

ПЕРЕВІРКА ПОДІБНОСТІ ТА ОДНОТИПНОСТІ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета публікації - різними способами перевірити однотипність і подібність добових графіків електричного навантаження окремо взятих приєднань промислових підприємств.

Застосовані ряд математичних і статистичних методів, способів визначення подібності та однотипності добових графіків електричного навантаження. Зроблено висновок про можливість застосування кожного з них для виявлення властивостей добових графіків електричного навантаження. Ці методи дозволяють також виявити подібність і однотипність не тільки добових, а й місячних, річних графіків електро- і енергоспоживання.

Ключові слова: електричне навантаження, добовий графік, теорія подібності, коефіцієнт подібності.

Вступ. Обробка експериментальних даних для однотипних графіків електричного навантаження (ГЕН) може дозволити вирішити проблему пошуку інтервалів часу, коли включений склад і режими роботи одиничних електроприймачів близькі. Як відомо, на одному і тому ж приєднанні добові ГЕН для однозмінного виробництва класифікуються як графік в робочий день (з понеділка по четвер), в передвихідний день (в п'ятницю) або передсвятковий день, у вихідний (святковий) день. Виявлення однотипних графіків навантаження дозволяє сформулювати підхід до вирішення декількох завдань, наприклад: формування статичної вибірки даних вимірювань комплексного навантаження для одного і того ж включеного складу одиничних електроприймачів або підбір оптимального заявленого графіка навантаження при покупці електроенергії на «Енергоринку».

Доцільно проводити угруповання або кластеризацію графіків електроспоживання за типами, але провести ці процедури неможливо без спеціального програмного забезпечення (ПО). Тому необхідно опрацювати питання використання таких методів перевірки подібності ГЕН, які не вимагають спеціального ПО і спеціальних знань математичної статистики в обслуговуючого персоналу.

Мета та задачі. Метою даної роботи є апробація різних способів визначення однотипних і подібних графіків електричних навантажень.

Матеріал і результати досліджень. Залежно від цілей пошуку однотипних графіків навантаження, можливо виділити декілька типів подібності часових рядів, схожих у часі, за формою, за структурою. У першому випадку ведеться пошук часових рядів, в яких особливі точки, а також інтервали спадання і зростання, близькі або точно відповідають один одному. Тоді близькі тимчасові ряди будуть відображати не тільки характерні особливості добового циклу споживання, але і містити в собі інформацію про включений склад електроприймачів і їх завантаженні в технологічному циклі, а також дії регулюючої автоматики і персоналу зі зміни параметрів електричного режиму. Саме такий тип подібності буде розглянуто далі. В якості вихідних даних для пошуку «схожих» добових графіків навантаження прийняті тимчасові ряди, що складаються з 24 погодинних значень або 48 півгодинних значень середньої на інтервалі часу активної та реактивної потужності. Для обробки і досліджень використовуються добові півгодинні графіки споживання активної та реактивної електроенергії за п'ять поспіль робочих днів ремонтного підприємства, яке працює в однозмінному режимі – 5 днів на тиждень з 7-30 до 16-30, перерва з 11-30 до 12-18. Як відомо, графіки електричних навантажень діляться на графіки звичайного робочого дня, передвихідного дня, вихідних та святкових днів.

Спершу доцільно виразити графіки навантаження в декартових або полярних координатах. Цей захід дозволить зафіксувати відміну графіка навантаження звичайних робочих днів від передвихідного дня. Щоб порівняти однотипність та подібність ГЕН на одному або декількох приєднаннях пропонується використовувати такі методи:

1. Метод розрахунку даних описової статистики і визначення показників графіка навантаження.
2. Метод визначення коефіцієнта подібності.

3. Розрахунок Евклідової відстані.
4. Визначення коефіцієнта кореляції.
5. Фазовий аналіз.

Дані електроспоживання записані в пам'яті електронного лічильника активної і реактивної електроенергії, встановленому на ввіді на силовий трансформатор 6 / 0,4 кВ. Облікові півгодинні дані електроспоживання в кВт зведені в табл. 1, в кВАр - в таблицю 2. У цих же таблицях наведені значення середньодобового навантаження, мінімального і максимального значення навантаження за добу, значення різних коефіцієнтів графіків навантаження.

