляду теорії складних мереж.

Результати дослідження

Складні мережі — це міждисциплінарна область знань. Наразі закладаються її основні поняття і отримані перші результати. Дослідники, які працюють у цій галузі, прийшли з математики, комп'ютерних наук, фізики, біології, соціології, економіки. Відповідно результати досліджень мають як теоретичне значення, так і практичні додатки в цих науках.

За визначенням *складні мережі* — це існуючі в природі мережі (графи), які мають нетривіальні топологічні властивості.

Більшість об'єктів природи і суспільства мають бінарні зв'язки, які можна представити у вигляді мережі, де кожен об'єкт — це точка, а його зв'язок з іншим об'єктом це лінія або дуга.

У сучасній англійській науковій літературі з теорії мереж оцінка важливості вузла визначається показником *centrality* (центральне розташування) [5]. Існує три основні категорії даного показника: *degree centrality* (можна перекласти як ступень вузла), *closeness centrality* (близькість вузла), and *betweenness centrality* (навантаження вузла).

Отже, *ступень вузла* — це число зв'язків вузла (в нашому випадку аеропорту). Для орієнтованих мереж розрізняють вихідний і вхідний ступені вузла. Розподіл ступенів вузлів є важливою характеристикою складної мережі. Більшість складних мереж мають близький до степеневого закону розподіл ступенів вузлів [3].

Близькість вузла характеризує середню близькість до даного вузла всіх інших вузлів мережі. Формальне визначення цього показника таке: близькість Cl_i вузла i є величина

$$Cl_i = \frac{N}{\sum_j d_{ij}}, \quad i = \overline{1, n},$$

де N — загальне число вузлів у мережі, d_{ij} — число зв'язків за найкоротшим маршрутом між вузлами i та j .

Близькість показує, наскільки просто вузлу i зв'язатися з іншим вузлом. Якщо вузол є центральним, то він може швидко взаємодіяти з іншими вузлами.

Іншою мірою важливості вузла є, як було зазначено вище, *навантаження вузла*.

Цей показник визначається як частка сумарного числа найкоротших шляхів між всіма вузлами, які проходять через вузол i до загального числа найкоротших шляхів мережі

$$B_i = \sum_{st} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}}, \quad i = \overline{1, n},$$

де $\sigma_{st}(i)$ — кількість найкоротших шляхів з вузла s у вузол t через вузол i та σ_{st} — загальна кількість найкоротших шляхів між усіма парами s та t .

Вузли з високим значенням B є найбільш завантаженими. На відміну від ступеня вузла, що є характеристикою локальної мережі, поняття навантаження вузла відображає топологію всієї мережі в цілому.

Два вузли називають сусідами, якщо існує зв'язок між ними. Для комплексних мереж характерно, що два вузли, сусідні до будь-якого вузла, часто також є сусідами між собою. Щоб охарактеризувати це явище і було запропоновано *кластерний коефіцієнт* C_i вузла i . Припускають, що вузол має ступінь k_i , це означає, що у нього k_i сусідів і між ними може бути максимум $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$ зв'язків. Тоді

$$C_i = \frac{2n_i}{k_i(k_i-1)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де n_i число зв'язків між сусідами вузла i .

Очевидно, що завжди $0 \leq C_i \leq 1$. Число n_i є сумарне число трикутників — циклів довжини 3 — прикріплених до вузла i , а $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$ — максимально можливе число трикутників (рис. 2).

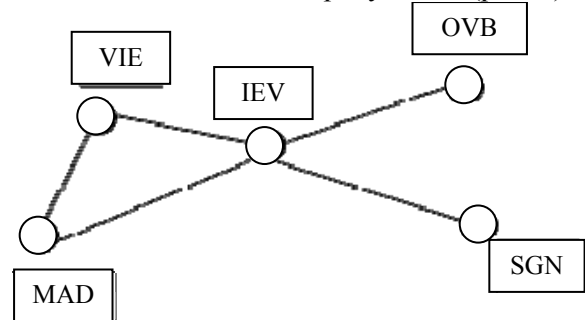


Рис. 2. Фрагмент мережі авіамаршрутів з м. Києва

Якщо всі найближчі сусіди вузла i взаємопов'язані, то $C_i = 1$. Коли між ними немає зв'язків (як у дерев), то $C_i = 0$.

Кластеризація всієї мережі визначається як

$$C_i = 3 \frac{M_{\Delta}}{M_{\nabla}},$$

де M_{Δ} — число трикутників в мережі, а M_{∇} — число пов'язаних тріад, де «пов'язана тріада» означає вузол і два його найближчих сусіда (рис. 2).

