УДК 004.621.3:519.816

С.В. Зибін,
к.т.н., доц. (Державний університет телекомунікацій)

АЛГОРИТМ РАНЖУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВ ПРИ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНІЙ ПІДТРИМЦІ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЖАВИ

Розробка комплексних систем захисту інформації − це складне завдання, яке вимагає застосування багатокритеріальних методів оптимізації з метою виявлення оптимального співвідношення критеріїв самої системи для її ефективного функціонування. Пропонується використовувати метод попарного порівняння для ранжирування альтернатив за обраними критеріями з метою пошуку оптимальної альтернативи.

Ключові слова: *інформаційна безпека, ранжування, автоматизована інформаційна система, захист інформації, система підтримки прийняття рішень, багатокритеріальна оптимізація, система керування, моделювання процесів, інформаційний вплив, керуюче рішення, комплексна система захисту інформації.*

Разработка комплексных систем защиты информации является сложной задачей, которая требует применения многокритериальных методов оптимизации с целью выявления оптимального соотношения критериев самой системы для ее эффективного функционирования. Предлагается использовать метод попарного сравнения для ранжирования альтернатив по выбранным критериям с целью поиска оптимальной альтернативы.

Ключевые слова: *информационная безопасность, ранжирование, автоматизированная информационная система, защита информации, система поддержки принятия решений, многокритериальная оптимизация, система управления, моделирование процессов, информационное воздействие, управляющее решение, комплексная система защиты информации.*

The development of complex information security systems is a complex task. It requires the use of multicriteria optimization methods in order to identify the optimal correlation of the system's criteria for its effective functioning. It is suggested to use the pairwise comparison method to rank the alternatives according to the selected criteria in order to find the best alternative.

Keywords: *information security, ranking, automated information system, information protection, decision support system, multi-criteria optimization, control system, process modeling, information impact, control solution, integrated information security system.*

Вступ

Підвищення якості і скорочення часу прийняття рішень при керуванні складними технічними та інформаційними системами різного призначення нині неможливе без інформаційно-аналітичної підтримки. Засоби інтелектуалізації процесів прийняття рішень є найбільш важливими і практично необхідними у сфері інформаційної безпеки держави та інформаційних технологій.

Розробка і експлуатація складних систем виявили проблеми, які можна вирішити лише на підставі комплексної оцінки і обліку різних за своєю природою факторів, різнорідних зв'язків, зовнішніх умов та інших показників. Тому все більш важливим у сучасних умовах стає питання якісного та ефективного прийняття рішень [1; 2].

Під терміном прийняття рішень розуміють дію над множиною альтернатив, у результаті якої виходить підмножина вибраних прийнятних альтернатив.

При генеруванні альтернатив найбільш часто вдаються до послуг експертів. Ці особи мають достатньо досвіду і знань у предметній сфері, яка аналізується. Апарат обробки експертних думок досить добре опрацьований і використовується в багатьох практичних сферах [3–6].

Найбільш популярним для оцінки альтернатив є критеріальний метод. При застосуванні цього методу кожна окремо взята альтернатива оцінюється чисельно. Порівняння альтернатив зводиться до порівняння відповідних чисел.

Викладення основного матеріалу

Кожному бінарному відношенню, яке задане на кінцевій множині альтернатив X, єдиним чином може бути співставлено граф переваг, що становить орієнтовний граф, вершини якого відповідають елементам множини X, а дуги − парам графіка Q цього відношення. Матриця цього відношення A називається також матрицею суміжності орієнтовного графу, оскільки поява одиниці на перетині i-го рядка і r-го стовпчика цієї матриці означає, що вершини x_i і x_i з'єднуються дугою, тобто є суміжними. Формується ця матриця за таким правилом:

$$a_{ir} = \begin{cases} 1, x_i Q x_r, \\ 0, x_i \bar{Q} x_r. \end{cases}$$

Слід зазначити, що як первинна інформація (до попередньої обробки) можуть виступати квадратні матриці переваг $B^j = \left(b_{ir}^j\right)$, $i, r = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}$, які отримані попарним порівнянням альтернатив за кожним критерієм. Але, на відміну від [7; 8], правило завдання відносини сформулюємо таким чином:

$$b_{ir}^j = \begin{cases} 1 - \text{якщо}\, a_i P^j a_r \vee a_i I^j a_r; \\ 0 - \text{інакше.} \end{cases} \tag{1}$$

У орієнтовному графі, відповідному цій матриці, поява контуру свідчить про еквівалентність альтернатив або суперечливості вихідної інформації. Протиріччя необхідно усунути за допомогою особи, яка приймає рішення (ОПР), повторно порівнявши виявлені альтернативи. Далі, після попередньої обробки вихідної інформації, будемо вважати, що суперечності усунені, тобто контури відповідають еквівалентним альтернативам.

