

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ НАН УКРАЇНИ

А. І. Кузьмичов

# **ВІЗУАЛЬНА АНАЛІТИКА МЕРЕЖЕВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Моделювання засобами MS Excel та yEd Graph Editor

Практикум

Київ  
Видавництво Ліра-К  
2019

УДК 338.45(078.5)  
К89

Копіювання, сканування, запис на електронні носії, а також будь-яке відтворення будь-якої частини практикуму без дозволу видавництва заборонено

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Інституту проблем реєстрації інформації НАН України  
(Протокол № 6 від 19 квітня 2019 р.)*

**Рецензенти:**

**О. Г. Додонов** – д. т. н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач відділом цифрових моделюючих систем Інституту проблем реєстрації інформації НАН України

**А. В. Матвійчук** – д. е. н., професор, директор Інституту моделювання та інформаційних технологій в економіці ДВНЗ «Київський національний економічний університет ім. Вадима Гетьмана»

**Кузьмичов А. І.**

**К89** Візуальна аналітика мережевої оптимізації. Моделювання засобами MS Excel та уEd Graph Editor: Практикум. – К.: Видавництво Ліра-К, 2019. – 180 с.

**ISBN 978-617-7748-55-6**

Дослідження мережевих структур – одна з основних проблем менеджменту, комп'ютерних, гуманітарних і природничих наук, багатьох галузей економіки і техніки. Різноманітна проблематика цього напрямку виникає не лише природно у явному мережевому середовищі, як от у будь-яких комунікаціях, але й в ситуаціях, які з мережами не мають спільного. Комп'ютерне моделювання мереж – це складова математичної теорії графів, де «graph» – схема чи рисунок, наочне представлення об'єкту дослідження в мережевій постановці. Саме з природної позиції, що краще аналізувати те, що видно, виник комплексний напрям візуальної аналітики: «отримав – побачив – вирішив», який якнайкраще відповідає процесу оцінювання, аналізу й прийняття обґрунтованих і зважених рішень на основі колективного обговорення видимого результату, тому візуалізація починається з простого зображення певної мережевої структури аж до наочної презентації розв'язку оптимізаційної задачі. Практикум розрахований на практиків і науковців, викладачів і студентів кафедр менеджменту будь-якого прикладного спрямування.

**УДК 338.45(078.5)**

**ISBN 978-617-7748-55-6**

© Кузьмичов А. І., 2019  
© Видавництво Ліра-К, 2019

*Краще один раз побачити,  
ніж сто разів почути.*

Народна мудрість

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Візуалізація мережових структур в діалозі Excel – уEd</b> .....	5
Взаємодія Excel – уEd .....	6
Єдині зображувальні властивості елементів графа .....	7
Типи графів та їх візуалізація .....	8
Середовище граф-редактора уEd .....	8
Робота в уEd .....	11
Швидкий старт .....	13
Вікно MS Excel Import.....	15
Різні зображувальні властивості елементів графа.....	24
Власні (користувачькі, унікальні) властивості.....	25
Зображувальні властивості вузла .....	26
Зображувальні властивості ребра .....	29
Макети: автоматичне розташування елементів графа на площині .....	32
Макети (алгоритми) укладки елементів графа .....	35
Інструмент Properties Mapper.....	44
Об'єкти Properties Mapper та їх взаємодія .....	46
<b>Пошук та візуалізація оптимальних мережових структур</b> .....	57
Класична транспортна задача .....	57
Задача про оптимальне призначення (у дводольному графі).....	64
Транспортна задача з проміжними пунктами.....	66
Задача про потік мінімальної вартості (з обмеженням пропускнуої здатності дуг) .....	77
Врахування питомих витрат для вузлів (ПВВ).....	78
Задача про найкоротший шлях .....	81
Задача про максимальний потік.....	84
Задачі про узагальнені потоки у мережах (з втратами/приростами).....	88
Узагальнені потоки в мережовій транспортній задачі (з проміжними пунктами) .....	89
Задача комівояжера .....	99
Задачі про паросполучення .....	108
Задача про найбільше паросполучення у мережі .....	109
Задача про паросполучення максимальної потужності у мережі .....	112
Задача про паросполучення мінімальної потужності у мережі .....	115
Задача китайського листоноши .....	115
Задачі розташування пунктів обслуговування .....	123
Задача Вебера .....	125
Задача про медіану графа .....	126
РМР .....	128
СРМР .....	139
Побудова мінімального покривного дерева .....	141
Багатопродуктові потоки.....	145
Задача про К-продуктові потоки мінімальної вартості.....	146
К-продуктова задача про максимальні потоки .....	152
Задача про мінімальний розріз .....	154
Потоки у мультиграфі .....	160
Транспортна задача з проміжними пунктами.....	162
Задача про максимальний потік-мінімальний розріз.....	163
Задача про найкоротший шлях .....	163
Додатки.....	164
Література.....	177

