

DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2026.28.2.363197>

УДК 519.863

А. І. Кузьмичов

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна
e-mail: akuzmychov@gmail.com

Реконфігурація логістичної мережі: визначення оптимальної кількості, потенціалів і локації об'єктів ресурсного постачання

При змінах властивостей оточуючого середовища змінюється конфігурація логістичної мережі, що прямо впливає на функціонування систем постачання. Визначальним показником досконалої реконфігурації мережі є оптимальна кількість об'єктів, для його визначення розв'язана цілочислова оптимізаційна задача CPLP у двох постановках, наведено табличні моделі, результати та зображення кластерів.

Ключові слова: *location science and analysis, spreadsheet modeling and analytics, capacitated plant location problem (CPLP), задачі локації-призначення.*

Вступ

В процесі неперервного розвитку та, особливо, під час надзвичайних ситуацій конфігурація логістичної мережі та властивості її складових змінюються, наслідки чого, в першу чергу, стосуються стійкого забезпечення великої кількості зв'язаних між собою точок попиту різного типу (клієнтів): від окремих людей до колективів й організацій різного рівня. Підхід до продуктивного реагування на зміни – реконфігурація логістичної мережі у зміненому розподіленому просторі, складеному колективним попитом. Реконфігурація логістичної мережі — оновлення локації спеціальних структур (служб) як центрів надання ресурсів/послуг групам призначених до них клієнтів, де кожен клієнт представлений своїм попитом як інтегрованим показником власних технічних, соціальних та економічних вимог. У свою чергу, сама служба, як джерело критичного ресурсу чи сервісу, має власний потенціал у вигляді граничного обсягу постачання згідно місцевих умов та необхідні потреби (фінансові, технічні чи кліматичні) щодо її відкриття й функціонування. Це цілком природна й практична ситуація, коли за загальних умов і потреб треба визначити узгоджену двома сторонами, потенційними службами і наявними клієнтами, реально можливу організаційну структуру за мінімізацією транспортних та організаційних

© А. І. Кузьмичов

витрат, які залежать від якнайкращого розташування цих служб як центрів, оточених відповідними сукупностями клієнтів у вигляді кластерів.

Є два підходи щодо розташування служб та призначення споживачів (кластеризації):

1) *підхід нескінченної множини* в першу чергу використовує просторові (для оцінювання відстаней і майбутніх транспортних витрат) аргументи і дані для знаходження найкращого місця, припускаючи, що не існує обмежень на доступність місць;

2) *підхід можливих множин*: за попереднім аналізом локацій виокремлено невелику кількість можливих і прийнятних місць, що заслуговують детального і поглибленого аналізу щодо вибору найкращого варіанта.

Підхід нескінченної множини знаходить місця розташувань в принципі, зате підхід можливих множин порівнює вже знайомі і реально доступні місця для конкретного вибору із врахуванням, зокрема, фіксованих витрат і обмежень на потенціали об'єктів.

Для прийняття шуканого компромісного рішення треба знаходити відповіді на три основних питання щодо формування кластерів шуканою локацією центрів: Скільки?, Де? та Як?

У науковому світі, побудованому на давній світовій практиці, для отримання збалансованих локаційних рішень для будь-яких реальних логістичних процесів щодо оптимального розподілу наявних ресурсів із врахуванням діючих обмежень на значення їхніх потоків, сформувалася локаційна наука та аналітика [1, 2, 5]. Тут визначено характерний клас задач під назвою Facility Location Problem (FLP), їхні математичні моделі та алгоритми, де facility — будь-яка виробнича чи сервісна організаційна структура та специфічний вид діяльності (фабрика, школа, універмаг, хаб, далі — об'єкт), для кожного із цього розмаїття структур відшукується місце-знаходження (локація) та формується відповідний кластер із оточуючих його елементів (клієнтів).

Версії оптимізаційних моделей FLP щодо цільової мінімізації витрат для відкриття об'єкту різні: транспортні, транспортно-організаційні, без/із обмеженням на потенціал об'єкта.

«Простою» в розрахунках є FLP у проблематиці стратегічного планування, де звичайним кількісним параметром потенційного об'єкта, його «цінністю», є його фіксоване «місце» як-от пара координат на площині, яка впливає на значення цільової функції (ЦФ) на мінімум транспортних витрат при формуванні кластерів без будь-яких додаткових умов і обмежень: цілком логічно, що чим об'єктів буде більше, тим транспортні витрати нижчі, аж до нуля, коли усі клієнти — одночасно самодостатні об'єкти.

