

5.3 Морфометрична оцінка нерівномірності графіка електричного навантаження

Традиційна оцінка нерівномірності графіка електричного навантаження (ГЕН) не завжди дозволяє достатньо інформативно характеризувати нерівномірність ГЕН, що потребує розробки нових методів, які би дозволяли здійснювати детальніший аналіз та будувати критерії для подальшого використання в системах управління навантаженням. Морфометрична оцінка успішно зарекомендувала себе в процесах аналізу геометричних параметрів об'єктів в різних наукових дослідженнях [264-268], в задачах електроенергетики морфометричний аналіз не використовувався.

Природа ГЕН дозволяє представити його у вигляді кругової часової діаграми – діаграми радарного типу (ДРТ). Таким чином фігура графіка утворює замкнений багатокутник певної форми. Якщо споживання є рівномірним то фігура являє собою коло. Морфометрія є відомим інструментом аналізу фігур різної форми і широко використовується для аналізу нерівномірності форми в ряді наук, зокрема в медицині, географії, аналізі поверхонь матеріалів. Його використання дозволяє отримати детальну та різносторонню оцінку нерівномірності, що і дозволило висунути гіпотезу про можливість його використання для аналізу нерівномірності ГЕН. Трансформацію ГЕН (рис.1), доцільно здійснити за допомогою діаграми радарного типу (ДРТ) [269-276] (рис. 2). Відстань від центру координат (x_0, y_0) до точки діаграми відповідає значенню потужності, що споживається в даний момент часу.

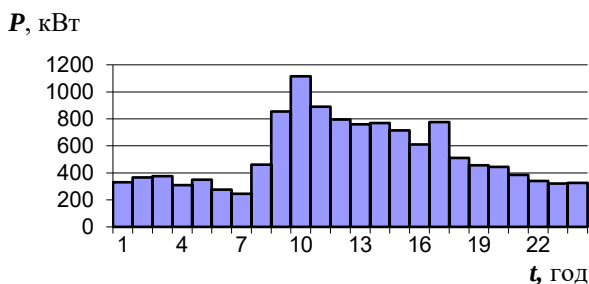


Рис.1. Типовий ГЕН

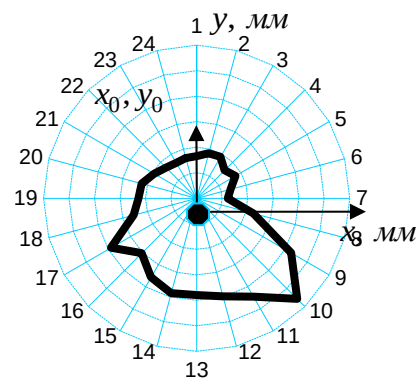


Рис. 2. ДРТ типового ГЕН

Основні морфометричні параметри [267], можна поділити на дві групи – базові та похідні, рис.3.

БАЗОВІ	ПОХІДНІ
1) X,Y координати	9) радіус вписаного, описаного кіл
2) периметр	10) довжина, ширина
3) площа	11) головна вісь видовження
4) координати центра ваги	12) додаткова вісь видовження
5) округлість	13) периметр випуклості
6) компактність	14) площа випуклості
7) видовження	15) компактність випуклості
8) випуклість	16) кут осей видовження

Рис. 3. Морфопараметри ДРТ

Розглянемо можливість оцінки нерівномірності ГЕН за допомогою базових морфопараметрів – номери 2,3,4,5,6,7,8 на рис.3.

Периметр ДРТ (P) – сума довжин відрізків, що формують ДРТ [280]:

$$P = \sum_{i=1}^{24} d_i = \sqrt{(x_{24} - x_1)^2 + (y_{24} - y_1)^2} + \sum_{i=1}^{23} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}. \quad (1)$$

Площа ДРТ (S) – площа багатокутника – фігури, що обмежена замкнутою ломаною без самоперетинів, що задана своїми вершинами в порядку обходу [280], обчислюється за формулою:

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{23} (x_i + x_{i+1})(y_i - y_{i+1}) \right|. \quad (2)$$

Координати центра ваги ДРТ,:

$$\begin{cases} x_y = \frac{\sum_{i=2}^{24} \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{2 \cdot (x_i \cdot y_{i-1} - x_{i-1} \cdot y_i)} \right)}{1,5 \cdot \sum_{i=1}^{24} (x_i \cdot y_{i-1} - x_{i-1} \cdot y_i)}; \\ y_y = \frac{\sum_{i=2}^{24} \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{2 \cdot (x_i \cdot y_{i-1} - x_{i-1} \cdot y_i)} \right)}{1,5 \cdot \sum_{i=1}^{24} (x_i \cdot y_{i-1} - x_{i-1} \cdot y_i)}. \end{cases} \quad (3)$$

Зміщення центра ваги ДРТ x_y, y_y відносно центра координат x_0, y_0 характеризує нерівномірність ГЕН, оскільки, коли ДРТ має форму кола (при рівномірному споживанні) то координати центра ваги і центра координат співпадають, в іншому випадку має місце зміщення координат центра ваги x_y, y_y відносно центру координат x_0, y_0 , що зростає з ростом нерівномірності, рис. 4:

$$d = \sqrt{(x_0 - x_y)^2 + (y_0 - y_y)^2}. \quad (4)$$

Зі зменшенням нерівномірності відбувається наближення форми ДРТ до кола та $d \rightarrow 0$. Тобто, d є мірою нерівномірності ДРТ, що реагує на будь-які піки чи провали ГЕН.

