

УДК 004.738+515.1

Мохор В.В.,
Зубок В.Ю.

ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОГО ПРОСТОРУ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

ipme@ipme.kiev.ua

Вступ

Інтернет є мережею, що постійно зростає за рахунок приєднання нових окремих комп'ютерних мереж та організації нових зв'язків. Цими приєднуваними комп'ютерними мережами є будь-які комп'ютерні системи, а також телекомунікаційні системи. Процес об'єднання функцій та послуг систем часто називають конвергенцією – поєднанням інформаційних та телекомунікаційних функцій, що раніше були властиві різним телекомунікаційним системам, завдяки новому типу обладнання, що поєднує різні функції і розробці уніфікованих структур систем обміну та обробки інформації.

Топологією комп'ютерної мережі називають визначений її архітектурою спосіб організації чи взаємного розташування її елементів, до яких входять всі види пристроїв мережі (кінцеві пристрої, комутатори, маршрутизатори, подовжувачі, таке інше, та власне з'єднання) [1]. Також топологією комп'ютерної мережі називають структуру у вигляді графа, яка може представити взаємодію елементів мережі як на так званому фізичному рівні (де демонструються розташування пристроїв та маршрути прокладання кабелів), так і на логічному, де описуються потоки даних. Оскільки відомо, що Інтернет є об'єднанням комп'ютерних мереж, і сутність його саме в цьому об'єднанні за принципами загальної логічної адресації та маршрутизації, варто розглядати «топологію Інтернет» саме на логічному рівні, де описуються потоки даних. Відсутність конкретного визначення топології Інтернет як поняття, та, водночас, проведення дослідження топології Інтернет, є протиріччям, що є перешкодою на шляху пошуку методів

вдосконалення мережі та захисту від кібернетичних атак, зокрема, її системи глобальної маршрутизації.

Постановка задачі

Необхідно розглянути особливості архітектури Інтернет, спосіб організації глобальної маршрутизації, існуючі способи визначення поняття «топологія Інтернет», та запропонувати узагальнене та непротиричне визначення, яке здатне пояснити, з яких елементів складається саме глобальна комп'ютерна мережа Інтернет і як саме вони взаємодіють.

Стислий опис системи адресації та маршрутизації в Інтернеті

Окремі комп'ютерні мережі мають зазвичай різноманітну архітектуру, в тому числі різні і несумісні між собою принципи адресації та маршрутизації. Функції адаптації та конверсії між окремими комп'ютерними мережами виконують так звані шлюзи. Заради забезпечення можливості передачі даних між всіма об'єднаними мережами, всі пристрої, що входять в об'єднану мережу (це можуть бути і кінцеві пристрої, але шлюзи – обов'язково) підтримують єдину спільну систему 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 – з 128 біт. Адреса умовно поділяється на дві частини по будь-якому біту – адресу мережі та адресу хоста в мережі. Позицію біта при конфігуруванні мережевого інтерфейса визначає мережева маска, а при ви-

борі маршрута – так званий префікс (нотація, коли за адресою одразу вказується по якому біту розмежовується адреса мережі та хоста, наприклад 10.0.0.1/24).

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 та обробкою таблиць маршрутизації;
- неможливість обслуговування Інтернету як єдиної системи через неможливість ізоляції помилок, збоїв маршрутизації;
- сталі алгоритми маршрутизації та ПО зовсім негнучкі через те, що неможливо забезпечити запропоновані зміни у всій мережі одночасно, бо це потребує адаптації до кожної окремої системи.

Тоді й виникла ідея увести поняття домену, або автономної системи, єдиної частки мережі, із 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, які керуються одним чи більше операторами, які мають єдину та чітко визначену політику маршрутизації. Кожна AS має 16- або 32-бітний номер для ідентифікації в процесі обміну інформацією с іншими AS [3]. 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 префіксу є свій «origin» – автономна система, до якої він належить. Така AS анонсує префікс і є джерелом маршруту до цього префікса.

