

**І н ф о р м а т и з а ц і я   т а   і н ф о р м а ц і й н і   т е х н о л о г і ї**

УДК 621

**ЗУБОК В.Ю.**, ТОВ “Інформаційний центр “Електронні вісті”**ІНТЕРНЕТ ЯК МЕРЕЖА, ЩО САМОБУДУЄТЬСЯ:  
ВРАЗЛИВОСТІ ТОПОЛОГІЇ**

**Анотація.** За допомогою розробленої методики моделювання топологічних змін певного сегмента мережі Інтернет досліджено його параметри до та після зміни топології. Отримані дані вказують, що чутливість мережі до вилучення певного вузла не залежить від кількості зв'язків цього вузла. Інтернет є вразливим у разі цілеспрямованого вилучення навіть невеликої кількості найбільших посередників – це збільшує навантаження інших вузлів, уповільнює час проходження інформації через збільшення кількості транзитних переходів між вузлами на шляху інформації.

**Ключові слова:** складні мережі, топологія Інтернету, автономна система, розподіл ступеня, посередництво, глобальна ефективність, вразливість.

**Аннотация.** С помощью разработанной методики моделирования топологических изменений определенного сегмента Интернет исследованы его параметры до и после изменения топологии. Полученные данные указывают, что чувствительность сети к удалению определенного узла не зависит от количества связей этого узла. Интернет уязвим при целенаправленной атаке на наибольших посредников – это увеличивает нагрузку на другие узлы и замедляет прохождение информации из-за увеличения транзитных переходов на пути передаваемых данных.

**Ключевые слова:** сложные сети, топология Интернета, автономная система, посредничество, распределение степени, глобальная эффективность, уязвимость.

**Summary:** with the help of the developed method of modeling topological changes in a certain segment of the Internet, we examined its parameters both before and after a topology change. These data indicate that the sensitivity of the network to remove a particular node does not depend on the number of links of that node. Internet shows vulnerability to a deliberate attack on the largest "brokers" – it increases the load on other nodes, and slows down the flow of information due to increased transitions on the way of network data flows.

**Keywords:** complex networks, the topology of the Internet, an autonomous system, betweenness, distribution, extent, global efficiency, vulnerability.

**Постановка проблеми.** Роль Інтернету в розвитку людства постійно зростає. Завдяки розвитку мережі весь світ перебуває постійно на зв'язку, миттєво доступний та інтерактивний. Спостерігається геометричне зростання обсягів інформаційних ресурсів, понад усе мультимедіа, до швидкості і якості передачі яких висувуються високі вимоги з боку користувачів. Домінує тенденція децентралізації не тільки трудомістких обчислень, а й сховищ даних, а також перенесення купи прикладних задач, властивих локальним мережам, в тому числі звичайного офісного програмного забезпечення, в так звані “хмари”. Хмарою традиційно зображували глобальну мережу. Тепер “хмари” – це розподілені гнучко конфігуровані обчислювальні ресурси, часто разом з програмним забезпеченням, які беруться в оренду в Інтернет-сервіс-провайдерів нового типу. Таким чином, недостатньо надійна або недостатньо швидка взаємодія з Інтернетом негативно відбивається не тільки на взаємодії організації з зовнішнім світом, а й на внутрішніх процесах. Жодних сумнівів, що є вірним і зворотне: надійність функціонування Інтернет

та безперешкодний доступ до суспільно значущих Інтернет-ресурсів, у тому числі державних, є суттєвою складовою інформаційної безпеки.

21 березня 2012 року було оприлюднене Доручення Президента України, в якому, зокрема, йдеться про необхідність розробки вимог щодо створення технологічної інфраструктури мережі Інтернет та мереж доступу до неї в населених пунктах з метою сприяння розбудові технологічної інфраструктури мережі Інтернет та мереж доступу до неї споживачів. При розробці цих вимог бажано брати до уваги особливості мережі Інтернет, що виявлені в результаті досліджень процесу її зростання.

**Метою статті** є моделювання топологічних змін певного сегмента мережі Інтернет та порівняння параметрів мережі до та після змін.

#### **Виклад основних положень.**

##### *Топологічні властивості Інтернету.*

Багато явищ у природі та в людських співтовариствах відбуваються за участю цілої мережі схожих взаємодіючих об'єктів чи тіл, що складаються в мережу. Виявляється, загальні характеристики цих явищ (наприклад, стійкість, здібність до адаптації і т. д.) залежать, як правило, не від конкретних об'єктів, а від математичних властивостей мережі в цілому: зв'язаності, однорідності, кластеризації, ієрархії.