Впливаючим доданим параметром об'єкта є фіксовані витрати на його відкриття (F), величина, незалежна від числа призначених до нього клієнтів, ці витрати повертають до реальності, коли «за все треба платити», визначаючи компроміс двох видів витрат: транспортних та організаційних.

Строго визначальним (і «важким» в обчисленнях) у відповідальних розрахунках¹ доданим параметром об'єкта є його потенціал (capacity, C), а саме: потуж-

¹ будь-який зважений відбір, конкурси, виборчі перегони

ність чи обсяг наявних ресурсів/спроможностей, яких має вистачити, щоби задовольнити сукупний, власний і клієнтський, попит призначених клієнтів. Потенціал кожного об'єкта — це саме той обмежений ресурс, яким треба скористатися як найкраще, відшукуючи відповідь на запит щодо шуканих змінних: Де? і Як?.

Кожна задача класу FLP — дворівнева location-allocation problem, що має дві суміжні цілі, які послідовно досягаються разом, та два відповідних набори шуканих змінних:

— location: Де розміщувати об'єкт? та

— allocation: Як призначити клієнтів до кожного з об'єктів?,

щоби задовольнити попит мінімізацією витрат.

Єдина задача в класі FLP із шуканою кількістю об'єктів — Plant Location Problem (PLP), постановки: PLP (транспортно-організаційна ЦФ), CPLP (плюс обмежений потенціал).

Суто практична задача під назвою Plant Location Problem² виникла на початку 20 ст., коли активізація процесу індустріалізації вимагає раціонального розміщення кожного об'єкта, а саме крупного підприємства (plant), розрахованого на тривалу експлуатацію, відносно його оточення: запасів сировини, робочої сили навколо, розвиненої транспортної мережі та близьких за базовим напрямом організацій-суміжників для утворення кластерів – соціально-промислових регіональних агломерацій, у класі FLP її розширена багатоб'єктна версія вважається найскладнішою (з-за дискретного характеру взаємодії змінних і нелінійності розрахунку відстаней). Варіанти математичних моделей: розташування (у вузлах мережі, будь-де), врахування фіксованих витрат (F) та потенціалу (C), форма і розмір матриць: $m \times n$, $n \times n$, де: m — число кандидатів, n — число клієнтів.

Типове застосування — математично обґрунтована кластеризація за мінімумом загальних витрат з урахуванням обмежених потенціалів об'єктів, які є реальними і обмеженими критичними ресурсами, призначеними для якнайкращого розподілу.

Клас FLP, як розділ локаційної науки, містить складні обчислювальні задачі розгалуженої логістики, для крупних і реальних ланцюгів поставок застосовують спрощені евристичні алгоритми для швидкого пошуку наближеного оптимуму, для задач навчально-дослідницького циклу використовуються точні моделі математичного програмування, які розв'язують стандартними засобами Excel (Solver, OpenSolver) [3, 4, 6].

Визначення оптимальної кількості, локації і призначення об'єктів ($n \times n$, PLP)

Згідно підходу нескінченної множини в локаційній практиці розглядають у першу чергу геометричні аргументи, конкретно, координати вузлів, за якими визначають найдорожчі транспортні витрати, вважається, що доступність місць у

² За походженням відома як задача Ферма-Вебера: П'єр Ферма, французький математик, вперше поставив у 17 ст. задачу «про три точки: знайти розташування четвертої точки, сума відстаней від якої до трьох заданих точок мінімальна»; Альфред Вебер, німецький економіст, автор теорії локації індустріальних об'єктів (1919 р.), показав наукову і практичну цінність локаційних задач для практики

просторі нічим не обмежена. Додатково оцінюють інші можливі впливаючі фактори для вибраного варіанту — це стратегічний план.

Постановка задачі

Простір для прийняття локаційних рішень — мережа із зв'язаних між собою n вузлів, які одночасно є клієнтами та потенційними об'єктами-кандидатами, за їхніми координатами обчислюється квадратна матриця відстаней між ними, необхідно визначити: необхідну кількість об'єктів з числа кандидатів, їхню локацію, потенціали та призначених до них клієнтів мінімізацією транспортно-організаційних³ витрат.

