

# ТЕРИТОРІАЛЬНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

A. PRAKHOVNIK, A. SAVCHENKO

## TERRITORIAL DECOMPOSITION OF ENERGY SUPPLY SYSTEMS

**Анотація.** Основою принципу енергетичної системи XXI сторіччя є поступове збільшення кількості розосереджених джерел генерації, які формують децентралізовані системи енергозабезпечення, з включенням їх до інтегрованих систем енергозабезпечення, що базуються на перевагах централізованих та децентралізованих систем. При цьому головним питанням залишається енергетично, економічно та технологічно доцільний радіус теплопостачання.

Рішення про реконструкцію існуючої системи в напрямі найбільш ефективного ступеня централізації та/або децентралізації локальних зон теплопостачання повинно формуватись згідно з економічно та технологічно доцільним радіусом теплопостачання.

В даній роботі пропонується підхід, за допомогою якого визначається ступінь децентралізації з використанням інструментів Data Mining, а саме проводиться кластеризація обраної території за розмірами та густиною попиту на енергію.

**Ключові слова:** розосереджені джерела генерації, децентралізовані системи, інтегровані системи, інструменти Data Mining, кластеризація території.

**Анотація.** Основой принципа энергетической системы XXI столетия является постепенное увеличение количества рассредоточенных источников генерации, которые формируют децентрализованные системы энергообеспечения, с включением их в интегрированные системы энергообеспечения, которые базируются на преимуществах централизованных и децентрализованных систем. При этом главным вопросом остается экономически и технологически целесообразный радиус теплоснабжения.

Решение о реконструкции существующей системы теплоснабжения в направлении наиболее эффективной степени централизации и/или децентрализации локальных зон теплоснабжения, должно формироваться в соответствии с энергетически, экономически и технологически целесообразным радиусом теплоснабжения.

В данной работе предлагается подход, с помощью которого определяется степень децентрализации с использованием инструментов Data Mining, а именно проводится кластеризация выбранной территории по размерам и плотности спроса на энергию.

**Ключевые слова:** рассредоточенные источники генерации, децентрализованные системы, интегрированные системы, инструменты Data Mining, кластеризация территории.

**Annotation.** The basis of energy systems of the XXI century is step-by-step accumulating of the energy sources, which are form decentralized energy supply systems, and whereupon are included to the integrated power supply systems, which have prerogatives of both - centralized and decentralized systems. But the most important point is still the same - an energetically, economically and technologically efficient radius of the energy supply.

The decision about reconstruction of the existing heating system in the direction of the most effective degree of the centralization and/or decentralization of a local heating zone, should be making by the economically and technologically expedient heating radius.

In the current article, were proposed an approach, which is by using instruments of Data Mining help to determine the decentralization degree. The essence of the approach is in the clustering of the selected area into smaller parts according to sizes and density of energy demand.

**Key words:** accumulating of the energy sources, decentralized systems, integrated systems, instruments of Data Mining, clustering of the area.

### Вступ

На даний час у світі відбулися значні зміни в формуванні стратегії розвитку енергетики. Основний наголос має робитися на нерозривність і узгодженість дій при вирішенні трьох завдань: енергозабезпечення (де головним є безперервність енергопостачання та надання якісної енергії й послуг), енергодоступності (за ціною та енергоощадністю), енергоприйнятності (за мінімальним впливом на навколишнє середовище та пом'якшення змін клімату).

Згідно з новою платформою енергозабезпечення European Technology Platform SmartGrids побудова сучасної енергетичної системи передбачає створення інтегрованої системи енергозабезпечення за рахунок підвищення рівня децентралізації на базі розосередженої генерації та використання Smart-технологій [1-4].

Зазначимо, що незалежно від того, наскільки швидко лишиться позаду великомасштабна централізована модель енергетики як безумовний релікт ХХ століття, людство вже вступило в період будівництва децентралізованих систем. Звичайно, найближче майбутнє належить інтегрованим системам енергопостачання споживачів, оскільки протягом значного періоду часу будуть «співіснувати» як централізовані, так і децентралізовані системи, з поступовим розширенням останніх. На сучасному етапі винятково важливою задачею є зробити таке «співіснування» безконфліктним, гармонійним і максимально ефективним [4].

