

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 519.233.6:621.314.212

А.В. Волошко, д-р. техн. наук, ORCID 0000-0003-3337-****,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Я.С. Бедерак, к.т.н, пров. інженер ПАК «АЗОТ», ORCID 0000-0002-2669-0965

В.В. Шевчук, аспірант, ORCID 0000-0003-0535-2630

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета публікації - використати методи теорії подібності для контролю електроспоживання на промислових підприємствах. На підставі п'ятого додаткового положення теорії подібності запропоновано застосувати стохастичні характеристики добових графіків електричного навантаження трансформаторних підстанцій. Розроблено наближений метод розрахунку коефіцієнта подібності як добових графіків електричного навантаження один з одним, так і обраного добового графіка з заявленим графіком на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку». Такий метод можливо використовувати на вибірках витрат різних енергоресурсів.

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

Вступ. З 01.07.2019 р запроваджено продаж електроенергії на промислових підприємствах (ПП) на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку» [1], що вимагає постійного контролю електроспоживання з боку електрослужби підприємства.

Електроенергію ПП купують або у Оператора ринку, або на біржі.

Ціна електроенергії для промислового підприємства C розраховується за формулою [2]:

$$C = x \cdot p + (x - pr) \cdot p_+ \cdot I_{(x-pr)>0} + (pr - x) \cdot p_- \cdot I_{(x-pr)<0} + P + Y,$$

де x - фактичне споживання електроенергії підприємством за годину, кВтг; pr - заплановане споживання підприємства, кВтг; p - ціна на електроенергію на ринку на добу вперед, грн / кВтг; p_+ - ціна на електроенергію на ринку при перевищенні фактичного споживання над запланованим, грн / кВтг; p_- - ціна на електроенергію на ринку при перевищенні запланованого споживання над фактичним, грн / кВтг; P - втрати електроенергії на підприємстві між межею балансового розділу та місцем установки приладів обліку, кВтг; Y - вартість послуг постачальника електроенергії, грн; I - функція Хевісайда ($I = 0$ при $x-pr < 0$ і $I = 1$ при $x-pr \geq 0$ для виразу з p_+ ; $I = 1$ при $x-pr < 0$ і $I = 0$ при $x-pr \geq 0$ для виразу з p_-).

Купівля електроенергії на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку» має ряд особливостей:

1. Якщо електроенергії погодинно замовлено більше, ніж спожито, то неспожиту електроенергію викупають у ПП за ціною набагато меншою, ніж замовило її підприємство заздалегідь.

2. Якщо електроенергії погодинно замовлено менше, ніж спожито, то необхідну додаткову електроенергію купують за ціною в кілька разів більше, ніж замовило її ПП спочатку.

Таким чином, споживачі електроенергії стикаються з двома видами небалансу:

1. Позитивний небаланс – якщо обсяг спожитої електричної енергії споживачем є меншим, ніж замовлений у постачальника. У такому випадку Оператор ринку викупить у постачальника неспожиту електричну енергію, але дешевше, ніж ціна закупівлі. Таким чином, споживач заплатить за електричну енергію, яку не витратив.

2. Негативний небаланс – якщо обсяг спожитої електричної енергії споживачем більший, ніж замовлений у постачальника.

У цьому випадку постачальник буде зобов'язаний купити електричну енергію, яка була витрачена більше замовленого обсягу. Ціна буде вище, ніж ціна закупівлі. Зрозуміло, що такі витрати постачальник буде переводити на споживача, який допустив небаланс.

Задля уникнення таких ситуацій особливу роль відіграє контроль погодинного добового електроспоживання на підприємстві.

Графіки навантаження по своїй суті є реалізацією випадкових процесів, тому для їх аналізу та порівняння найбільш підходять критерії стохастичної подібності [3]. Це відноситься до п'ятого, додаткового положення про подібність імовірнісних об'єктів, коли критерії подібності утворюються з числових характеристик змінних випадкових процесів [4].

За отриманими значеннями статистичного ряду будується залежність щільності розподілу випадкової величини. Критерії подібності, отримані в результаті обробки випадкових величин, також носять ймовірні ознаки і повного збігу оцінок бути не може. В цьому випадку слід розглядати їх з точки зору ймовірності подібності. При повному збігу критеріїв подібності π фігури щільності розподілу $f(\pi)$ (рис. 1) для об'єктів порівняння мають повний збіг і загальна площа має максимальну величину [3]. Можливо прийняти за $f(\pi)$ графік електричного навантаження. Кожен погодинний графік електричного навантаження за певну добу як об'єкт порівняння характеризується середнім арифметичним значенням 24 погодинних значень m (математичним очікуванням) і середньоквадратичним відхиленням σ за той же період часу.