Дано: $n = 25$, координати вузлів (населених пунктів), фіксовані витрати (F) та попит клієнтів (W). Простір локації і призначень: об'єкти-кандидати та клієнти розташовані у вузлах мережі, двонаправлені зв'язки «кожен з кожним».

Задача оптимізації

Знайти матрицю призначень $X = \{x_{ij}\}$ та вектор локації:

$$Y = \{y_i\}, i, j = 1, \dots, 25$$

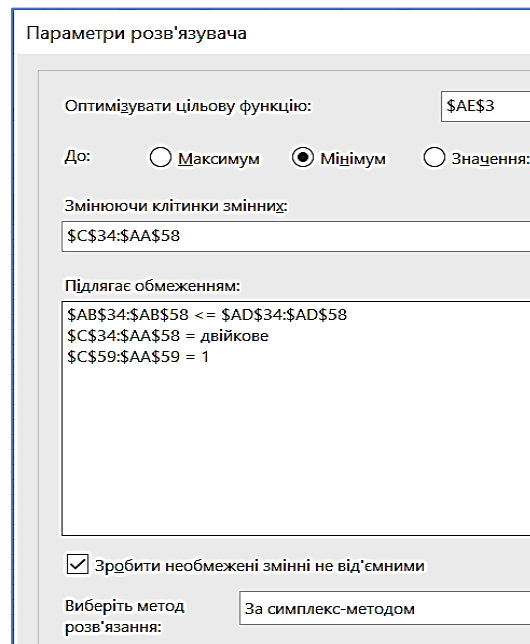
$$\text{ЦФ} \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} + \sum_i f_i y_i \rightarrow \min$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, j = 1, \dots, 25$$

$$\sum_j x_{ij} = n y_i, i = 1, \dots, 25$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Зауваження. В моделі з шуканою квадратною (0, 1)-матрицею призначення (X) друге обмеження $\sum_j x_{ij} \leq n y_i, j = 1, \dots, 25$, де шукані значення y_i — копія елементів матриці X , розташованих на її головній діагоналі; реалізовано за допомогою формули з функцією Excel INDEX, яка копіюється на увесь діапазон:



AC34 : X ✓ fx {=INDEX(\$C\$34:\$AA\$58;1+ROW(AC34)-ROW(\$AC\$34);1+ROW(AC34)-ROW(\$AC\$34))}

Таблична модель і результат показані на рис. 1.

³ враховувати лише транспортні витрати немає смислу, бо вони найменші, нульові, якщо розмістити у мережі n «безкоштовних» і самодостатніх об'єктів (діагональні елементи матриці призначень X)

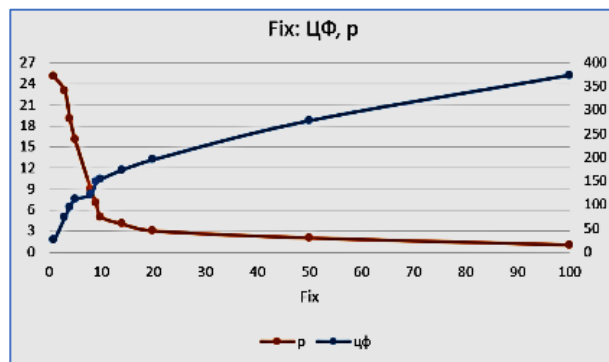
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | AA | AB | AC | AD | AE | |
|----|------|----------------|---------|--------|---------|---------|-----------|----------------|------|---------------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|-------------|------|-----------|---------|--------|--------|--------------|---------|----------|----------|------|----|----|------|-----|---|
| | | | Вінниця | Дніпро | Донецьк | Житомир | Запоріжжя | Ів.-Франківськ | Київ | Кропивницький | Луганськ | Львів | Миколаїв | Одеса | Полтава | Рівне | Сімферополь | Суми | Тернопіль | Ужгород | Харків | Херсон | Хмельницький | Черкаси | Чернівці | Чернігів | Сума | У | Уп | Птнц | | |
| 33 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | k1 | Вінниця | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 35 | k2 | Дніпро | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 36 | k3 | Донецьк | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 37 | k4 | Житомир | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 38 | k5 | Запоріжжя | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 13 | 1 | 25 | 272 | |
| 39 | k6 | Ів.-Франківськ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 40 | k7 | Київ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 41 | k8 | Кропивницький | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 42 | k9 | Луганськ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 43 | k10 | Львів | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 44 | k11 | Львів | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 45 | k12 | Миколаїв | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 46 | k13 | Одеса | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 47 | k14 | Полтава | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | k15 | Рівне | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | k16 | Сімферополь | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | k17 | Суми | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | k18 | Тернопіль | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 | 1 | 25 | 240 | |
| 52 | k19 | Ужгород | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 53 | k20 | Харків | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 54 | k21 | Херсон | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 55 | k22 | Хмельницький | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 56 | k23 | Черкаси | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 57 | k24 | Чернівці | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 58 | k25 | Чернігів | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 59 | Сума | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | |

