

В. Ю. Зубок¹, В. В. Мохор²

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова
вул. Генерала Наумова, 15, 03164 Київ-164, Україна

¹тел. (+38044) 4241063, e-mail: vitaly.zubok@gmail.com

²тел. (+38044) 4241063, e-mail: ipme@ipme.kiev.ua

Представлення системи глобальної маршрутизації мережі Інтернет як топологічного простору

На шляху пошуку методів удосконалення топології глобальної комп'ютерної мережі Інтернет з метою захисту її системи глобальної маршрутизації від кібернетичних атак стоїть відсутність конкретного визначення топології Інтернету як поняття. Запропоновано варіант формулювання поняття «топологія Інтернету» через математичне визначення топологічного простору, що утворений системою глобальної маршрутизації на множині з'єднань між вузлами — автономними системами. В результаті застосування такого підходу продемонстровано, що маршрути, які несуть інформацію про доступність мережевих префіксів, є елементами топології. Це відкриває шлях до використання методів топології для дослідження топологічного простору Інтернету.

Ключові слова: Інтернет, топологія, топологічний простір, глобальна маршрутизація.

Вступ

Словосполучення «топологія мережі Інтернет» зустрічається найчастіше в двох сенсах. По-перше, коли мова йде про глобальний інформаційний простір, який утворює всесвітнє павутиння (WWW) завдяки гіперпосиланням (URL) між інформаційними ресурсами. По-друге, термін «топологія» згадується під час опису структури комп'ютерної мережі Інтернет. В обох випадках завдяки аналізу окремих груп зв'язків проводяться успішні дослідження характеристик цієї «топології».

У даній статті розглянуто аспекти визначення термінології, пов'язаної з топологією Інтернету як комп'ютерної мережі, опису топології і принципів її формування. Це необхідно, аби розв'язати протиріччя, що виникає внаслідок відсутності конкретного визначення топології Інтернету як поняття, та, водночас, проведення дослідження цієї топології. Узагальнене та непротиричне визначення, яке

здатне пояснити, з яких елементів складається саме глобальна комп'ютерна мережа Інтернет, і як саме вони взаємодіють, допоможе прибрати перепону на шляху пошуку методів удосконалення мережі та захисту від кібернетичних атак, зокрема, її системи глобальної маршрутизації [1].

Система глобальної маршрутизації і топологія

Окремі комп'ютерні мережі мають зазвичай різноманітну архітектуру, в тому числі різні та несумісні між собою принципи адресації і маршрутизації. Функції адаптації і конверсії між окремими комп'ютерними мережами виконують так звані шлюзи. Заради забезпечення можливості передачі даних між всіма об'єднаними мережами, всі пристрої, що входять до об'єднаної мережі (це можуть бути і кінцеві пристрої, але шлюзи — обов'язково), підтримують єдину спільну систему адресації [2].

Система глобальної адресації. Спільна адресація в мережі Інтернет називається IP-адресацією і полягає в присвоєнні кожному мережевому пристрою унікального цифрового ідентифікатора. IP-адреса протоколу мережевого рівня IPv4 складається з 32 біт, а протоколу IPv6 — зі 128 біт. Адреса умовно поділяється на дві частини за будь-яким бітом — на адресу мережі і адресу хоста в мережі. Положення біта при конфігуруванні мережевого інтерфейсу визначає мережева маска, а при виборі маршруту — так званий префікс (нотація, коли за адресою одразу вказується по якому біту розмежується адреса мережі та хоста, наприклад 10.0.0.1/24).