По суті, коефіцієнт кластеризації C_i є часткою тих триад, у яких є три ребра, що утворюють трикутник, тобто циклів довжини 3. Середнє значення кластеризації за всіма вузлами можна визначити як $\langle C \rangle = \frac{\sum j C_j}{n}$.

Зображена на рис. 2 мережа містить один трикутник (цикл довжини 3) і вісім сполучених триад. Отже, у цій мережі коефіцієнт кластеризації дорівнює $C = 3 \frac{1}{8} = 0,375$. Окремі вузли мають коефіцієнти кластеризації 1, 1, 1/6, 0 та 0, а середнє значення дорівнює $\langle C \rangle = \frac{13}{30}$.

Усереднений кластерний коефіцієнт вузлів називається *кластерним коефіцієнтом мережі*. Для більшості складних мереж він істотно більший, ніж кластерний коефіцієнт випадкового графа таких же розмірів. У праці [4] зазначається, що чим вище кластерний коефіцієнт, тим краще зв'язність вузлів мережі.

У мережі можлива ситуація, коли вузли, що мають велику ступінь («зірки»), переважно пов'язані з вузлами, що мають великий ступінь. Іншими словами «зірки» «вولیють» бути пов'язаними з «зірками». Такі мережі називають *ассортативними*. Можлива також зворотна ситуація: «зірки» пов'язані з іншими «зірками» через ланцюжки вузлів, що мають мале число сусідів.

Такі мережі називають *дисассортативними*.

Щоб охарактеризувати цю властивість, користуються коефіцієнтом асортативності r , тобто коефіцієнтом кореляції Пірсона між ступенями сусідніх вузлів [3]:

$$r = \frac{L \sum_{i=1}^L j_i k_i - \left[\sum_{i=1}^L j_i \right]^2}{L \sum_{i=1}^L j_i^2 - \left[\sum_{i=1}^L j_i \right]^2}.$$

Тут L — число зв'язків у мережі, а j_i і k_i — число зв'язків вузлів на обох кінцях зв'язку i . Якщо вузли з великим числом зв'язків (хаби) пов'язані один з одним, то $r \approx 1$. Якщо вузли з великим числом зв'язків пов'язані з вузлами з невеликим числом зв'язків, то $r \approx -1$.

У праці [4] для визначення важливості вузла (аеропорту) вводиться поняття *сили вершини вузла i (strength of node i)*, яку можна визначити за формулою:

$$s_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, w_{ij}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де w_{ij} — частота рейсів між пунктами i та j мережі аеропортів.

Мережу аеропортів України можна побудувати, використовуючи дані ІКАО [6]. Для прикладу розглянемо фрагмент мережі з дев'яти аеропортів України і 16 пунктів призначення j , між якими є прямі рейси (див. таблицю). Ці дані подамо у вигляді матриці A розміром 9×16 . Для розрахунку показника ступінь вузла k_i візьмемо $a_{j,i} = 1$, якщо існує прямий рейс між вузлами i та j , інакше $a_{j,i} = 0$.

Розрахунки за формулами (2) показують, що на вибраному фрагменті мережі аеропортів України найбільшу силу вершини мають вузли Київ (3861) і Одеса (1141), ступінь вузла в цих аеропортах дорівнює 14 і 9 відповідно.

Фрагмент мережі аеропортів України (кількість рейсів між пунктами)

Аеропорти мережі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	k_i	s_i	C_i
	Відень	Баку	Брюссель	Мінек	Софія	Варна	Хошимін	Ларнака	Єреван	Афіни	Салоніки	Тегеран	Тімішоара	Багумі	Берлін	Стамбул			
Київ	908	227	265	292	365		3	189	264	228	41	129		183	322	445	14	3861	0,45
Донецьк		52						49	7	58				15		104	6	285	0,60
Харків									5					12			2	17	0,00
Львів		15											541				2	556	0,00
Чернівці													542				1	542	-
Дніпропетровськ	48								5					5	166	154	5	378	0,30
Івано-Франківськ		10															1	10	-
Одеса	333	11					13	23	14	36			324	24		363	9	1141	0,31
Сімферополь									6							117	2	123	0,00
Загальний коефіцієнт кластеризації для мережі																			0,24

Найвищий коефіцієнт кластеризації, розрахований за формулою (3), має аеропорт Донецька — 0,6, що свідчить про наявність зв'язків між пунктами, в які є прямі рейси з аеропорту Донецька. Київ, як вершина мережі, має коефіцієнт кластеризації 0,45, що говорить про слабкий зв'язок між пунктами-сусідами даного вузла. Можна також зробити висновок про слабку інтеграцію Києва в європейську мережу хабів. Отримані розрахункові показники фрагмента мережі аеропортів України згідно з теорією складних мереж підтверджуються аналізом результатів експлуатації мережі авіаліній за даними ICAO 2010–2011 рр.