В більшості країн СНД централізоване теплопостачання (ЦТ) залишається домінуючою формою теплопостачання, однак в цілому його репутація стає слабкою. Централізоване теплопостачання від котельень у 70 - 80-х роках нарівні із теплофікацією було одним із ключових напрямів розвитку теплопостачання СРСР. Той період часу характеризувався технічним прогресом в області котельних установок, опануванням нових видів котельно-паливного та допоміжного обладнання. В СРСР справедливо вважалось, що централізація теплопостачання забезпечує підвищення його якості, економію тепла та трудових ресурсів, зниження забруднення навколишнього середовища (за підрахунками того часу сумарні викиди шкідливих речовин в атмосферу за рахунок теплофікації та централізації теплопостачання знижувались приблизно на 15%) [5].

*Однією з головних проблем систем теплозабезпечення 80-х років можна вважати розробку проектів по постачанню, в основу яких полягав підхід вирішення локальної задачі без врахування вимог до схем теплопостачання щодо вибору джерел тепла [6].*

### Кластеризація обраної території енергозабезпечення

Останнім часом аналіз стану електроенергетики України свідчить, що він є близьким до критичного: енергоблоку теплових електростанцій, повітряні лінії та трансформаторні підстанції вичерпали свій граничний технічний ресурс; в енергокомпаніях практично не вирішуються завдання як оптимізації експлуатаційного і ремонтного обслуговування електричних мереж, так і оперативного управління режимами, що призвело до безпрецедентного зростання втрат електричної енергії, які досягають значних величин. На думку експертів вже зараз відставання галузі від сучасних світових технологій становить не менше 20 років.

Тому необхідним є невідкладне прийняття кардинальних заходів і формування нової стратегії розвитку електроенергетики у максимальній мірі з огляду на економічні, політичні, соціальні, географічні і територіальні особливості України. При цьому запропоновані рішення не повинні вимагати значних миттєвих капітальних вкладень, але повинні порівняно швидко давати реальну віддачу та орієнтуватися на найбільш передові технології.

З появою нових конкурентоспроможних технологій з виробітку енергії у світі розпочався розвиток, так званої, «зеленої» енергетики (заснованої на відновлюваних джерелах енергії). При цьому чітко простежується стійка динаміка зниження як капітальних, так і експлуатаційних витрат, пов'язаних із застосуванням альтернативної енергетики [7]. Крім цього, паралельно з'явилися і стрімко розвиваються нові ефективні джерела малої енергетики, що спираються на традиційні технології, мають досить високі експлуатаційні показники, в тому числі при використанні первинного органічного палива. Проте дотепер головним питанням залишається економічно та технологічно доцільний радіус теплопостачання.

*В даній роботі засобами Data Mining розроблено алгоритм визначення найбільш раціонального з точки зору густини попиту на опалення та на гаряче водопостачання радіуса теплопостачання.*

Економічно та технологічно доцільний радіус теплопостачання повинен формувати рішення про реконструкцію існуючої системи в напрямі найбільш ефективного ступеня централізації та/або децентралізації локальних зон теплопостачання. Підключення нового навантаження до

централізованих систем теплопостачання потребує постійного опрацювання варіантів їхнього розвитку. Оптимальний варіант повинен характеризуватись економічно та технічно доцільною зоною дії джерела зони теплопостачання при дотриманні вимог до якості та надійності теплопостачання, а також до екології [8].

Рішення про оптимальний ступінь децентралізації необхідно приймати враховуючи багато факторів. В даній роботі пропонується підхід, за допомогою якого визначається ступінь децентралізації з використанням інструментів *Data Mining*, а саме проводиться кластеризація обраної території за розмірами та густиною попиту на енергію.

Оскільки різні алгоритми кластеризації використовують різні метрики та критерії розбиття, то для проведення дослідження в даній роботі використовувались 3 методи кластер-аналізу: *k-means*, *EM-clustering*, *Kohonen Maps*. При цьому кількість класів (кластерів) або задається априорі, або визначається в процесі роботи самого алгоритму. Отримавши результати розбиття на кластери трьома різними статистичними алгоритмами та порівнявши їх, ми проводимо більш ефективну територіальну декомпозицію.