Рис. 1. Таблична модель, результат

Аналіз результату

Матриця відстаней (як питомих транспортних витрат) D обчислена за наведеними координатами точок і декартовою формулою. Булева матриця призначень X зі значеннями (0/1) формується за відповідним обмеженням моделі за отриманими значеннями дійсного типу вектору локації об'єктів.

За визначеним критерієм достатньо мати два об'єкти в позиціях вузлів Тернопіль і Запоріжжя, відповідні кластери наведені на рис. 2. Впливаючим фактором на значення цільової функції є фіксовані витрати (Fix) на відкриття об'єкта (див. графік).



Тривалість пошуку розв'язку за цією моделлю слабо залежить від значення n , основний час користувач витрачає на формування табличної моделі, особливо, якщо вона візуально має розмір, більший за екран.

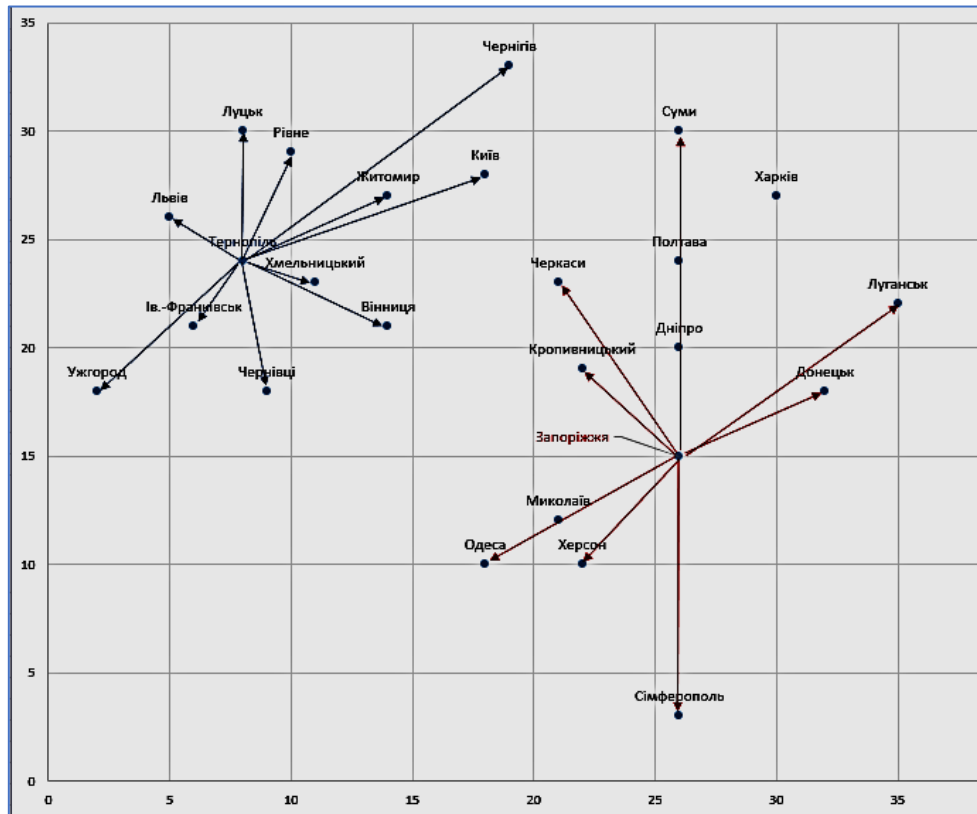


Рис. 2. Локація об'єктів, призначення клієнтів, кластеризація

Визначення оптимальної кількості, локації і призначення об'єктів ($n \times n$, CPLP)

Серйозним ускладненням і, одночасно, близькістю до реальності є обмеження на значення потенціалу об'єкта (C). Це обмеження відносить нас до фундаментальної задачі про оптимальний розподіл обмежених (чим є значення C) ресурсів.