Завдяки мережевій масці кожен мережевий пристрій «знає» припустимі адреси своїх сусідів у підмережі, адресуючи дані до всіх інших адрес до маршрутизатора-шлюзу. Мережева маска також використовується як один із двох спеціальних прийомів, завдяки яким Інтернет може розширитися майже без обмежень. Він полягає в тому, що мережева маска дозволяє зменшити розмірність адресного простору за допомогою його агрегування в підмережі (subnets), утворюючи так звані мережеві префікси у форматі «адреса мережі/довжина мережевої маски». Ці префікси ідентифікують не окремі пристрої, а підмережі. Таблиця маршрутизації на жодному пристрої Інтернету не містить маршруту до всіх адрес, а лише до мережевих префіксів. Маршрут до конкретної адреси в загальному випадку стає відомим тільки безпосередньо у фізичному сегменті мережі, до якого підключений пристрій з цією адресою. Для успішної взаємодії з усіма іншими пристроями досить знати мережеву адресу шлюзу (маршрутизатора), через який можна вийти за межі своєї підмережі.

Маршрутизація. Як відомо, маршрутизація у складових мережах — процес мережевого рівня. Особливістю та важливою перевагою маршрутизації в Інтернеті і взагалі мережах, що функціонують на базі протоколів TCP/IP, є спосіб вирішення складної обчислювальної задачі пошуку оптимального маршруту, який полягає в розподілі обчислень методом покрокового прийняття рішення про направлення передачі пакета. Кожен вузол мережі приймає рішення виключно, виходячи з власних даних, наявних на момент прийняття рішення; до таких даних відносяться список активних мережевих інтерфейсів, локальні метрики (правила, переваги, звані політикою маршрутизації) і таблиця маршрутизації, створена з адміні-

стративно заданих правил, інформації від сусідніх пристроїв, статусу мережевих інтерфейсів тощо.

Глобальна маршрутизація є в деякому сенсі метамаршрутизацією, де обмін інформацією про маршрути відбувається не на мережевому, а на прикладному рівні за протоколом BGP-4. Дві головні властивості — визначення маршруту тільки на один крок уперед і агрегація адрес у префікси — притаманні і глобальній маршрутизації. Останні три десятиліття безперервного зростання Інтернету та розвитку технологій, що базуються на використанні Інтернету, безумовно показали масштабованість системи глобальної маршрутизації.

Система глобальної маршрутизації. Ще на початку 1980 років розробники інтернет-технологій бачили тенденцію щодо швидкого зросту мережі, неструктурованого збільшення кількості шлюзів, які були під керуванням зовсім різного програмного забезпечення та не підлягали типовому обслуговуванню. Передбачуваними наслідками такого зросту стали:

- багаторазове збільшення потоків інформації, пов'язаної з передачею і обробкою таблиць маршрутизації;
- неможливість обслуговування Інтернету як єдиної системи через неможливість ізоляції помилок, збоїв маршрутизації;
- одночасна заміна програмного забезпечення, що задіяне в системі глобальної маршрутизації, неможлива через велике різноманіття програмно-апаратних засобів.

Тоді й виникла ідея ввести поняття домену, або автономної системи, єдиної частки мережі, з будь-яким внутрішнім устроєм, але стандартними зовнішніми маршрутизаторами, які реалізують стандартні протоколи взаємодії з іншими автономними системами. Автономні системи повинні мати можливість не тільки взаємодіяти одна з одною, але й забезпечувати транзитні функції для автономних систем, які не мають безпосереднього зв'язку, аби забезпечити для кінцевого користувача «прозорість» Інтернету як єдиної мережі. Ця ідея знайшла відображення в документі RFC 827 «Зовнішній шлюзовий протокол» (Exterior Gateway Protocol — EGP), або протокол зовнішньої маршрутизації.

На сьогодні термін «автономна система» використовується не стосовно обладнання, а стосовно певної групи IP-адрес — мережевих префіксів. На рис. 1 схематично зображений процес переходу, чи конверсії, окремих мереж в автономні системи.

Автономна система (AS) — це поєднана група з одного або більше IP-префіксів, що керуються одним чи більше операторами, які мають єдину та чітко визначену політику маршрутизації. Кожна AS має 16- або 32-бітний номер для ідентифікації у процесі обміну інформацією з іншими AS [3, 4]. Протокол зовнішнього шлюзу отримав розвиток і став Border Gateway Protocol version 4 (BGP-4) — єдиний протокол, що використовується в системі глобальної маршрутизації між автономними системами.

