

## ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО VPN РІШЕННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Нікіта Усіченко, Сабіна Рузудженк, Каріна Погоріла

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, Харків, 61022, Україна  
[nik.usichenko@gmail.com](mailto:nik.usichenko@gmail.com), [ruzudzhenk.jb@gmail.com](mailto:ruzudzhenk.jb@gmail.com), [karina.pogorelka@gmail.com](mailto:karina.pogorelka@gmail.com)

Рецензент: Роман Олійников, д.т.н., проф., ПАО "ІТ", вул. Бакуліна, 12, Харків, 61166, Україна  
[roliynykov@gmail.com](mailto:roliynykov@gmail.com)

Поступила: Червень 2020

***Анотація.** В роботі розглянуто проблематику щодо створення віртуальної приватної мережі в сучасному світі. Запропоновано метод знаходження оптимального рішення віртуальної приватної мережі на основі методу аналізу ієрархій. Наведені переваги та недоліки даного методу. Через доступність широкого спектру програмно-апаратних засобів, розглянуті рішення на основі п'яти актуальних VPN протоколів: PPTP, IPsec, L2TP + IPsec, SSTP та OpenVPN. Залученими до виконання досліджень експертами введені шість критеріїв для визначення кращого VPN рішення. Введені наступні критерії: швидкість, шифрування даних, налаштування, конфігурація, порти, стабільність та сумісність клієнтів. Надана ієрархія рівнів прийняття рішень для тематичного дослідження. Виконана оцінка пріоритетів на підставі експертних суджень, профільних, за даної тематики, спеціалістів. Виконана перевірка узгодженості для виявлення можливих суперечностей. Визначений глобальний пріоритет за допомогою методу власних значень, який обчислює не тільки пріоритети, але й ступінь невідповідності. За результатами моделювання підкреслено, що вибір VPN протоколу є складним завданням. Вирішення цього завдання потребує аналізу ринку, визначення критеріїв порівняння і надання пріоритетів. Звернено увагу на той факт, що всі зазначені складові здійснюються в умовах, коли немає повної інформації о системі, в якій ці процеси відбуваються. В такому випадку, необхідно користуватися методами прийняття рішень в умовах невизначеності. На теперішній час існує велика кількість таких методів, але в ситуації, що розглядалася, експертами було запропоновано метод аналізу ієрархій. За умов наведених критеріїв та наданих пріоритетів, за результатами розрахунку, протокол OpenVPN являється найбільш оптимальним рішенням для створення віртуальної приватної мережі.*

***Ключевые слова:** метод аналізу ієрархій; віртуальна приватна мережа; метод Саати; VPN протокол.*

### 1 Вступ

На думку аналітиків обсяг світового ринку віртуальних приватних мереж оцінювався у 25,65 млрд. доларів США у 2019 році та, як очікується, буде рости із середньорічним темпом зростання (CAGR) 17,4% з 2020 по 2027 рік [1]. Такий інтерес до VPN (Virtual private network) обумовлений необхідністю зниження витрат на обслуговування корпоративних мереж за допомогою з'єднання віддалених користувачів через Інтернет. При цьому, головним питанням при організації такого типу з'єднань стає безпека передачі даних, що спонукає до створення механізмів, за допомогою яких можна забезпечити цілісність і конфіденційність інформації, яка циркулює між віддаленими користувачами.

Основним інструментом для розв'язання такого питання може виступати VPN. Найголовнішою перевагою цього рішення є фінансова сторона питання. В теперішній час, коли панує пандемія і впроваджуються масові карантинні заходи, коли усе більше компаній змушені переводити своїх співробітників на дистанційну роботу, стає актуальним питання ефективності систем безпечного доступу на основі VPN [2].

За останні роки було реалізовано велику кількість різних варіантів організації віртуальної приватної мережі [3]. Через це перед користувачами, для яких використання віддаленого доступу до корпоративних ресурсів є основним варіантом підтримки бізнес процесів, стає завдання вибору найбільш відповідного (для конкретних умов підтримки бізнес процесів) рішення для VPN на основі певних пріоритетів. Ця задача може вирішуватися за допомогою теорії прийняття рішень.

В області теорії прийняття рішень за останні роки опубліковано багато наукових робіт, присвячених як вибору варіантів при створенні складних технічних систем, так і, безпосередньо, розвитку методів теорії прийняття рішень. Серед них можна відзначити роботи, в яких

викладено методи теорії прийняття рішень, що включають методи аналізу ієрархій та аналітичних мереж, методи, засновані на теорії нечітких множин тощо [4-6].