Дано: додано потенціали об'єктів-кандидатів (C) та два обмеження: шукані потенціали $\leq C$, тип $(0, 1)$ для змінної y_i .

Таблична модель, результат (рис. 3)

Аналіз результату

На рис. 4 показано, що попит у Чернівцях задовольняє віддалений і потужний об'єкт у Запоріжжі за мінімальними загальними витратами і це тому, що об'єкту в Луцьку (потенціал 172 од.) не вистачило 8 од. (-2 од. залишок $+ 10$ од. попит Чернівців) потенціалу, щоби покрити цей попит.

Оцінюють тривалість розрахунку для цієї потенційно-орієнтованої задачі не в залежності від значення n , бо цей показник критично залежить від співмірності заданих значень попиту клієнтів й обмежених потенціалів об'єктів: так, декілька потужних об'єктів (з потенціалом 20–30 % попиту) миттєво покривають усі замовлення і навпаки, «середні» потенціали змусять чекати результат навіть для невеликої задачі хвилинами (наведений результат отримано за 4–5 хв.).

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | AA | AB | AC | AD | AE | A | AG | AH | | | |
|----|-----|----------------|---------|--------|---------|---------|-----------|----------------|------|---------------|----------|-------|-------|----------|-------|---------|-------|-------------|------|-----------|---------|--------|--------|--------------|---------|----------|----------|------|----|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | X | Вінниця | Дніпро | Донецьк | Житомир | Запоріжжя | Ів.-Франківськ | Київ | Кропивницький | Луганськ | Луцьк | Львів | Миколаїв | Одеса | Полтава | Рівне | Сімферополь | Суми | Тернопіль | Ужгород | Харків | Херсон | Хмельницький | Черкаси | Чернівці | Чернігів | Сума | У | Уп | Птнц | Fix | Cap | | | | |
| 34 | k1 | Вінниця | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 171 | 152 | | |
| 35 | k2 | Дніпро | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 8 | 1 | 25 | 181 | 0 | 0 | 164 | 186 | | |
| 36 | k3 | Донецьк | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 124 | 124 | |
| 37 | k4 | Житомир | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 192 | 195 | |
| 38 | k5 | Запоріжжя | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 8 | 1 | 25 | 161 | 0 | 0 | 109 | 167 | | |
| 39 | k6 | Ів.-Франківськ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 224 | 139 | |
| 40 | k7 | Київ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 193 | 196 |
| 41 | k8 | Кропивницький | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 188 | 135 |
| 42 | k9 | Луганськ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 189 | 179 |
| 43 | k10 | Луцьк | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 1 | 25 | 170 | 0 | 0 | 139 | 172 | | |
| 44 | k11 | Львів | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 185 | 116 |
| 45 | k12 | Миколаїв | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 135 |
| 46 | k13 | Одеса | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 155 | 185 |
| 47 | k14 | Полтава | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 173 | 106 |
| 48 | k15 | Рівне | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 157 | 148 |
| 49 | k16 | Сімферополь | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 163 |
| 50 | k17 | Суми | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249 | 156 |
| 51 | k18 | Тернопіль | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 108 | 136 |
| 52 | k19 | Ужгород | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 | 144 |
| 53 | k20 | Харків | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 182 | 183 |
| 54 | k21 | Херсон | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 168 | 124 |
| 55 | k22 | Хмельницький | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 174 | 120 |
| 56 | k23 | Черкаси | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 216 | 160 |
| 57 | k24 | Чернівці | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 228 | 138 |
| 58 | k25 | Чернігів | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200 | 123 |
| 59 | k25 | Сума | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | P | |
| 61 | | | W | 25 | 33 | 17 | 23 | 12 | 33 | 28 | 26 | 16 | 10 | 21 | 31 | 13 | 21 | 17 | 23 | 30 | 12 | 10 | 10 | 29 | 19 | 11 | 10 | 32 | | | | | | | | | |

