

## ПРЕДСТАВЛЕННЯ АСОЦІАТИВНОЇ МЕРЕЖІ ОБРАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФІВ

© Бісікало О., Тадевосян Р., 2009

**Розглянуто загальний підхід до представлення асоціативної мережі образів (АМО) за допомогою графів. Обґрунтовано модель АМО у вигляді орієнтованого зваженого графу з двостороннім рухом. Для пошуку найкоротшого шляху у графі запропоновано новий алгоритм вичерпної дії, побудований на основі принципу «пошук углиб з поверненням».**

**The main approach to the introduction of associative network of images (ANI) in the form of a graph is considered in the given article. The model of ANI as a rough weight graph with two-extraneous motion is defined. The new algorithm of exhaustive action, built on the basis of principle «search in deepen with back» is suggested aiming for the search of short cut.**

### Вступ

Важливим теоретико-експериментальним поняттям психолінгвістики вважається асоціативно-вербальна мережа (АВМ) носія мови [1]. Сучасні Інтернет-технології забезпечують зручний інструментарій для розроблення та підтримання АВМ з метою проведення масштабних психолінгвістичних досліджень на основі вільного асоціативного експерименту [2]. Отримані у цьому напрямку напрацювання було запропоновано використати як об'єктивне підґрунтя для створення асоціативної мережі образів (АМО) – однієї з складових моделі образного мислення людини [3], що має актуальність та новизну впровадження у дидактику навчального процесу [4]. Проте до цього часу в літературі не висвітлені питання формального математичного представлення АМО.

Розглянемо задачу формального опису АМО з урахуванням особливостей моделі образного мислення людини. Будемо вважати, що траєкторія нервового збудження може передавати такі типи сигналів:

- кількісний параметр – базовий тип інформаційного сигналу;
- якісний параметр як обмежена множина кількісних параметрів;
- образ (гештальт) як обмежена множина якісних параметрів.

Така послідовність типів сигналів відповідає логічному принципу від простого до складного та, скоріш за все, має філогенетичну хронологію. Інформаційні потоки кількісної природи безперервно надходять через всі 5 органів чуття людини і так само безперервно розпізнаються в автоматичному (несвідомому) режимі. З фізіології відомо, що базовий тип нервового збудження задається виключно кількісними параметрами – силою та тривалістю сигналу, а також специфічними для кожного органу чуття властивостями, наприклад, світових або звукових хвиль тощо [5]. Результатом первинного розпізнавання можна вважати ідентифікацію певної множини або комбінації кількісних параметрів у вигляді якісного параметра, що має безпосереднє відношення до одного з раніше розпізнаних образів. Отже, якісні параметри (інакше – відчуття образів) являють собою ознаки або властивості, яким, як правило, відповідає вербальний (символьний) еквівалент, наприклад, «зелений», «великий», «голосний», «приємний», «повільний», «небезпечний», «солодкий» тощо.

Згідно з нейропсихологічними основами моделювання [6], первинне розпізнавання відбувається на несвідомому рівні, проте в результаті інтроспективного аналізу може згодом «спливати» у свідомість саме завдяки вербальним ознакам відповідних образів. Наступним етапом розпізнавання, що спочатку також відбувається поза свідомістю, є феномен сприйняття людиною цілісного образу або гештальту. Будь-яке представлення образу об'єднує в єдине ціле доволі значну, але обмежену

кількість якісних ознак та властивостей, що пов'язують його з іншими образами. Отже, представлення образів у пам'яті людини визначаються певною множиною найбільш значимих (насамперед – статистично) зв'язків, що можна продемонструвати відомими загадками на зразок «Круглий, як шар, зелений, як трава, червоний, як кров, солодкий, як мед» або «Червона, солодка, пахуча, росте низько, до землі близько».