Узагальнимо, що входить до системи глобальної маршрутизації Інтернет на основі рис.1 (б). До неї належать такі об'єкти:

1) Множина мережевих префіксів, кожен префікс прив'язаний до певного та єдиного вузла v , званого "джерелом":

$$p = \{\text{Net}_1, \text{Net}_2, \dots, \text{Net}_{10}\};$$

$$\forall p: p \in v_i \Leftrightarrow p \notin v_j, \quad v_i, v_j \in V$$

2) Множина автономних систем V , кожен вузол є джерелом для певних префіксів:

$$V = \{AS_1, AS_2, \dots, AS_5\};$$

$$\forall v \in V: \exists \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \in v$$

3) Направлені з'єднання суміжних AS, по яких анонсуються префікси p ;

$$l_p = \{AS_i, AS_j\} \neq \{AS_j, AS_i\}$$

З'єднання можуть розглядатись виключно в контексті передачі по них 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.

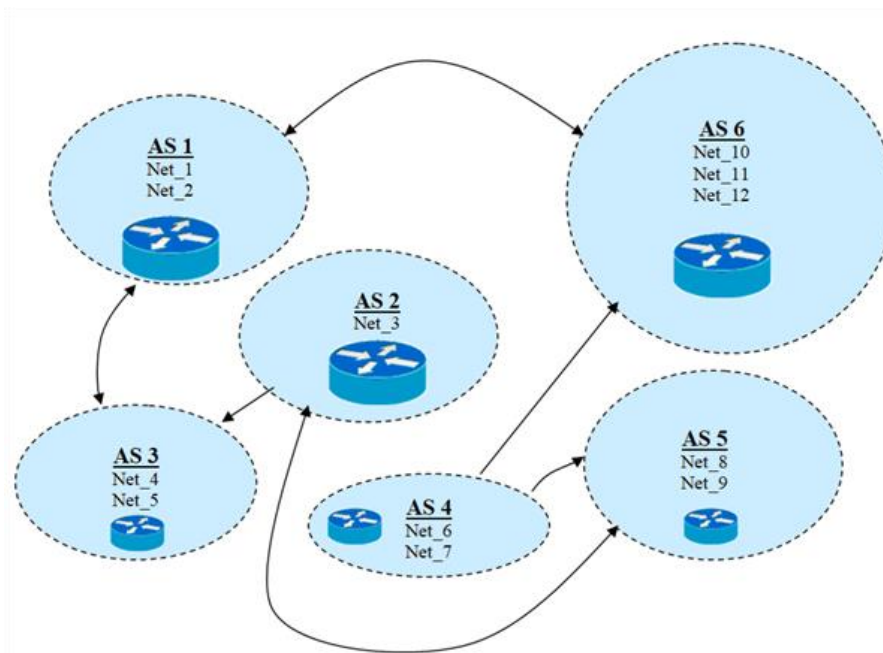
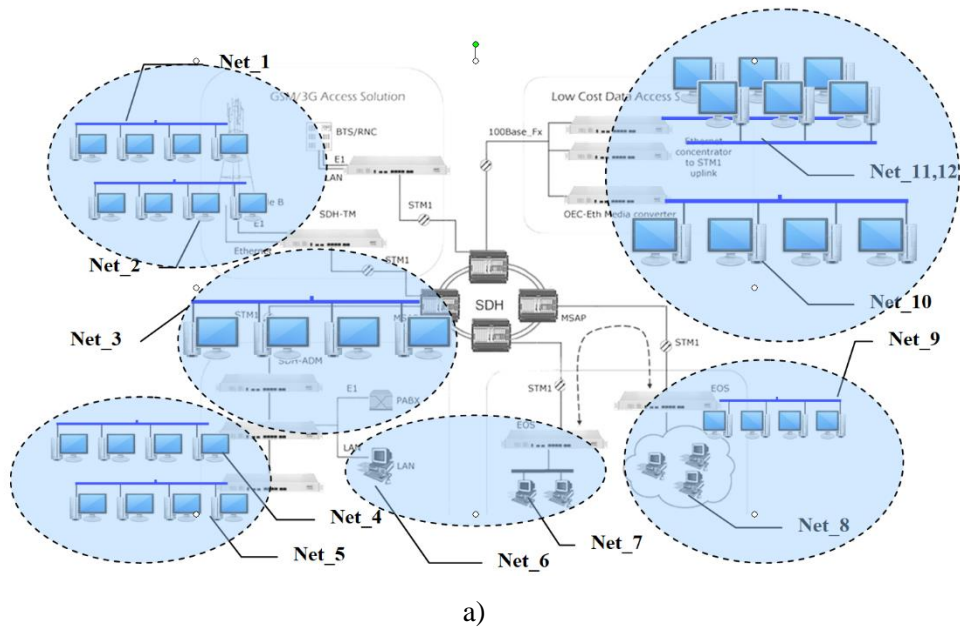