Так наприклад, при проектуванні нових зразків техніки або оцінці її досяжного технічного рівня, завжди виникає питання доцільності використання того чи іншого методу прийняття рішень. З огляду на актуальність зазначеного завдання було проведено цикл досліджень стосовно оцінки актуальних загроз безпечного доступу для ІТ компаній та синтезу відповідних рішень задля підтримки безпечного обміну корпоративною інформацією, як в сегменті головний офіс – працівник, так і на ділянках працівник – працівник. Варто зазначити, що в межах виконання досліджень в якості експертів залучалися профільні фахівці відповідної кафедри ХНУ імені В.Н. Каразіна.

## 2 Основні концепції методу аналізу ієрархій

Для умов невизначеності, коли немає можливості однозначно порівняти альтернативи між собою, існують наступні методи прийняття рішень: *Multi-Attribute Utility Theory* [7], *SMART* [8], *ELECTRE* [9], та Метод аналізу ієрархій (МАІ) [10].

МАІ був розроблений Томасом Сааті, та дозволяє структурувати проблему прийняття рішень у вигляді ієрархії, порівняти і зробити оцінку альтернативних варіантів рішень. В порівнянні з іншими методами МАІ має наступні переваги:

- може враховувати відносні пріоритети факторів або альтернатив і представити найкращий результат;
- забезпечує просту і дуже гнучку модель для проблеми;
- забезпечує можливість перерахувати або структурувати на будь-якому рівні деталізації основної проблеми;
- забезпечує можливість вимірювати узгодженість суджень [11].

Водночас цьому методу притаманні певні недоліки:

- МАІ має суб'єктивний характер процесу моделювання, тобто методологія не може гарантувати прийняття рішень, як однозначно істинних;
- коли кількість рівнів в ієрархії збільшується, кількість парних порівнянь також збільшується, так що, для побудови моделі МАІ потрібно набагато більше часу та зусиль [11].

Для використання МАІ користувачеві потрібно виконати два кроки, щоб отримати рейтинг альтернатив: спершу, як і у випадку з будь-яким іншим методом прийняття рішень, проблема повинна бути структурована, після цього бали - або пріоритети, як вони відомі в МАІ - обчислюються на основі попарних порівнянь, наданих користувачем. Можна здійснити два додаткові етапи: перевірку узгодженості та аналіз чутливості. Обидва кроки є обов'язковими, але рекомендуються як підтвердження надійності результатів. Перевірка узгодженості є загальною для всіх методів, заснованих на попарних порівняннях. Проблеми, що вимагають техніки багатокритеріального прийняття рішень, є складними, тому їх зручно розподіляти на кілька підзадач. Розподіл здійснюється під час структурування проблеми та визначення пріоритетів шляхом попарного порівняння. Проблема структурується відповідно до ієрархії, де верхній елемент є метою рішення, другий рівень ієрархії представляє критерії, а найнижчий - альтернативи. У складніших ієрархіях можна додати більше рівнів. Ці додаткові рівні представляють підкритерії. У будь-якому випадку в ієрархії є мінімум три рівні.

## 3 Застосування методу аналізу ієрархій для вибору оптимального VPN рішення

Експерти, що приймали участь у моделюванні, обирали віртуальну приватну мережу на основі п'яти наступних VPN протоколів через те, що для них доступний широкий спектр програмно-апаратних засобів:

- *PPTP (Point-to-Point tunneling protocol)*;
- *IPsec (IP Security)*;
- *L2TP (Layer Two Tunneling Protocol) + IPsec (Internet Protocol Security)*;
- *SSTP (Secure Socket Tunneling Protocol)*;

- *OpenVPN*.

При прийнятті рішення щодо вибору VPN були визначені наступні шість критеріїв:

- швидкість (*обсяг даних, оброблених і переданих за одиницю часу*);
- шифрування даних при передаванні відкритими мережами;
- налаштування / конфігурація (*складність налаштування*);
- порти (*можливість блокування*);
- стабільність (*стабільність з'єднання та швидкість відновлення роботи*);
- сумісність клієнтів (*кросплатформність*).

На рис. 1 представлено ієрархію тематичного дослідження. Він містить три рівні, мінімально необхідних для вирішення проблеми з МАІ, де кожен нижній рівень має пріоритет відповідно до його безпосереднього верхнього рівня. Відповідне питання щодо розставлення пріоритетів залежить від контексту, а іноді, й від того, хто приймає рішення.