Таблиця 1. Зведені півгодинні значення електроспоживання P на ввіді в кВт

Часовий інтервал	День тижня				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
0:00	9	9	9	10	11
0:30	10	9	9	10	11
1:00	10	9	9	10	11
1:30	9	9	9	10	11
2:00	10	10	10	10	11
2:30	10	9	9	10	11
3:00	10	10	9	10	11
... Дані подібні ...					
18:30	9	9	10	11	11
19:00	9	9	9	11	10
19:30	9	9	10	11	11
20:00	9	9	9	11	11
20:30	9	9	10	11	10
21:00	9	9	10	11	11
21:30	9	9	10	11	11
22:00	9	9	10	11	11
22:30	9	9	10	11	11
23:00	9	9	10	11	11
23:30	10	9	10	11	11

Таблиця 2. Зведені півгодинні значення електроспоживання Q на ввіді в кВАр

Часовий інтервал	День тижня				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
0:00	19	18	18	20	19
0:30	19	18	18	20	19
1:00	19	19	19	20	20
1:30	19	19	19	20	20
2:00	20	19	19	20	20
2:30	20	19	19	20	20
3:00	20	19	19	20	20
3:30	20	19	20	20	20
4:00	20	19	20	20	20
... Дані подібні ...					
17:30	17	17	19	18	18
18:00	17	17	19	18	18
18:30	17	16	18	17	18
19:00	17	16	18	17	17
19:30	17	16	18	17	17
20:00	17	17	19	17	17
20:30	17	17	19	17	18
21:00	17	17	19	18	18
21:30	17	17	19	18	18
22:00	18	17	19	18	18
22:30	18	17	20	18	19
23:00	18	18	20	19	19
23:30	18	17	20	19	19

1. Метод розрахунку даних описової статистики і визначення показників графіка навантаження.

Дані описової статистики, коефіцієнтів графіків активних навантажень зведені в табл. 3, а реактивних навантажень - в табл. 4.

Таблиця 3. Значення параметрів описової статистики, коефіцієнтів графіків активних навантажень на вводі

Часовий інтервал	День тижня				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
P_{cp}	23,1	21,6	18,5	19,9	18,3
$P_{срквдр}$	28,70	26,57	21,87	23,11	22,12
Ексцес	-1,5	-1,5	-1,0	-1,6	0,2
Асиметрія	0,6	0,6	0,8	0,5	1,4
$K_{ф=} = P_{срквдр}/P_{cp}$	1,24	1,23	1,18	1,16	1,21
$P_{макс}$	54,54	46,25	43,29	40,54	46,40
$P_{мин}$	9,00	8,85	9,05	9,30	10,20
$K_{м=} = P_{макс}/P_{cp}$	2,36	2,14	2,34	2,04	2,53
$K_3 = P_{cp}/P_{макс}$	0,42	0,47	0,43	0,49	0,40

Таблиця 4. Значення параметрів описової статистики, коефіцієнтів графіків реактивних навантажень на вводі

Часовий інтервал	День тижня				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
Q_{cp}	25,8	22,9	23,4	22,7	23,2
$Q_{срквдр}$	27,54	23,68	24,05	23,13	24,36
Ексцес	-0,1	-1,5	-1,4	-1,3	0,1
Асиметрія	1,0	0,5	0,6	0,5	1,3
$K_{ф=} = Q_{срквдр}/Q_{cp}$	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1
$Q_{макс}$	52,2	33,0	33,3	31,0	40,4
$Q_{мин}$	16,8	16,3	17,9	17,4	16,1
$K_{м=} = Q_{макс}/Q_{cp}$	2,0	1,4	1,4	1,4	1,7
$K_3 = Q_{cp}/Q_{макс}$	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6

Позначення в табл. 3 і 4:

P_{cp} і Q_{cp} – середньодобові значення півгодинних активної і реактивної потужності відповідно.

$P_{срквдр}$ і $Q_{срквдр}$ – середньоквадратичні значення півгодинних активної і реактивної потужності відповідно.

$P_{макс}$ і $Q_{макс}$ – максимальні значення півгодинних активної і реактивної потужності відповідно.

$P_{мин}$ і $Q_{мин}$ – мінімальні значення півгодинних активної і реактивної потужності відповідно.

$K_{ф}$ – коефіцієнт форми.

$K_{м}$ – коефіцієнт максимуму.

K_3 – коефіцієнт заповнення.

Визначення коефіцієнтів графіків електричних навантажень наведені в роботі [1].

Аналіз описової статистики, значень коефіцієнтів графіків навантажень (табл. 3 і 4) показав, що за їх допомогою неможливо виявити подібні графіки або графіки, які не подібні один одному.

2. Метод визначення коефіцієнта подібності.

У публікації [2] запропонований алгоритм методу розрахунку коефіцієнта подібності обраних добових графіків завантаження, який має наступний вигляд:

1. Обираються дві рівні за тривалістю добові вибірки.