Рис. 1. Конверсія окремих мереж в автономні системи: об'єднання мереж спільним управлінням (а) та перехід до системи глобальної маршрутизації (б)

Проблема терміну «топологія Інтернет»

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

В [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 та маршрутизаторів властиве будь-якій складовій 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 Інтернет, а саме – сукупність взаємопоєднаних 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 заздальгідь відомих протиріч, і, відповідно до них, топологія Інтернет 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 та маршрутів підтверджує також Джоф Хостон, видатний вчений і розробник Інтернет, який в [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 Інтернет, натомість вважають топологією Інтернету щось само собою зрозуміле – з'єднання на рівні AS. Відсутність конкретного визначення топології Інтернет як поняття, та, водночас, проведення дослідження топології Інтернет, є протиріччям, що є перепороною на шляху пошуку нових методів захисту від кібернетичних атак на систему глобальної маршрутизації [4].

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.

Топологічний простір 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 , якщо 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 роздивляємось топологію Інтернет 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 прийнятим. Якщо граф Інтернет 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, чиї 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 [2].

Початкові дані, доступні нам з системи глобальної маршрутизації, виглядають так.

- множина вузлів (AS);
- множина мережевих префіксів (ідентифікатори IP-мереж, до яких прокладаються маршрути), причому кожен префікс прив'язаний до певного вузла, званого "джерела";
- з'єднання – спрямований зв'язок двох суміжних AS, по якому передається анонс конкретного префікса; з'єднання можуть розглядатись виключно в контексті передачі по них інформації про доступність мережевих префіксів;
- маршрут до певного префікса – безперервна послідовність унікальних зв'язків, що закінчується джерелом префікса;
- множина маршрутів до певного префікса, яка охоплює всі можливі комбінації зв'язків, за якими анонсується певний префікс, з кінцевою точкою в вузлі-джерелі;
- множина всіх маршрутів до всіх префіксів.

Необхідно встановити зв'язок, чи, скоріше, відповідність між структурами,

що утворюються в результаті процесів глобальної маршрутизації, та 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 в BGP-4 містить мережевий префікс та шлях до нього. Оскільки нами прийнято, що з'єднання між суміжними AS ми розглядаємо виключно в контексті передачі по ньому NLRI певного префікса, то маршрути відрізняються виключно шляхами, тому далі замість «шлях» ми використовуватимемо термін «маршрут».

Мережа Інтернет є системою сполучених комп'ютерних мереж, об'єднаних принципами маршрутизації [4]. Отже, мережевий префікс є ідентифікатором окремої комп'ютерної мережі, яку можна вважати сполученою з Інтернет 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 префіксу.

AS за визначенням обмінюється інформацією про маршрути до префіксів з іншими AS [2]. Тому вважаємо, що будь-яка AS має з'єднання з принаймні однією іншою AS, і кожне з'єднання задієє принаймні в одному маршруті, тобто через нього може бути прокладено шлях від хоча б однієї AS до джерела хоча б одного префіксу.