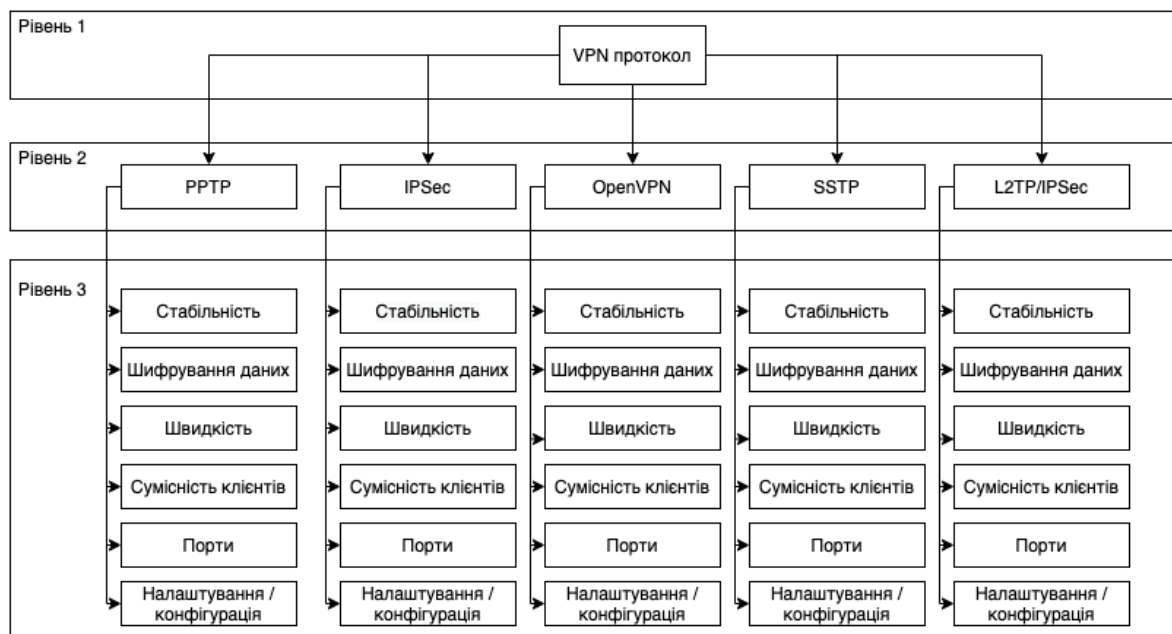


Рис. 1 - Ієрархія рівнів прийняття рішень для тематичного дослідження

Наступним кроком є визначення пріоритету, де оцінки пріоритетів формувались на основі експертних суджень спеціалістів, що залучались до експерименту (*фахівці кафедри*). При цьому пріоритетом є оцінка, яка визначає важливість альтернативи або критерію в рішенні. Після етапу структурування проблем необхідно розрахувати три наступні типи пріоритетів.

- *Критерії пріоритетів*. Важливість кожного критерію (стосовно вищої мети).
- *Локальні альтернативні пріоритети*. Важливість альтернативи щодо одного конкретного критерію.
- *Глобальні альтернативні пріоритети*. Критерії пріоритетності та локальні альтернативні пріоритети - це проміжні результати, що використовуються для розрахунку глобальних альтернативних пріоритетів. Глобальні альтернативні пріоритети класифікують альтернативи за всіма критеріями, а отже, і загальною метою.

Використання парних порівнянь, як правило, оцінюється за фундаментальною шкалою 1–9. Перетворення з вербальної в числову шкалу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Таблиця перетворення

Ступінь важливості	Визначення
1	Рівне значення
2	Слабка перевага
3-4	Помірна перевага
5	Сильна перевага
6-7	Дуже сильна перевага
8-9	Надзвичайна перевага

У таблиці 2 наведені попарні порівняння між критеріями. Всі порівняння є додатними числами. Порівняння по головній діагоналі дорівнюють 1, оскільки критерій порівнюється сам із собою. Матриця є взаємною, оскільки верхній трикутник є реверсом нижнього трикутника. Перевага точності вимагає більших зусиль, особливо коли існує велика кількість критеріїв або альтернатив. Кількість необхідних порівнянь для кожної матриці порівняння дорівнює  $(n^2-n)/2$ , де  $n$  - кількість альтернатив / критеріїв.

Таблиця – 2 (Критерії)

Критерії	Стабільність	Шифрування даних	Швидкість	Сумісність клієнтів	Порти	Налаштування
Стабільність	1	1	2	3	5	6
Шифрування даних	1	1	2	3	5	6
Швидкість	1/2	1/2	1	2	3	5
Сумісність клієнтів	1/3	1/3	1/2	1	2	4
Порти	1/5	1/5	1/3	1/2	1	3
Налаштування	1/6	1/6	1/5	1/4	1/3	1

Це значення отримано наступним образом:

- $n^2$  - загальна кількість порівнянь, які можна записати в матрицю;
- $n$  з них представляють порівняння альтернативи із самою собою (головна діагональ). Ця оцінка дорівнює 1 і тому не потрібна;
- оскільки матриця є взаємною, потрібна лише половина порівнянь. Інша половина автоматично обчислюється з першої половини.