Теорія мереж знайшла численні застосування в житті – у вивченні транспортних потоків, шляхів розповсюдження інформації та знань, біологічних схем тощо. На цей час з метою дослідження мережі розподіляють на соціальні, інформаційні, технологічні та біологічні [4].

Інтернет як телекомунікаційна мережа не має центру планування та керування. Централізація стосується лише деяких операцій, таких як розподіл адресного простору та керування системою доменних імен верхнього рівня. Топологія мережі не є визначеною чи навидь типовою, кількість та структура вузлів також не є константами. Постійно змінюючись, Інтернет набув характеристик складної мережі.

Глобальна комп'ютерна мережа Інтернет складається з сотень тисяч вузлів, які здійснюють передачу даних методом пакетної комутації по протоколах TCP/IP. Для маршрутизації даних в такій складній мережі розроблені в якості стандартів і використовуються єдині “міжвузлові” протоколи маршрутизації і правила побудови політик маршрутизації.

Наявність фізичного підключення між мережним устаткуванням в Інтернеті є необхідною, але не достатньою умовою наявності зв'язку. Зв'язність між вузлами Інтернету визначається наявністю прикордонної взаємодії між групами мережного обладнання. З точки зору цієї прикордонної взаємодії вузлом мережі ми будемо називати автономну систему. Під автономною системою (autonomous system, AS) розуміється мережа, якій присвоєно IP-адреси, що мають єдину, чітко визначену політику маршрутизації. Таким чином, в глобальному сенсі автономні системи відповідають вузлам мережі, а зв'язки між вузлами забезпечуються роботою протоколів маршрутизації. Ці протоколи інваріантні до внутрішнього устрою автономної системи, використовуюваному устаткуванню і топології внутрішніх зв'язків в AS.

Автономні системи можуть взаємодіяти одна з одною безпосередньо, а також можуть виконувати транзитні функції. Якщо автономні системи представити у вигляді вершин графа, то ребрами графа будуть фактично встановлені зв'язки між ними.

Дослідженням графів такого розміру займається наука про складні мережі. Дослідження Інтернету як складної мережі проводяться з початку 1990 років. Було з'ясовано, що Інтернету властиво розподіл ступеня вузлів за степеневим законом. На практиці це означає, що дуже мала кількість вузлів мають велику кількість зв'язків (їх

називають концентраторами чи хабами), і навпаки – велика кількість вузлів має дуже малу кількість зв'язків. Такі мережі називають безмасштабними (scale-free, SF) за їх “довгий хвіст” на графіку розподілу ступеня. Автономним системам з малою кількістю зв'язків властиві зв'язки не з собі подібними, а з великими вузлами – концентраторами. Тому при загальній кількості автономних систем в Інтернеті, вимірюваному десятками тисяч, найкоротший маршрут між двома будь-якими AS проходить, в середньому, через 5 транзитних вузлів. Ця властивість складних мереж називається феноменом “малого світу”.

Існують місця особливо тісної взаємної пов'язаності AS – це так звані точки обміну трафіком, їх також називають мережі або біржі обміну трафіком (Internet Exchanges, IX). Тут висока кластеризація, тобто якщо AS1 з'єднана з AS2, а AS2 з'єднана з AS3, висока ймовірність, що з'єднані також AS1 і AS3.

*Дослідження Інтернету як складної мережі.*

Емпіричне вивчення Інтернету як складної мережі проводиться з початку 1990-х років на рівні маршрутизаторів або на міждоменному рівні. У першому випадку вузли мережі представлені маршрутизаторами, спеціальними комп'ютерами, що контролюють рух даних у мережі, а в другому – вузлами є так звані автономні системи (АС). АС є підмережею, яка складається з багатьох маршрутизаторів, що реалізують єдину та чітку політику маршрутизації [гіре-181].

В комплексному дослідженні “On Power-Law Relationships of the Internet Topology” [6] Інтернет проаналізований і на рівні АС (на основі трьох карт, створених від листопада 1997 р. до грудня 1998 р.), і на рівні маршрутизаторів (на основі даних 1995 року). Автори дослідили, що розподіл багатьох кількісних характеристик Інтернету має ступеневий характер. Дослідження тривають й досі. Найвідоміші з них – Cooperative Association for Internet Data Analysis (<http://www.caida.org>), який у 2006 році об'єднав зусилля з проектом Active Measurement Project (National Laboratory for Applied Network Research), а також RIPE NCC Test Traffic Measurements (<http://www.ripe.net/projects/ttm/>).