Мережеві префікси анонсуються автономними системами (в іноземній літературі використовується термін «originating», отже в кожного префікса є свій «origin» — автономна система, до якої він належить. Така AS анонсує префікс і є джерелом маршруту до цього префікса.

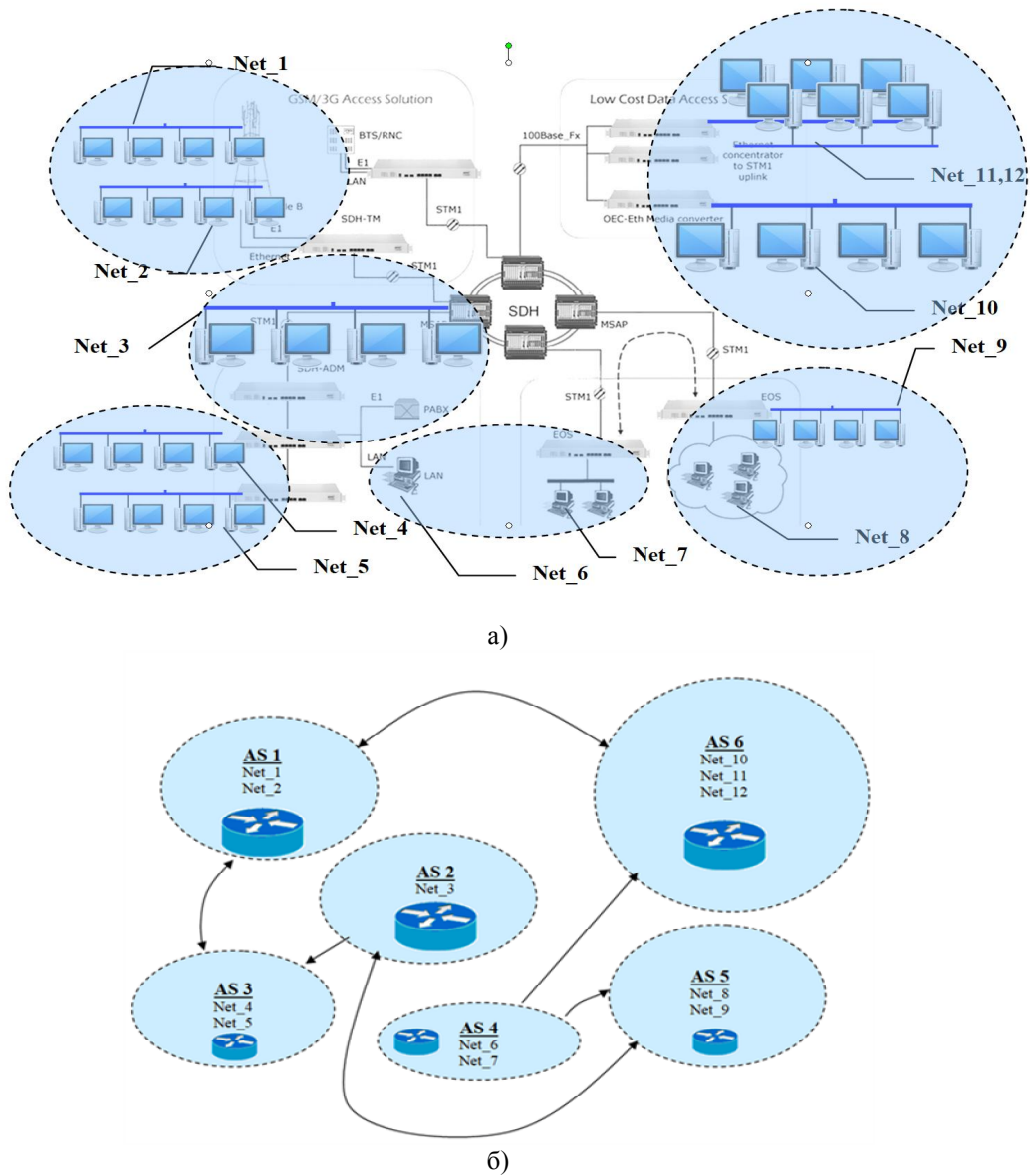


Рис. 1. Конверсія окремих мереж в автономні системи: а) об'єднання мереж спільним управлінням; б) перехід до системи глобальної маршрутизації