У таблицях 3 - 8 наведені матриці розрахунку пріоритетів для наступних критеріїв: налаштування, швидкість, порти, шифрування даних, стабільність, сумісність клієнтів.

Таблиця – 3 (Налаштування / конфігурація)

	OpenVPN	L2TP/IPsec	IPsec	SSTP	PPTP
OpenVPN	1	1/3	1/4	2	1/6
L2TP/IPsec	3	1	1/2	4	1/3
IPsec	4	2	1	5	2
SSTP	1/2	1/4	1/5	1	1/7
PPTP	6	3	1/2	7	1

Таблиця – 4 (Швидкість)

	OpenVPN	L2TP/IPsec	IPsec	SSTP	PPTP
OpenVPN	1	3	2	1	1/2
L2TP/IPsec	1/3	1	1/2	1/3	1/6
IPsec	1/2	2	1	1/2	1/4
SSTP	1	3	2	1	1/2
PPTP	2	6	4	2	1

Таблиця – 5 (Порти)

	OpenVPN	L2TP/IPsec	IPsec	SSTP	PPTP
OpenVPN	1	4	3	1	7
L2TP/IPsec	1/4	1	1/2	1/4	1/5
IPsec	1/3	2	1	1/3	3
SSTP	1	4	3	1	7
PPTP	1/7	5	1/3	1/7	1

Таблиця – 6 (Шифрування даних)

	<i>OpenVPN</i>	<i>L2TP/IPsec</i>	<i>IPsec</i>	<i>SSTP</i>	<i>PPTP</i>
<i>OpenVPN</i>	1	1	3	1	6
<i>L2TP/IPsec</i>	1	1	3	1	6
<i>IPsec</i>	1/3	1/3	1	1	3
<i>SSTP</i>	1	1	1	1	6
<i>PPTP</i>	1/6	1/6	1/3	1/6	1

Таблиця – 7 (Стабільність)

	<i>OpenVPN</i>	<i>L2TP/IPsec</i>	<i>IPsec</i>	<i>SSTP</i>	<i>PPTP</i>
<i>OpenVPN</i>	1	1	1	1	2
<i>L2TP/IPsec</i>	1	1	1	1	2
<i>IPsec</i>	1	1	1	1	2
<i>SSTP</i>	1	1	1	1	2
<i>PPTP</i>	1/2	1/2	1/2	1/2	1

Таблиця – 8 (Сумісність клієнтів)

	<i>OpenVPN</i>	<i>L2TP/IPsec</i>	<i>IPsec</i>	<i>SSTP</i>	<i>PPTP</i>
<i>OpenVPN</i>	1	1/3	1/3	4	1/3
<i>L2TP/IPsec</i>	3	1	1	7	1
<i>IPsec</i>	3	1	1	7	1
<i>SSTP</i>	1/4	1/7	1/7	1	1/7
<i>PPTP</i>	3	1	1	7	1

Коли матриця завершена, виконується перевірка узгодженості для виявлення можливих суперечностей у записах. Коли подано кілька послідовних попарних порівнянь, вони можуть суперечити одне одному. Причинами цих суперечностей можуть бути, наприклад, нечітко визначені проблеми, відсутність достатньої кількості інформації, невизначена інформація або відсутність концентрації.

У більшості випадків проблеми визначені нечітко [10]. Той, хто приймає рішення, може мати досить поверхневе уявлення про бажання створити віртуальну приватну мережу, при цьому не знаючи точних альтернатив та критеріїв. Структура повинна бути сформована шляхом тривалих розмірковувань, аналізу досвіду і організації спеціалізованих груп тощо.

Таке структурування елементів рішення є важливим, оскільки інша структура може призвести до різного остаточного рейтингу. Критерії з великою кількістю підкритеріїв, як правило, набувають більшої ваги, ніж тоді, коли вони менш деталізовані.

МАІ, завдяки його попарним порівнянням, потребує шкали співвідношень, які, на відміну від методів, що використовують інтервальні порівняння, не потребують одиниць порівняння. Судження є відносною величиною або часткою  $a/b$  двох величин «а» та «б», що мають однакові одиниці виміру: - інтенсивність, корисність тощо.

Матриця, заповнена попарним порівнянням  $a_{ij}$ , називається узгодженою, якщо дотримуються правила транзитивності та взаємності [10].

Правило транзитивності:  $a_{ij} = a_{ik} \times a_{kj}$ , де  $a_{ij}$  - порівняння альтернативи  $i$  з  $j$ .

Правило взаємності:  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ , де  $i, j$  та  $k$  - будь-які альтернативи матриці.