Ранжування, як правило, строгі, хоча і використовуються в деяких завданнях, але досить рідко, зазвичай, як допоміжний засіб [8]. У [7] пропонується представляти такі ранжування квадратною матрицею упорядкування $S = \left(s_{ij}\right), i, j = \overline{1,n}$, де n − кількість альтернатив:

$$S_{ij}\begin{cases} 1,\ \text{якщо}\ a_i\ \text{має перевагу над}\ a_j, \\ -1,\ \text{якщо}\ a_j\ \text{має перевагу над}\ a_i, \\ 0,\ \text{якщо}\ a_i\ \text{та}\ a_j\ \text{рівноцінні.} \end{cases}$$

Але для того, щоб такій матриці S єдиним чином відповідало певне ранжування, необхідне виконання ряду додаткових умов, що ускладнює розробку і реалізацію обчислювальних алгоритмів.

Матриця переваг (1) по окремо взятому критерію будується за таким же принципом, шляхом попарного порівняння альтернатив. Відповідно, їй можна поставити у відповідність граф переваг. Впорядковане за перевагою розміщення альтернатив у ранжировці можливе тільки в тому випадку, якщо матриця переваг являється в разі відносини строгого переваги трикутної (верхньої або нижньої), а для відносини несуворого переваги має блочно-трикутний вид.

Послідовність вирішуваних завдань для кожного критерію виглядає таким чином:

1. Попарне порівняння альтернатив. Тобто формування матриці переваг і матриці еквівалентних альтернатив D.
2. Отримання матриці досяжності.
3. Перевірка інформації на несуперечність.
4. Перевірка зв'язності отриманого відношення переваги.
5. Формування ранжування альтернатив.

При попарному порівнянні альтернатив $\left(x_i, x_r\right), i, r \in \overline{1,n}$ (розглядається $n(n-1)/2$ пар) експерт має можливість відповісти, що альтернатива x_i є строго переважнішою ніж $x_r\left(b_{ir}^j = 1\right)$. Альтернатива x_r є строго переважнішою ніж $x_i\left(b_{ri}^j = 1\right)$. Альтернатива x_i еквівалентна $x_r\left(b_{ir}^j = b_{ri}^j = 1, d_{ij} = d_{rj} = g\right)$, або експерт може відмовитися від порівняння альтернатив x_i і x_r.

Якщо, порівнюючи пари альтернатив, ОПР визначила відношення переваги у всіх випадках (експерт не відмовлявся від порівняння альтернатив), то матриця переваг вже є матрицею всіх можливих маршрутів, або матрицею досяжності. У такому випадку здійснюється перехід відразу до вирішення третього завдання. У іншому випадку, пошук матриці досяжності, а також подальша перевірка повноти отриманого відношення переваги є обов'язковими. Для вирішення другої і третьої задач реалізуються відомі алгоритми [9; 10].

Отримання матриці досяжності ще називають транзитивним замиканням. Традиційно матриця досяжності $B^* = \left(b_{ir}^*\right), i, r = \overline{1,n}$, орієнтовному графу G з n вершинами визначається як $\{0,1\}$ − матриця, в якій елемент b_{ir}^* дорівнює 1 тоді і тільки тоді, коли існує орієнований шлях з вершини i в вершину r при $i \neq r$ або орієнтований цикл, що складається з однієї вершини. Іншими словами, елемент

матриці досяжності дорівнює 1 тоді і тільки тоді, коли вершина r досяжна з вершини i через послідовність орієнтованих дуг. Для побудови матриці досяжності реалізується алгоритм Воршелла [9]:

Крок 1. Введення матриці суміжності B орієнтовного графу G.