Кластер-аналіз було практично здійснено зазначеними вище алгоритмами на прикладі обраного реального району енергозабезпечення міста, який розбито на 38 умовних споживачів енергії, що є приблизно однаковими за площами, кожен з яких представляє собою певну групу реальних одиничних споживачів енергії із притаманними їм характеристиками енергоспоживання. За допомогою *Deductor Studio Academic 5.2* зображено характеристики умовних споживачів в просторі (рис.1).

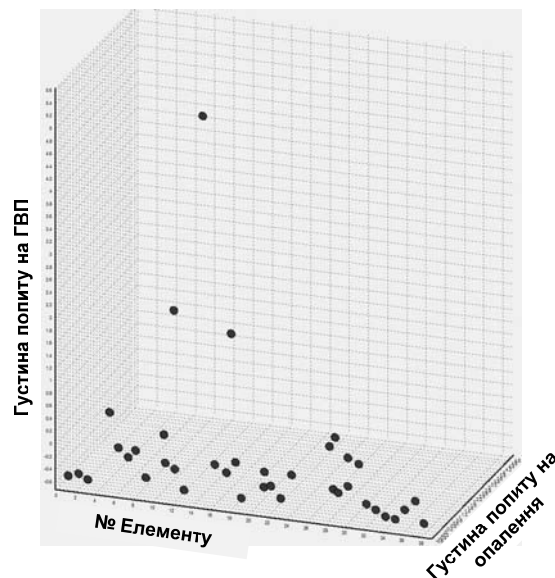


Рис. 1. Діаграма розміщення характеристик умовних споживачів енергії в 3D-просторі

Перш за все використаємо найбільш популярний алгоритм **k-means (К-середніх)**. Припустимо, що в мережі існує  $K$  нечітких нейронів із центрами в точках  $c_i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ). Початкові значення цих центрів можуть бути вибрані випадковим чином із областей допустимих значень відповідних компонентів векторів  $x_j$  ( $j=1,2,\dots,p$ ), що використовуються для навчання. В такому разі приймаємо, що функція фазифікації задана у формі узагальнюючої функції Гауса [9].

Для практичного застосування даного алгоритму використовуємо статистичну програму, що входить до складу аналітичної платформи *Deductor Academic*, а саме *Deductor Studio Academic 5.2 Build 0.70*. Результати роботи алгоритмів зображені на рис.2.

Оскільки точність розбиття на кластери даним алгоритмом можна вважати стовідсотковою тільки за умови попереднього задавання кількості кластерів, то нам необхідно провести “перевірочний” кластер-аналіз іншим ітеративним методом – *EM-clustering* (EM-алгоритм).

**Expectation—maximization алгоритм (EM)**. EM-алгоритм — це алгоритм, що використовується в математичній статистиці для знаходження оцінок максимальної правдоподібності параметрів вірогідних моделей у випадку, коли модель залежить від деяких прихованих змінних. Кожна ітерація алгоритму складається з двох кроків. На  $E$  кроці (expectation)

визначається очікуване значення функції правдоподібності, і при цьому приховані змінні вважаються тими, за якими ведеться спостереження. На М-кроці (maximization) розраховується оцінка максимальної правдоподібності, і таким чином збільшується очікувана правдоподібність, що розраховується на кроці Е. Потім на наступній ітерації це значення використовується для Е-кроку. Алгоритм виконується до збіжності [10].

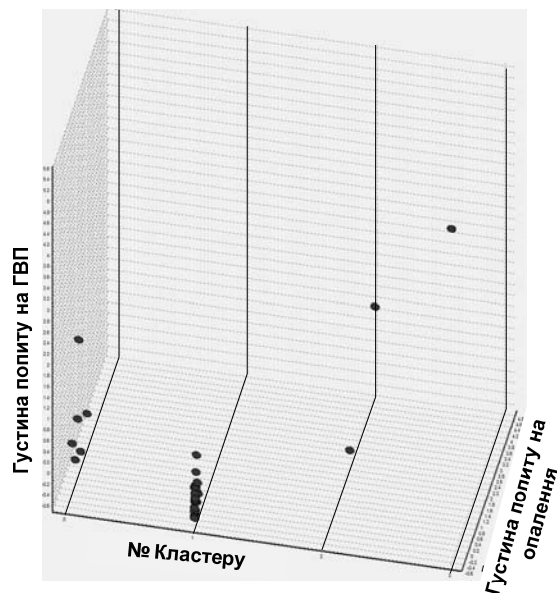


Рис.2. Розташування умовних споживачів енергії в результаті кластер-аналізу за допомогою алгоритму К-середніх

Для практичного здійснення кластер-аналізу описаним вище алгоритмом використовуємо статистичний пакет Statistica 8.0. В результаті кластер-аналізу дані розбито на 3 кластери. На рис.3 зображено розбиття умовних елементів по кластерах при використанні цього алгоритму.