Однією з найважливіших характеристик складних мереж є розподіл ступеня (кількості зв'язків) вузлів  $P(k)$ , який визначається як вірогідність того, що вузол  $i$  має ступінь  $k(i)$ . Для орієнтованих мереж окремо розраховується вхідний та вихідний ступінь вузла. Мережі з різними  $P(k)$  демонструють різну поведінку [5].

Автори всіх досліджень підтвердили, що Інтернет стосовно до “штучних” мереж, утворених людством, має безмасштабну (scale-free) топологію. Основна властивість такої побудови – ступеневий (power-law) розподіл ступеня вузлів:

$$P(k) \sim 1/k^\gamma \quad (1)$$

де :

$k$  – це кількість зв'язків (ступінь) випадково обраного вузла,

$\gamma$  – масштабуюча експонента ( $2 < \gamma < 3$ ),

$P(k)$  – розподіл ступеня вузла, тобто вірогідність того, що випадково обраний вузол має  $k$  зв'язків.

Досліди показали, що і природним, і утвореним людством мережам властивий розвиток і що з ростом кількості вузлів вони перетворюються на безмасштабні. Причина в тому, що “старі” вузли в мережі мають більше можливостей щодо отримання зв'язків з новими вузлами при їх утворенні [7]. Стосовно Інтернету, цей феномен добре знайомий пересічному користувачеві на прикладі всесвітнього павутиння World Wide Web: чим довше знаходиться ресурс в WWW без зміни адреси, тим більше на нього посилань

нараховується у пошукових системах. Два фактори – ріст мережі та переваги її нових членів – пояснюють існування габів.

Зупинимось ще на деяких найважливіших поняттях з теорії складних мереж, які, крім розподілу ступеня, також будуть використані в даній праці.

Відстань між вузлами можна визначити як кількість кроків, які необхідно зробити, щоб дістатись від одного вузла до іншого. Природно, що вузли можуть бути з’єднані безпосередньо (за допомогою єдиного ребра) або опосередковано, декількома ребрами через інші вузли. Шляхом між вузлами називається найкоротша відстань між ними. В зарубіжній літературі зустрічається визначення “геодезичний шлях” (geodesic path) [4].

Коефіцієнт кластерності [8] показує, скільки найближчих сусідів заданого вузла. Він характеризує тенденцію до утворення груп взаємопов’язаних вузлів – так званих кліків (clique). Для окремого вузла мережі, який має ступінь  $k$ , тобто з якого виходить  $k$  ребер, що з’єднують його з  $k$  іншими вузлами (так званими найближчими сусідами), коефіцієнт кластерності визначається як відношення реальної кількості ребер  $E_m$ , якими з’єднані найближчі сусіди вузла, до максимально можливого, яке дорівнює, як відомо,  $k(k-1)/2$ :

$$C_m = \frac{E_m}{k(k-1)/2} \quad (2)$$

Рівень кластерності для всієї мережі визначається як арифметичне середнє значення коефіцієнтів кластерності по всіх вузлах мережі та вказує на ймовірність існування зв’язку між двома випадково взятими найближчими сусідами вузла, а також містить інформацію про наявність у мережі “трикутників” (циклів довжиною три).

Однією з важливих характеристик вузлів є посередництво (betweenness, або betweenness centrality). Посередництво  $\sigma(m)$  відображає роль вузла в установленні зв’язків у мережі й показує, скільки найкоротших шляхів проходить через цей вузол:

$$\sigma(m) = \sum_{i \neq j} \frac{B(i, m, j)}{B(i, j)}, \quad (3)$$

де:  $B(i, j)$  — загальна кількість найкоротших шляхів між вузлами  $i$  та  $j$ , а  $B(i, m, j)$  кількість найкоротших шляхів між  $i$  та  $j$ , таких, що проходять через вузол  $m$ .

Для всієї мережі можна визначити поняття середнього шляху, як середньої по всіх парах вузлів найкоротшої відстані між ними:

$$l = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i>j} d_{ij}, \quad (4)$$

де:  $d_{ij}$  – шлях (найкоротша відстань) між вузлами  $i$  і  $j$ .