Округлість (M_1) визначається як відношення радіуса вписаного кола ДРТ до радіуса його описаного кола (рис. 4), центри кіл співпадають з центром ваги ДРТ:

$$M_1 = \frac{R_{\min}}{R_{\max}}, \quad (5)$$

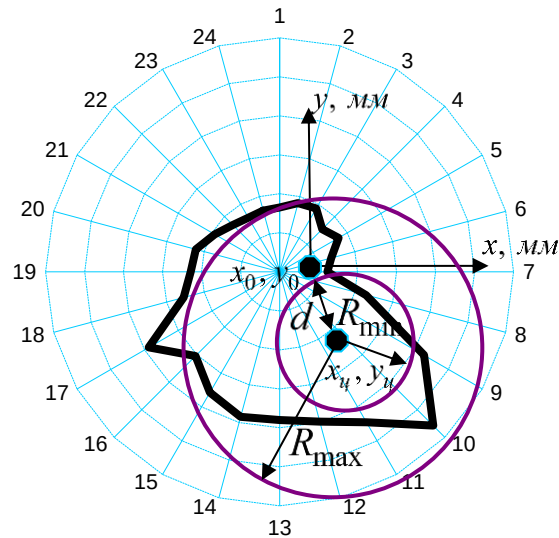


Рис. 4. Округлість ДРТ

де $R_{\min}$ – радіус вписаного кола ДРТ (рис. 2, рис. 4); $R_{\max}$ – радіус описаного кола ДРТ (рис. 2, рис. 4).

Якщо $R_{\min} \square R_{\max}$, то $M_1 \rightarrow 0$. Якщо $R_{\min} \approx R_{\max}$, то $M_1 \rightarrow 1$.

На рис. 5 представлено ГЕН та відповідну йому ДРТ, що дозволяє ілюструвати порівняльний аналіз M_1 та K_n . Як видно з рис. 4 M_1 надає детальну характеристику нерівномірності, що має певну аналогію з K_n , але на відміну від K_n характеристика M_1 є інтегральною, оскільки враховує не тільки одне мінімальне та максимальне значення, а їх множину зумовлену нерівномірністю ГЕН, оскільки координати центра вписаного та описаного кіл зміщені на величину d , що є мірою нерівномірності ДРТ, а радіуси кіл обмежені мінімальним та, відповідно, максимальним значенням радіусів, проведених з центра ваги фігури ДРТ.

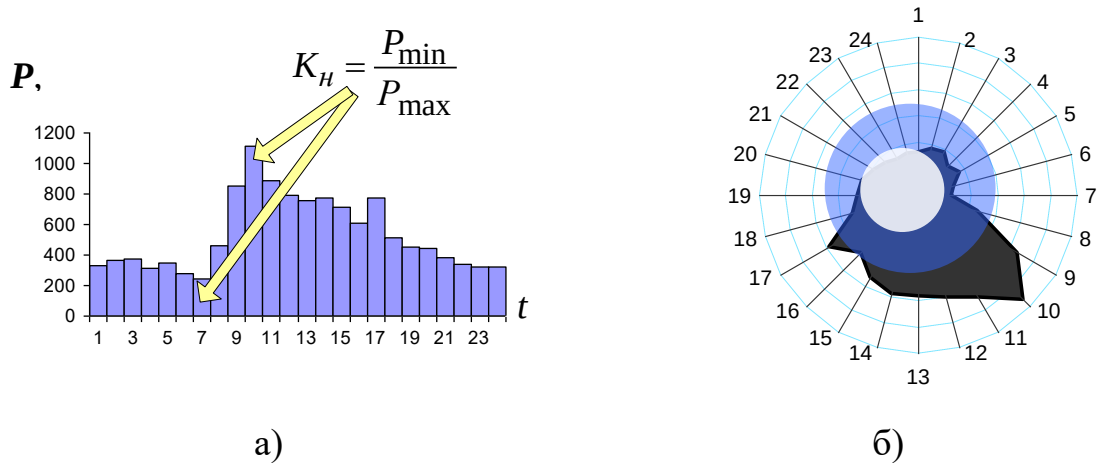


Рис. 5. Оцінювання ГЕН:

а) на основі визначення K_n ; б) на основі визначення M_1

Компактність (стисненість, нерозрихленість) (M_2) визначається як відношення між площею ДРТ і квадратом її периметру:

$$M_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{\Pi^2}. \quad (6)$$

В умовах значної нерівномірності ДРТ величина Π значно зростає при фактично незмінній величині S і, відповідно, $M_2 \rightarrow 0$. При рівномірному ГЕН ДРТ є колом, для якого $S = \pi R^2$, а $\Pi = 2\pi R$. Підставивши ці величини в формулу (6), отримаємо: $M_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot \pi \cdot R^2}{(2 \cdot \pi \cdot R)^2} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2} = 1$.