Узагальнимо, що входить до системи глобальної маршрутизації Інтернету на прикладі рис. 1,б. До неї належать такі об'єкти:

- 1) множина автономних систем — вузлів V : $V = \{AS1, AS2, \dots, AS6\}$;
- 2) множина мережевих префіксів p . Кожен префікс прив'язаний до певного та єдиного вузла v , званого «джерелом», а кожен вузол *може* бути джерелом для певних префіксів:

$$p = \{Net_1, Net_2, \dots, Net_{12}\}; \quad \forall p: p \in v_1 \Leftrightarrow p \notin v_2, \quad v_1, v_2 \in V,$$

$$\forall v \in V: \exists (\emptyset, \{p_1, p_2, \dots, p_n\}) \in v;$$

3) направлені з'єднання суміжних AS, за якими аноншуються префікси p :

$$l = \{AS_i, AS_j\} \neq \{AS_j, AS_i\}, \quad i \neq j.$$

З'єднання можуть розглядатися виключно в контексті передачі ними інформації про доступність мережевих префіксів, завдяки яким з'являються маршрути.

Крім того, до системи глобальної маршрутизації належать і процеси, які виконуються алгоритмами протоколу BGP-4, основною функцією якого є обмін інформацією про доступність окремих мереж.

З'єднання можуть розглядатися виключно в контексті передачі ними інформації про доступність мережевих префіксів, завдяки яким з'являються маршрути.

Крім того, до системи глобальної маршрутизації належать і процеси, які виконуються алгоритмами протоколу BGP-4, основною функцією якого є обмін інформацією про доступність окремих мереж.

Огляд існуючих досліджень топології Інтернету

Інтернет є об'єднанням комп'ютерних мереж, і сутність його саме в об'єднанні за принципами загальної логічної адресації і маршрутизації.

У [5] топологією Інтернету називають неформалізовану конструкцію, в якій кінцеві пристрої, маршрутизатори, автономні системи з'єднані одне з одним. Таке визначення містить очевидні протиріччя. Перше протиріччя полягає в тому, що з'єднання кінцевих пристроїв і маршрутизаторів властиве будь-якій складеній комп'ютерній мережі і, таким чином, таке визначення не є специфічним для Інтернету. Друге протиріччя полягає в тому, що автономна система за визначенням є результатом адміністративного об'єднання маршрутизаторів, а тому припущення про кінцевий пристрій, з'єднаний з автономною системою, є некоректним.

Робота [6], на яку посилаються автори [5], пропонує інше визначення топології Інтернету, а саме — сукупність взаємопоеднаних доменів маршрутизації (routing domains). Ці домени являють собою «групу вузлів (маршрутизатори, комутатори та хости) під єдиним технічним адмініструванням, в яких спільна маршрутизаційна інформація та правила».

Отже, тут топологія являє собою з'єднання груп неоднорідних вузлів, при тому визначення цих груп співпадає з наведеними раніше визначенням автономної системи. Тобто, синтезуючи це визначення з більш загальними поняттями топології комп'ютерних мереж, можна запропонувати два формулювання:

1) топологією комп'ютерної мережі Інтернет є визначений системою глобальної маршрутизації спосіб з'єднання її автономних систем, до яких входять окремі мережеві префікси зі спільною політикою маршрутизації;

2) топологією комп'ютерної мережі Інтернет є структура у вигляді графа, яка може представити взаємодію її автономних систем, до яких входять окремі мережеві префікси зі спільною політикою маршрутизації.