Рис. 3. Таблична модель

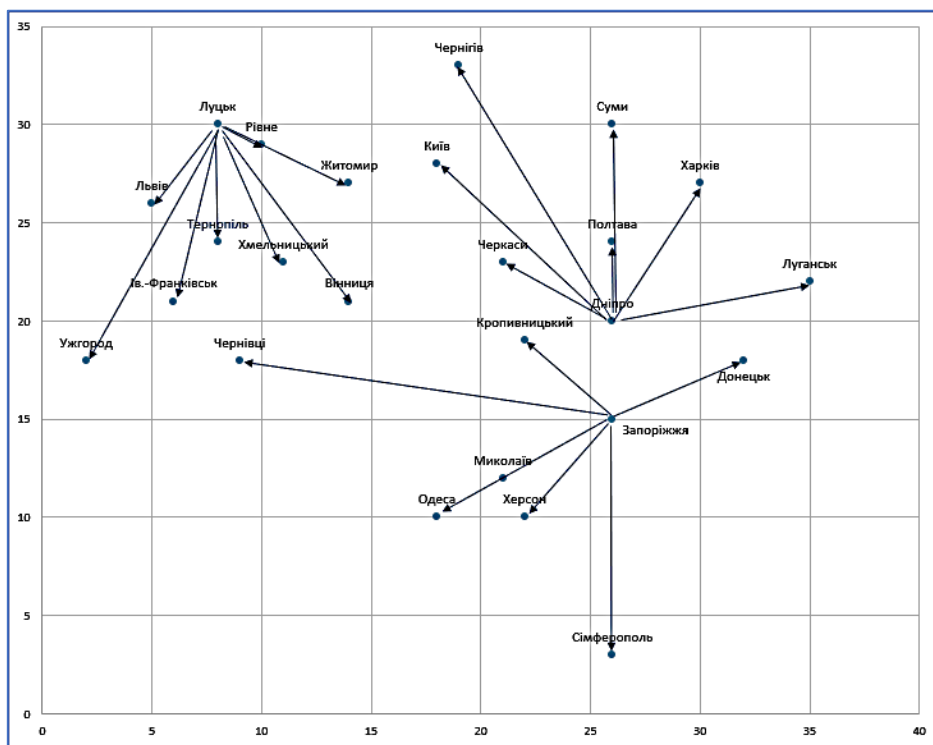


Рис. 4. Локація об'єктів, призначення клієнтів, кластеризація

Визначення оптимальної кількості, локації і призначення об'єктів ($m \times n$, PLP)

Згідно підходу можливих множин за попередніми розрахунками виокремлена кількість прийнятних локацій об'єктів, серед яких визначається необхідна кількість об'єктів, їхньої локації, потенціали та призначення до них клієнтів.

Постановка задачі

Мережа складається із m вузлів об'єктів-кандидатів, n вузлів клієнтів, $m < n$, та прямокутної матриці зв'язків/дуг розміром $m \times n$ між ними, необхідно визначити: оптимальну кількість об'єктів з числа m кандидатів (p), для кожного: локацію, потенціал та призначених клієнтів мінімізацією транспортно-організаційних витрат.

Дано: координати вузлів, за ними обчислюється матриця відстаней (D) між кандидатами і клієнтами як вагові коефіцієнти дуг, попит клієнтів (W) та фіксовані витрати (F).

Дано: $m = 5$ ($s_1 \dots s_5$), $n = 25$ ($k_1 \dots k_{25}$).

Простір пошуку розв'язків: об'єкти-кандидати і клієнти розташовані у вузлах мережі, між ними дуги із відстанями «кожен з кожним».

Задача оптимізації

Знайти: матрицю призначень $X = \{x_{ij}\}$ та вектор локації $Y = \{y_j\}$, $i = 1, \dots, 5$; $j = 1, \dots, 25$:

$$\text{ЦФ } Z = \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} + \sum_j f_j y_j \rightarrow \min$$

$$\text{При: } \sum_j x_{ij} = 1, i = 1, \dots, 5$$

$$\sum_{ij} w_j x_{ij} \leq c_i$$

$$x_{ij} \leq y_j$$

Зауваження: коли використовується прямокутна модель, завдання m обмежень $x_{ii} \leq y_i$ (означає, що попит задоволено, якщо клієнт призначений до відкритого об'єкта, $y_i = 1$) вимагає m раз вручну увести у вікно Параметри розв'язувача показані на рисунку конструкції, що потребує уваги й ускладнює роботу для крупних задач у порівнянні з квадратною моделлю.