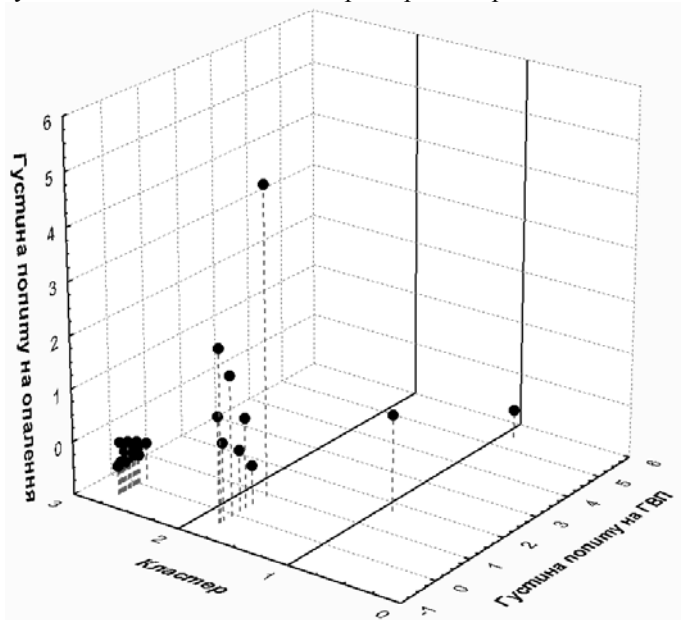


Рис. 3. Розташування умовних споживачів енергії в результаті кластер-аналізу за допомогою EM-алгоритму

Третій використаний нами алгоритм кластеризації - це Kohonen Maps (самоорганізуючі карти Кохонена, SOM). Ми використали цей алгоритм для того, щоб підтвердити або заперечити результати попередніх двох алгоритмів і використати відмінну особливість даного методу - візуалізацію отриманих результатів.

**Самоорганізуючі карти Кохонена.** SOM – це змагальна нейронна мережа із навчанням без вчителя, що виконує задачу візуалізації та кластеризації. Вона представляє собою проєктування багатомірного простору в простір із більш низькою розмірністю (частіше всього двовимірний), а також застосовується для вирішення задач моделювання, прогнозування і т.ін.

Самоорганізуюча карта складається із компонентів, що називаються вузлами або нейронами. Їхня кількість задається аналітиком. Кожен із вузлів описується двома векторами. Перший – так званий вектор ваги  $m$ , має ту ж саму розмірність, що й вхідні дані. Другий – координати вузла на карті, тобто вектор  $r$ . Зазвичай вузли розташовують у вершинах регулярної решітки із квадратними або шестикутними осередками.

На початку відома розмірність карти вхідних даних, по ній деяким чином будується першочерговий варіант карти. В процесі навчання вектори ваги вузлів наближуються до вхідних даних. Для кожного спостереження обирається найбільш схожий за вектором ваги вузол, а значення його вектора ваги наближуються до спостереження. Також до спостереження наближуються вектори ваги декількох вузлів, що розташовані поблизу один від одного, і таким чином, якщо в множині вхідних даних два спостереження схожі, на карті їм будуть відповідати близькі вузли. Циклічний процес навчання, що перебирає вхідні дані, закінчується при досягненні картою допустимої (наперед заданої аналітиком) похибки або після завершення заданої кількості ітерацій [11, 12].

На практиці кластер-аналіз за допомогою самоорганізуючих карт Кохонена було реалізовано в Deductor Studio Academic 5.2 Build 0.70.

Оскільки попередньо двома різними алгоритмами було визначено, що оптимальна кількість кластерів в межах  $k=3$  або 4, тому, задаючи розмір карт Кохонена, приймаємо її розмір  $6 \times 7$ , таким чином не надто «дроблячи» дані на кластери. В результаті отримуємо 4 кластери (рис. 4).