Порівняння величин M_2 та σ, K_ϕ з точки зору оцінки добової нерівномірності ГЕН наведено на рис. 6.

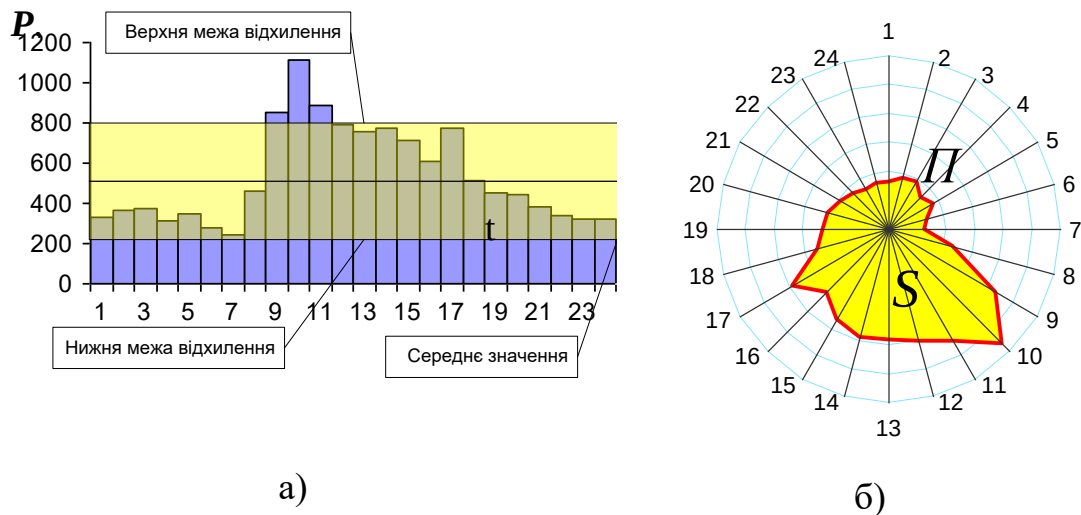


Рис. 2.6. Оцінювання ГЕН:

а) на основі визначення σ, K_ϕ ; б) на основі визначення M_2

Як видно з рис. 6. та на основі аналізу (3) – (5) величини σ, K_ϕ здійснюють характеристику нерівномірності на основі значень величин у певні моменти часу. При цьому ігноруються проміжні значення величини між моментами часу та характеристики зміни нерівномірності: спади чи рости, стрімкі чи розмірені перепади значень. На противагу їм величина M_2 , що визначається відношенням квадрата довжини профілю графіка (периметра ДРТ) до площі ДРТ дозволяє врахувати проміжні значення, здійснюючи лінійну апроксимацію та характер нерівномірності – більш стрімкі перепади значень призводять до росту величини Π

Видовження (M_3) визначається як відношення між значенням довжини перпендикуляра до головної осі діаграми (L_2) та значенням довжини головної вісі діаграми (L_1), рис. 7. Головна вісь визначається як найдовша вісь, що проходить через центр ваги ДРТ:

$$M_3 = \frac{L_2}{L_1}. \quad (7)$$

Якщо $L_2 \ll L_1$, то $M_3 \rightarrow 0$. Якщо $L_2 \approx L_1$, то $M_3 \rightarrow 1$.