## ВСТУП

Першоджерелом мережевого моделювання і оптимізації слід вважати фундаментальну роботу [8, 26], у якій стартером лінійного програмування стала транспортна задача про перевезення мережею продукту від  $m$  постачальників до  $n$  споживачів, успішно розв'язана симплекс-методом на перших ЕОМ. І ця задача-стартер і отриманий результат у вигляді шуканої мережевої структури – оптимального плану перевезень – показали, що навкруги існує цілий клас практичних задач планування і управління в мережевій постановці, розв'язок яких новими методами і засобами є багатобічним.

Суттєво, що знайдений оптимальний план одночасно визначає «вузке місце», складову мережі як підграф, отриману аналізом чутливості цільової функції від зміни початкових даних, на яку менеджер має звернути увагу як на шанс зменшити загальні витрати.

Інфографіка – друга важлива інформаційна технологія, призначена зробити наочними числові масиви, що супроводжують процес прийняття рішень.

Звичайні і професійні користувачі, маючи справу з мережевими задачами, мають труднощі зі зображення графів і мереж. У користувачів інтереси різні, хтось (як ми у цьому виданні), розв'язує задачі мережевої оптимізації, де мережевих конструкцій дуже багато, кожна може мати досить солідні розміри, різні конфігурації, способи і макети відображення; інший (студент, викладач, адміністратор чи науковець) для публікації чи презентації документів розробляє оригінальні мережеві конструкції для ілюстрацій. І кожен вимушений мати необхідний і доступний програмний продукт й бути непоганим комп'ютерним рисувальником, аби користуватися наявними інструментальними засобами із власною термінологією, технікою і культурою, що, буває, майже неможливо. Характерні приклади – добре відомі векторні графічні редактори MS Visio чи Inkscape, у середовищі яких можна створити (лише рисуючи) і імпортувати лише власний чи, іноді, споріднений (за форматом) графічний об'єкт. Якщо ж таких рисунків треба мати багато, ця специфічна справа серйозно відволікає від основної дослідницької чи офісної роботи, яка часто не має будь-якого стосунку до комп'ютерної графіки (з історії теорії графів відомо, що перші граф-задачі виникли в хімії, біології та соціології).

Проблемно-орієнтований графічний редактор уEd, що має і використовує досить розвинені мовні засоби для розробки унікальних графічних об'єктів і шаблонів (достатньо подивитися галерею на сайті), на наш погляд – єдиний у класі графічних редакторів, який, по-перше, має справу лише із суто графами і мережевими структурами (це видно по палітрі), по-друге, взагалі не вимагає щось програмувати, і, головне, – може відкрити для імпорту даних і подальшої роботи «нерідне» для себе середовище – електронну таблицю Excel – списки якої, зроблені за запропонованими нормами, є еквівалентом і заготовкою зображення графа.