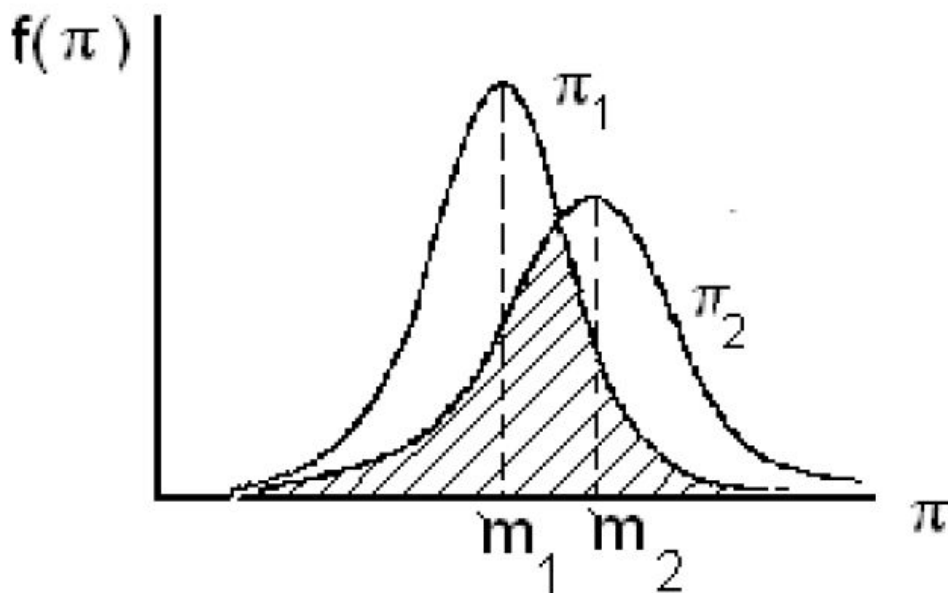


Рисунок 1 – Щільності розподілу оцінок подібності π_1 і π_2 порівнюваних графіків електричних навантажень за різних період часу

При неповній (імовірнісній) подібності ймовірність подібності визначається як відношення загальної, що збігається, площі фігур до площі однієї з них. В якості критеріїв подібності на приєднаннях силових трансформаторів можливо використовувати як коефіцієнт завантаження, так і погодинні усереднені значення потужності за кожну годину доби.

Мета та задачі. Метою даної роботи є апробація використання методів подібності для контролю погодинних добових графіків електроспоживання промислового підприємства (ПП) в умовах купівлі електроенергії на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку».

Матеріал і результати досліджень. Для застосування методів теорії подібності використовуються добові вибірки (графіки електричної завантаження) з інтервалом опитування 1 година на введенні 6 кВ силового трансформатора тип ТДН-10000/110/6, встановленого на підстанції 110/6 кВ для електропостачання насосної станції очистки промислових стічних вод обласного центру. Облік електроенергії забезпечується електронним лічильником електроенергії. Облікові середньогодинні дані за 7 днів листопада місяця 201... року зведені в табл. 1. У цій само таблиці наведені значення

середньодобового навантаження, середнє відхилення СКО, мінімального і максимального значення навантаження P на добу за ті самі періоди часу.

Таблиця 1 – Зведені погодинні значення електроспоживання P на введенні трансформатора ТДН 10000/110 в кВт

Часовий інтервал	День тижня						
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота	Неділя
1	2	3	4	5	6	7	8
0 - 1	2188	2216	2196	2190	2164	2279	2256
1 - 2	2174	2207	2180	2203	2155	2255	2246
...
10 - 11	2188	2233	2196	2176	2216	2316	2285
11 - 12	2189	2238	2204	2216	2204	2325	2278
12 - 13	2190	2219	2220	2194	2207	2299	2276
...
21 - 22	2237	2224	2233	2221	2310	2258	2255
22 - 23	2219	2219	2206	2183	2305	2266	2230
23 - 24	2216	2210	2239	2190	2309	2275	2210
Споживання за добу, кВт год	52725	53248	53001	53027	53336	54954	54038
Середнє значення за добу P , кВт	2196,9	2218,7	2208,4	2209,5	2222,3	2289,8	2251,6
СКО, кВт	25,8	13,6	24,8	24,0	42,2	19,7	18,3
Мінімальне значення P , кВт	2153	2196	2168	2176	2155	2255	2210
Максимальне значення P , кВт	2237	2242	2270	2246	2310	2325	2288

Щоб визначити подібність добових графіків навантаження, необхідно розрахувати щільність розподілу, але по 24 значенням це зробити складно. Тому пропонується наступний метод.