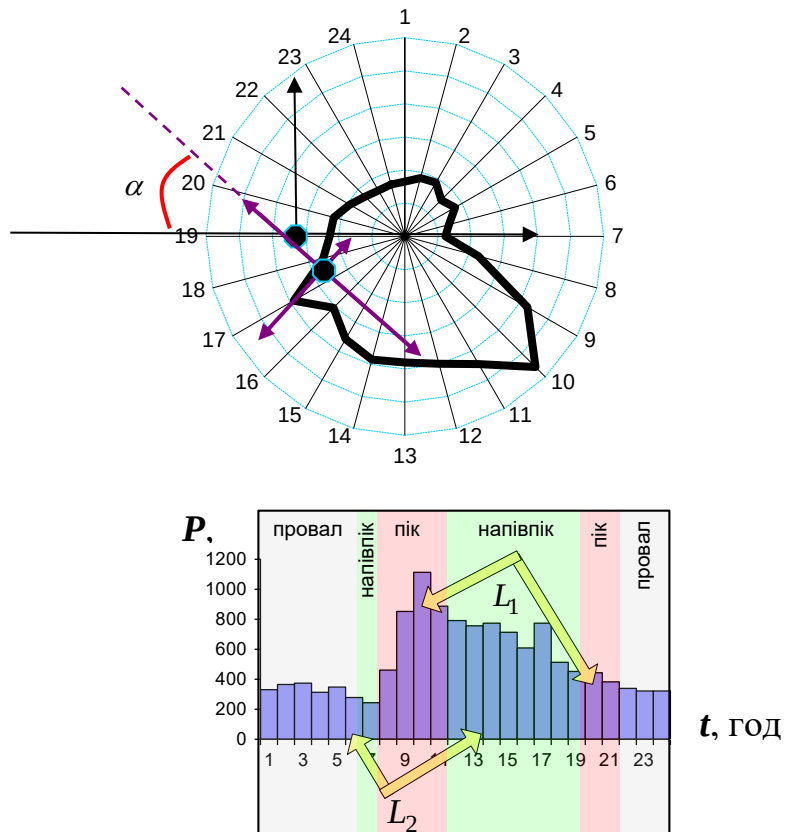


Рис. 7. Видовження ДРТ

На основі аналізу кута α можна визначити підприємства пік навантаження яких співпадає з піком навантаженням енергосистеми. У відповідності з рис. 7, 1 година складає $\frac{360}{24} = 15^\circ$ повороту основної осі ДРТ.

В загальному випадку, час зміщення пікового навантаження відносно 7-ї години ранку можна визначити наступним чином:

$$t = \frac{\alpha}{15}, \quad (8)$$

де α – кут осей видовження.

Якщо $t \in [1, 4] \vee t \in [13, 15]$ – наявне пікове навантаження в години пік енергосистеми. Якщо $t \in [16, 24]$ – наявне пікове навантаження в години нічного провалу енергосистеми. В інших випадках наявне пікове навантаження в години напівпіку енергосистеми.

Отже, в подальшому для застосування процедур управління навантаженням будемо використовувати промислові підприємства, що створюють пікове навантаження в години піку енергосистеми з метою вирівнювання їх ГЕН та, відповідно, ГЕН енергосистеми.

Випуклість (M_4) обчислюється як відношення між площею випуклого корпусу S_ϵ і площею ДРТ S . Прикладом випуклого корпусу може служити натягнута «гумова стрічка» навколо ДРТ, рис. 8:

$$M_4 = \frac{S_\epsilon}{S}. \quad (9)$$

Якщо $S_\epsilon \square S$, то $M_4 \rightarrow 0$. Якщо $S_\epsilon \approx S$, то $M_4 \rightarrow 1$.

P ,

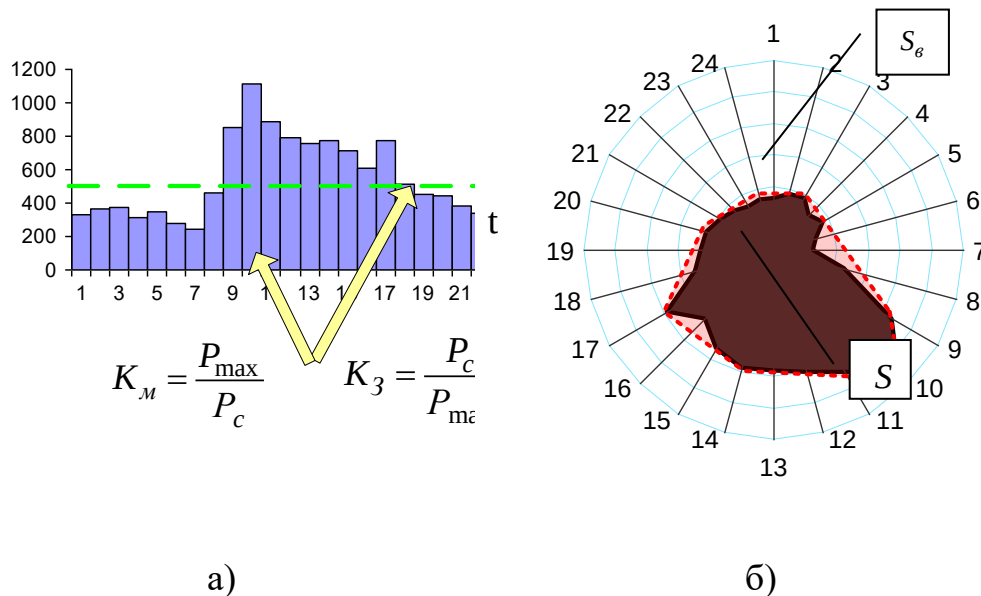


Рис. 8. Оцінювання ГЕН:

а) на основі визначення K_M, K_3 ; б) на основі визначення M_4

Визначення величин K_M, K_3 основане на відношенні максимуму навантаження до його середнього значення. На противагу K_M, K_3 величина M_4 є інтегральною, оскільки вона враховує не тільки одне максимальне значення, а їх множину визначену випуклою фігурою та зумовлену нерівномірністю ГЕН. Отже величина M_4 надає характеристику нерівномірності, що має певну аналогію з K_M, K_3 , але охоплює множину максимумів ГЕН, тому є більш широкою і точніше описує характер нерівномірності.

