

Бедерак Ярослав Семенович, к.т.н., начальник лабораторії цеху електропостачання Приватного акціонерного товариства «АЗОТ», +38(096)036-66-82, yaroslav0768@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2669-0965

ПрАТ «АЗОТ»

вул. Героїв Холодного Яру, 72, м. Черкаси, 18028, Україна

Семко Інга Борисівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехнічних систем, +38(096)410-06-91, semkoinga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6251-5830

Черкаський державний технологічний університет

б-р. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

Ткаченко Валентин Федорович, к.т.н, завідувач кафедри електротехнічних систем, доцент, +38(067)416-89-47, tkachvf@gmail.com, ORCID ID: 000-0001-6290-2286

Черкаський державний технологічний університет

б-р. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСПЕРСІЙНОГО І КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СПОЖИВАЧІВ

Анотація. У статті розглянуто сфери застосування дисперсійного та кореляційного аналізу для дослідження добових графіків електричного навантаження споживачів електроенергії із використанням однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), кореляційного аналізу Пірсона, критерію Шапіро-Вилка (перевірка нормальності) та Левена (перевірка гомогенності дисперсії). Розроблено алгоритм застосування дисперсійного й кореляційного аналізу та проведено дослідження, які виявили часткове використання критеріїв дисперсійного аналізу для оцінки масивів даних електроспоживання на приєднаннях споживачів. Результати дослідження доводять доцільність застосування дисперсійного та кореляційного аналізу графіків електричних навантажень приєднань промислових підприємств для підбору оптимального заявленого графіку навантаження при купівлі електроенергії на «Ринку на добу наперед» або балансувальному ринку.

Ключові слова: електричне навантаження, добовий графік, подібність, однотипність, дисперсійний аналіз, кореляційний аналіз

Bederak Yaroslav, PhD, Head of the laboratory of the power Supply of the Private Joint-Stock Company «AZOT», +38(067)943-49-99, yaroslav0768@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2669-0965

PJ-S Company «AZOT»

72, Str. Heroes of Kholodny Yar, Cherkasy, 18028, Ukraine

Semko Inga, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems, +38(096)410-06-91, semkoinga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6251-5830

Cherkasy State Technological University

460 Shevchenko Ave., Cherkasy, 18006, Ukraine

Tkachenko Valentyn, Head of the Department of Electrical Engineering Systems, PhD, Associate Professor, +38(067)416-89-47, tkachvf@gmail.com, ORCID ID: 000-0001-6290-2286

Cherkasy State Technological University

460 Shevchenko Ave., Cherkasy, 18006, Ukraine

A APPLICATION OF ANALYSIS OF VARIANCE AND CORRELATION ANALYSIS TO THE STUDY OF CONSUMERS' DAILY ELECTRICAL LOAD CURVES

Abstract. *This article examines the applications of analysis of variance (ANOVA) and correlation analysis in the study of daily electricity load profiles of electricity consumers, using one-way ANOVA, Pearson's correlation analysis, the Shapiro-Wilk test (normality test), and Levene's test (test of homogeneity of variances). An algorithm for applying variance and correlation analysis was developed and research was conducted that revealed the partial use of variance analysis criteria for evaluating electricity consumption data sets at consumer connections. The results of the study demonstrate the feasibility of applying variance and correlation analysis to the electricity load profiles of industrial enterprise connections for selecting the optimal declared load profile when purchasing electricity on the «Day-Ahead Market» or the balancing market.*

Keywords: *electrical load, daily load curve, similarity, uniformity, analysis of variance, correlation analysis*

Вступ. На одному і тому ж приєднанні або вводі промислового підприємства (ПП) добові графіки електричних навантажень (ГЕН) для виробництва в одну зміну, класифікуються як графік у звичайний робочий день (з понеділка по четвер), у передвихідний день (п'ятницю) або передсвятковий день, у вихідний (святковий) день.

Виявлення однотипних графіків навантаження дозволяє сформулювати підхід до розв'язання низки завдань, зокрема, формування статистичної вибірки даних вимірювань комплексного навантаження для одного і того ж увімкненого складу одиничних електроприймачів або підбір оптимально заявленого графіку навантаження під час купівлі електроенергії на ринку «на добу наперед» чи балансувальному ринку.