Крок 2. $i = 1$.

Крок 3. $k = 1$.

Крок 4. Якщо $b_{ir} = 1$, тоді перехід до кроку 5, інакше перехід до кроку 8.

Крок 5. $k = 1$.

Крок 6. $b_{kr} = b_{kr} \vee b_{ki}$.

Крок 7. Якщо $k < n$, тоді $k = k + 1$ і перехід до кроку 6, інакше, перехід до кроку 8.

Крок 8. Якщо $r < n$, тоді $r = r + 1$ і перехід до кроку 4, перехід до кроку 9.

Крок 9. Якщо $i < n$, тоді $i = i + 1$ і перехід до кроку 3, інакше останов.

У результаті роботи алгоритму Воршелла матриця досяжності буде отримана за один прохід. Алгоритм має складність n^3.

Далі проводиться пошук контурів на орієнтовному графі, відповідному матриці B^{*j}, де через B^{*j} позначається матриця досяжності, побудована для j-го критерію. Ця процедура в нашому випадку призначена для виявлення суперечливості інформації або для визначення груп еквівалентних альтернатив, оскільки наявність контуру в орієнтовному графі переваг при обраній формі опису свідчить або про порушення принципу транзитивності, або про те, що відповідну групу слід визнати групою еквівалентних альтернатив.

Якщо вершини x_i і x_r орієнтовному графу G знаходяться у складі певного контуру довільної довжини (мається на увазі число дуг) і довільного складу, то існують маршрути $\langle x_i, ..., x_r \rangle$ і $\langle x_r, ..., x_i \rangle$. Оскільки матриця B^{*j} містить всі можливі маршрути, то вона містить і обидва маршрути між вершинами x_i і x_r. Цим маршрутам відповідають одиниці $b_{ir}^{*j} = 1$ і $b_{ri}^{*j} = 1$ (симетричні відносно головної діагоналі). Звідси випливає критерій приналежності вершин x_i і x_r деякого контуру, який лежить в основі обраного для пошуку контурів алгоритму [9]:

якщо $b_{ir}^{*j} = 1 \wedge b_{ri}^{*j} = 1$, тоді x_i і x_r належать одному контуру.

Отже, симетрична матриця контурів $Z^j = \left(z_{ir}^j\right), i, r = \overline{1, n}$ може бути отримана таким чином:

$$Z^j = B^{*j} \wedge \left(B^{*j}\right)^T,$$

де Т – індекс транспонування.

Ненульові елементи i-го рядка матриці Z^j вкажуть на ті вершини орграфа, які входять в контур разом з i-ой вершиною. Обчислювальна складність алгоритму дорівнює n^2.

Таким чином, при виявленні контуру можливі такі варіанти: дана підмножина $(x_i, ..., x_s)$, що входить в контур, розглядається повторно з метою усунути протиріччя. Або експерт, або ОПР приходить до висновку, що дані альтернативи настільки близькі один до одного, що можуть вважатися еквівалентними за цим критерієм, після чого проводиться уточнення матриці еквівалентних альтернатив D.

Для того щоб переконатися в повноті отриманого відношення переваги, перевіряється така умова:

$$\forall\, x_i \in X \quad d_i^{*+} + d_i^{*-} - d_i^{K+} = n - 1, \tag{2}$$

де d_i^{*+}, d_i^{*-} – відповідно, напівступені результату і заходу i-ї вершини, які обчислюють по матриці досяжності, а d_i^{K+} – напівступені результату i-ї вершини, що обчислюється по матриці контурів, тобто

$$\forall\, x_i \in X \quad \sum_{r=1}^{n} b_{ir}^{*j} + \sum_{r=1}^{n} b_{ri}^{*j} - \sum_{r=1}^{n} z_{ir}^{j} = n - 1 .$$

Умова (2) означає, що кожна вершина орієнтовного графу пов'язана з іншими n – 1 вершинами.

Якщо існують альтернативи, для яких умова (2) не дотримується, то відбувається повернення до попарного порівняння відповідних альтернатив. Альтернативи, для яких не вдається домогтися виконання умови (2) ні повторним порівнянням, ні транзитивним замиканням, з подальшого розгляду виключаються.