Таким чином морфопараметри M_1, M_2, M_3, M_4 доцільно використовувати для аналізу нерівномірності ГЕН, решту – при інших розрахунках характеристик процесу електроспоживання, враховуючи, що їх значення знаходяться в межах від нуля до одиниці. Якщо вони прямують до нуля, то нерівномірність ГЕН є значною. З наближенням їх до одиниці ГЕН є рівномірним.

Морфометричні параметри дають нові можливості для характеристики нерівномірності ГЕН. Вони характеризують форму ГЕН, відображаючи як загальну нерівномірність, так і співвідношення споживання електроенергії в різні години доби. На основі їх аналізу отримано висновок, що детальну комп'ютеризовану оцінку добової нерівномірності доцільно здійснювати із застосуванням власне морфометричних параметрів.

Отже, задля повного та детального аналізу форми ГЕН необхідно створити комплексний морфометричний критерій. Він дозволить здійснювати детальну оцінку нерівномірності, що в подальшому дасть можливість покращити процес споживання електроенергії.

Групуючи вибрані морфопараметри, отримаємо критерій оцінки нерівномірності ГЕН, що дозволить комплексно оцінювати нерівномірність ГЕН, характеризуючи при цьому:

- загальну добову нерівномірність ГЕН, динаміку і величину змін значень навантаження на основі параметра M_1 ;
- співвідношення споживання електроенергії, яке було б, якби споживач працював лише з заданими максимальними навантаженнями, з реальною величиною споживання електроенергії на основі параметра M_2 ;
- співвідношення між навантаженням у періоди нічного провалу/напівпіку та пікового навантаження, показуючи наближене співвідношення дешевої та дорогої спожитої енергії (згідно з диференційованим тарифом) на основі параметра M_3 ;
- детально загальну добову нерівномірність ГЕН, динаміку і величину зміни значень навантаження, як відношення всіх піків і провалів ДРТ на основі M_4 .

Комплексний морфометричний показник рівномірності ГЕН набуде наступного вигляду:

$$F = (M_1; M_2; M_3; M_4) \\ M_1, M_2, M_3, M_4 \in [0,1] \quad (10)$$

Він є вектором, координати якого характеризують нерівномірність ГЕН у відповідності з суттю відповідного морфометричного параметра. Якщо значення $F = (0,0,0,0)$, то ГЕН має значну нерівномірність, при $F = (1,1,1,1)$ має місце рівномірне споживання електроенергії протягом доби.

У даному показнику рівномірності ГЕН (10) M_1 спадає, найбільш реагуючи на збільшення кількості значних піків і провалів; M_2 спадає, найбільш реагуючи на збільшення локальних екстремумів; M_3 спадає, найбільш реагуючи на накладання симетричних (ДРТ) піків/провалів; M_4 спадає, найбільш реагуючи на збільшення незначних коливань або значні перепади значень. Тобто, в залежності від поставленої задачі ми можемо гнучко задавати межі, до яких прямує та чи інша складова критерію (10), що дозволяє більш чітко визначати цілі вирівнювання та здійснювати адекватну оцінку:

$$F = (M_1 \rightarrow a_1; M_2 \rightarrow a_2; M_3 \rightarrow a_3; M_4 \rightarrow a_4) \\ M_1, M_2, M_3, M_4 \in [0,1] \quad (11)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 – значення меж для кожного компонента критерію F , $a_1, a_2, a_3, a_4 \in [0,1]$.

Якщо, для прикладу, в нас є ГЕН з оцінкою нерівномірності $M_1 = 30\%, M_2 = 40\%, M_3 = 20\%, M_4 = 10\%$ і нас цікавить зменшення великих піків і провалів ГЕН на 5%, зменшення нерівномірності в цілому на 10%, зменшення співвідношення споживання пік /провал та напівапік на 15%, зменшення піків ГЕН на 20%, то (10) запишеться наступним чином:

$$F = (M_1 \rightarrow 0,35; M_2 \rightarrow 0,5; M_3 \rightarrow 0,35; M_4 \rightarrow 0,3). \quad (12)$$

Отже, спираючись на формули (10) та (11), доцільно утворити морфометричну математичну модель оцінки добової нерівномірності ГЕН та її об'єктно-орієнтовану реалізацію, що дозволяє здійснювати детальну оцінку нерівномірності та може бути легко інтегрована в сучасні системи управління виробництвом.

Об'єктно-орієнтоване програмування (ООП) дає змогу створювати моделі елементів систем як об'єктів згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу на засадах об'єктно-орієнтованої композиції з подальшим формуванням із цих об'єктів моделі системи в цілому. Особливої актуальності це набуває для моделювання СЕП та їх елементів і процесів, що відбуваються в них, зокрема ГЕН. Це дозволяє значно спростити процес створення комп'ютерних моделей систем, у яких задіяні складні, з точки зору математичного опису, елементи, адже користувач такої моделі оперуватиме нею як об'єктом, а не окремими рівняннями, які його описують [277–279].

Таким чином за допомогою підходів ООП створюємо морфометричну модель ГЕН та її об'єктно-орієнтовану реалізацію – клас **Графік**. Використовуючи термінологію ООП, модель об'єкта чи явища називається класом. Ієрархія спроектованого класу наведена на рис.11, його код, що ліг в основу відповідного програмного забезпечення.