Однак деякі мережі можуть бути непов’язаними, тобто в них є вузли, відстань між якими є нескінченною. Відповідно, середній шлях може також дорівнювати нескінченності. З метою урахування таких випадків існує визначення середнього інверсного шляху між вузлами, який обчислюється за формулою:

$$il = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i>j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (5)$$

де:  $d_{ij}$  – шлях (найкоротша відстань) між вузлами  $i$  і  $j$ .

Враховуючи, що, природно, “швидкість” передачі інформації мережею зворотно пропорційна середньому найкоротшому шляху, цей показник часто називають також глобальною ефективністю  $E$ .

З глобальної ефективності розраховується показник вразливості  $V_i$  для певного вузла  $i$ , який визначає, наскільки зміниться середній геодезичний шлях (знизиться ефективність мережі) в разі вилучення певного вузла  $i$ , відповідно, всіх його зв’язків:

$$V_i = \frac{E - E_i}{E} \quad (6)$$

Таким чином виконується моделювання характеристик нової мережі, яка не містить певного вузла. Слід зазначити що, якщо у формулі (6) під  $i$  розуміти сукупність з двох чи більше вузлів, можна отримати справжню модель вразливості мережі до атак на габи.

В роботі [10] та її продовженні було описано методи та засоби збору та обробки даних для дослідження великих сегментів мережі Інтернет на прикладі біржі обміну трафіком DE-CIX. Використовуючи отримані дані, спробуємо моделювати приєднання та вилучення вузлів.

*Моделювання вилучення вузла.* За станом на грудень 2010 р., в DE-CIX були присутні анонси 370 учасників, що безпосередньо підключені до цієї мережі. Вони обмінюються через сервери маршрутів анонсами, які походять від понад 9200 автономних систем. Найбільший ступінь вузла – 471 зв’язок – має AS 12389, яка належить компанії Ростелеком. Розподіл ступеня в DE-CIX зберігає типовий ступеневий характер (Рис. 1).

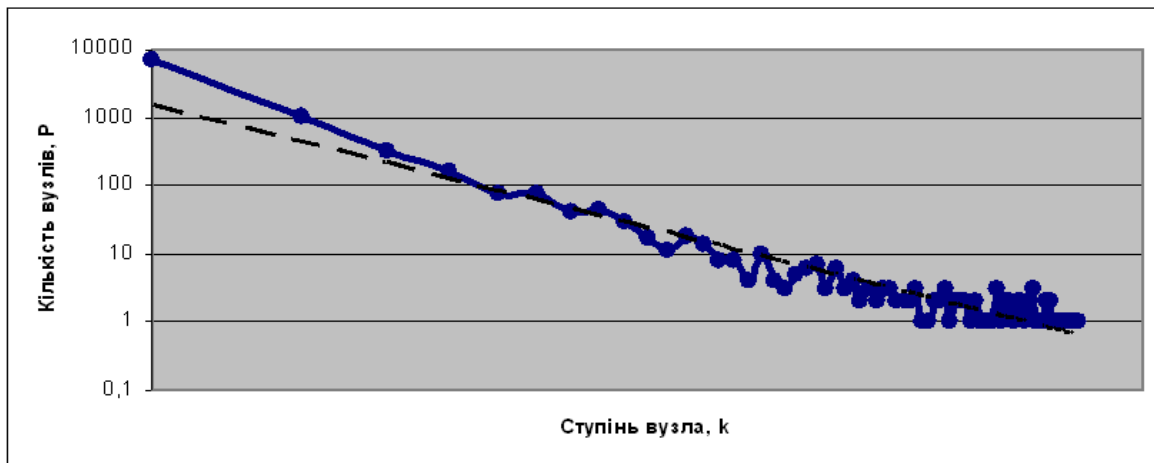


Рис.1. Розподіл ступеня вузлів у DE-CIX та результат апроксимації ступеневою функцією.

Дані з досить високою достовірністю апроксимуються ступеневою функцією:

$$P(k) = 1586k^{-1,81} \quad (5)$$

При цьому достовірність апроксимації  $R^2$  становить 0,92. Графік ступеневої функції показаний на Рис. 3 переривчастою лінією.

На Рис. 2 за допомогою програми візуалізації, розробленої доктором технічних наук Дмитром Ланде, зображено центральний фрагмент мережі DE-CIX. Він налічує 60 вузлів – AS, які мають найбільшу кількість зв’язків з іншими транзитними AS. Тупикові вершини, так звані “пелюстки”, відкинуто. Як бачимо, AS 12389 не відіграє головної

ролі в мережі транзитів. Центральну позицію займає AS6695. Відповідна точка знаходиться на Рис. 2 приблизно в центрі координат.