Якщо ми припустимо, що переваги  $P_i$  відомі,

$$A = \begin{bmatrix} p_1/p_1 & \dots & p_i/p_1 & \dots & p_n/p_1 \\ \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ p_i/p_1 & \dots & 1 & \dots & p_n/p_1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ p_n/p_1 & \dots & p_n/p_j & \dots & p_n/p_1 \end{bmatrix},$$

то можна створити цілком узгоджену матрицю, оскільки всі порівняння  $a_{ij}$  підпорядковуються рівності:  $a_{ji} = P_i/P_j$ , де  $P_i$  є пріоритетом альтернативи  $i$ .

Пріоритети відношень в МАІ заздалегідь не відомі. Оскільки пріоритети відношень мають сенс лише у випадку, якщо вони походять з узгоджених або майже узгоджених матриць, необхідно застосовувати перевірку узгодженості. Поріг для визначення непослідовної матриці незрозумілий. Для вимірювання узгодженості існує кілька методів. Один з них заснований на визначнику матриці, інший - на додаванні різниці між співвідношенням розрахованих пріоритетів та наведеними порівняннями. Однак, найчастіше, використовується метод, розроблений Т. Сааті [10], який запропонував *індекс узгодженості (CI)*, що пов'язаний із методом власних значень:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1},$$

де  $\lambda_{max}$  - максимальне власне значення. *Відношення узгодженості (CR)* визначається як:  $CR = CI/RI$ , де  $RI$  - випадковий індекс (*середній CI 500 випадково заповнених матриць*). Якщо  $CR$  менше ніж 10% (*невідповідність менше ніж 10% з 500 випадково заповнених матриць*), то матриця має прийнятну узгодженість.

Сааті розрахував випадкові показники (див. в Табл. 9), а інші дослідники проводили моделювання з різною кількістю матриць або неповними матрицями. Їх випадкові індекси декілька відрізняються, але близькі до показників Сааті.

Таблиця – 9 (Випадкові показники Сааті)

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Розрахуємо  $CI$  та  $CR$  для всіх матриць:

Таблиця – 10 (Критерії)

Критерії	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
Стабільність	180,00	2,100	0,2865	0,92
Шифрування даних	180,00	2,100	0,2865	0,92
Швидкість	7,5000	1,334	0,1819	1,10
Сумісність клієнтів	0,4444	0,891	0,1215	1,18
Порти	0,0200	0,572	0,0780	1,27
Налаштування	0,0005	0,334	0,0456	1,14

Індекс узгодженості для таблиці 10 дорівнює:  $CI = 0,11$ . З цього слід, що відношення узгодженості дорівнює:  $CR = CI/RI = 8,54\%$  – А так як  $CR < 10\%$  - матриця 10 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 11 (Налаштування / конфігурація)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
OpenVPN	0,03	0,49	0,07	1,06
L2TP/IPSec	2,00	1,15	0,17	1,14
IPSec	80,00	2,40	0,36	0,88
SSTP	0,004	0,32	0,05	0,93
PPTP	63,00	2,29	0,34	1,25

Індекс узгодженості для табл. 11:  $CI = 0,07$ .

Відношення узгодженості дорівнює:  $CR = CI / RI = 7,62 \%$   
 $CR < 10\%$  - матриця 11 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 12 (Швидкість)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
OpenVPN	3,00	1,25	0,21	1,00
L2TP/ IPsec	0,01	0,39	0,06	0,97
IPsec	0,13	0,66	0,11	1,04
SSTP	3,00	1,25	0,21	1,00
PPTP	96,00	2,49	0,41	1,00

Індекс узгодженості для табл. 12:  $CI = 0,0016$ .  
Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 0,14 \%$   
 $CR < 10\%$  - матриця 12 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 13 (Порти)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
OpenVPN	84,00	2,43	0,37	1,00
L2TP/ IPsec	0,01	0,36	0,05	0,87
IPsec	0,67	0,92	0,14	1,09
SSTP	84,00	2,43	0,37	1,00
PPTP	0,03	0,51	0,08	1,39

Індекс узгодженості для табл. 13:  $CI = 0,09$ .  
Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 7,66 \%$   
 $CR < 10 \%$  - матриця 13 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 14 (Шифрування даних)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
OpenVPN	18,00	1,78	0,29	1,03
L2TP/ IPsec	18,00	1,78	0,29	1,03
IPsec	0,33	0,80	0,13	1,10
SSTP	6,00	1,43	0,24	0,98
PPTP	0,002	0,27	0,05	0,99

Індекс узгодженості:  $CI = 0,03$ .  
Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 3 \%$   
 $CR < 10 \%$  - матриця 14 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 15 (Стабільність)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
OpenVPN	2,00	1,15	0,22	1
L2TP/IPsec	2,00	1,15	0,22	1
IPSec	2,00	1,15	0,22	1
SSTP	2,00	1,15	0,22	1
PPTP	0,06	0,57	0,11	1

Індекс узгодженості:  $CI = 0,00$ .

Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 0\%$   
 $CR < 10\%$  - матриця 15 має прийнятну узгодженість.

Таблиця – 16 (Сумісність клієнтів)

	Добуток	Оцінки компонент власного вектору	Нормалізовані оцінки вектору пріоритету	$L_{max}$
<i>OpenVPN</i>	0,15	0,68	0,11	1,09
<i>L2TP/ IPsec</i>	21,00	1,84	0,29	0,99
<i>IPsec</i>	21,00	1,84	0,29	0,99
<i>SSTP</i>	0,001	0,24	0,04	0,95
<i>PPTP</i>	21,00	1,84	0,29	0,99

Індекс узгодженості:  $CI = 0,01$ .

Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 0,5\%$

$CR < 10\%$  - матриця 16 має прийнятну узгодженість.

Визначення глобальних пріоритетів є завершальною стадією МАІ. Існують різні методи для розрахунку пріоритетів за допомогою матриці попарного порівняння, найпопулярніший - це *метод власних значень* [10]. Метод власних значень обчислює не тільки пріоритети, але й ступінь невідповідності. У методі власних значень вектор пріоритетів  $p$  обчислюється вирішенням рівняння:  $Ap = np$ , де  $n$  - розмірність  $A$  і  $p = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$ .

Спочатку продемонстровано обґрунтованість методу власних значень на послідовній матриці. Припустимо, що пріоритети відомі. Легко вивести послідовну матрицю порівняння з пріоритетів наступним чином. Нехай  $a_{ij} = p_i / p_j$ . Помноживши  $A$  на вектор пріоритету  $p$ , отримаємо праву частину рівняння. Для спрощення обчислення спочатку розглядається лише рядок  $i$  з  $A$ :

$$\frac{p_1}{p_1} p_1 + \frac{p_i}{p_2} p_2 + \dots + \frac{p_i}{p_j} p_j + \dots + \frac{p_i}{p_n} p_n = p_i + p_i + \dots + p_i + \dots + p_i = np_i,$$

або

$$\sum_j \frac{p_i}{p_j} \cdot p_j = np_i.$$

Таким чином, добуток рядка  $i$  на вектор пріоритету  $p$  дає  $n$  разів пріоритету  $p_i$ . Помноживши всі елементи матриці порівняння  $A$  на вектор пріоритету  $p$ , отримаємо таку рівність:

$$\begin{bmatrix} p_1/p_1 & p_1/p_2 & \dots & p_1/p_n \\ p_2/p_1 & p_2/p_2 & \dots & p_2/p_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_n/p_1 & p_n/p_2 & \dots & p_n/p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix},$$

що є рівнянням:  $Ap = np$ . Отже, для послідовної матриці вектор пріоритету отримують розв'язуванням даного рівняння.

Для несумісної матриці це відношення вже не є дійсним, оскільки порівняння між елементами  $i$  та  $j$  не обов'язково дається формулою:  $a_{ji} = p_i / p_j$ .

Тому розмірність  $n$  замінюється невідомим  $\lambda$ . Обчислення  $\lambda$  і  $p$  за таким рівнянням, як  $Ap = \lambda p$ , у лінійній алгебрі називається задачею власних значень [12]. Будь-яке значення  $\lambda$ , що задовольняє це рівняння, називається власним значенням, а  $p$  - пов'язаним із ним власним вектором. Відповідно до теореми Перрона [13], позитивна матриця має унікальне позитивне власне значення. Нетривіальне власне значення називається максимальним власним значенням  $\lambda_{max}$ . Якщо  $\lambda_{max} = n$ , то матриця цілком узгоджена. В іншому випадку різниця між  $\lambda_{max}$  -  $n$  є мірою невідповідності.

Сааті обґрунтував підхід власних значень для несуперечливих матриць теорією збурень, яка говорить, що незначні зміни в послідовній матриці означають лише незначні зміни власного вектору та власного значення.



Для того, щоб розрахувати власний вектор, пов'язаний з максимальним власним значенням, більшість програмних пакетів, використовують метод живлення, який є ітераційним процесом:

1. Парна матриця має квадрат:  $A_{n+1} = A_n A_n$ .
2. Обчислюються та нормуються суми рядків. Це 1-е наближення власного вектору.
3. За допомогою матриці  $A_{n+1}$  кроки №1 та №2 повторюються.
4. Крок №3 повторюється до тих пір, поки різниця між цими сумами в двох послідовних розрахунках пріоритетів не буде меншою, ніж заданий критерій зупинки.

Розрахунок глобального пріоритету матриці наведено в табл. 17.