Вихідним для отримання ранжування альтернатив на основі матриці переваги є завдання формування прямих маршрутів (маршрути від вхідних вершини до вихідний) на орієнтовному графі.

Для формування ранжування альтернатив достатньо альтернативи x_i вибудовувати в ранжировці за убуванням величини Δn_i, де

$$\Delta n_i = d_i^{*+} - d_i^{*-}, i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Переконаємося в тому, що вказане впорядкування альтернатив дає ранжування, яке необхідно знайти.

Розглянемо спочатку орієнтовний граф без контурів. Тоді відповідно до (1) усі маршрути прямі і нижче головної діагоналі не має бути жодної логічної одиниці. Отже, матриця B^{*j} повинна мати в цьому випадку верхню трикутну форму. Таким чином, завдання впорядкування альтернатив за перевагою для P^i зводиться до перетворення матриці B^{*j} загального вигляду до трикутної матриці $B^{\Delta j}$.

Перетворення матриці B^{*j} має бути ізоморфне, тобто відносини суміжності вершин відповідних графів повинні зберігатися в обидві сторони.

Розглянемо довільний маршрут, що включає $2 < s \le n$ вершин $\langle x_1, ..., x_i, ..., x_{i+k}, ..., x_s \rangle$. Порівняємо вершини x_i и x_{i+k} ($k \ne 0$) прямого маршруту. Очевидно, що будуть виконуватися такі вирази:

$$lx_1, x_i \langle lx_1, x_{i+k}, lx_i, x_s \rangle lx_{i+k}, x_s, \quad (4)$$

де l – довжина маршруту, що дорівнює числу дуг на маршруті <·, ·>.

З (4) випливає, що для матриці досяжності

$$v_i \langle v_{i+k}, w_i \rangle w_{i+k}, \quad (5)$$

де w_i – число одиниць в i-му рядку, v_i – число одиниць в i-му стовпці, сформуємо величину Δn, яка дорівнює

$$\Delta n_i = w_i - v_i, i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

На підставі (5) можна зробити висновок, що

$$\Delta n_i > \Delta n_{i+k}, \quad (7)$$

тобто величина Δn_i по мірі просування по прямому маршруту буде постійно зменшуватися. Так як w_i, v_i, відповідно, є напівступенями результату і заходу вершини орієнтовного графу після побудови всіх можливих маршрутів, (3) є наслідком (5)–(7).

У результаті перетворення, якщо досліджуваний орієнтовний граф переваг ациклічний, вихідна матриця досяжності буде приведена до верхнього трикутного вигляду $B^{\Delta j}$.

Припустимо, орієнтовний граф має контури. Внаслідок того, що упорядкування здійснюється на матриці досяжності, вершини контуру мають однакове значення Δn_i, оскільки якщо $\langle x_s, ..., x_p, x_s \rangle$ – контур, то після транзитивного замикання для будь-яких $\langle x_s, x_k \in x_s, ..., x_p, x_s \rangle$ $d_i^+ = d_k^+$, $d_i^- = d_k^-$, отже $\Delta n_i = \Delta n_k$. Крім того, відношення, що розглядається, є повним (після відповідної попередньої обробки), тому справедливим є також зворотнє: якщо $\Delta n_i = \Delta n_k$, то x_i і x_k входять до складу одного і того ж контура. Тому в результаті упорядкування по спадаючій (3) вершин, що входять в один і той же контур, будуть відповідати сусідам групи рядків (стовпців), і отримана матриця буде мати верхню блочно-трикутну форму. Склад контурів відбитий у матриці контурів Z^j.

Таким чином, трикутній матриці однозначно відповідає впорядкована послідовність вершин орієнтовного графу від входу до виходу, або в нашому випадку ранжування альтернатив S^j по максимізуємому j-му критерію від найкращої альтернативи до найменш хорошої. В іншому випадку, оскільки ранжування аль-тернатив визначається після перевірки суперечливості інформації, контури визначають групи альтернатив, визнаних ОПР еквівалентними по j-му критерію. Обчислювальні витрати алгоритму формування ранжування складають: $O(n) \leq n + 3n^2$.