Запроваджена в Україні з 01.07.2019 року нова модель оптового ринку електричної енергії, передбачає можливість купівлі та продажу електричної енергії на конкурсній основі. Оптовий ринок поділяється на чотири сегменти: ринок двосторонніх договорів (ДД), ринок «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобовий ринок (ВДР) та балансуєчий ринок (БР). Учасники ринку електричної енергії отримують можливість укласти прямі довгострокові

договори на постачання електроенергії за обраним графіком роботи та за взаємовигідними цінами.

На ринку «на добу наперед» здійснюється купівля електроенергії з терміном постачання на наступну добу. На РДН ціна визначається окремо для кожної години доби відповідно до принципу граничного ціноутворення, реалізованого у формі двостороннього аукціону. Згідно з цим принципом, гранична ціна є точкою перетину графіків сукупного попиту та пропозиції і дорівнює або є нижчою за ціну останньої заявки. Під час подання заявок/пропозицій продавці та покупці зазначають відповідні обсяги та ціни [1].

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування дисперсійного та кореляційного аналізу для дослідження графіків електричних навантажень та виявлення їхніх характерних властивостей, які дозволять ефективно працювати на ринку електричної енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. На виконання вимог енергоринку необхідно забезпечити максимальну відповідність фактичного електричного навантаження робочого або іншого характерного дня для кожного i -го часового інтервалу. У контексті такого підходу, вимірний та заявлений добові графіки електричного навантаження повинні характеризуватися високим рівнем подібності.

Питання подібності добових графіків електричних навантажень були розглянуті у дослідженні [2], а основні положення кореляційного та дисперсійного аналізу представлені у джерелі [3].

Як вихідні дані для пошуку «подібних» добових графіків навантаження прийнято часові ряди, що складаються з 24 погодинних значень або 48 півгодинних значень середньої за інтервал часу активної та реактивної потужності.

Для проведення обробки та досліджень у роботі використані наступні дані:

1. Добові півгодинні графіки споживання активної електроенергії за п'ять послідовних робочих днів ремонтного підприємства, що працює в однозмінному режимі 4 дні на тиждень з 7:30 до 16:30 (у п'ятницю з 7:30 до 15:30), перерва з 11:30 до 12:18 (наведені в табл. 1).

2. Годинні дані електроспоживання цеху аміаку хімічного підприємства за 1 та 2 квітня 201... року (табл. 2 та 3).

Статистична обробка була проведена із використанням пакету аналізу «MS Excel» та критерію Шапіро–Уїлка (перевірка нормальності) [4].

Гомогенність дисперсій (або гомоскедастичність) – це статистична умова, за якої дисперсії (міри розкиду даних навколо середнього) у різних групах або вибірках приблизно рівні між собою. Це означає, що дані в групах, які порівнюють, мають однаковий ступінь «мінливості» або «розкиду».

Для перевірки умов застосованості дисперсійного аналізу проведено:

- перевірку гомогенності дисперсій (критерій Левена) [3];
- перевірку нормальності розподілу (критерій Шапіро–Уїлка) [4].

Дані електроспоживання ремонтного підприємства записані в пам'яті електронного лічильника активної та реактивної електроенергії, встановленого на ввіді силового трансформатора 6/0,4 кВ. Облікові півгодинні дані електроспоживання P у кВт зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Зведені півгодинні дані електроспоживання P ремонтного підприємства

Часовий інтервал	Дні тижня				
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
0.00 – 0.30	11,9	17,6	11,2	20,9	11,5
0.30 – 1.00	11,5	17,6	11,2	20,5	11,5
...
8.30 – 9.00	254,9	213,8	162,4	223,6	154,8
9.00 – 9.30	288,0	235,8	159,1	213,8	169,6
9.30 – 10.00	252,4	178,2	166,7	198,7	163,4
...
12.00 – 12.30	118,8	75,6	75,2	101,5	81,7
12.30 – 13.00	154,1	115,2	113,4	147,2	119,9
13.00 – 13.30	170,3	121,0	119,9	168,1	126,4
...
16.30 – 17.00	50,4	52,9	58,0	63,4	40,0
22.30 – 23.00	20,5	15,5	22,0	19,8	12,6
23.00 – 23.30	17,6	10,8	20,2	11,5	11,2
23.30 – 24.00	17,5	10,3	20,0	11,1	10,7

Як приклад обрано великотоннажний цех з виробництва аміаку хімічного підприємства. Величина витрати електроенергії в цеху за певний період залежить

від багатьох факторів, основними з яких є обсяги виробництва аміаку та споживання природного газу, середня температура повітря, що подається до аміачних компресорів, температура зворотної води в системах охолодження компресорів тощо.