Таблиця – 17 (глобальні пріоритети матриці)

Альтернативи	Критерії						Глобальні пріоритети
	Стабільність	Шифрування даних	Швидкість	Сумісність клієнтів	Порти	Налаштування і конфігурація	
	Числові значення вектору пріоритету						
	0,184	0,1844	0,11	0,07	0,05	0,03	
<i>OpenVPN</i>	0,222	0,2935	0,21	0,11	0,37	0,07	0,14451
<i>L2TP/IPSec</i>	0,222	0,2935	0,06	0,29	0,05	0,17	0,13007
<i>IPSec</i>	0,222	0,1322	0,11	0,29	0,14	0,36	0,11394
<i>SSTP</i>	0,222	0,2356	0,21	0,04	0,37	0,05	0,12815
<i>PPTP</i>	0,111	0,0451	0,41	0,29	0,08	0,34	0,10825

Спираючись на результати розрахунку глобального пріоритету, можна стверджувати, що *OpenVPN*, зі значенням 0,14451, являється найбільш прийнятним варіантом для цілей створення віртуальної приватної мережі.

### 3 Висновки

1. Вибір VPN протоколу є складним завданням, яке потребує аналізу ринків, визначення критеріїв порівняння, надання коректних пріоритетів, причому часто, в умовах, коли немає повної інформації о системі, в якій ці процеси відбуваються.

2. VPN протокол, в певній мірі, є рішенням проблеми безпечного віддаленого доступу.

3. У багатьох випадках існує необхідність приймати рішення, коли немає достатньої інформації про систему, для якої це рішення приймається. В цих випадках варто користуватися методами прийняття рішень в умовах невизначеності. Існує велика кількість таких методів, але в даній ситуації, обраними експертами був використаний метод аналізу ієрархій.

4. Даному методу притаманні наступні переваги:

- Попарність порівнянь. Зникає необхідність тримати одночасно велику кількість альтернатив в розрахунку. Внаслідок чого отримуються більш точні результати;
- Додатковість вихідної матриці. В реальних умовах нерідкими є випадки в котрих відбуваються зміни відношень або альтернатив. При використанні МАІ це призводить лише до порівняння альтернатив, що з'явилися;
- Наявність вербально-числової шкали;
- Перевірка роботи експерта за допомогою відношення узгодженості;

5. Експертами, що долучалися до участі в дослідженнях визначено наступні критерії:

- швидкість;

- шифрування даних;
- налаштування / конфігурація;
- порти;
- стабільність;
- сумісність клієнтів.

6. Як альтернативні рішення розглядалися наступні VPN протоколи: - *PPTP*; - *IPsec*; - *L2TP+IPsec*; - *SSTP* та *OpenVPN*. За допомогою МАІ встановлено, що *OpenVPN* є найбільш прийнятним вибором при вирішенні зазначеного кола завдань.

### Посилання

- [1] Virtual Private Network Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component, By Type (Site-To-Site, Remote Access, Extranet), By Deployment Mode, By End Use, By Region, And Segment Forecast, 2020 – 2027
- [2] COVID-19 VPN Demand Statistics. URL: <https://www.top10vpn.com/research/investigations/covid-19-vpn-demand-statistics/> (дата звернення: 15.10.2020).
- [3] Lewis M. Comparing, Designing, And Deploying Vpns. Ne: Cisco Systems, 2006. 1043 с.
- [4] Saaty T. Decision making with the analytic hierarchy process. // International Journal of Services Sciences. 2008. № 1 (1).
- [5] Simanaviciene R. and Ustinovichius L. Sensitivity analysis for multiple criteria decision-making methods: TOPSIS and SAW. // Procedia Social and Behavioral Sciences. 2010. № 2.
- [6] Kowalski, Z. Meler-Kapci M. Zielinski S. CBR methodology application in an expert system for aided design ship's engine room automation. // Expert Systems with Applications, 2005. № 29 (2).
- [7] Fishburn, P. Conjoint measurement in utility theory with incomplete product sets // Journal of Mathematical Psychology, 1967. № 4(1): 104-119.
- [8] Chen, Y., Okudan, G., and Riley, D. Decision support for construction method selection in concrete buildings // Prefabrication adoption and optimization. Automation in Construction. 2010. № 19(6): 665-675.
- [9] Konidari P., Mavrakakis D. A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments // Energy Policy. 2007. № 35 (12). С.6235-6257.
- [10] Saaty T. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 с.
- [11] Oguztimur S. Why Fuzzy Analytic Hierarchy Process Approach For Transport Problems? // 51st ERSA Congress. Barcelona, 2011. С.439.
- [12] Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. Москва: Наука, 1974. 292 с.
- [13] Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. Москва: Наука, 1966. 576 с.

**Reviewer:** Roman Oliynykov, Doctor of Sciences (Engineering), Full Prof., JSC “Institute of Information Technologies”, 12 Bakulin St., Kharkiv, 61166, Ukraine.