Електронні таблиці (ET), у першу чергу, Excel, найбільш популярний програмний продукт у світі [13], що вивчається в середній і вищій школах. Щодня мільйони студентів, викладачів, дослідників і фахівців використовують Excel для побудови ET-моделей повсякденних задач, свідоме розуміння і досвід роботи з електронними таблицями – обов'язкова складова комп'ютерної грамотності людей. А для управлінців прийняття рішень засобами ET – міжнародний стандарт, що підтримується підручниками з OR/MS світового рівня [3, 11, 12, 16, 17, 21, 25], де стандартні програми-надбудови в Excel – базовий інструментарій із оптимізаційного моделювання і поглибленого аналізу даних. Тож не дивно, що саме платформа ET стала основою новітньої технології візуальної аналітики, доступної на робочому місці рядового користувача. У практикумі використовуються досконалі і зручні програми-надбудови Excel Solver (OpenSolver) для мережевої оптимізації, а граф-редактор уEd Graph Editor – для автоматизованої візуалізації графів і мереж. Кожен користувач Excel вміє робити списки в електронній таблиці будь-якого розміру, користуючись розвиненими техніками формульного редагування, копіювання, посилань, шаблонів, сортування та фільтрації. Тож ці користувачі, від школяра до бізнес-аналітика та спеціаліста із будь-яких гуманітарних чи природничих наук, фахівець зі області ділової практики (економіст, менеджер, адміністратор), які далекі від комп'ютерного рисування та програмування за фахом, бажанням та можливостям, тепер можуть легко підготувати необхідні табличні дані в Excel і власноруч в уEd побудувати граф (мережу) за запропонованими макетами (layout) практично будь-якого розміру.

Саме ця чудова властивість, зрозуміла і прозора техніка побудови теоретико-графової чи мережевої структури в діалозі Excel-уEd без будь-якого програмування, швидко і просто, основа цього практикуму.

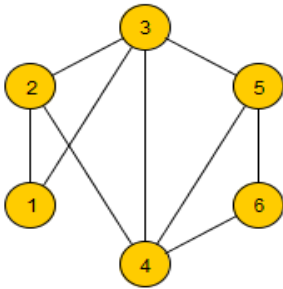
# ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ СТРУКТУР В ДІАЛОЗІ EXCEL – yED

## Загальні відомості

**Граф** (graph) – абстрактний математичний об'єкт  $G = (V, E)$ , який складається із множини **вершин** (vertex)  $V(G)$  та множини **ребер** (edge)  $E(G)$  як з'єднань між парами вершин, це основний об'єкт теорії графів.

За сучасною інформаційною технологією автоматизованого рисування графів (Graph Drawing) граф представляють в наочній формі у вигляді характерної діаграми у вигляді сукупності іменованих (помічених) вершин, з'єднаних між собою ребрами, яка теж називається графом.

Рисунок графа, де 7 вершин і 9 ребер, зроблений в yEd:

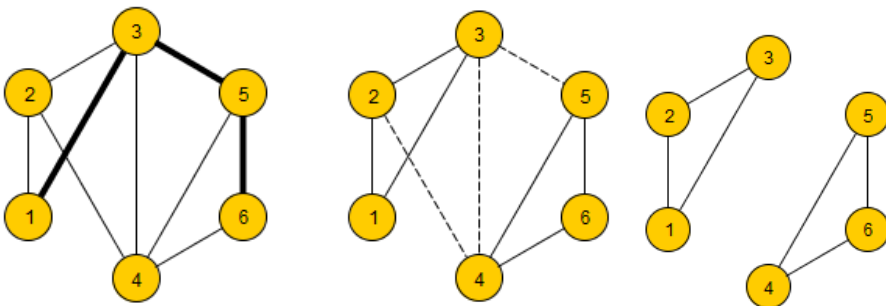


Граф  $G' = (V', E')$  називається **підграфом** графа  $G = (V, E)$ , якщо  $V'$  та  $E'$  є підмножинами  $V$  та  $E$ , причому ребро підграфа міститься в  $E'$  лише тоді, коли його кінцеві вершини містяться в  $V'$ . Підграф  $G' = (V', E')$  утворюється (породжується) двома шляхами, в залежності, який елемент є ініціатором його утворення, вершина чи ребро, і тому називається:

- вершинно-породженим, коли в його склад входять вершини із суміжними ребрами, або
- реберно-породженим, коли в його склад входять ребра зі своїми кінцевими вершинами.

Характерні приклади підграфів (рис.):

- шлях між парою вершин (1, 6) – послідовність вершин, з'єднаних ребрами (1, 3), (3, 5), (5, 6)
- розріз, перетин графа – сукупність ребер  $\{(2, 4), (3, 4), (3, 5)\}$ , видалення яких «розрізає» граф (цю шукану сукупність у відповідних задачах називають «вузким місцем»):



Сферу різноманітних практичних застосувань математичної теорії графів представляє її складова – теорія мереж<sup>1</sup>, де **мережа** (net, network) – це граф  $G = (N, A)$ , **вузли** (node) та **дуги** (arc) якого мають додаткові параметри (атрибути):

- для вузлів: потенціали (пропозиції, попит, пропускна здатність),
- для ребер: орієнтація (напрямки руху потоків) та вагові коефіцієнти: питома вартість/довжина, пропускна здатність, обмеження зверху/знизу.