Такі визначення не містять задалегідь відомих протиріч, і, відповідно до них, топологія Інтернету базується на з'єднаних одна з одною автономних системах. Вона є найбільш часто досліджуваною [6–9]. При цьому дослідники акцентують увагу на наступному:

— топологія Інтернету на рівні AS є найкрупнішою деталізацією Інтернету, інші рівні топології Інтернету частково залежать від топології рівня AS;

— отримати топологію рівня AS відносно просто, а інші рівні топології іноді розглядаються як приватна інформація, і їх важче отримати;

— топологія рівня AS не розробляється безпосередньо людьми; натомість це сукупний результат технологічних та економічних сил, а отже, його походження та еволюція викликають значний інтерес з боку дослідників.

Уявлення про «відносну простоту» отримання інформації про зв'язки між AS, яке було наведене в [5] та інших роботах, дуже спрощене. Функціонування системи глобальної маршрутизації не дає можливості в окремій AS отримати інформацію про усі зв'язки в мережі безпосередньо за допомогою протоколу BGP. Відсутність єдиної точки огляду (vantage point) для всіх зв'язків і маршрутів підтверджує також Джоф Хостон, видатний учений і розробник Інтернету, який у [10] акцентує увагу на тому, що «не існує абсолютної правди про топологію; є лише набір відносних маршрутних карт, зібраних окремими BGP-системами».

Отже, основні проаналізовані дослідження не дають визначення топології Інтернету, натомість вважають топологією Інтернету щось само собою зрозуміле — з'єднання на рівні AS. Відсутність конкретного визначення топології Інтернету як поняття, та, водночас, проведення дослідження топології Інтернету, є протиріччям, що є перепорою на шляху пошуку нових методів захисту від кібернетичних атак на систему глобальної маршрутизації [1].

Вище було дане визначення всіх елементів глобальної комп'ютерної мережі Інтернет, які складають її архітектуру, і яка відрізняє її від будь-якої іншої комп'ютерної мережі. Необхідно визначити, що є топологією Інтернету, який складається з цих елементів. Це дасть змогу усунути наведене протиріччя.

Визначення топологічного простору Інтернету

Існує чітке математичне визначення поняття топології. Воно походить з визначення поняття топологічного простору, яке використовується у загальній топології. Визначення топологічного простору спирається лише на теорію множин, і є найбільш загальним поняттям математичного простору, що дозволяє визначити концепції, такі як безперервність, зв'язність та конвергентність [11].

Нехай існує множина елементів X . Система T відкритих підмножин його елементів є топологією на X , що відповідає вимогам, які зветься аксіомами топології:

— об'єднання довільного сімейства підмножин L з елементів X належить T :
 $\forall L', L'' \in T: (L' \cap L'' \in T)$;

— перетин довільного скінченного сімейства L з підмножин елементів X належить T :
 $\forall L', L'' \in T: (L' \cup L'' \in T)$;

— сама множина X та порожня множина належать T : $\emptyset \in T, X \in T$.

Окремим випадком топологічного простору є простір з дискретною топологією. В дискретному топологічному просторі множина точок не є безперервною, всі точки простору в якомусь сенсі ізольовані одна від іншої. Топологією дискретного топологічного простору (дискретною топологією) є сімейство всіх його підмножин, що відповідають аксіомам топології. Особливістю дискретної топології є

те, що її базою послуговують всі підмножини множини X , що складаються з одного елемента.

Мережеві структури утворюють топологічний простір. Метричні структури часто моделюють у вигляді графа. В роботі [12] продемонстровано представлення топологічного простору логістичного графа на множині його ребер, з якого витікає, що граф є прикладом моделі.

Ми також роздивляємося топологію Інтернету як «структуру у вигляді графа, яка може представити взаємодію її автономних систем, до яких входять окремі мережеві префікси зі спільною політикою маршрутизації», оскільки представлення мережі у вигляді графа є типовим і загально прийнятним. Якщо граф Інтернету теж є прикладом дискретного топологічного простору, необхідно визначити на множині яких елементів задано цю топологію.

Оскільки топологія — це система підмножин з елементів множини, на якій вона задається, необхідно визначити, на якій саме множині задається топологія.