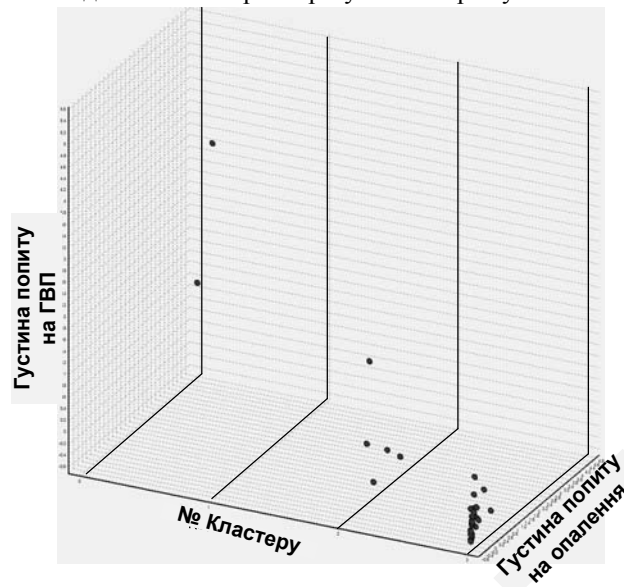


Рис.4. Розташування умовних споживачів енергії в результаті кластер-аналізу за допомогою карт Кохонена

Отже, отримавши результати кластеризації за всіма трьома алгоритмами, маємо результати, що зведені в табл. 1. Тоді, можна наглядно порівняти, яким чином район енергозабезпечення розбито на кластери за густиною попиту на ГВП та на опалення.

Таблиця 1

**Узагальнення результатів, отриманих за трьома алгоритмами кластер-аналізу**

Алгоритм	Номер кластера			
	0	1	2	3
Кarti Кохонена	4	15	1-3, 5-13, 17-19, 21-24, 27-38	14, 16, 25-27
К-середніх	4, 26	15	1-3, 5-9, 11-13, 17-19, 21-24, 28-38	10, 14, 16, 20, 25, 27
EM-алгоритм	15,16	4, 5, 10, 14, 20, 25-27	1-3, 6-9, 11-13, 17-19, 21-24, 28-38	-

Аналізуючи графічні зображення та табл.1, визначаємо, що існує великий «пласт» елементів, який за результатами трьох кластер-аналізів розташувався в один і той самий кластер. Інші деякі розбіжності складу кластерів, отримані за результатами трьох різних алгоритмів, не є надто значимими. Загалом, можна використовувати будь-який з трьох описаних вище алгоритмів кластеризації як окремо один від одного, так і в сукупності.

Отже, робимо висновок, що в результаті кластер-аналізу оптимально буде виділити 4 кластери.

Нанесемо їх на карту району енергозабезпечення (рис.5) та, використовуючи математичний алгоритм для визначення електричних навантажень, розрахуємо центри теплових навантажень.