### Постановка задачі

Будемо вважати вузлами АМО вербальні ознаки  $n$  образів, які можуть поєднуватися між собою спрямованими асоціативними зв'язками від головного образу до підлеглого. У процесі функціонування система фіксує кількість  $q_{ij}$  виявлених зв'язків між  $i$ -м та  $j$ -м образами, причому у кожний момент часу відоме найбільше значення  $q_{max}$  з усіх  $q_{ij}, (i, j) = \overline{1, n}$  [3]. З метою застосування відомих формальних схем з теорії графів припустимо, що вага асоціативного зв'язку дорівнює

$$a_{ij} = \begin{cases} \infty, & q_{ij} = 0 \\ q_{max} + 1 - q_{ij}, & q_{ij} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Кількість ненульових (вага більша за 0) зв'язків від кожної вершини графу до інших вершин набагато менша за  $n-1$ , оскільки, згідно з практикою вільного асоціативного експерименту [1], при великих значеннях  $n$  людина може підібрати не більше  $7 \pm 2$  значимих слів-асоціатів на словостимул. Необхідно:

- a) обґрунтувати тип графів для представлення АМО на основі врахування відомих фізіологічних, нейропсихологічних і психолінгвістичних даних;
- b) для графів визначеного типу запропонувати алгоритм пошуку найкоротшого шляху.

### Визначення графу АМО

Побудуємо граф  $G = \{V, E\}$  для формального представлення фізіологічних процесів образного мислення. З постановки задачі випливає, що граф  $G$  є орієнтованим графом. Множину вершин графа визначимо у вигляді

$V = \{X, K, Y\}$ , де

$X$  – вхідні кількісні параметри,  $X = \{X_i\}, i = \overline{1, r}$ ;

$K$  – проміжні якісні параметри,  $K = \{K_j\}, j = \overline{1, p}$ ;

$Y$  – образи з власними вербальними позначеннями,  $Y = \{Y_l\}, l = \overline{1, n}$ ,

$r$  – загальна кількість каналів нервового збудження органів чуття;

$p$  – загальна кількість якісних параметрів, які розрізняє людина.

На рис.1 представлено приклад графу для відображення фізіології процесів образного мислення людини.

Оскільки певні якісні параметри відчуттів мають вербальний еквівалент, то очевидно, що

$$X \cap K = \emptyset, \quad (2)$$

$$X \cap Y = \emptyset, \quad (3)$$

$$K \cap Y \neq \emptyset. \quad (4)$$

Введемо такі позначення:

$Z = K \cap Y$  – множина відомих мовних образів та відповідних їм якостей;

$Z_1 = Y \setminus Z$  – невідомі слова без відчуттів – множина вербальних позначень образів, не присутніх у чуттєвому досвіді суб'єкта, отже, для яких ще не сформовано якісних параметрів;

$Z_2 = K \setminus Z$  – відчуття без слів – множина якісних параметрів, що розрізняються на рівні відчуттів, проте для яких у суб'єкта ще немає вербальних позначень.

З урахуванням цих позначень співвідношення (4) представлено на рис. 2 у формі діаграми Ейлера–Венна.