Спробуємо змодельовати, як зміниться середній шлях мережі (4), глобальна ефективність (5) та вразливість (6) в разі вилучення з мережі вузла AS 12389.

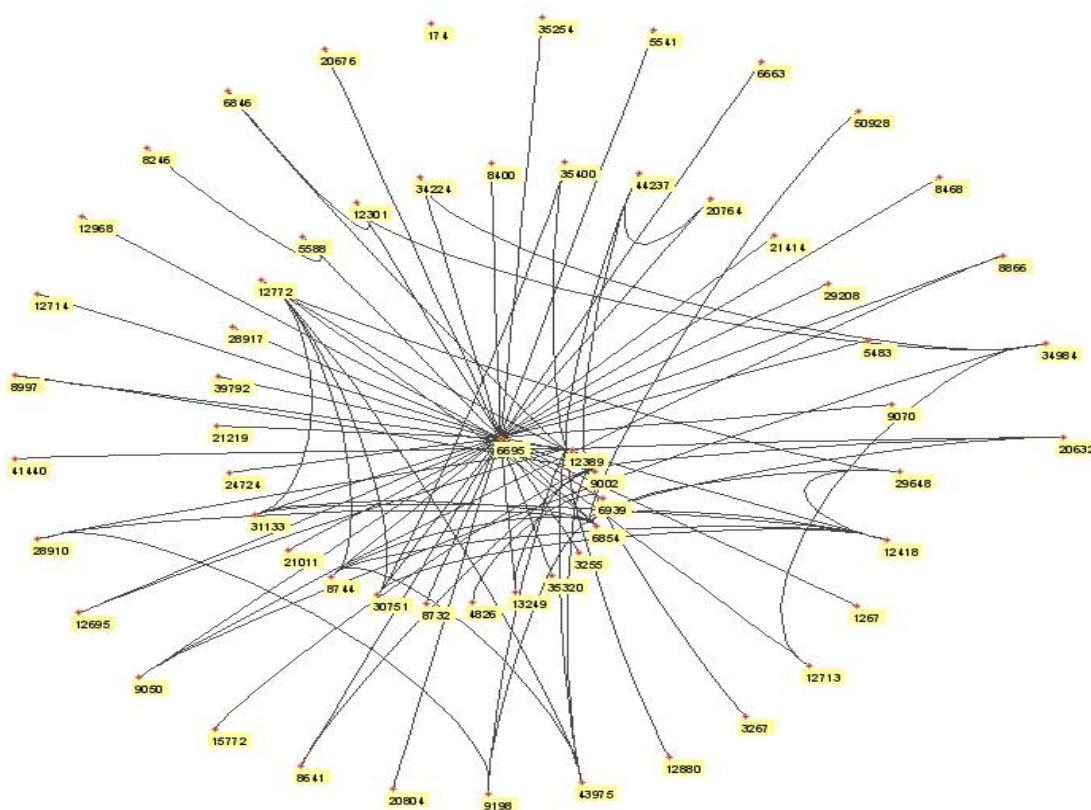


Рис. 2. Центральний фрагмент мережі зв’язків вузлів зі ступенем 2 та вище в мережі обміну трафіком DE-CIX

Для цього в матриці інцидентності обнулимо всі елементи матриці в  $k$ -стовбці та в  $k$ -рядку. Це еквівалентно вилученню вузла  $k$  і всіх його зв’язків та рівнозначно до видалення з таблиці маршрутизації всіх анонсів, що походять від вузла  $k$  чи реекспортуються через нього. Результати розрахунків наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Зміна параметрів мережі при вилученні вузла з найвищим ступенем.

№ з/п	Параметр	Значення до вилучення AS12389	Значення після вилучення AS12389	Різниця, %
1	Середній шлях ( $l$ )	4,274	втрата зв’язності	-
2	Глобальна ефективність ( $E$ )	0,2543	0,2491	- 2,0
3	Вразливість ( $V$ )	-	0,02	-

Тепер обрахуємо зміну цих параметрів у разі вилучення з мережі вузла DE-CIX. Він, як зазначалось, має дещо меншу кількість зв’язків (370 проти 470 в Ростелекома). Результати наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2. Зміна параметрів мережі при вилученні другого за ступенем вузла.