У цеху є два однакових агрегати з виробництва аміаку (перший та другий). На кожному з агрегатів встановлено два однакових за потужністю аміачних поршневих компресори. Сировиною для виробництва аміаку є природний газ та повітря. Таким чином, основними споживачами електричної енергії в цеху є тихохідні синхронні двигуни (СД) 6 кВ потужністю 8 МВт приводу аміачних компресорів, а також асинхронні електродвигуни (АД) 6 кВ потужністю 4,80 МВт приводу турбокомпресорів, що подають до них повітря та природний газ. Решта споживачів (трифазні асинхронні електродвигуни напругою 6 кВ та потужністю від 0,25 до 1,6 МВт, а також силові трансформатори 6/0,4 кВ) живляться двома вводами від тупикової підстанції 6 кВ. Облікові дані електроспоживання за працюючими приєднаннями за одну і ту ж добу зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Добове зведення електроспоживання за 1 квітня 201.. року за приєднаннями цеху аміаку, кВт

Час	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Сума
0.00 – 1.00	4906	4845	5496	5130	5191	5515	2090	4098	37271
1.00 – 2.00	4907	4850	5482	5122	5180	5503	2087	4094	37224
...
9.00 – 10.00	4957	4889	5521	5170	5221	5536	2873	3288	37455
10.00 – 11.00	4952	4892	5500	5143	5202	5518	2870	3279	37355
...
22.00 – 23.00	4955	4874	5446	5090	5143	5477	2115	4119	37219
23.00 – 24.00	4960	4889	5462	5097	5148	5483	2118	4122	37279

У табл. 3 наведено добове зведення електроспоживання за 2 квітня 201.. року за приєднаннями цеху аміаку, кВт.

Таблиця 3 – Добове зведення електроспоживання за 2 квітня 201.. року за приєднаннями цеху аміаку, кВт

Час	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Сума
0.00 – 1.00	4974	4895	5461	5102	5149	5492	2121	4125	37320
1.00 – 2.00	4973	4900	5458	5084	5134	5490	2118	4122	37280
...
9.00 – 10.00	4970	4902	5458	5119	5173	5485	2061	4113	37281

10.00 – 11.00	4976	4900	5467	5126	5180	5501	2061	4098	37310
...
22.00 – 23.00	4945	4865	5448	5094	5140	5485	2108	4112	37196
23.00 – 24.00	4953	4868	5457	5104	5143	5498	2106	4115	37243

За результатами дослідження:

I. Перевірка передумов застосування дисперсійного аналізу за критерієм Левене.

Ia. Ремонтне підприємство.

З метою визначення P -значення був застосований інструмент аналізу «Однофакторний дисперсійний аналіз» пакету «аналіз даних» програми «Microsoft Excel». За нульову гіпотезу H_0 приймаємо припущення про ідентичність графіків, тоді як альтернативна гіпотеза H_1 передбачає відсутність ідентичності.

Нульова гіпотеза H_0 стверджує, що групові середні значення рівні, а незалежний фактор не чинить суттєвого впливу. Альтернативна гіпотеза H_1 стверджує, що принаймні одне середнє значення відрізняється від інших, тобто є фактор, який має значущий ефект.

Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання ремонтного підприємства за п'ять робочих днів представлені на рис. 1.

ПІДСУМКИ						
Групи	Рахунок	Сума	Середнє	Дисперсія		
понеділок	48	4097,661	85,368	6803,829		
вівторок	48	3403,237	70,901	4586,162		
середа	48	3146,178	65,545	2917,636		
четвер	48	3977,142	82,857	4828,196		
п'ятниця	48	2910,086	60,627	3416,621		
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	22232,91	4	5558,228	1,232	0,298	2,410
У середині груп	1059965	235	4510,489			
Всього	1082198	239				

Рисунок 1 – Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання ремонтного підприємства за п'ять робочих днів

Висновок: $F = 1,232 < F_{крит} = 2,410$, $P\text{-значення} = 0,298 > P = 0,05$.