2. Кожна добова вибірка ділиться на рівні (або не рівні) інтервали, число яких в загальному

випадку $24/\sqrt{n}$, де n - число значень в добовій вибірці.

3. Розраховується частота потрапляння добового графіка навантаження в кожен з інтервалів (кишень).

4. Підраховується загальне значення навантаження за кожен інтервал порівнюваних добових вибірок і за добу.

5. Розраховується коефіцієнт подібності як співвідношення загального значення навантаження на добу за обраними графіками навантаження до числа значень у вибірці.

Згідно даного алгоритму для вибірки активного навантаження визначена частота потрапляння навантаження в обрані інтервали (табл. 5).

Таблиця 5. Визначення частоти потрапляння активного навантаження в інтервали (кишені)

Кишені	Інтервали навантаження, кВт	Кількість значень, що потрапили в інтервал навантаження в кожен з днів тижня				
		1 доба	2 доба	3 доба	4 доба	5 доба
1	15,0	28	28	29	27	33
2	22,0	1	1	2	2	2
3	29,0	1	2	6	1	3
4	36,0	1	2	4	13	2
5	43,0	7	5	6	5	4
6	50,0	7	10	1	0	4
7	57,0	3	0	0	0	0

На підставі частоти потрапляння навантаження розраховане загальне число її значень в кожному інтервалі.

Таблиця 6. Розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленим графіками активного навантаження

	Число загальних інтервалів у добових графіках активного навантаження			
	1-2	1-3	1-4	1-5
Загальна кількість значень півгодинного навантаження K_0	43	38	35	39
Кількість півгодинних значень	48	48	48	48
$K_{\text{подібності}} = K_0/48$	0,9	0,79	0,73	0,81

Загальна кількість значень півгодинного навантаження в кожен інтервал між вибірками за першу та другу добу визначається згідно правила, описаного в роботі [3]. Інші дані в табл. 6 отримані аналогічно.

Дані табл. 6 показують, що коефіцієнт подібності не застосовують для виявлення подібних або однотипних добових графіків навантаження.

3. Розрахунок Евклідової відстані

Нехай $P_j = \{p_1, p_2, \dots, p_T\}$ і $Q_j = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$, $j \in N$ – добові тимчасові ряди активної і реактивної потужності, що містять T відліків за часом; N – кількість добових графіків навантаження. Значення часових рядів в кожен момент часу є одномірні речові змінні p_i і q_i , $i \in T$. Для зручності опису і виконання розрахунків в роботі [3] пропонується об'єднати добові тимчасові ряди активної і реактивної потужності:

$$D_j = P_j \cup Q_j = \{p_1, p_2, \dots, p_T, q_1, q_2, \dots, q_T\}.$$

Тоді $F(D_j, D_k)$, при $j \neq k$ і $k, j \in N$ є деяка функція, яка вимірює наскільки D_j відрізняється від D_k .

В якості функції $F(D_j, D_k)$ оцінки відмінності між добовими графіками навантаження використовується Евклідова відстань [3]:

$$F(D_j, D_k) = (\sum^T (p_{i,j} - p_{i,k})^2 + \sum^T (q_{i,j} - q_{i,k})^2)^{0,5}. \quad (1)$$

За формулою (1) розрахована Евклідова відстань для повної, активної і реактивної потужності в кВА, кВт, кВАр відповідно. Результати розрахунку зведені в табл. 7.

Таблиця 7 Результати розрахунку Евклідової відстані графіків повного навантаження F_n , активного навантаження F_a і реактивного навантаження F_p за перший день з графіками навантаження другого (1-2), третього (1-3), четвертого (1-4) та п'ятого (1-5) днів тижня.

F_n (1-2)	F_a (1-2)	F_p (1-2)	F_n (1-3)	F_a (1-3)	F_p (1-3)	F_n (1-4)	F_a (1-4)	F_p (1-4)	F_n (1-5)	F_a (1-5)	F_p (1-5)
42,7	21,2	37,0	66,4	53,5	39,3	67,4	47,3	48,1	91,2	78,6	46,2

Дані табл. 7 показують, що Евклідова відстань графіків повного навантаження F_p і активного навантаження F_p за перший день з графіками навантаження другого, третього, четвертого робочих днів тижня перебуває в межах $20 \div 70$ кВА. А Евклідова відстань графіків повного навантаження F_p і активного навантаження F_p за перший день з графіками навантаження п'ятого передвихідного робочого дня тижня перебуває в межах $75 \div 100$ кВА. Таким чином, такий параметр як Евклідова відстань доцільно застосовувати для перевірки однотипності добових графіків навантаження (але не подібності).