E-mail: [roliynykov@gmail.com](mailto:roliynykov@gmail.com)

Received: June 2020.

### Authors:

Usichenko Nikita, computer science student, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [nik.usichenko@gmail.com](mailto:nik.usichenko@gmail.com)

Sabina Ruzudzhensk, student of CSD, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [ruzudzhensk.jb@gmail.com](mailto:ruzudzhensk.jb@gmail.com)

Karina Pogorelaya, student of CSD, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: [karina.pogorelka@gmail.com](mailto:karina.pogorelka@gmail.com)

### Finding the optimal VPN-solution based on the hierarchies analysis method.

**Abstract.** The article considers the problems of creating a virtual private network in the modern world. A method for finding the optimal solution of a virtual private network based on the method of hierarchy analysis is proposed. The advantages and disadvantages of this method are given. Due to the availability of a wide range of software and hardware, solutions based on five current VPN protocols are considered: PPTP, IPsec, L2TP + IPsec, SSTP, and OpenVPN. Experts involved in the study introduced six criteria for determining the best VPN solution. The following criteria are speed, data encryption, settings, configuration, ports, stability, and customer compatibility. A hierarchy of decision levels for case studies is provided. The assessment of priorities on the basis of expert judgments of specialists on this topic has been performed. The consistency check has been performed to identify possible contradictions. The global priority is determined using the method of eigenvalues, which calculates not only the priorities but also the degree of inconsistency. According to the simulation results, it is emphasized that the choice of VPN protocol is a difficult task. Solving this problem requires market analysis, the definition of comparison criteria, and prioritization. Attention is drawn to the fact that all these components are carried out in conditions where there is no complete information about the system in which these processes occur. In this case, it is necessary to use decision-making methods in conditions of uncertainty. At present, there are a large number of such methods, but in this situation, experts have proposed a method of analysis of hierarchies. Under the above criteria and priorities, according to the results of the calculation, the OpenVPN protocol is the most optimal solution for creating a virtual private network.

**Keywords:** Method of analysis of hierarchies; Virtual Private Network; Saati method; VPN protocol.

**Рецензент:** Роман Олейников, д.т.н., проф., ЧАО “Институт информационных технологий”, ул. Бакулина, 12, Харьков, 61166, Украина.

E-mail: [roliynykov@gmail.com](mailto:roliynykov@gmail.com)

Поступила: Июнь 2020.

**Авторы:**

Усиченко Никита, студент факультета компьютерных наук, ХНУ имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина.

E-mail: [nik.usichenko@gmail.com](mailto:nik.usichenko@gmail.com)

Сабина Рузудженк, студентка факультета компьютерных наук, ХНУ имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина.

E-mail: [ruzudzhenk.jb@gmail.com](mailto:ruzudzhenk.jb@gmail.com)

Карина Погорелая, студентка факультета компьютерных наук, ХНУ имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина.

E-mail: [karina.pogorelka@gmail.com](mailto:karina.pogorelka@gmail.com)

**Нахождение оптимального VPN решения на основе метода анализа иерархий.**

**Аннотация.** В работе рассмотрена проблематика по созданию виртуальной частной сети в современном мире. Предложен метод нахождения оптимального решения виртуальной частной сети на основе метода анализа иерархий. Приведены преимущества и недостатки данного метода. Из-за доступности широкого спектра программно-аппаратных средств, рассмотрены решения на основе пяти актуальных VPN протоколов PPTP, IPsec, L2TP + IPsec, SSTP и OpenVPN. Привлеченными к выполнению исследований экспертами введены шесть критериев для определения лучшего VPN решения. Введены следующие критерии: скорость, шифрование данных, настройки, конфигурация, порты, стабильность и совместимость клиентов. Предоставлена иерархия уровней принятия решений для тематического исследования. Выполнена оценка приоритетов на основании экспертных суждений профильных, в данной тематике, специалистов. Выполнена проверка согласованности для выявления возможных противоречий. Определен глобальный приоритет с помощью метода собственных значений, который вычисляет не только приоритеты, но и степень несоответствия. По результатам моделирования подчеркнута, что выбор VPN протокола является сложной задачей. Решение этой задачи требует анализа рынка, определение критериев сравнения и предоставления приоритетов. Обращено внимание на тот факт, что, все указанные составляющие осуществляются в условиях, когда нет полной информации о системе, в которой эти процессы происходят. В таком случае, необходимо пользоваться методами принятия решений в условиях неопределенности. В настоящее время существует большое количество таких методов, но в ситуации, рассмотренной экспертами, был предложен метод анализа иерархий. В условиях приведенных критериев и предоставленных приоритетов, по результатам расчета, протокол OpenVPN является наиболее оптимальным решением для создания виртуальной частной сети.

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий; виртуальная частная сеть; метод Саати; VPN протокол.