Для визначення числа інтервалів (кишень) необхідно поділити кожен добову вибірку з 24 значень на \sqrt{n} , де n -число значень в добовій вибірці. Для розглянутого випадку необхідно поділити всю вибірку на $\sqrt{24}$ (≈ 5) інтервалів (кишень), починаючи з мінімального значення з усіх мінімальних значень добових вибірок і закінчуючи максимальним значенням з усіх максимальних значень. Тоді значення кишень будуть наступні: 2190; 2225; 2260; 2295; 2325. Після цього з'являється можливість розрахувати ступінь подібності двох або декількох графіків один з одним, використовуючи функцію «ЧАСТОТА» в програмі «Microsoft Excel» (табл. 2).

Таблиця 2 – Визначення частоти потрапляння навантаження в інтервали (кишені)

Кишені	Інтервали навантаження, кВт	Кількість значень навантаження, що потрапили в інтервал в кожен з днів тижня						
		1 доба	2 доба	3 доба	4 доба	5 доба	6 доба	7 доба
1	<2190	14	0	6	9	4	0	0
2	2190-2225	5	16	13	8	11	0	1
3	2225-2260	5	8	4	7	5	2	17
4	2260-2295	0	0	1	0	1	10	6
5	2295-2325	0	0	0	0	3	12	0

Далі необхідно порахувати загальну кількість значень навантаження в кожному інтервалі. Це дозволить наближено визначити коефіцієнт подібності між добовими графіками навантаження (табл. 3). Якщо на введенні заявлена потужність для роботи в «Енергоринку» прийнята наприклад за 2200 кВт, то

можливо також отримати значення коефіцієнта подібності $K_{\text{подібності}}$ обраного добового графіка з заявленим (наприклад, за першу добу з заявленим 1-3 або за другі з заявленим 2-3).

Таблиця 3 – Розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження

-	Число загальних інтервалів у добових графіках навантаження							
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-3	2-3
Загальна кількість значень погодинного навантаження K_o	10	15	19	14	2	6	5	16
Кількість погодинних значень	24	24	24	24	24	24	24	24
$K_{\text{подібності}} = K_o/24$	0,42	0,63	0,79	0,58	0,08	0,25	0,21	0,67

Загальна кількість значень погодинного навантаження в кожен інтервал між вибірками за першу та другу добу визначається наступним чином: в перший інтервал (кишень) перевіряється кількість загальних значень по табл. 2 (у першого графіка їх 14, у другого 0, загальна кількість - 0); в другий інтервал виконується та ж процедура (у першого графіка 5, у другого 16, загальна кількість - 5); в третій інтервал (у першого графіка 5, у другого 8, загальна кількість - 5); в четвертий і п'ятий інтервали по 0. Таким чином, загальна кількість значень навантаження, що потрапили в добову вибірку, між першими і другими цілодобово - 10). Інші дані в табл. 3 отримані аналогічно.

У таблиці наведено також значення коефіцієнтів подібності.

При бажанні збільшити точність при розрахунку коефіцієнтів подібності необхідно збільшити кількість інтервалів навантаження (кишень). У табл. 4 наведено розрахунок частоти потрапляння навантаження в 9 інтервалів (кишень).

Таблиця 4 – Визначення частоти попадання навантаження в 9 інтервалів (кишень)

Кишені	Інтервали навантаження, кВт	Кількість значень навантаження, що потрапили в інтервал в кожен з днів тижня						
		1 доба	2 доба	3 доба	4 доба	5 доба	6 доба	7 доба
1	<2190	14	0	6	9	4	0	0
2	2190-2207,5	1	5	7	3	6	0	0
3	2207,5-2225	4	11	6	5	5	0	1
4	2225-2242,5	5	8	3	4	4	0	6
5	2242,5-2260	0	0	1	3	1	2	11
6	2260-2277,5	0	0	1	0	1	6	3
7	2277,5-2295	0	0	0	0	0	4	3
8	2295-2312,5	0	0	0	0	3	9	0
9	2312,5-2325	0	0	0	0	0	3	0

У табл. 5 наведено розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження при розподілі графіка навантаження на 9 інтервалів.

Таблиця 5 – Розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження при розподілі графіка навантаження на 9 інтервалів

-	Число загальних інтервалів у добових графіках навантаження							
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-3	2-3
Загальна кількість значень погодинного навантаження K_o	10	14	18	13	0	6	1	5
Кількість погодинних значень	24	24	24	24	24	24	24	24
$K_{\text{подібності}} = K_o/24$	0,42	0,58	0,75	0,54	0,00	0,25	0,04	0,2

Чим більша кількість інтервалів, тим точніше можливо визначити коефіцієнт подібності.