Отримані результати свідчать про відсутність підстав відхилення нульової гіпотези. Отже, графіки навантаження за всі п'ять робочих днів можна вважати статистично ідентичними.

Іб. Цех аміаку.

Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання за усіма приєднаннями цеху аміаку за 1 квітня 201... року наведені на рис. 2.

ПІДСУМКИ						
Групи	Рахунок	Сума	Середнє	Дисперсія		
АД-1	24	118656,5	4944,0	322,0		
АД-2	24	117050,3	4877,1	308,1		
СД-1/1	24	131946,3	5497,8	670,3		
СД-1/2	24	124437,0	5184,9	1723,1		
СД-2/1	24	123122,3	5130,1	1451,2		
СД-2/2	24	132476,0	5519,8	638,7		
Ввід В-6-1	24	53452,5	2227,2	83025,6		
Ввід В-6-2	24	94962,0	3956,8	88815,1		
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	203475809	7	29067972,7	1314,1	0,0	2,1
У середині груп	4069941,2	184	22119,2			
Всього	207545750	191				

Рисунок 2 – Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання за усіма приєднаннями цеху аміаку за 1 квітня 201... року

Висновок: $F = 1314,1 > F_{крит} = 2,10$, $P\text{-значення} = 0,0 < P = 0,05$. Отримані результати свідчать про відхилення нульової гіпотези. Графіки навантаження приєднань цеху аміаку за 1 квітня 201... року мають відмінності.

Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання за усіма приєднаннями цеху аміаку за 2 квітня 201... року наведені на рис. 3.

ПІДСУМКИ						
Групи	Рахунок	Сума	Середнє	Дисперсія		
АД-1	24	119045,9	4960,2	466,2		
АД-2	24	117202,2	4883,4	554,8		
СД-1/1	24	130959,8	5456,7	354,1		
СД-1/2	24	123695,0	5154,0	201,0		
СД-2/1	24	122548,4	5106,2	210,2		
СД-2/2	24	131868,0	5494,5	327,8		
Ввід В-6-1	24	50124,0	2088,5	630,3		
Ввід В-6-2	24	98505,0	4104,4	257,3		
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	212049419	7	30292774,1	80732,3	0,0	2,1
У середині груп	69041,433	184	375,2			
Всього	212118460	191				

Рисунок 3 – Результати проведення однофакторного дисперсійного аналізу електроспоживання за усіма приєднаннями цеху аміаку за 2 квітня 201... року

Висновок: $F = 80732,3 > F_{крит} = 2,10$, $P\text{-значення} = 0,0 < P = 0,05$. Отримані результати свідчать про відхилення нульової гіпотези. Графіки навантаження приєднань цеху аміаку за 2 квітня 201... року мають відмінності.

II. Перевірка застосовності дисперсійного аналізу за критерієм Шапіро–Уїлка, який використовується для оцінювання нормальності розподілу вибірок значень.

Критерій Шапіро–Уїлка розраховується для кожної вибірки за допомогою онлайн-калькулятора [5]. Нульова гіпотеза H_0 приймається у випадку, коли значення критерію Шапіро–Уїлка W перевищує його критичне значення. За цієї умови для вибірки підтверджується нормальний розподіл. За альтернативною гіпотезою H_1 , якщо обчислене значення W є меншим за критичне значення W , нульова гіпотеза відхиляється, а нормальний розподіл вибірки не підтверджується.

IIa. Ремонтне підприємство.

Результати розрахунку критерію Шапіро–Уїлка W для ремонтного підприємства зведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку критерію Шапіро–Уїлка W для ремонтного підприємства

День тижня	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
$W_{вим}$	0,820	0,790	0,870	0,850	0,800
$W_{крит}$	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
$R_{вим}$	0	0	0	0	0
Нульова гіпотеза підтверджується	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

Приклад висновку для понеділка (для інших днів за аналогією):

$W_{вим} = 0,82 < W_{крит} = 0,95$, $P\text{-значення} = 0,0 < P = 0,05$. Звідси випливає, що нульова гіпотеза відхиляється, розподіл не є нормальним.

Пб. Цех аміаку.