Подання вихідної інформації для вибору за допомогою ранжувань $S^j, j = \overline{1,m}$ вигідно не тільки через економію пам'яті при обчисленнях ($n \times m$ замість $m \times n \times n$ або $n \times n$), але й дозволить підвищити ефективність вибору, як можна буде побачити далі. Крім того, застосування викладених вище алгоритмів забезпечує попередню обробку вихідної інформації (отримання простим і доступним експерту способом повного і транзитивного відношення переваги) з формуванням ранжувань альтернатив за кожним критерієм на основі приватних матриць переваг (1). У результаті будуть отримані:

- матриця порядкових номерів $\Pi = \left(\pi_{ij}\right) = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}$;
- матриця ранжувань $S = \left(s_{qj}\right), q = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}$, де S_{qj} дорівнює ідентифікаційному номеру i альтернативи x_i з порядковим номером $q = \pi_{ij}$ в ранжировці S^j;
- матриця еквівалентних альтернатив $D = \left(d_{ij}\right), i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}$.

Крім того, знадобиться також матриця наведених номерів $E = \left(e_{ij}\right), i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}$, де e_{ij} – номер альтернативи x_i, в ранжировці S^j, що враховує наявність в S^j альтернатив, еквівалентних альтернативі x_i (якщо $d_{ij} \neq 0$, тоді e_{ij} дорівнює порядковому номеру після застосування процедури 2, в іншому випадку $e_{ij} = \pi_{ij}$).

Блок-схема алгоритму ранжирування альтернатив на основі попарного порівняння представлена на рис. 1,

де $\tilde{X}$ – множина альтернатив, при порівнянні яких допущені протиріччя;

$X^{\times}$ – множина альтернатив, для яких відношення переваги не є зв'язним.

Якщо при порівнянні альтернатив були отримані рішення, еквівалентні за всіма критеріями, від кожної такої групи залишається одне рішення, а інші рішення групи далі не розглядаються. Такі альтернативи визначаються за допомогою матриці D. Якщо після виконання завдання вибору рішення виявляється найкращою альтернативою, тоді ОПР доцільно розглянути всі рішення групи, що представляються для їх порівняльної оцінки за іншими критеріями, що раніше не розглядалися.

Рис. 1. Блок-схема алгоритму ранжування альтернатив на підґрунті попарного порівняння

Висновок

Таким чином, пропонуємо використовувати метод попарного порівняння для ранжирування альтернатив за обраними критеріями з метою пошуку оптимальної альтернативи. Цей метод вимагає комп'ютерної реалізації у вигляді системи підтримки прийняття рішень, який буде використовувати обчислювальні потужності для пошуку альтернатив, їх оцінку і вибір ключових критеріїв для оптимізації, після чого ці відомості надходять у систему.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Зибін С.В., Хорошко В.О.* Підтримка прийняття рішень при формуванні програм інформаційної безпеки держави: моделі загроз і ризиків. Інформатика та математичні методи в моделюванні. Т. 5. № 1. 2015. С. 77–84.

2. *Бідюк О.П., Гожий О.П., Коршевнюк Л.О.* Комп'ютерні системи підтримки прийняття рішень: навчальний посібник. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. 380 с.

3. *Джозеф Джарратано, Гари Райли.* Экспертные системы. Принципы разработки и программирование. 4-е издание. Вильямс, 2007. С. 1152.

4. *Ларичев О.И.* Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. 2-ое изд., перераб. и доп. Москва: Логос, 2002. 392 с.

5. *Тоценко В.Г.* Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. Київ: Наукова думка, 2002. 382 с.

6. *Герасимов Б. М., Тарасов В. А., Токарев И. В.* Человеко-машинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта. Киев: Наукова думка, 1993. 183 с.

7. *Кемени Дж., Снелл Дж.* Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения. Москва: Советское радио, 1972. 192 с.

8. *Авен П.О., Мучник И.Б., Ослон А.А.* Функциональное шкалирование, агрегирующие интегральные показатели. Москва: ВНИИ систем. исслед., 1986, 44, [1] с. 22.

9. *Свами М., Тхуласираман К.* Графы, сети и алгоритмы. Москва: Мир, 1984, с. 95, с. 318–320.

10. *Нефедов В.Н.* Алгоритмический подход к решению задач теории графов и сетей. Москва: МАИ, 1990, с. 4–21.

Отримано 02.10.2017
Рецензент Корченко О.Г., д.т.н., проф.