Обґрунтування Твердження 1.

Маршрут $m(p)$ до префікса p за визначенням є впорядкованою безперервною послідовністю з'єднань. Дискретна топо-

логія 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 є топологією на множині з'єднань.

Обґрунтування Твердження 2.

Нехай M є сімейством всіх можливих безперервних послідовностей з'єднань $m(p) = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \dots, l(p)\}$, що належать префіксу p . Очевидно, що тоді кожне окреме з'єднання l належить якомусь елементові m сімейства M , і не існує жодного з'єднання, яке не належало би до жодного елемента сімейства M .

Отже, сукупність усіх маршрутів до префікса є топологією на множині з'єднань.

Обґрунтування Твердження 3.

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

Крім того, до топології має належати порожня множина елементів, на яких вона задана. Для топології Інтернет порожньою множиною може послуговувати комбінація зв'язків, по якій AS анонсує мережевий префікс, який належить їй самій. Розглянемо приклад на рис.2. Нехай 10,11,12,13,77 – ідентифікатори автономних систем (AS), при чому AS 13 є джерелом префіксу 192.168.0.0/20. Нехай $L = \{a, b, c, d, e, f\}$ – направлені зв'язки суміжних AS, якими передається інформація (NLRI) про доступність мережевого префіксу p .

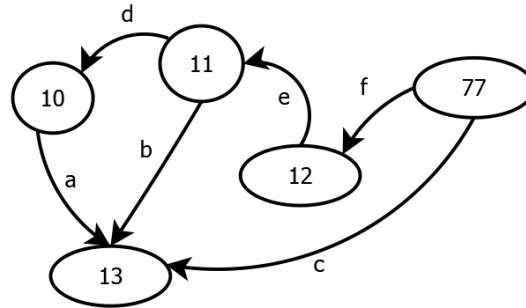


Рис. 2. Наочний приклад утворення маршрутів з елементів топології

Розглянемо сімейство підмножин з елементів L , які є маршрутами до префіксу p , які мають завершуватись його джерелом – AS 13, тобто утворення яких обумовлено правилами формування шляхів в протоколі BGP-4:

$$\begin{aligned} (13,13) &= \{\emptyset\}; \\ (10,13) &= \{a\}; \\ (11,13) &= \{a,b, \{a,b\}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (12,13) &= \{\{e,b\}, \{e,d,a\}\}; \\ (77,13) &= \{c, \{f,e,b\}, \{f,e,d,a\}\}. \end{aligned}$$

Резюмуємо міркування. Нехай існує множина 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:

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

В 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:

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

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

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

Таким чином, алгоритм протоколу BGP обирає кращі шляхи для кожного префікса з елементів топології, що належать топологічному простору цього префікса $G_p := (L_p, T_p)$ та складаються виключно із з'єднань, по яких передається анонс цього префікса. Отже G – сукупність топологічних просторів всіх мережевих префіксів

охоплює всі існуючі з'єднання між вузлами Інтернету:

$$G = \bigcup_p G_p, \quad G_p := (L_p, T_p) \quad (3)$$

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

Висновки

Основні проаналізовані дослідження не дають визначення топології Інтернет, натомість вважають топологією Інтернету щось само собою зрозуміле – з'єднання на рівні AS. Відсутність конкретного визначення топології Інтернет як поняття, та,

водночас, проведення дослідження топології Інтернет, є протиріччям, що є перепону на шляху пошуку нових методів захисту від кібернетичних атак на систему глобальної маршрутизації.

Тому запропоновано варіант формулювання поняття «топологія Інтернет» 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 Інтернет.