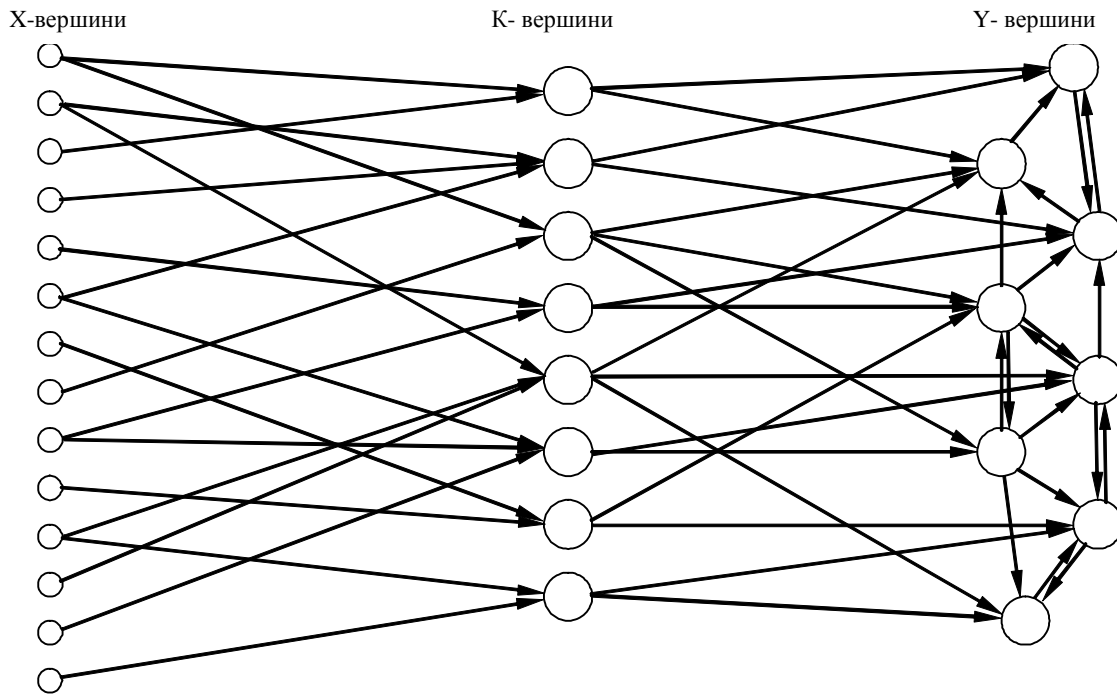


Рис. 1. Загальне представлення процесів образного мислення людини

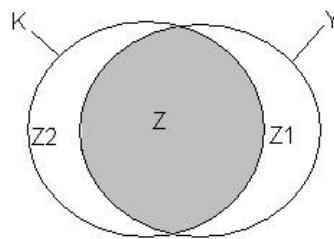


Рис. 2. Діаграма перетину вершин графу

Зазначимо, що  $Z$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  – непусті множини. Загальною множиною вершин орієнтованого графу  $G$ , що об'єднує всі різні вершини множин  $Z$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$ , вважатимемо  $W = Z_1 \cup Z_2 \cup Z$ . Зрозуміло, що  $X \cap W = \emptyset$  як наслідок з (2) та (3).

Тепер визначимо множину ребер  $E = \{(a,b)\}$  графу  $G$ . Нехай  $(a,b) \in E$ , тоді можливі такі варіанти:

1.  $a, b \in X$  – не існує відповідно до постановки задачі;
2.  $a \in X$ ,  $b \in W$  – існує, проте не розглядається при моделюванні АМО;
3.  $a, b \in W$  – складається з таких варіантів:
  - a)  $a \in Z_1$ ,  $b \in Z$ ;
  - b)  $a \in Z_1$ ,  $b \in Z_2$ ;
  - c)  $a \in Z_2$ ,  $b \in Z$ ;
  - d)  $a \in Z_1$ ,  $b \in Z_1$ ;
  - e)  $a \in Z_2$ ,  $b \in Z_2$ ;
  - f)  $a_i \in Z$ ,  $b_j \in Z$ .

Варіанти a) та c) існують, проте їх можна віднести до окремого класу моделей орієнтувального рефлексу, а тому в даному дослідженні такі ребра не розглядаються. Варіанти b), d)

та *e*) також існують, але для моделювання вже сформованої АМО їх можна не враховувати. Отже, тільки варіант *f*) відповідає АМО та надалі буде розглядатися як основний тип ребер моделі.

З вищезазначеного випливає, що для моделювання АМО з графу  $G = \{V, E\}$  мають бути відібрані підмножини вершин  $V \subseteq Z$  та ребер  $E \subseteq Z \times Z$ . Фактично нас цікавить підграф  $G_z(V_z, E_z) \subset G$ , де  $V_z \subseteq V$  та  $E_z \subseteq E$ . Для нього справедливо  $V_z = Z$ , а  $(a, b) \in E_z$  (зазначимо, що  $E_z = K \cap Y$ ).