Одним із найважливіших принципів ООП є абстрагування, яке полягає у виділенні абстракцій – важливих характеристик об'єкта або групи об'єктів, які відрізняють їх від усіх інших видів об'єктів, чітко визначаючи особливості цих об'єктів у перспективі їхнього подальшого розгляду, аналізу та моделювання. В теорії ООП абстрагування застосовується у формуванні класів, що описують типи об'єктів, операції, які можна здійснити з об'єктами, та операції, що їх можуть здійснити самі об'єкти.

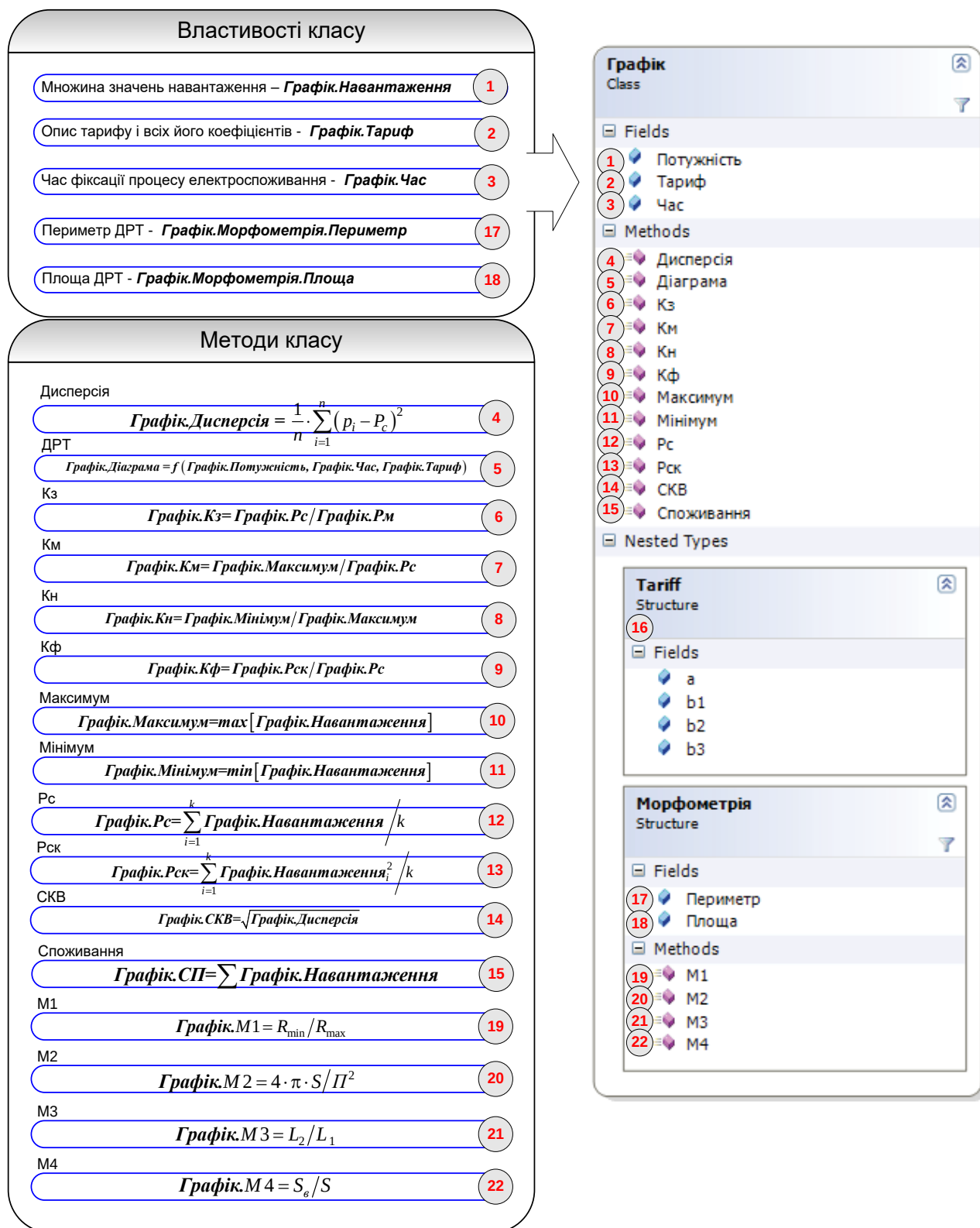


Рис. 11. Ієрархія класу Графік

Класи будують за ієрархічним принципом. Головним типом відношень між класами є успадкування (inheritance). Воно виникає тоді, коли один клас

(нащадок) використовує структуру чи функціональну частину одного або кількох інших класів (відповідно констатуються проста та множинна спадковості).

Стан об'єкта характеризують переліком усіх можливих його параметрів (властивостей) і їхніх значень. До параметрів об'єкта належать ті його характеристики, які роблять його унікальним (індивідуальним) і які в процесі функціонування об'єкта набувають певних значень.