Результати розрахунку критерію Шапіро–Уїлка W для приєднань цеху аміаку за 1 квітня 201... року зведено у табл. 5 та за 2 квітня 201... року – у табл. 6.

Таблиця 5 – Результати розрахунку критерію Шапіро–Уїлка W для приєднань цеху аміаку за 1 квітня 201... року

Найменування приєднання	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Всього
$W_{вим}$	0,960	0,970	0,930	0,930	0,910	0,900	0,560	0,550	0,860
$W_{крит}$	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920
$R_{вим}$	0,43	0,65	0,06	0,08	0,04	0,026	0,001	0,001	0,002
Нульова гіпотеза підтверджується	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

Таблиця 6 – Результати розрахунку критерію Шапіро–Уїлка W для приєднань цеху аміаку за 2 квітня 201... року

Найменування приєднання	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Всього
$W_{вим}$	0,940	0,890	0,980	0,970	0,950	0,960	0,840	0,960	0,970
$W_{крит}$	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920
$R_{вим}$	0,14	0,01	0,78	0,63	0,196	0,44	0,001	0,32	0,66
Нульова гіпотеза підтверджується	Так	Ні	Так	Так	Так	Так	Ні	Так	Так

Більшість вибірок мають нормальний розподіл (з 18 вибірок нормальний розподіл у 11).

III. Результати розрахунків щодо застосовності дисперсійного аналізу на 23 приєднання споживачів електроенергії показують, що його не можна використовувати для аналізу графіків електричних навантажень у повному обсязі.

Однак доцільно використовувати значення дисперсій вибірок даних для оцінки стабільності роботи та ведення технологічного процесу, а також для визначення подібності графіків електричних навантажень. Так, використовуючи значення дисперсій, можна дійти висновку, що зміни, які працювали 2 квітня, забезпечили менше розсіювання даних електроспоживання, ніж зміни, які працювали 1 квітня. Порівняння критеріїв Фішера та *P*-значень може бути корисним при роботі на ринку електричної енергії.

IV. Кореляційний аналіз.

Кореляційний аналіз дозволяє визначити суттєві фактори, які тісно пов'язані з проблемою, що досліджується, виключивши вплив інших. Коефіцієнт кореляції Пірсона [3] демонструє ступінь зв'язку між обраними масивами (вибірками) даних та визначається за формулою (1):

$$r = \frac{\sum_i (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 \sum_i (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (1)$$

де \bar{y} , \bar{x} , y_i , x_i – середні арифметичні значення та конкретні дані, що відносяться до кожної з вибірки даних.

Як правило, коефіцієнт кореляції +1 або -1 передбачає лінійний зв'язок (залежність, взаємозв'язок) між двома або декількома вибірками (або масивами) даних. Якщо коефіцієнт кореляції знаходиться в інтервалі від -1 до +1, то взаємозв'язок між масивами даних нелінійний.

Для розрахунку коефіцієнтів кореляції вибірок електричних навантажень використали інструмент аналізу «Кореляційний аналіз» пакета «Аналіз даних» програми «Microsoft Excel».

IVa. Ремонтне підприємство.

Кореляційна матриця для добових півгодинних вибірок представлена у табл. 7.

Таблиця 7 – Кореляційна матриця для ремонтного підприємства

День тижня	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця
Понеділок	1,00				
Вівторок	0,93	1,00			
Середа	0,96	0,94	1,00		
Четвер	0,96	0,98	0,98	1,00	
П'ятниця	0,88	0,94	0,87	0,91	1,00

Висновок: добові півгодинні графіки електричних навантажень схожі між собою, значення коефіцієнтів кореляції від 0,91 до 0,98.

IVб. Цех аміаку.

Розраховані коефіцієнти кореляції вибірок по кожному приєднанню за 1 та 2 квітня. Значення коефіцієнтів кореляції Пірсона за 1 квітня 201... року узагальнено в кореляційній матриці, наведеній у табл. 8, а за 2 квітня – у табл. 9.