Основною функцією системи глобальної маршрутизації є обмін інформацією про доступність мережі. Ця інформація про доступність мережі включає список автономних систем (AS), крізь які проходить інформація про доступність мережі. Цієї інформації достатньо для побудови графа зв'язків AS.

Маршрут — це одиниця інформації, яка поєднує набір пунктів призначення з атрибутами шляху до цих пунктів призначення. Набір пунктів призначення — це системи, чії IP-адреси містяться в одному IP-префіксі, розташованому в повідомленні про доступність мережі (network layer reachability information, NLRI). Шлях — це дані у вигляді списку AS, крізь які проходить інформація про доступність мережі. Дані містяться в полі атрибутів шляху того самого повідомлення [3].

Початкові дані, доступні нам із системи глобальної маршрутизації, виглядають так:

- 1) множина вузлів (AS);
- 2) множина мережевих префіксів (ідентифікатори IP-мереж, до яких прокладаються маршрути), причому кожен префікс прив'язаний до певного вузла, так званого «джерела»;
- 3) з'єднання — спрямований зв'язок двох суміжних AS, яким передається анонс конкретного префікса; з'єднання можуть розглядатися виключно в контексті передачі ними інформації про доступність мережевих префіксів;
- 4) маршрут до певного префікса — комбінація з послідовних зв'язків, що закінчується джерелом префікса;
- 5) множина маршрутів до певного префікса, яка охоплює всі можливі комбінації послідовних зв'язків, за якими анонсується певний префікс, з кінцевою точкою в джерелі префікса;
- 6) множина всіх маршрутів до всіх префіксів.

Необхідно встановити зв'язок, чи, скоріше, відповідність між структурами, що утворюються в результаті процесів глобальної маршрутизації, і математичним визначенням топології.

Твердження 1. Окремий маршрут до префікса є топологією на множині з'єднань.

Твердження 2. Сукупність усіх маршрутів до префікса є топологією на множині з'єднань.

Твердження 3. Сукупність усіх маршрутів до всіх префіксів є топологією на множині з'єднань.

Наведемо обґрунтування тверджень 1, 2, 3. Попередньо сформулюємо засади та наведемо визначення, на яких базується обґрунтування.

За визначенням, маршрут у BGP-4 містить мережевий префікс і шлях до нього. Оскільки нами прийнято, що з'єднання між суміжними AS ми розглядаємо виключно в контексті передачі ним маршруту до певного префікса, то маршрути відрізняються виключно шляхами, тому далі замість «шлях» ми використовува- тимемо термін «маршрут».

Мережа Інтернет є системою сполучених комп'ютерних мереж, об'єднаних принципами маршрутизації [2]. Отже, мережевий префікс є ідентифікатором окремої комп'ютерної мережі, яку можна вважати сполученою з Інтернетом тоді і лише тоді, коли до неї існує маршрут з кожної іншої сполученої мережі. Тому вважатимемо, що в кожній AS наявний принаймні один маршрут до кожного мережевого префікса.

AS за визначенням обмінюється інформацією про маршрути до префіксів з іншими AS [3, 4]. Тому вважаємо, що будь-яка AS має з'єднання з принаймні однією іншою AS, і кожне з'єднання задіяне принаймні в одному маршруті, тобто через нього може бути прокладено шлях від хоча б однієї AS до джерела хоча б одного префікса.

Обґрунтування Твердження 1.

Маршрут $m(p)$ до префікса p за визначенням є множиною послідовних з'єднань. Дискретна топологія включає в себе всі можливі комбінації елементів множини, на якій вона визначається. Дискретна топологія на множині з'єднань, які належать префіксу, включає в себе всі комбінації з'єднань. Впорядкована безперервна послідовність з'єднань є однією з можливих комбінацій з'єднань. Отже, окремий маршрут до префікса належить топології на множині з'єднань.

Обґрунтування Твердження 2.