Для прикладу розгортання класу на промисловому підприємстві розглянемо схему механічного цеху інструментального та ремонтного господарств картонно-руберойдового комбінату з інтеграцією засобів збору й аналізу інформації про електроспоживання – рис. 12.

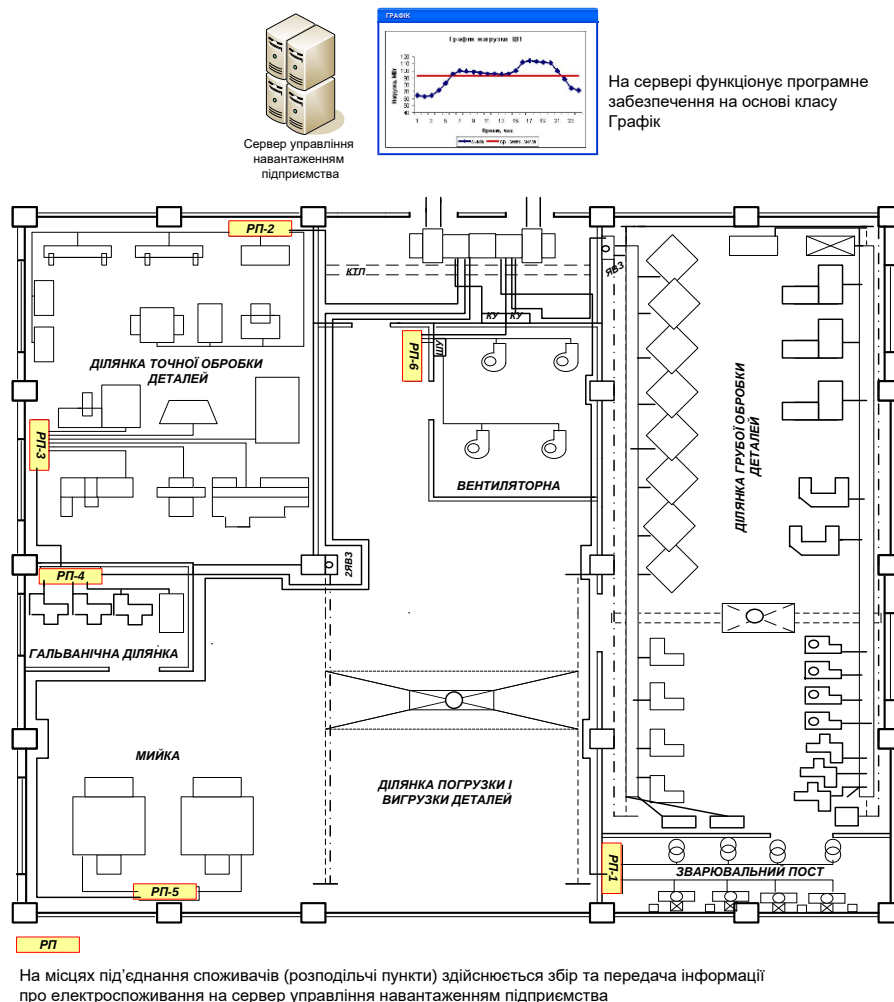


Рис. 12. Схема цеху

В класі **Графік** наявні ряд властивостей і методів. Здійснимо їх абстрагування і сформуємо його стан. Властивості класу дозволяють здійснити

загальний опис характеристик ГЕН, а методи – розрахувати показники його нерівномірності, як на основі класичного підходу, так і на основі морфометричного.

Варто зауважити, що клас **Графік** є базовим, і на його основі шляхом наслідування можна створити субкласи з базовими і розширеними методами та властивостями для моделювання графіків навантаження цехів, підрозділів та окремих споживачів електричної енергії промислових підприємств.

Для схеми (рис. 12) ієрархія структури класів набуде наступного вигляду – рис.13. У даній ієрархічній схемі класи мають вільний доступ до інформації, що міститься в кожному з них, що дозволяє здійснювати моделювання ієрархічних систем, та виконувати автоматичний перерахунок параметрів моделей в режимі реального часу. Крім цього, можливий доступ до будь-яких характеристик процесів операторів, що працюють з системою.