Таблиця 8 – Кореляційна матриця для вибірок із приєднань цеху аміаку за 1 квітня 201.. року

	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Всього
АД-1	1,00								
АД-2	0,92	1,00							
СД-1/1	0,46	0,63	1,00						
СД-1/2	0,53	0,72	0,86	1,00					
СД-2/1	0,49	0,71	0,85	0,99	1,00				
СД-2/2	0,49	0,64	0,98	0,85	0,85	1,00			
В-6-1	0,40	0,45	0,41	0,51	0,45	0,29	1,00		
В-6-2	-0,35	-0,40	-0,39	-0,48	-0,42	-0,26	-1,00	1,00	
Всього	0,69	0,83	0,88	0,94	0,94	0,91	0,39	-0,34	1,00

Дуже висока кореляція між двигунами АД-1 та АД-2 ($r \approx 0,92$); СД-1/1, СД-1/2, СД-2/1, СД-2/2 ($r > 0,85$) вказує на синхронну роботу. В-6-1 корелює з іншими слабше ($r \approx 0,4$). Від'ємна кореляція між вводами ($r \approx -1,0$) вказує на відокремлене живлення різних груп споживачів.

Таблиця 9 – Кореляційна матриця для вибірок із приєднань цеху аміаку за 2 квітня 201.. року

	АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Всього
АД-1	1,00								
АД-2	0,98	1,00							
СД-1/1	0,59	0,54	1,00						
СД-1/2	0,12	0,08	0,46	1,00					
СД-2/1	0,31	0,31	0,50	0,93	1,00				
СД-2/2	0,57	0,52	0,95	0,44	0,45	1,00			
В-6-1	0,39	0,35	0,18	-0,59	-0,50	0,19	1,00		
В-6-2	0,72	0,69	0,36	-0,31	-0,15	0,31	0,79	1,00	
Всього	0,91	0,87	0,83	0,28	0,43	0,80	0,44	0,71	1,00

Дуже висока кореляція між двигунами АД-1 та АД-2 ($r \approx 0,98$). Режим роботи СД-1/1 за 2 квітня нагадував роботу СД-2/2, а режим роботи СД-2/1 був схожий на роботу СД- 1/2.

В-6-1 корелює з іншими приєднаннями слабше ($r \approx 0,4$).

Обчислено коефіцієнти кореляції між вибірками по кожному приєднанню за 1 і 2 квітня, значення яких наведено у табл. 10.

Таблиця 10 – Значення коефіцієнтів кореляції графіків електричного навантаження однойменних приєднань за 1 та 2 квітня 201... року

АД-1	АД-2	СД-1/1	СД-1/2	СД-2/1	СД-2/2	В-6-1	В-6-2	Електроспоживання цеху аміаку
0,32	0,52	0,55	0,31	0,71	0,52	-0,44	0,03	0,78

Аналізуючи результати розрахунків коефіцієнту кореляції, можна зробити наступний висновок, що графіки навантаження за 1 та 2 квітня 201... року для приєднань СД-1/1, СД-2/1, СД-2/2 та всього цеху аміаку є схожими між собою, а решта – ні.

Слід зазначити, що добові графіки електричних навантажень формуються під впливом змінних експлуатаційних чинників, зокрема показників мікроклімату, особливостей ведення технологічного процесу персоналом, а також добових параметрів природного газу.

Для оцінки ефективності роботи технологічного обладнання та персоналу особливе значення має кореляційний аналіз однотипних приєднань у межах однієї й тієї самої доби.

Як приклад, наведено дисперсійний аналіз декількох груп однотипних приєднань:

1 група: АД-1 та АД-2;

2 група: СД-1/1, СД-1/2;

3 група: СД-2/1, СД-2/2;

4 група: В-6-1 та В-6-2.

Розраховано коефіцієнт кореляції графіків навантаження однотипних приєднань за 1 квітня 201... року. Значення наведені у табл. 11.

Таблиця 11 – Значення коефіцієнту кореляції Пірсона для вибірок (масивів) даних про споживання електроенергії однотипних підключень станом на 1 квітня 201... року

Назва групи	АД-1 та АД-2	СД-1/1 та СД-1/2	СД-2/1 та СД-2/2	В-6-1 та В-6-2
Значення коефіцієнту кореляції	0,92	0,85	0,85	-0,99

Масиви даних щодо споживання електроенергії електродвигунами великої потужності в 1, 2 та 3 групах (АД-1 та АД-2, а також СД-1/1 та СД-1/2, СД-2/1 та СД-2/2) мають схожі між собою властивості. Графіки навантаження В-6-1 та В-6-2 характеризуються від'ємною кореляцією, що пояснюється зростанням навантаження на першому вводі, яке призводить до зменшення його на другому (сумарне навантаження двох вводів зазвичай стабільне).