Розглянемо спрямованість ребер  $(a, b) \in E_z$ . Будемо вважати, що  $a$  – початок ребра, а  $b$  – його кінець. Для ребра  $(a, b)$  принципово можливі наступні випадки:

1.  $a \in K, b \in K$  – не існує, виходячи з графу процесів образного мислення людини (рис.1);
2.  $a \in K, b \in Y$  – існує, проте не розглядається, оскільки відноситься до класу моделей розпізнавання образів;
3.  $a \in Y, b \in K$  – існує, проте не розглядається, оскільки у мовній практиці не прийнято визначати сутність образу через його власну якість («масло масляне»);
4.  $a \in Y, b \in Y$  – існує та вважається основним типом ребер орієнтованого підграфу  $G_z$ .

Представимо множину  $Y = Y_+ \cup Y_-$ , причому  $a \in Y_+, b \in Y_-$  для будь-якого ребра  $(a, b) \in E_z$ . Припустимо, що в загальному випадку,  $Y_+ \cap Y_- \neq \emptyset$ . Тоді розглянемо граф  $G_z(Y_z, E_z)$ ,  $Y_z = Y_+ \cup Y_- = Y$ . Приклад графу  $G_z$ , що цікавить нас з метою моделювання АМО, зображено на рис.3 у вигляді двостороннього орієнтованого графу.

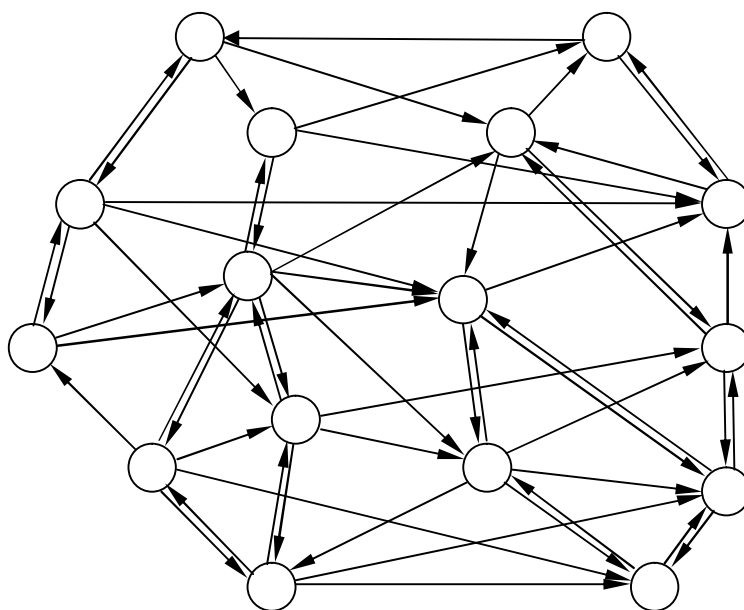


Рис. 3. Представлення двостороннього орієнтованого графу  $G_z$

Введемо поняття ваги та шляху для цього графу. Нехай  $(a_i, b_j) \in Y_z'$ ,  $a_i \in Y_+, b_j \in Y_-$ . Тоді вага  $c_{ij}$  для ребра  $(a_i, b_j)$  визначається згідно з (1). Особливість графу  $G_z'$  у відповідності до мовної практики полягає в тому, що вершина не може одночасно бути початковою та кінцевою в одному шляху.

Розглянемо наступну АМО (рис.4).

Побудуємо для цієї АМО відповідний до неї граф  $G_z$ :

$$Y_z - \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\};$$

$$E_z - (1, 2)=3; (1, 3)=1; (1, 4)=2; (1, 6)=2;$$

(2,3)=2; (2,4)=5; (2,8)=1;  
 (3,2)=1; (3,8)=4;  
 (4,3)=1; (4,5)=3; (4,8)=1;  
 (5,4)=3; (5,8)=2;  
 (6,2)=1; (6,4)=2; (6,7)=4;  
 (7,4)=2; (7,5)=1; (7,8)=5.