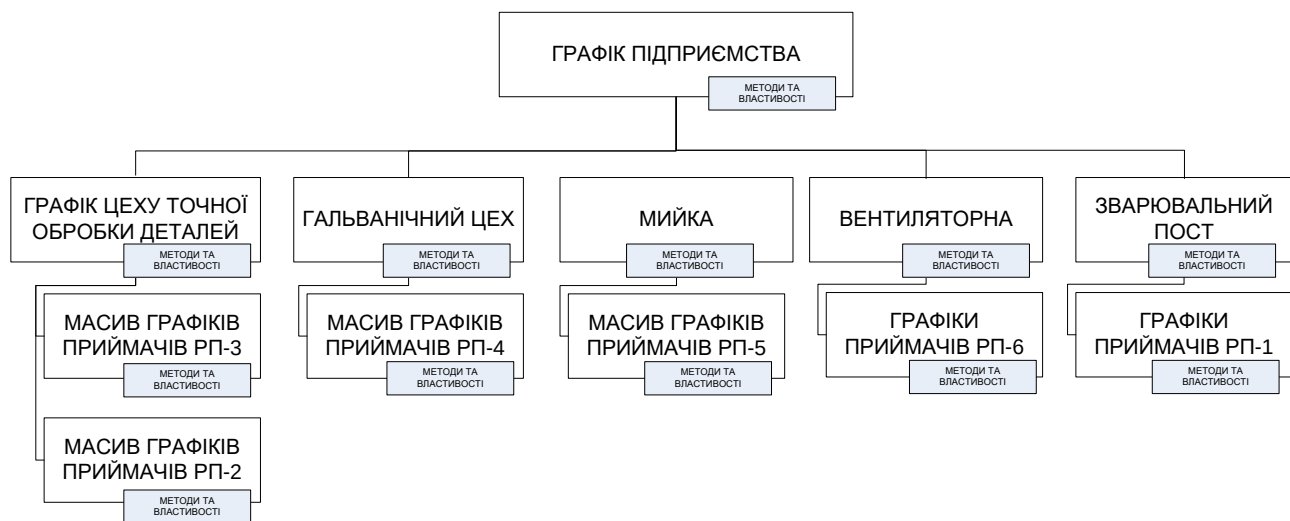


Рис. 13. Ієрархічна схема реалізації класу **Графік**

В об'єктно-орієнтованій моделі добового ГЕН виділимо ряд властивостей і методів, які описують стан і параметри процесу (табл. 1).

Таблиця 1. Властивості та методи класу Графік

Назва	Детальний опис
Графік.Час	Множина значень часу
Графік.Навантаження	Множина значень навантаження
Графік.Тариф	Опис тарифу і всіх його коефіцієнтів
Графік.Мінімум	Мінімум навантаження
Графік.Максимум	Максимум навантаження
Графік.Споживання	Добове споживання електричної енергії
Графік.Рс	Середнє значення навантаження
Графік.Рск	Середньоквадратичне значення навантаження
Графік.Дисперсія	Дисперсія навантаження
Графік.СКВ	Середньоквадратичне відхилення навантаження
Графік.Кф	Коефіцієнт форми
Графік.Км	Коефіцієнт максимуму
Графік.Кз	Коефіцієнт заповнення
Графік.Кн	Коефіцієнт нерівномірності
Графік.Діаграма	Діаграма радарного типу
Графік.Морфометрія	Морфометричні показники
Графік.Морфометрія.Периметр	Периметр
Графік.Морфометрія.Площа	Площа
Графік.Морфометрія.ЦентрВаги	Центр ваги діаграми радарного типу
Графік.Морфометрія.М1	Округлість
Графік.Морфометрія.М3	Видовження
Графік.Морфометрія.М4	Випуклість
Графік.Морфометрія.М2	Компактність
Графік. Критерій	Оцінка нерівномірності на основі (8)

Процес оцінки нерівномірності на основі класу **Графік** є доволі простим і в типових випадках виглядає наступним чином (рис. 14). Відбувається він за допомогою розробленого програмного забезпечення.



Рис. 14. Процес оцінки нерівномірності ГЕН

Дане програмне забезпечення дозволяє на основі отриманої інформації

розраховувати та аналізувати характер добової нерівномірності ГЕН технологічних агрегатів, виробничих цехів та промислового підприємства в цілому, що дозволяє отримати цілісну картину процесу електроспоживання та вдосконалити його.

Використання морфометричних показників дає можливість більш детально оцінювати добову нерівномірність навантажень СЕП промислових підприємств, порівняно із традиційними показниками.

Для оцінки нерівномірності ГЕН доцільно використати ряд морфометричних показників: округлість, компактність, видовження та випуклість. На відміну від традиційної оцінки, вони дозволяють отримати детальну характеристику нерівномірності, що дозволяє вивчати раніше не досліджувані закономірності процесів електроспоживання та більш гнучко управляти навантаженням СЕП.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що за допомогою традиційних показників не можливо оцінити відмінності різних за формою ГЕН у всіх можливих випадках. На противагу їм морфометричні показники надають детальну, розширену інформацію в усіх проаналізованих випадках, що дозволяє використовувати їх в якості критерію оцінки нерівномірності ГЕН, що надає унікальну характеристику для кожного окремого випадку.

Збільшення значних піків і провалів ГЕН призводить до зменшення округлості ДРТ; збільшення нерівномірності в цілому призводить до зменшення компактності ДРТ; ріст споживання в пік і спад споживання в провал/напівпік призводить до зменшення видовження; збільшення кількості піків призводить до зменшення випуклості.

Комп'ютеризовану оцінку добової нерівномірності варто здійснювати шляхом об'єктно-орієнтованої реалізації морфометричної моделі аналізу нерівномірності ГЕН, що дозволить створювати автоматичні системи управління навантаженням, інтегруючи їх у сучасні системи управління виробництвом.