4. Визначення коефіцієнта кореляції.

Кількісною оцінкою ступеня подібності конфігурації розглянутих графіків навантаження можуть служити знак і величина відповідного коефіцієнта парної кореляції R [4]:

Результати визначення чисельних значень коефіцієнтів парної кореляції між графіками навантаження першого, другого, третього, четвертого і п'ятого робочих днів тижня один з одним зведені в табл. 8.

Таблиця 8 Значення коефіцієнтів кореляції графіка активного навантаження за перший день з графіками навантаження другого, третього, четвертого і п'ятого робочих днів тижня

Графік активного навантаження	Коефіцієнт кореляції				
	За перший день	За другий день	За третій день	За четвертий день	За п'ятий день
За перший день	1,00				
За другий день	0,99	1,00			
За третій день	0,98	0,96	1,00		
За четвертий день	0,98	0,97	0,96	1,00	
За п'ятий день	0,80	0,75	0,88	0,78	1,00

Аналіз показав, що коефіцієнт кореляції графіків активного навантаження звичайного робочого дня з передвихідним наочно показує однотипність і подібність (або їх відсутність) для різних добових графіків.

5. Фазовий аналіз.

Теорія проведення фазового аналізу розглянута в роботі [5]. Застосування фазового аналізу для контролю електроспоживання розглянуто в публікації [6].

За даними табл. 1 побудовані фазові портрети для активного навантаження за кожні з 5 діб. Фазовий портрет за перший, другий, третій і четвертий день тижня практично ідентичні. На рисунку представлені фазові портрети за перший і п'ятий дні тижня.

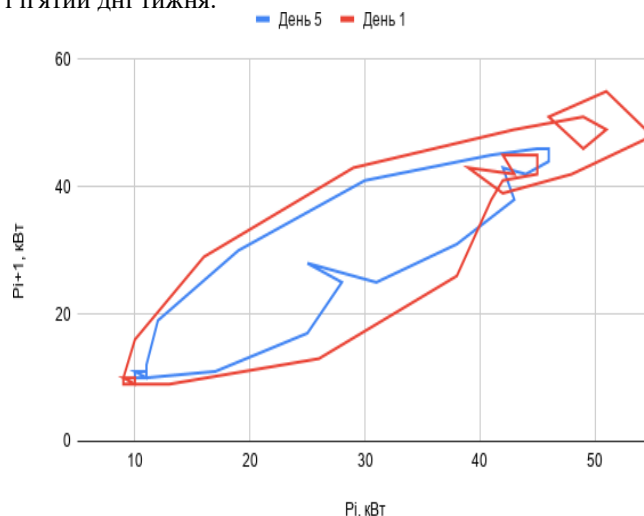


Рисунок Фазові портрети за 1 і 5 добу

Фазові портрети за понеділок і п'ятницю володіють великою схожістю (подібністю), але за допомогою них можна виявити типи графіків електричних навантажень. Таким чином, за результатами досліджень можна скласти табл.9.

Таблиця 9. Застосування математичних і статистичних методів, способів виявлення однотипності та подібності добових графіків електричного навантаження (плюс означає, що метод або спосіб можна застосовувати, а мінус ні)

Найменування методу (способу)	Виявлення однотипності	Виявлення подібності
Розрахунок показників графіків навантаження і розрахунку описової статистики	-	-
Визначення коефіцієнта подібності	-	-
Розрахунок Евклідової відстані	+	-
Визначення коефіцієнта кореляції вибірок добових графіків	+	+
Фазовий аналіз графіків навантаження	-	+

Евклідова відстань дозволяє визначити однотипність добових графіків навантаження, а фазовий аналіз - подібність. Коефіцієнт кореляції виявляє і те, і те. Однотипність і подібність можливо оцінити не тільки у добових графіках за різні дні тижня, а й певного добового графіка з еталонним (типовим).

Зазначені вище методи можуть бути застосовані для оцінки типовості або подібності не тільки графіків електричного навантаження, а й витрати інших енергоресурсів як добових, так і місячних або іншої тривалості.