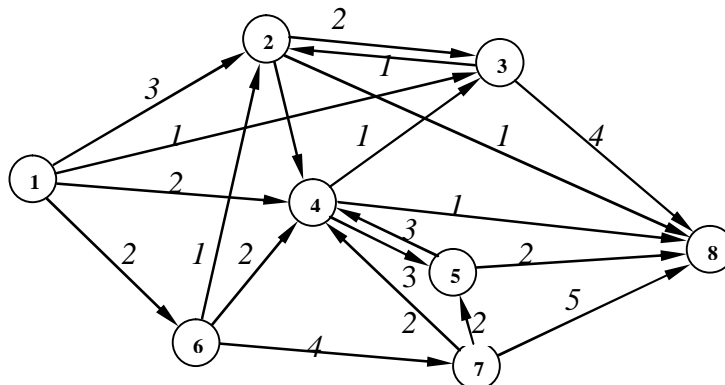


Рис. 4. Приклад графу АМО

### Пошук найкоротшого шляху

Маємо, в загальному випадку, орієнтований зважений граф  $G = \{V, E\}$ , де, не порушуючи спільності, нехай буде  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ , а  $E = \{(i, j)\}$ , де  $i$  – початок ребра,  $j$  – кінець ребра. Граф  $G$  задамо у вигляді матриці суміжності  $A = \{a_{ij}\}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ , де  $a_{ij}$  – вага ребра  $(i, j)$  – визначається з урахуванням співвідношення (1) як

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & (i, j) \notin E \\ c_{ij}, & (i, j) \in E \end{cases}.$$

Необхідно знайти в графі  $G$  найкоротший  $(s-t)$  шлях, тобто маршрут  $s = v_1, v_2, \dots, v_{k-1}, v_k = t$  с мінімальною вартістю. Для комп'ютерного розв'язання задачі вбачається доцільним застосувати оригінальний алгоритм знаходження найкоротшого шляху, оскільки, як показує практика, поведінка алгоритму Дейкстри в графах з двостороннім рухом не завжди передбачувана у зв'язку з можливими загрозами зациклення.

Введемо такі позначення:

$s, t$  – відповідно початкова та кінцева вершини шляху (задаються);

$v = \{s = v_1, v_2, \dots, v_k\}$ , де  $v_i \in V$  – маршрут довжини  $k$ , при  $v_k = t$  –  $(s-t)$  шлях;

$i$  – вершина пошуку ( $i$ -й рядок матриці  $A$ );

$j_p$  – номер позиції пошуку в рядку  $i$ ,  $j_p \leq j \leq n$ ;

$kp$  – номер першої вершини з кінця шляху (або маршруту) с ненульовою пропускнуою здатністю;

$S$  – вартість маршруту,  $S = a_{v_1 v_2} + a_{v_2 v_3} + \dots + a_{v_{k-1} v_k}$ ;

$S_{min}$  – мінімальна вартість шляху;

$V_{min}$  – шлях з мінімальною вартістю;

$Vix$  – вектор пропускнуої здатності графу – вектор локальних ступенів (кількість виходів) вершини.

**Алгоритм OPTWAY.** Знаходить оптимальний  $(s - t)$  шлях в орієнтованому зваженому графі  $G = \{V, E\}$ . Алгоритм вичерпної дії, побудований на основі принципу «пошук у глиб з поверненням».

Викладемо сутність алгоритму «Вичерпний пошук углиб з поверненням».

1. [Перевірка існування розв'язку задачі] – чи є вихід з вершини  $s$  та вхід до вершини  $t$ ?  
Нехай для задачі, що має розв'язок, побудовано маршрут  $V = \{s = v_1, v_2, \dots, v_{k-1}\}$  (рис.5), для якого зафіксуємо  $i = v_{k-1}$  та встановимо значення  $j_p$ .



Рис. 5. Маршрут  $V$

2. [Пошук нової вершини шляху]. Досліджується  $i$ -та вершина. В рядку  $i$  матриці  $A$  шукаємо новий ненульовий елемент

$$v_k = \min_{j_p \leq j \leq n} \{a_{ij} \neq 0\}.$$

При цьому можливі такі варіанти:

а)  $v_k$  не існує (немає виходу з вершини  $i$ , тобто  $j > n$  та  $a_{ij} = 0$ ).