Нехай M є сімейством усіх комбінацій з послідовних з'єднань, якими передається інформація про доступність префікса p :

$$M_p = \bigcup m(p), \quad m(p) = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \dots, l(p)\}.$$

Очевидно, що тоді кожне окреме з'єднання l належить якомусь елементу m сімейства M , і не існує жодного з'єднання, яке не належало би до жодного елемента сімейства M . Отже, сукупність усіх маршрутів до префікса належить топології на множині з'єднань.

Обґрунтування Твердження 3.

Нехай у кортежі (V, E) до V належать всі AS, а до E належать усі з'єднання між AS. Нехай T є топологією, заданою на множині всіх з'єднань. З визначення AS витікає, що кожен зв'язок використовується при побудові принаймні одного маршруту до якогось префікса. Тоді всі маршрути до всіх префіксів «здійюють» усі зв'язки в такій чи іншій комбінації, а отже — сукупність усіх маршрутів до всіх префіксів є топологією, заданою на множині всіх зв'язків між AS у мережі Інтернет.

Крім того, до топології має належати порожня множина елементів, на яких вона задана. Для топології Інтернету порожньою множиною може послугувати комбінація зв'язків, за якою AS анонсує мережевий префікс, що належить їй самій.

Розглянемо приклад на рис. 2. Нехай AS1, AS2, ..., AS6 — ідентифікатори автономних систем (AS), при чому AS1 є джерелом префікса p . Нехай $L = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ — направлені зв'язки суміжних AS, якими передається інформація про доступність мережевого префікса p .

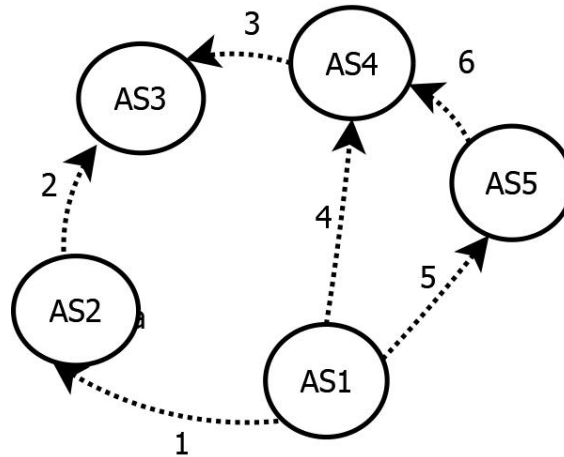


Рис. 2. Приклад утворення маршрутів з елементів топології

Розглянемо сімейство підмножин з елементів L , які могли би стати маршрутами до префіксів, що анонсуються AS1. Обов'язкова умова за визначенням маршруту — послідовність з'єднань має бути безперервною, а закінчуватися джерелом префікса (AS1):

- $\{\emptyset\}$: (AS1, AS1);
- $\{1\}$: (AS2, AS1);
- $\{1, 2\}, \{4, 3\}, \{5, 6, 3\}$: (AS3, AS1);
- $\{4\}, \{5, 6\}$: (AS4, AS1);
- $\{6\}$: (AS5, AS1).

Резюмуємо міркування. Нехай існує множина L всіх з'єднань l між вузлами. Нехай існує система елементів множини цих з'єднань T , до якої належать порожня множина, сама множина всіх з'єднань, та будь-які комбінації (об'єднання та перетини) з цієї множини:

$$\exists T : \emptyset, L \in T; \forall L', L'' \in T : (L' \cap L'' \in T; L' \cup L'' \in T) . \quad (1)$$

У такому разі система T відповідає визначенню топології на множині з'єднань L , а пара $G(L, T)$ відповідає визначенню топологічного простору, де множина з'єднань є «носієм» топології. Формалізуємо визначення маршруту до певного префікса як безперервної послідовності унікальних з'єднань, що закінчується джерелом префікса. Відповідно до цього визначення всі маршрути належать топології, бо безперервна послідовність елементів може бути утворена об'єднанням елементів і за визначенням є елементом топології:

$$\left(\begin{array}{l} m(p) = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \dots, l(p)\}; \\ l_i = \{v_i, v_j\}; \quad v_i, v_j \in V \end{array} \right) \Rightarrow \forall p, m(p) \in T, \quad (2)$$

$$\forall m(p'), m(p'') \in T : \left(\begin{array}{l} m(p') \cup m(p'') \in L \subset T; \\ m(p') \cap m(p'') \in (\emptyset, L) \subset T \end{array} \right) .$$

Сутність «порожня множина» в даній топології символізує з'єднання, яким вузол-джерело передає анонс власного префікса сам собі.