Висновки

1. Досліджено застосовність різних математичних і статистичних методів, способів визначення однотипності або подібності добових графіків електричного навантаження. Зроблено висновок про те, що розрахунок Евклідової відстані дозволяє визначити однотипність добових графіків навантаження, а фазовий аналіз - подібність. Визначення коефіцієнта кореляції виявляє і однотипність, і подібність добових графіків.
2. Однотипність і подібність можливо оцінити не тільки у добових графіках за різні дні тижня, а й певного добового графіка з еталонним (типовим).
3. Даний метод доцільно поширити не тільки на добові вибірки електроспоживання, а й на вибірки іншої тривалості у часі (місячні, річні).
4. Запропонований спосіб визначення коефіцієнта подібності добових графіків навантаження можливо використовувати для графіків витрат різних енергоресурсів.

Список літератури

1. Бурбело М. Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання / М. Й. Бурбело – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 122 с.
2. Волошко А. В. Застосування теорії подібності для контролю електроспоживання промислових підприємств / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, В. В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2020. – № 4. – С. 78 – 83.
3. Тавлинцев А.С. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов, Е.Д. Стаймова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 20–27.
4. Диха М. В. Економетрія: навчальний посібник / М. В. Диха, В. С. Мороз. – К. : «Центр учбової літератури», 2016. – 206 с.
5. Сергеева Л.Н. Моделирование поведения экономических систем методами нелинейной динамики (теории хаоса) / Л.Н. Сергеева. – Запорожье: ЗГУ, 2002. – 227 с.
6. Бедерак Я.С. Контроль нагрузки в почасовом суточном графике промышленного предприятия в условиях работы в Энергорынке / Я. С. Бедерак // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб. // Промелектро. – 2020. – №1. – С. 28–39.

A.V. Voloshko, Ph.D. Sciences, Prof., ORCID 0000-0003-3337 - ****;
National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky,
J.S. Bederak, Ph.D. tech. Sciences, ORCID 0000-0002-2669-0965,
Private Joint Stock Company "AZOT" Cherkasy
V.V. Shevchuk, graduate student, ORCID 0000 0003-0535-2630
National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky,

VERIFICATION OF SIMILARITY AND SIMILARITY OF DAILY SCHEDULES OF ELECTRIC LOADING OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

The purpose of the study in this paper is based on a detailed analysis of various mathematical and statistical methods for determining the similarity and uniformity of daily schedules of electrical load to form an approach to solving several important tasks. Namely, method of forming a static sample of complex load measurement data for the same included composition of single electrical receivers, selection of the optimum declared schedule of electric loading at purchase of the electric power on "Energorinka", as well as solving other similar tasks, all this in general requires effective clustering of graphs.

Due to the fact that daily schedules of electrical load are divided into working days, pre-weekend, pre-holiday and weekend in this paper it is proposed to express the data of electric load graphs in Cartesian or polar coordinates. This allowed us to record the difference between the daily schedule of electrical load on normal working days from the day before.

The efficiency of application of these methods of search of identical and similar daily schedules of electric loading was analyzed by allocation of several basic types of similarity of time series, similar: in time, on the form, on structure.

It is shown that the calculation of the Euclidean distance allows to determine the uniformity of daily load graphs. And phase analysis is their similarity. The most acceptable method is to determine the correlation coefficient, which reveals the similarity and similarity of daily schedules of electrical load.

Key words: *electric load, daily schedule, similarity theory, similarity coefficient.*

References

1. Burbelo M.Y. Calculation of internal power supply / M.Y. Burbelo - Vinnytsia: VNTU, 2017. - 122 p.
2. Voloshko A.V. Application of similarity theory for control of electrical consumption of industrial enterprises / A.V. Voloshko, J.S. Bederak, V.V. Shevchuk // *Energy: economics, technologies, ecology*. - 2020. - № 4. - P. 78 - 83.
3. Tavlintsev A.S. Search for the same type of load graphs of the energy object / .A.S. Tavlintsev, A.A. Suvorov, E.D. Staymova // *Vestnik YuUrGU. Energy series*. - 2018. - Vol. 18, № 2. - P. 20–27.
4. Dykha M.V. *Econometrics: textbook* / M.V. Dykha, V.S. Moroz. - Kyiv: Center for Educational Literature, 2016. -206 p.
5. Sergeeva L.N. *Modeling of behavior of economic systems by methods of nonlinear dynamics (chaos theory)* / L.N. Sergeeva. - Zaporozhye: ZGU, 2002. - 227 c.
6. Bederak J.S. Load control in the hourly daily schedule of an industrial enterprise in working conditions in the Energy Market / J.S. Bederak // *"Industrial power engineering and electrical engineering" Promelectro: inform. zb.* // *Promelectro*. - 2020. - №1. - P. 28–39.

Надійшла 10.11.2021
Received 10.11.2021