Таблична модель, результат (рис. 5).

| Параметри розв'язувача | |
|-------------------------------------|--|
| Оптимізувати цільову функцію: | <input type="text" value="\$AE\$3"/> |
| До: | <input type="radio"/> Максимум <input checked="" type="radio"/> Мінімум <input type="radio"/> Значення |
| Змінюючи клітинки змінних: | <input type="text" value="\$E\$13:\$AC\$17;\$AD\$13:\$AD\$17"/> |
| Підлягає обмеженням: | <input type="text" value="\$AE\$13:\$AE\$17 <= \$AE\$5:\$AE\$9"/> <input type="text" value="\$AD\$13:\$AD\$17 = двійкове"/> <input type="text" value="\$E\$13:\$AC\$13 <= \$AD\$13"/> <input type="text" value="\$E\$13:\$AC\$17 = двійкове"/> <input type="text" value="\$E\$14:\$AC\$14 <= \$AD\$14"/> <input type="text" value="\$E\$15:\$AC\$15 <= \$AD\$15"/> <input type="text" value="\$E\$16:\$AC\$16 <= \$AD\$16"/> <input type="text" value="\$E\$17:\$AC\$17 <= \$AD\$17"/> <input type="text" value="\$E\$18:\$AC\$18 = 1"/> |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Зробити необмежені змінні не від'ємними |
| Виберіть метод розв'язання: | <input type="text" value="За симплекс-методом"/> |

Нелінійна (binary) оптимізаційна модель з врахуванням потенціалів кандидатів як сильних обмежень значно складніша, бо все залежить від значень і співвідношень попиту клієнтів і потужностей кандидатів: у реальній конкурентній боротьбі кадрові, фінансові та виробничі потенціали сторін визначають обсяги, концентрацію і масштаби охоплення ринку попиту.

Орієнтир щодо даних: результат з одним відкритим об'єктом як монополістом гарантовано, якщо є потенціали-конкуренти зі значеннями, не меншими суми попиту, з їхніми меншими значеннями буде відкрито декілька об'єктів з урахуванням відповідних витрат. При низьких значеннях потенціалів не виключається відсутність розв'язку із-за недостатньої кількості кандидатів (більше, ніж m).

Висновки

Розроблено оптимізаційні моделі задачі PLP за двома підходами в плануванні у матричному форматі в різних постановках щодо локації нових об'єктів (джерел критичних ресурсів) для покриття попиту клієнтів визначенням їхнього необхідного числа та побудовою відповідних кластерів «об'єкти-клієнти». Моделі призначено для гнучкого балансування розподільчої системи для повного задоволення попиту клієнтів в умовах дисбалансу, викликаного релокацією існуючих активів. Тип оптимізаційної моделі дозволяє доступними інструментальними засобами Excel реалізувати розв'язки досить крупних задач про логістичні мережі, в першу чергу, у форматі $(n \times n)$, які розглядаються на етапі стратегічного планування перспективного ланцюгу постачання.

1. Eiselt H., Marianov V. Foundations of Location Analysis. Springer, 2011. 524 p.
2. Laporte G. Location Science, 2-ed. Springer, 2019. 767 p.
3. Додонов О.Г., Кузьмичов А.І. Мережеві організаційні структури управління. Моделювання та візуалізація засобами Excel. Київ: Вид-во Ліра-К, 2021. 264 с.
4. Ragsdale C. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. A Practical Introduction to Business Analytics, 9-ed. Cengage, 2022. 908 p.
5. Haitao L. Optimization Modeling for Supply Chain Applications. World Sci., 2023. 469 p.
6. Кузьмичов А.І. Лінійна модель транспортної задачі локації-релокації об'єктів у логістичній мережі. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2025. Т. 27, № 2. С. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.2.345502>

Надійшла до редакції 05.04.2026

Прийнята до друку 19.05.2026

Опублікована 17.06.2026