Обсяги пасажирських перевезень, кількість рейсів свідчать про те, що Київ є пунктом, в якому формується пасажиропотік для хабових аеропортів у містах Москва, Франкфурт, Лондон, Тель-Авів, Відень, Прага. Дані щодо кількості виконаних рейсів з таких пунктів, як Одеса, Дніпропетровськ, Донецьк, Львів, Сімферополь, також свідчать про тяжіння основних пасажиропотоків до хабових аеропортів Москви, а також європейських міст: для Донецька — це Мюнхен, для Львова — Варшава, для Дніпропетровська — Берлін, Стамбул, для Одеси — Стамбул, Варшава, Відень, Прага. Такі самі результати дає аналіз обсягу перевезених пасажирів за напрямками. Ураховуючи низькі показники за обсягами внутрішніх перевезень, можна припустити, що Київ не відіграє ролі хабу як для українських аеропортів, так і для європейських, тому що кількість далекомагістральних рейсів є незначною. Москва — це основний трансферний пункт для пасажирів, які слідують з/та в Україну.

Висновки

У сучасній теорії складних мереж, яка вже зараз застосовується багатьма вченими для вивчення закономірностей розвитку мережі аеропортів та авіаліній, сформувався кілька важливих фундаментальних і прикладних напрямів досліджень. Виявлені емпіричні закономірності в мережевих структурах реальних об'єктів і розуміння природи складних систем можуть допомогти більш адекватному прогнозуванню їх поведінки і відповідної корекції стратегії розвитку.

Так, лише декілька показників кількісного аналізу (ступінь вузла, сила вузла, коефіцієнт кластеризації) обґрунтовують бачення того, що мережа маршрутів авіакомпаній з аеропортів України формується виходячи з бізнес-моделі фідерного перевізника для європейських авіакомпаній. Якщо і надалі не буде розвитку власної мережі далекомагістральних рейсів і внутрішніх авіаперевезень, орієнтації на світові хаби, то для українських авіапідприємств залишається лише стратегія оптимізації розкладу рейсів за основними напрямками (Москва, Франкфурт, Лондон, Тель-Авів, Відень, Прага,

Варшава) за критерієм «мінімальний стикувальний час» для трансферу на далекомагістральні рейси з європейських хабів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Yield and Unit Cost* — Commercial Air Carriers. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://portal.icao.int/sta/Pages/AirCarrierStatistics-Financial.aspx>.
2. *Всемирный банк* — Украина. Обзор, март 2011. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://siteresources.worldbank.org/UKRAINE/INUKRAINIANEXTN/Resources/455680-1316425374845/UkraineSnapshotUkrSeptember2011.pdf>.
3. *Евин И. А.* Сложные сети как модели сложных систем. Международная конференция «Сети, самоорганизация, будущее» (памяти Сергея Петровича Капицы): 29–30 ноября 2012 г. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.i-nett.com/2012/11/18/slozhnye-seti-kak-modeli/>.
4. *Nita Parekh* Analysis of Airport Network of India. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.academia.edu/745461/Analysis_of_Airport_Network_of_India.
5. *Transportation Geography and Network Science/Centrality*. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://en.wikibooks.org/wiki/Transportation_Geography_and_Network_Science.
6. *Traffic by Flight Stage* — Commercial Air Carriers. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://portal.icao.int/sta/Pages/AirCarrierStatistics-TFS.aspx>.

REFERENCES

1. *Yield and Unit Cost* — Commercial Air Carriers. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: <https://portal.icao.int/sta/Pages/AirCarrierStatistics-Financial.aspx>.
2. *Vsemirnyiy bank* — Ukraina. Obzor, mart 2011. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: <http://siteresources.worldbank.org/UKRAINE-INUKRAINIANEXTN/Resources/455680-131642-5374845/UkraineSnapshotUkrSeptember2011.pdf>
3. *Evin I. A.* Slozhnyie seti kak modeli slozhnyih sistem. Mezhdunarodnaya konferentsiya «Seti, samoorganizatsiya, buduschee» (pamyati Sergeya Petrovicha Kapitsyi): 29-30 noyabrya 2012 g. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: <http://www.i-nett.com/2012/11/18/slozhnye-seti-kak-modeli/>
4. *Nita Parekh* Analysis of Airport Network of India. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: http://www.academia.edu/745461/Analysis_of_Airport_Network_of_India.
5. *Transportation Geography and Network Science/ Centrality*. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: http://en.wikibooks.org/wiki/Transportation_Geography_and_Network_Science.
6. *Traffic by Flight Stage* — Commercial Air Carriers. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupu: <https://portal.icao.int/sta/Pages/AirCarrierStatistics-TFS.aspx>.