Література

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. 54 Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд, 2006. – 958 с.
2. Y.Rekhter, D. Estrin, S.Hots. A Unified Approach to Inter-Domain Routing. [Електронний ресурс.] – Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc1322>.
3. Y.Rekhter, T.Li S.Hares. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). [Електронний ресурс.] – Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc4271>.
4. Зубок В.Ю. Дослідження зв'язку між топологією та ризиком в наслідок кібератак на глобальну маршрутизацію /

В.Ю. Зубок, В.В. Мохор // Моделювання та інформаційні технології. – ISSN: 2309-7647. – 2018. – №85. – С. 23-26.

5. He Y., Siganos G., Faloutsos M. “Internet Topology” In: Meyers R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer. – 2009.

6. K.L. Calvert, M.B. Doar, E.W. Zegura. "Modeling Internet topology," in IEEE Communications Magazine. – Vol. 35, №6. – P. 160-163.

7. Faloutsos M. On Power Law Relationships of the Internet Topology / Faloutsos M., Faloutsos P., Faloutsos C. // Comput. Commun. Rev. – 1999. – №.29. – С. 251-263

8. Krioukov D. The Internet AS-Level Topology: Three Data Sources and One Definitive Metric / D. Krioukov // SigComm Computer Communication Review. – Vol.36, issue 1. – С. 17-26.

9. Barabasi A.-L. Scale-Free Networks / A.-L. Barabasi, E. Bonebau // Scientific American. – 2003.– Vol. 5. – С. 50-59.

10. G. Huston. “Why Securing BGP is So Damn Hard”. [Електронний ресурс.] – Режим доступу: <https://blog.apnic.net/2019/09/19/why-is-securing-bgp-just-so-damn-hard/>.

11. Kelley J. General Topology / John L. Kelley. – Dover Books on Mathematics (Reprint Edition). – 2017. – 320 p.

12. Живицкая Е. Топологические свойства сложных логистических систем / Е.Н. Живицкая // Доклады БГИУР. – №8. – 2012.

Мохор В.В., Зубок В.Ю.

ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОГО ПРОСТОРУ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ

Топологією комп'ютерної мережі називають визначений її архітектурою спосіб організації чи взаємного розташування її елементів, до яких входять всі види пристроїв мережі (кінцеві пристрої, комутатори, маршрутизатори, подовжувачі, таке інше, та власне з'єднання). Оскільки відомо, що Інтернет є об'єднанням комп'ютерних мереж, і сутність його саме в цьому об'єднанні за принципами загальної логічної адресації та маршрутизації, варто розглядати «топологію Інтернет» саме на логічному рівні, де описуються потоки даних.

Відсутність конкретного визначення топології Інтернет як поняття, та, водночас, проведення дослідження топології Інтернет, є протиріччям, що є перепону на

шляху пошуку методів вдосконалення мережі та захисту від кібернетичних атак, зокрема, її системи глобальної маршрутизації.

Тому запропоновано варіант формулювання поняття «топология Інтернет» 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. Це відкриває шлях до використання методів топології для дослідження топологічного простору Інтернет.

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

Mokhor V.V., Zubok V.Yu.

DEFENITION OF TOPOLOGICAL SPACE OF THE INTERNET

A topology of a computer network is a method of organization or mutual arrangement of its elements determined by its architecture, which includes all types of network devices (end devices, switches, routers, extension cords, etc.) and its own connection. Since it is known that the Internet is a union of computer networks, and its essence is in this union on the principles of general logical addressing and routing, it is worth considering the "topology of the Internet" at the logical level, which describes data flows.

The lack of a specific definition of the Internet topology as a concept, and, at the same time, the study of the Internet topology, is a contradiction that is an obstacle to finding ways to improve the network and protect against cyber-attacks, including its global routing system.

Therefore, a variant of formulating the concept of "Internet topology" through the mathematical definition of the topological space of the global computer network Internet, which is formed by a global routing system on a set of connections between nodes – autonomous systems. It is also shown that routes that carry information about the availability of network prefixes are elements of the topology. This opens the way to the use of topology methods to study the topological space of the Internet.

Keywords: Internet, topology, topological space, global routing.