№ з/п	Параметр	Значення до вилучення AS6695	Значення після вилучення AS6695	Різниця, %
1	Середній шлях ( $D$ )	4,274	втрата зв'язності	
2	Глобальна ефективність ( $E$ )	0,25	0,1214	- 52,26 %
3	Вразливість ( $V$ )	-	0,523	-

В результаті можна спостерігати, що вилучення цього вузла значно більше вплинуло на зниження глобальної ефективності. Хоч він має лише 370 активних зв'язків проти 470, він відіграє в мережі значно важливішу роль і через нього проходить значно більше найкоротших шляхів, тобто це – кращий посередник. Такі вузли грають головну роль у встановленні зв'язків між іншими вузлами мережі. Синонімом посередництва є термін “навантаження” (load), який відіграє дуже важливу роль в аналізі надійності Інтернету.

Дане моделювання демонструє, що Інтернет є “стійким” до випадкового вилучення вузлів, але є вразливим у разі цілеспрямованого вилучення навіть невеликої кількості найбільших посередників. У випадку з телекомунікаційною основою Інтернету ця вразливість проявляється в тому, що вихід з ладу кожного вузла, який має велику кількість зв'язків, може різко уповільнити швидкість перетікання інформації по мережі в цілому [7, 9], і ось чому.

В теоретичній випадковій мережі (з розподілом ступеня за Пуассоном) всі вузли приблизно рівні за ступенем, а ребра з'єднують їх “від сусіда до сусіда”, і вилучення вузла чи навіть групи вузлів не зробить ніяку частину мережі ані ізольованою, ані кластеризованою. Але висока стійкість до пошкоджень досягається ціною вкрай низької ефективності передачі інформації на далекі відстані [5] через дуже довгий середній шлях.

В реальних мережах – із степеневим розподілом – вилучення габіта призведе до перерозподілу великої кількості шляхів між іншими вузлами, рівень їх посередництва (або “навантаження”) значно зростає.

### **Висновки.**

В роботі наведена методика моделювання топологічних змін певного сегменту мережі Інтернет та порівняння параметрів мережі до та після змін. Отримані дані вказують, що чутливість мережі до вилучення певного вузла не залежить від кількості зв'язків цього вузла. Дане моделювання демонструє, що Інтернет є “стійким” до випадкового вилучення вузлів, але є вразливим у разі цілеспрямованого вилучення навіть невеликої кількості найбільших посередників. Ця вразливість проявляється в тому, що вихід з ладу кожного вузла, який має велику кількість зв'язків, збільшує навантаження інших вузлів, уповільнює час проходження інформації через збільшення кількості транзитних переходів між вузлами на шляху інформації.

### **Використана література**

1. Craig Hunt. TCP/IP Network Administration, 3rd Edition // O'Reilly Media, 2002. – 752 с.
2. T. Bates, E. Gerich etc. Representation of IP Routing Policies in a Routing Registry (ripe-181). – 1994. – Режим доступу : <http://ftp.ripe.net/ripe/docs/ripe-181.txt>
3. Y. Rekhter, P. Gross. RFC 1772. Application of the Border Gateway Protocol in the Internet. – Режим доступу : <http://tools.ietf.org/html/rfc1772>

4. M.E.J. Newman. The structure and function of complex networks // *SIAM Review*. – 2003. – Vol. 45. pp. 167 – 256.
5. Складні мережі / [Ю. Головач, К. фон Фербер, О. Олемської, Т. Головач, О. Мриглод, І. Олемської, В. Пальчиков] // *Журнал фізичних досліджень*, 2006. – Т. 10. – С. 247 – 291.
6. Faloutsos M., Faloutsos P., Faloutsos C. On Power Law Relationships of the Internet Topology // *Comput. Commun. Rev.* 29, (1999) 251 – 263.
7. A.-L. Barabasi, E. Bonabeau. Scale-Free Networks // *Scientific American*. – May 2003. – pages 50–59. Ланде Д.В.,
8. D.J. Watts, S.H. Strogatz. Collective dynamics of “small-world” networks. // *Nature*. – 1998. – Vol. 393. pp. 440 – 442.
9. V.Latora, M.Marchiori. Efficient behavior of “small-world” networks. // *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 19, 5 Nov 2001.
10. Зубок В. Ю. Європейські мережі обміну Інтернет-трафіком та їхній вплив на зв’язність між автономними системами ; збірник наукових праць ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 56. – К., 2011.

~~~~~ \* \* \* ~~~~~