[Перевірка кінця]. Чи існують ще не побудовані  $(s - t)$  шляхи, тобто якщо  $Vix = 0$  (всі

компоненти вектора  $Vix$  дорівнюють 0), то всі  $(s - t)$  шляхи побудовані. [Кінець]. У протилежному випадку:

[Повернення назад] – з кінця маршруту шукаємо першу вершину з ненульовою пропускну здатністю. Нехай  $k_p = k - 2$  (або  $k - 1$ , якщо  $v_{k-2} = n$ ),  $j_p = v_{k_p+1} + 1$ ,  $i = v_{k_p}$  та  $k = k_p$  (у маршруті лишити вершини  $s = v_1, v_2, \dots, v_{k_p=k}$ ; з вершини  $v_{k_p}$  – існує вихід). Для нового маршруту  $V$  корегувати його вартість  $S$  і відновити початкові пропускі здатності відкинутих вершин з попереднього маршруту  $v_m \in V$  та [Пошук нової вершини шляху].

б)  $v_k \in V$ , тоді прийняти  $i = v_{k-1}$ ,  $j_p = j_p + 1$  (виключити виникнення циклів) та [Пошук нової вершини шляху].

в)  $(v_k \notin V)$  и  $(v_k \neq t)$ , тобто  $v_k$  – не остання вершина шляху. Включити  $v_k$  до маршруту;  $S = S + a_{ij}$ ,  $Vix[k] = Vix[k] - 1$  (зменшити пропуску здатність  $k$ -го елементу маршруту, тобто вершини  $i$ );  $i = v_k$ ,  $j_p = 1$  та [Пошук нової вершини шляху].

г)  $(v_k \notin V)$  и  $(v_k = t)$ , тобто шлях побудовано. Прийняти  $S_{\min} = \min(S, S_{\min})$ ,  $V \rightarrow V_{\min}$ .

[Перевірка кінця].

Якщо існують ще не побудовані  $(s - t)$  шляхи, то

[Повернення назад (до витoku)]. Нехай  $k_p = k - 1$  (або  $k - 2$ , якщо  $v_{k-1} = n$ ) та шукається перший (з позиції  $k_p$  вектора  $V$  у напрямку до витoku  $S$ ) елемент з ненульовою пропускну здатністю. Нехай він буде  $v_{k_p}$ . Тоді прийняти  $i = v_{k_p}$ ,  $k = k_p$ ,  $j_p = v_{k_p+1} + 1$  та, у відповідності до побудови маршруту  $V$  корегувати його вартість  $S$  та відновити початкові пропускі здатності відкинутих вершин з маршруту  $v_m \in V$  та [Пошук нової вершини шляху].

Проілюструємо роботу алгоритму «Вичерпний пошук углуб з поверненням» на прикладі розглянутої раніше АМО у вигляді графу  $G_z$  (рис.4). Матриця суміжності  $A$  для нього буде мати наступний вигляд (таблиця).

У додатковому стовпці *Input* таблиці пораховано значення впускної здатності кожної  $i$ -ї вершини графу (локальна ступінь входження), а в стовпці *Output* – значення пропускну здатності (локальна ступінь виходу).

### Матриця суміжності $A$ для графу $G_z$

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$j_5$	$j_6$	$j_7$	$j_8$	$In$	$Outt$
$i_1$	0	3	1	2	0	2	0	0	0	4
$i_2$	0	0	2	5	0	0	0	1	3	3
$i_3$	0	1	0	0	0	0	0	4	3	2
$i_4$	0	0	1	0	3	0	0	1	5	3
$i_5$	0	0	0	3	0	0	0	2	2	2
$i_6$	0	1	0	2	0	0	4	0	1	3
$i_7$	0	0	0	2	1	0	0	5	1	3
$i_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0

Алгоритм **OPTWAY** реалізовано у системі програмування *TurboPascal*. Результати роботи програми представлено у Додатку для визначення найкоротшого шляху у двох випадках: з вершини  $s=1$  до вершини  $t=8$  та з вершини  $s=1$  до вершини  $t=4$ .