Про практичність теорії мереж нагадують реальні технологічні, соціальні, інформаційні, організаційні мережі чи мережеві моделі різноманітних наук (біологія, хімія, екологія, фізика), це будь-які об'єкти, що мають мережеву організаційну структуру: телефонія, увесь транспорт, відділення банків чи пошти, хімічні формули, структури даних, діаграми тощо [15].

Відповідно, **підмережа** – складова мережі, зокрема, шуканий розв'язок певної задачі мережевої оптимізації, характерний фрагмент чи виокремлена конфігурація, яка має привернути увагу дослідника («вузьке місце», «родзинка»).

Надалі для елементів графа (мережі) будемо використовувати терміни node (вузол) та edge (ребро), як передбачено у середовищі граф-редактора yEd.

## Взаємодія Excel – yEd

Процедура побудови графа із наступним зображенням в yEd:

- 1) сформувані і зберегти файл мережевої структури в Excel
- 2) В yEd визначити єдині властивості елементів графа з палітри:
  - форму вузла (з колекції Shape Nodes) та
  - тип лінії ребра (з колекції Edges Types), що діють за промовчанням
- 3) здійснити імпорт та налаштувати файл Excel у вікні MS Excel Import редактора yEd.

### Граф (мережа) в Excel

Граф в електронній таблиці представлений такими структурами даних:

- список вузлів – хоча б один стовпець із заголовком, наприклад, **Вузли**,
  - список ребер – хоча б два стовпці із заголовками, наприклад, **Початок** і **Кінець**,
  - матриця суміжності.
- Приклади:
- списки вузлів та дуг (зліва)
  - матриця суміжності (справа):

---

<sup>1</sup> все частіше кажуть і пишуть про єдину теорію графів і мереж [20]

№	А	В	С	Е	Р	О	Н	І	Т
1	8	11	11	1	9	1	9	9	9
4	1	-1	1	2	9	2	9	9	4
6	2	0	0	4	1	2	6	9	2
7	3	0	0	5	1	2	10	10	3
8	4	0	0	6	1	4	9	1	2
9	5	0	0	7	1	4	13	0	3
10	6	0	0	8	1	9	12	0	2
11	7	0	0	9	1	9	6	0	2
12	8	0	0	10	2	1	10	10	8
13	9	0	0	11	2	4	14	10	8
14				12	2	4	12	10	8
15				13	2	4	6	10	8
16				14	2	9	9	10	3
17				15	2	9	10	10	2
18				16	2	9	0	0	8
19				17	2	8	0	0	8
20				18	2	9	0	0	8

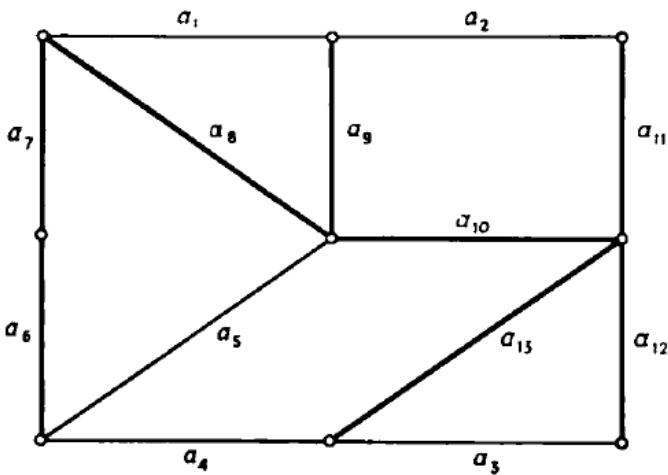
№	А	В	С	Е	Р	О	Н	І	Т
1	8	11	11	1	9	1	9	9	9
4	1	-1	1	2	9	2	9	9	4
6	2	0	0	4	1	2	6	9	2
7	3	0	0	5	1	2	10	10	3
8	4	0	0	6	1	4	9	1	2
9	5	0	0	7	1	4	13	0	3
10	6	0	0	8	1	9	12	0	2
11	7	0	0	9	1	9	6	0	2
12	8	0	0	10	2	1	10	10	8
13	9	0	0	11	2	4	14	10	8
14				12	2	4	12	10	8
15				13	2	4	6	10	8
16				14	2	9	9	10	3
17				15	2	9	10	10	2
18				16	2	9	0	0	8
19				17	2	8	0	0	8
20				18	2	9	0	0	8