Таким чином, алгоритм протоколу BGP обирає кращі шляхи для кожного префікса p з елементів топології, що належать топологічному простору цього префікса та складаються виключно зі з'єднань, якими передається анонс цього префікса:

$$G_p = (L_p, T_p).$$

Отже G — сукупність топологічних просторів усіх мережевих префіксів охоплює всі існуючі з'єднання між вузлами Інтернету:

$$G = \bigcup_p G_p . \quad (3)$$

Таким чином, (3) є топологічним простором Інтернету, який утворено системою глобальної маршрутизації.

Висновки

Основні проаналізовані дослідження не дають визначення топології Інтернету, натомість вважають топологією Інтернету щось само собою зрозуміле — з'єднання на рівні AS. Відсутність конкретного визначення топології Інтернету як поняття, та, водночас, проведення дослідження топології Інтернету, є протиріччям, що є перепорою на шляху пошуку нових методів захисту від кібернетичних атак на систему глобальної маршрутизації.

Тому запропоновано варіант формулювання поняття «топологія Інтернету» через математичне визначення топологічного простору глобальної комп'ютерної мережі Інтернет, що утворений системою глобальної маршрутизації на множині з'єднань між вузлами — автономними системами. Також показано, що маршрути, які несуть інформацію про доступність мережевих префіксів, є елементами топології. Перехід від нечіткого розуміння поняття топології глобальної комп'ютерної мережі до математичного визначення топологічного простору відкриває шлях застосування нових методів дослідження властивостей Інтернету.

1. Зубок В.Ю., Мохор В.В. Дослідження зв'язку між топологією та ризиком в наслідок кібератак на глобальну маршрутизацію. *Моделювання та інформаційні технології*. 2018. № 85. С. 23–26. ISSN: 2309-7647.

2. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. для вузов. 3-е изд. 2006.

3. Rekhter Y., Li T., and Hares S. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4271> (Last accessed: 29.06.2018).
4. Rekhter Y., Estrin D., and Hots S. A Unified Approach to Inter-Domain Routing. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1322> (Last accessed: 29.06.2018).
5. He Y., Siganos G., Faloutsos M. Internet Topology. In: Meyers R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer, 2009. DOI:10.1007/978-0-387-30440-3_293.
6. Calvert K.L., Doar M.B., and Zegura E.W. Modeling Internet topology. *IEEE Communications Magazine*. June 1997. Vol. 35, No. 6. P. 160–163. DOI:10.1109/35.587723.
7. Faloutsos M., Faloutsos P., Faloutsos C. On Power Law Relationships of the Internet Topology. *Comput. Commun. Rev.* 1999. No. 29. P. 251–263.
8. Krioukov D. The Internet AS-Level Topology: Three Data Sources and One Definitive Metric. *SigComm Computer Communication Review*. 2006. Vol. 36. Issue 1. P. 17–26.
9. Barabasi A.-L, Bonebau E. Scale-Free Networks. *Scientific American*. 2003. Vol. 5. C. 50–59.
10. Huston G. Why Securing BGP is So Damn Hard. URL: <https://blog.apnic.net/2019/09/19/why-is-securing-bgp-just-so-damn-hard/> (Last accessed: 15.09.2019).
11. Kelley J. General Topology. Dover Books on Mathematics (Reprint Edition), 2017. 320 p.
12. Живицкая Е. Топологические свойства сложных логистических систем. *Доклады БГИУР*. 2012. № 8.

Надійшла до редакції 02.03.2021