### Висновки

У результаті врахування відомих фізіологічних та нейропсихологічних даних, а також особливостей АВМ з психолінгвістики обґрунтовано представлення АМО у вигляді орієнтованого зваженого графу  $G_z(Y_z, E_z)$  з двостороннім рухом. При цьому відокремлені класи задач моделювання орієнтувального рефлексу та розпізнавання образів. Для пошуку найкоротшого шляху у графах типу  $G_z$  запропоновано новий алгоритм вичерпної дії, побудований на основі принципу «пошук углиб з поверненням». **Перспективи подальших досліджень** полягають у розв'язанні наступних задач моделювання образного мислення для типу графів, подібних  $G_z$ :

1. Визначити оптимальний з енергетичного погляду маршрут – такий шлях між вершинами  $a_{i0}$  та  $b_{j0}$ , що
  - а. Кількість проміжних ребер мінімальна;
  - б. Вартість маршруту мінімальна або сумарна вага маршруту найменша серед маршрутів з однаковою кількістю ребер.
2. «Знайти синонім» для вершини  $a_i$  – визначити таку вершину графу  $b_j$ , множина суміжних вершин якої максимально збігається з множиною суміжних вершин для  $a_i$ .
3. «Моделювати інсайт» – знайти таку проміжну вершину  $c$  для не пов'язаних між собою вершин графу  $a_i$  та  $b_j$ , що сумарна вага маршруту  $a_i - c - b_j$  є мінімальною.

### Додаток

$s=1$   
 $t=8$

1 2 3 8	9
1 2 4 3 8	13
1 2 4 5 8	13
1 2 4 8	9
1 2 8	4
1 3 2 4 5 8	12
1 3 2 4 8	8
1 3 2 8	3
1 3 8	5
1 4 3 2 8	5
1 4 3 8	7
1 4 5 8	7
1 4 8	3
1 6 2 3 8	9

```

1 6 2 4 3 8    13
1 6 2 4 5 8    13
1 6 2 4 8      9
1 6 2 8        4
1 6 4 3 2 8    7
1 6 4 3 8      9
1 6 4 5 8      9
1 6 4 8        5
1 6 7 4 3 2 8  11
1 6 7 4 3 8    13
1 6 7 4 5 8    13
1 6 7 4 8      9
1 6 7 5 4 3 2 8  13
1 6 7 5 4 3 8  15
1 6 7 5 4 8    11
1 6 7 5 8      9
1 6 7 8        11
----- opt -----
1 3 2 8 Smin= 3
s=1
t=4
1 2 4      8
1 3 2 4    7
1 4        2
1 6 2 4    8
1 6 4      4
1 6 7 4    8
1 6 7 5 4  10
----- opt -----
1 4 Smin= 2

```

1. Горошко Е.И. Интегративная модель свободного ассоциативного эксперимента. – М. – Харьков: ИЯ РАН – Каравелла, 2001. – 318 с. 2. Автоматизированная система научных исследований ассоциативных экспериментов (АСИИ АЭ) – [Интернет-ресурс]: <http://www.philiprovich.ru/Projects/ASIS/index.htm> 3. Бісікало О.В. Методика побудови тезауруса навчальної системи на основі моделі образного мислення // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 730–735. 4. Тадевосян Р.Г., Бісікало О.В., Ільницький Н.П., Мусиенко Е.Л. Об одной модели взаимодействия «пользователь – ПК» // Нові технології навчання: Збірник наукових праць. Розвиток духовності та професіоналізму в умовах глобалізації // Спец. випуск №55. Ч. 2: Матеріали V Міжнародної науково-методичної конференції. – Київ–Вінниця, 2008. – С.257–259. 5. Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Искусственный интеллект: от нейрона к нейрокомпьютеру. – М.: Наука, 1990. 237 с. 6. Лурия А.Р. Язык и сознание / Под ред. Е.Д. Хомской. – М.: Издательство Московского университета, 1979. – 320 с.