Таким чином, алгоритм роботи методу розрахунку коефіцієнта подібності обраних добових графіків навантаження має наступний вигляд:

1. Обираються дві рівні за тривалістю добові вибірки.
2. Кожна добова вибірка ділиться на рівні (або не рівні) інтервали, число яких \sqrt{n} в загальному випадку, де n - число значень добової вибірки.
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.

Необхідно відзначити, що запропонований метод дозволяє визначити ступінь подібності не тільки двох або декількох добових погодинних або півгодинних графіків електричного навантаження один з одним, але і місячних добових, річних щомісячних.

Такий метод можна застосовувати також для різних графіків споживання енергоресурсів, як добових, так і з іншою тривалістю у часі.

Висновки

1. Вперше застосований метод теорії подібності для контролю погодинних добових графіків електроспоживання промислового підприємства, який дозволяє визначити ступінь подібності двох або декількох графіків електричного навантаження один з одним або з заявленим на «Енергоринку» графіком, або з еталонним. Визначення ступеня подібності різних графіків може бути корисним для контролю якості роботи технологічного або виробничого персоналу.

2. Розроблено алгоритм розрахунку коефіцієнта подібності кількох обраних добових графіків навантаження один з одним або з заявленим на «Ринку подового наперед і внутрішньодобового ринку» графіком навантаження, або з еталонним графіком.

3. Даний метод при необхідності можливо поширити не тільки на добові вибірки електроспоживання, а й на вибірки іншої тривалості у часі (місячні щодобові, річні щомісячні).

4. Запропонований спосіб визначення коефіцієнта подібності добових графіків навантаження можливо поширити і на вибірки витрат інших енергоресурсів, вироблення продукції.

Список використаної літератури

1. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Затверджені Постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 308 (у редакції постанови НКРЕКП від 24.06.2019 № 1169).

2. Трофимова В.Ш., Ліпатніков А.В. Розробка методики планування погодинного споживання електричної навантаження великим металургійним підприємством. Вісник МГТУ ім. Г. І. Носова. 2014. №3. С. 57-62.

3. Камінський А.В. Застосування методів теорії подібності для аналізу роботи трансформаторних підстанцій. Інтернет-журнал «наукознавство». Том 7, №2 (2015).

URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf> (доступ вільний). DOI: 10.15862 / 45TVN215 (дата Звернення 24.12.2020).

4. Веніков В.А. Теорія подібності і моделювання. Москва: Вища школа, 1976. 480 с.

A. Voloshko, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-3337-****,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
J. Bederak, Ph.D. tech. Science, **ORCID** 0000-0002-2669-0965
lane engineer of PJSC "NITROGEN"
V. Shevchuk, PhD – student, **ORCID** 0000-0003-0535-2630
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF THE THEORY OF SIMILARITY TO CONTROL ELECTRIC CONSUMPTION INDUSTRIAL ENTERPRISES

The purpose of the publication is to use the methods of the similarity theory to control power consumption in industrial enterprises. On the basis of the fifth additional provision of the theory of similarity, it is proposed to apply the stochastic characteristics of the daily graphs of the electrical load of transformer substations. An approximate method for calculating the coefficient of similarity of both daily schedules of electrical load with each

other and the selected daily schedule with the declared schedule on the "Daily market in advance and intraday market" has been developed. This method can be used when choosing the consumption of various energy resources.

Keywords: *electrical load, daily schedule, theory of similarity, coefficient of similarity.*

REFERENCES

1. The rules of the market are "do it ahead" and the internal market is similar. Approved by the Resolution of the NKREKP dated March 14, 2018 No. 308 (at the editorial office of the NKREKP Resolution dated June 24, 2019 No. 1169).
2. Trofimova V.Sh., Lipatnikov A.V. Development of a methodology for planning the hourly consumption of electrical load by a large metallurgical enterprise. Vestnik MGTU im. G.I. Nosov. 2014. No. 3. S. 57–62.
3. Kaminsky A.V. Application of similarity theory methods for analyzing the operation of transformer substations. Online magazine "Science". Volume 7, No. 2 (2015).
URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf> (free access). DOI: 10.15862 / 45TVN215 (date 24.12.2020).
4. Venikov V.A. Similarity theory and modeling. Moscow: Higher School, 1976.480 p.

Надійшла 15.12.2020
Received 15.12.2020