## Єдині зображувальні властивості елементів графа

В зображенні графа усі його елементи – вузли/ребра – можуть мати одні й ті ж графічні властивості, визначені за промовчанням (Use as Default), скажімо, еліпс із жовтою заливкою для вузла, для ребра – лінія, зі стрілкою чи без неї, усі однієї товщини і одного кольору. Це може означати, що елементи мережевої структури, яка моделюється, мають єдину природу і властивості, де усі:

- вузли це: люди, населені пункти, підрозділи організаційної структури тощо,
- ребра це: дороги, знайомства, підпорядкованість, залежність, технологічні переходи, зв'язки тощо.

Зазвичай, такий вигляд мають графи, представлені в підручниках, де однакові на вигляд: вузли і лінії, за шрифтом і розміром символів – мітки вузлів та ребер:

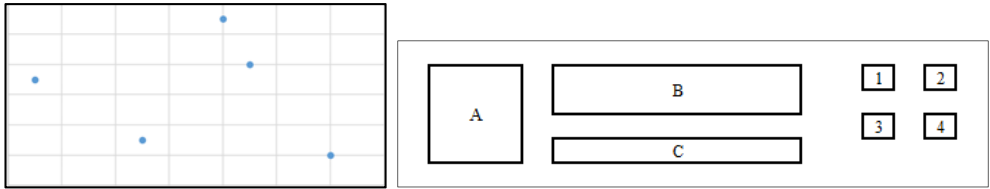


Окрім єдиних зображувальних властивостей для усіх вузлів/ребер, вузли і ребра графа можуть мати оригінальні (власні) властивості деяких вузлів/ребер згідно процесу, що моделюється, за якими вони візуально будуть вирізнятися на зображенні (наприклад, маршрут містом чи місцевістю), це принципово важливо, коли мова йде про візуалізацію шуканих мережевих структур, про власні властивості скажемо нижче.

Далі розглянемо характерні складові теорії графів, на які будемо посилатися, й зразу ж на прикладах побудуємо в уEd їхні зображення.

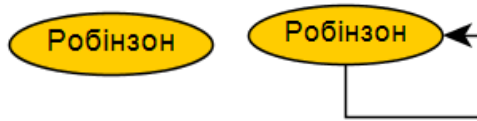
## Типи графів та їх візуалізація

**Порожній (вироджений) граф** – граф без ребер, це, наприклад, точковий графік на площині, план території:



чи населені пункти на географічній карті.

Найпростіший граф – граф лише із одного вузла (з іменем, скажімо, Робінзон), за ним, за простотою, слідує петля, що складається з одного вузла і одного ребра (Робінзон спілкується сам з собою):



Вузол графа без зв'язків називається ізольованим. Наприклад (задача про паросполучення), вихователька Марина в дитсадку просить утворити пари для 15 дітей, тож один вузол-дитинка тимчасово виявиться ізольованим і піде на прогулянку в парі з Мариною.

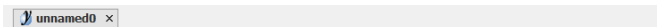
Порожній граф задають як початкові дані для, скажімо, побудови шуканої мережевої структури, наприклад, того ж паросполучення, покриття чи обходу.

## Середовище граф-редактора уEd

- робоча область (полотно, основа, Background),
- пункти меню File Edit View Layout Tools Grouping Windows Help
- панель інструментів



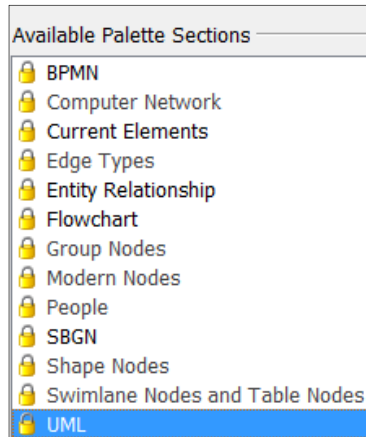
- список задач як вкладки



- палітра форм вузлів та типів ліній для ребер (Palette).
- Першочергова задача – користування палітрою із символами вузла і ребра.