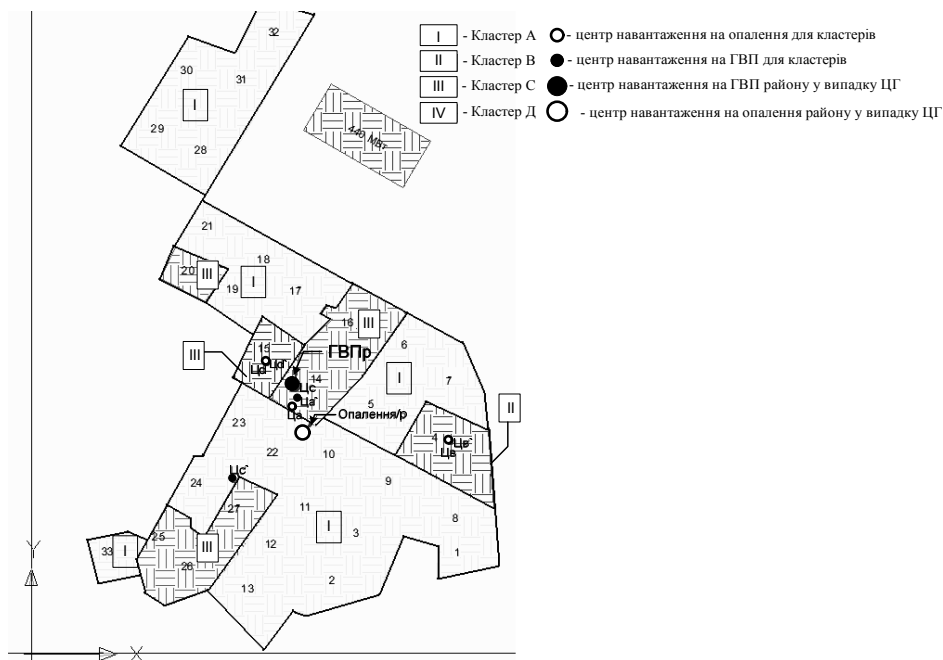


Рис. 5. Схематичне зображення центрів енергонавантаження кластерів та центр енергонавантаження району міста в системі координат XOY для випадку централізованої генерації

Здійснивши суміжний кластер-аналіз для даних, що складають попередньо утворений кластер №2 та провівши декомпозицію, отримуємо наступну схему оптимальної децентралізації обраного району.

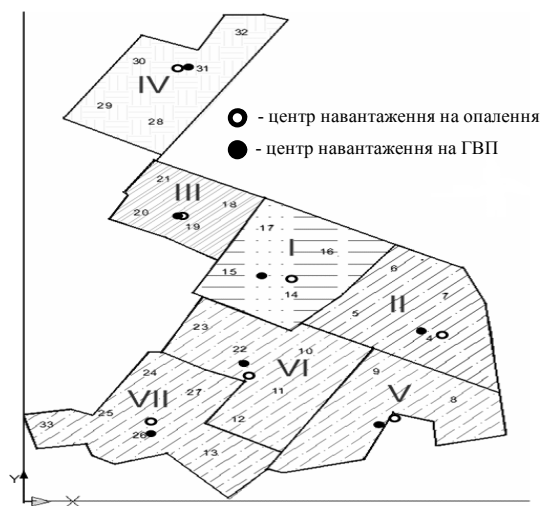


Рис. 6. Схематичне зображення центрів енергонавантаження груп споживачів для сценарію впровадження РГ обраного району міста в системі координат XOY

Завдяки визначеним територіальною декомпозицією центрам енергонавантаження, стає можливим використовувати різноманітні «набори» генеруючих потужностей залежно від їхнього потенціалу, економічної доцільності та потреби. Відновлювальні джерела енергії (біопаливо) також можуть бути використані для покриття попиту (за потребою), але вони є пасивними елементами системи, адже їхній енергетичний потенціал не є постійним.

Схематично це можна показати наступним чином (рис. 7):