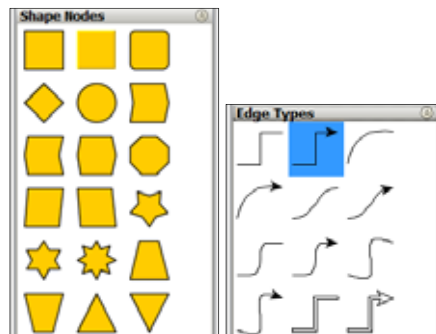


**Палітра (Palette)** зображень вузлів/ребер складається із тематичних секцій (Section), вбудованих (іх 13)

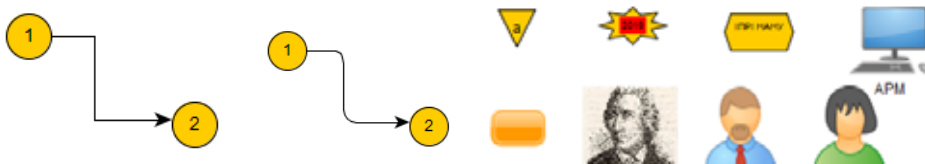


і створених користувачем (user-created).

Кожна секція містить графічні символи – іконки (icon), наприклад: для вузлів – shape (форма) і для ребер – типи ліній:

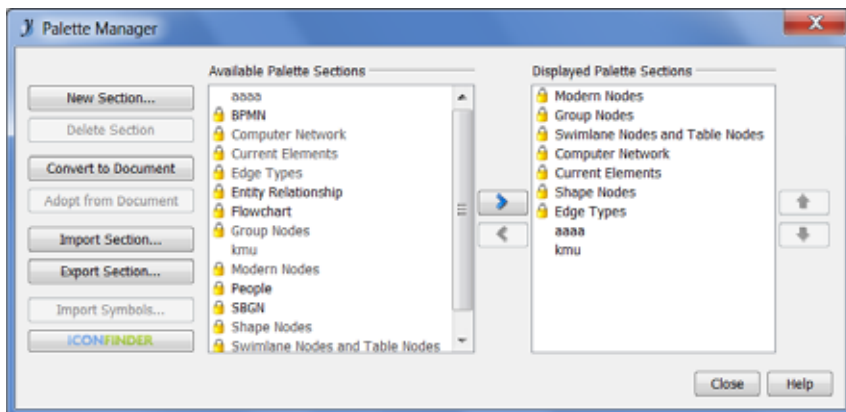


Тут набір різних графічних (для іконок) та текстових (для міток, Label) властивостей (вбудованих, змінених, скачаних):



Палітру можна забрати з полотна (×), щоб мати більше місця на екрані, поновити командою Windows → Palette чи рухати полем.

Керує нею Palette Manager (Edit → Manage Palette ...), у його вікні зліва вказані усі доступні секції, їх можна розгортати/згорнути (∨/∧), справа – ті, якими користуються (з «замочком») – вбудовані, незмінювані, аaaa, kmu – створені користувачем):



внизу зліва – посилання на сайт ICONFINDER, постачальник іконок:



Отже, все, що можна нарисувати на полотні, знаходиться в палітрі.

Не біда, якщо бажаного символу (icon) в палітрі нема<sup>2</sup>, тоді завчасно його утворюють самостійно:

- рисують у графічному редакторі,
- використовують фотографію,
- відшуковують в колекціях іконок,

зберігаючи у секції Current Elements чи у власній проблемно-налаштованій секції палітри, варіантів безліч.

Вузли-іконки, це: піктограми із характерними зображеннями апаратури, будівель, стандартні символи документів, кольорові рисунки типових об'єктів, як от для задач логістики: завод, магазин, склад, транспортний засіб тощо аж до мініпортретів певних осіб в організаційній діаграмі.

<sup>2</sup> більшість графічних редакторів пропонують фіксований набір символів-іконок