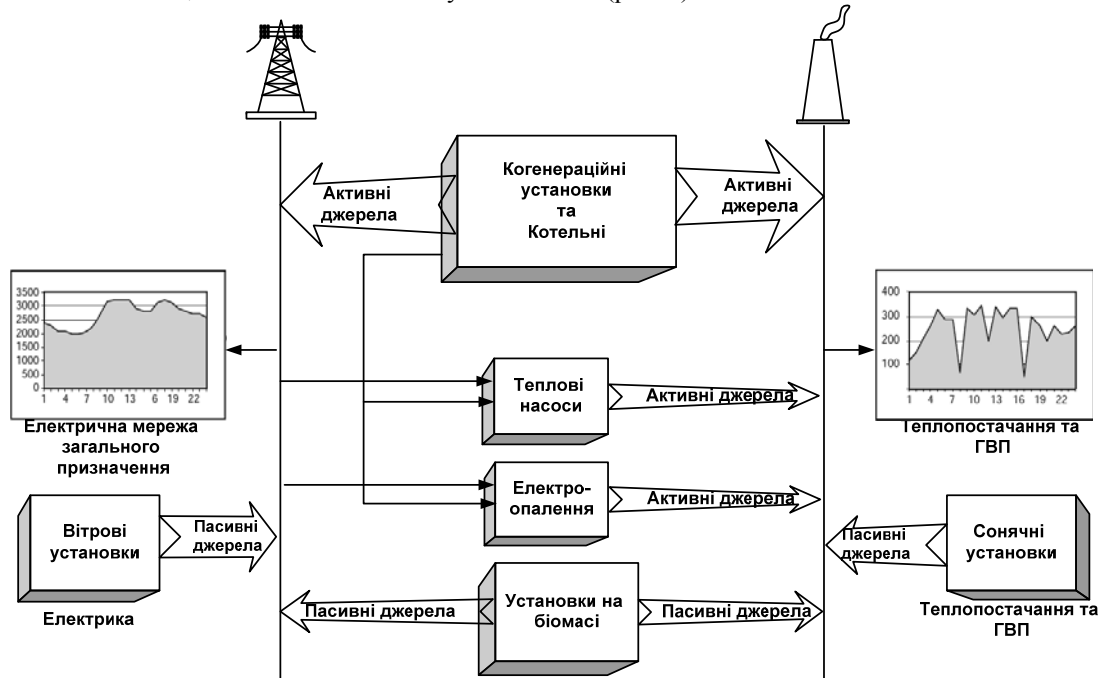


Рис. 7. Схематичне зображення енергетичного балансу території з використанням джерел розосередженої генерації

### Висновки

В даній роботі здійснено територіальну декомпозицію моделі відносно центру генерації, яка формується на базі алгоритмів кластер-аналізу з використанням різних метрик та критеріїв (питома щільність попиту на ГВП, опалення тощо). Цей підхід продемонстровано на рис.5, де показано один з реальних мікрорайонів міста.

Для забезпечення квазіоптимальної інтеграції автономних джерел генерації теплової та електричної енергії з об'єднаною енергосистемою, окрім описаного вище алгоритму, необхідно провести другий етап вибору оптимального варіанта декомпозиції району енергозабезпечення за критерієм відносних втрат.

Таким чином, в цілому буде забезпечено покращення функціонування створюваних інтегрованих систем енергозабезпечення шляхом вирівнювання графіків електричних та теплових навантажень.

Підсумовуючи зазначимо, що описаний вище алгоритм кластеризації за густинами попиту на опалення та на ГВП є однією із основних складових комплексного алгоритму побудови інтегрованих систем енергозабезпечення, визначеного в роботі «Обґрунтування нової стратегії та алгоритмів формування інтегрованих систем енергопостачання для забезпечення сталого розвитку територіальних громад» [13], який забезпечує оптимальну інтеграцію з об'єднаною енергосистемою, в цілому покращуючи її роботу шляхом вирівнювання графіків електричних та теплових навантажень, дозволяє об'єктивно визначити для обраної території (міста, району) перелік і параметри застосування джерел розосередженої генерації з використанням різних технологій. Даний алгоритм можна застосовувати для будь-якого району із його окремими особливостями, а отже він є універсальним.

### Література

1. Праховник А.В., Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. – Киев: «Освіта України», 2007. – 464 с.

2. Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. Report/ WEC, IASA, report, 1995, 110 p. Мировая энергетика будущего / Мировой Энергетический Совет – Документ МирЭс 2000, ETV, 2000, 172 с. (справочный перевод).
3. European SmartGrids Technology Platform/ European Commission. Directorate – General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040, 2006, 44 pp.
4. New ERA for electricity in Europe. Distribution generation: key issues, challenges and proposed solutions. – Directorate – General for research – 2003.
5. “Почему централизованное теплоснабжение?” Андерс Дюрелунд.
6. Либерман Н.Б., Нянковская М.Т. «Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения».
7. Copenhagen, Stockholm and Oslo ranked the greenest cities in Europe A report by Siemens, reviewed by Brian Baker.
8. Is District Energy Right For Your Community? Part3: Supporting Resources. Ken Church [www.cdea.ca](http://www.cdea.ca)
9. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: учебное пособие – Киев – 2008.
10. Expectation-maximization algorithm, <http://ru.wikipedia.org/wiki/EM-алгоритм>
11. “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise”, Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, XiaoweiXu. 2ndInternational Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). Institute for Computer Science, University of Munich, Germany.
12. SDL Component Suite, “Kohonen Network - Background Information”, [http://www.lohninger.com/helpcsuite/kohonen\\_network\\_background\\_information.htm](http://www.lohninger.com/helpcsuite/kohonen_network_background_information.htm). Accessed online March 13, 2007.
13. Праховник А.В., Попов В.А., Ковальчук А.М., Демиденко С.К., Савченко А.С. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір “Обґрунтування нової стратегії та алгоритмів формування інтегрованих систем енергопостачання для забезпечення сталого розвитку територіальних громад” № 30111 від 02-09-2009.