Проведені дослідження дозволяють скласти таку послідовність дій щодо проведення дисперсійного та кореляційного аналізів добових графіків електричного навантаження:

1. Перевірка умов застосування дисперсійного аналізу шляхом визначення гомогенності дисперсій та перевірки нормальності розподілу.

2. Виявлення подібності графіків електричних навантажень методом дисперсійного аналізу.

3. Проведення кореляційного аналізу масивів даних навантажень.

4. Визначення ідентичності зібраних вибірок даних для виявлення властивостей споживачів електроенергії та можливості застосування графіків навантаження для прогнозу навантаження на «Енергоринку».

Висновки. Розроблено алгоритм проведення дисперсійного та кореляційного аналізу графіків електричних навантажень. На прикладі ремонтно-механічного підприємства та великотоннажного цеху з виробництва аміаку перевірено проведення вищезазначених аналізів для виявлення властивостей споживачів електроенергії та можливості їхнього застосування для прогнозування навантаження на «Енергоринку».

Результати розрахунків щодо застосування дисперсійного аналізу, наведені в публікації, свідчать про обмеженість його використання для аналізу графіків електричних навантажень. Водночас, доцільним є використання значень дисперсій вибірок даних для оцінки стабільності роботи технологічного обладнання та характеру ведення технологічного процесу, а також для визначення подібності графіків електричних навантажень.

Виявлено наявність високої кореляції між вибірками електроспоживання однотипних електродвигунів, що свідчить про їх синхронний режим роботи. Від'ємна кореляція між вводами В-6-1 і В-6-2 ($r \approx -1,0$) пояснюється роздільним живленням різних груп споживачів, підключених до відповідних вводів.

Визначено, що частина графіків навантаження приєднань цеху аміаку за дві послідовні доби характеризуються подібністю, тоді як інші графіки мають суттєві відмінності. Це може бути зумовлено впливом різних факторів, зокрема, відмінностями мікроклімату в різні доби, змінами характеристик природного газу, особливостями ведення технологічного процесу персоналом, змінами режимів роботи обладнання тощо.

Практична цінність роботи полягає у можливості обґрунтованого вибору типових графіків навантаження для участі на ринку «на добу наперед» та балансуєчому ринку. Крім того, запропонований підхід може бути використаний для виявлення аномальних режимів роботи обладнання за відхиленнями кореляційних зв'язків, оптимізації заявленої потужності на підставі аналізу статистично однотипних діб.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Блінов І. В., Мірошник В. О., Шиманюк П. В. Оцінка вартості похибки прогнозу «на добу наперед» технологічних втрат в електричних мережах України. *Технічна електродинаміка*, 2020. № 5. С. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/353?articlesBySimilarityPage=1>
2. Волошко А. В., Бедерак Я. С., Шевчук В. В. Застосування теорії подібності для контролю електроспоживання промислових підприємств. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2020. № 4. С. 78–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2020_4_11
3. Диха М. В., Мороз В. С. Економетрія: навчальний посібник. Київ: «Центр учбової літератури», 2016. 206 с.
4. Shapiro S. S., Wilk M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3), 591–611.
5. Сайт SciStatCalc. Shapiro-Wilk Test Calculator. URL: <https://scistatcalc.blogspot.com/2013/10/shapiro-wilk-test-calculator.html>

REFERENCES:

1. Blinov I. V., Miroshnyk V. O., Shymaniuk P. V. (2020). Estimation of the cost of the error in the forecast “day ahead” of technological losses in the electrical networks of Ukraine. *Technical Electrodynamics*, 5, 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/353?articlesBySimilarityPage=1>
2. Voloshko A. V., Bederak Ya. S., Shevchuk V. V. (2020). Application of similarity theory to control electricity consumption of industrial enterprises. *Energy: Economics, Technologies, Ecology*, 4, 78–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2020_4_11
3. Dykha M. V., Moroz V. S. (2016). Econometrics: a textbook. Kyiv: “Center for Educational Literature”, 206 p.
4. Shapiro S. S., Wilk M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3), 591–611.
5. Site SciStatCalc. Shapiro-Wilk Test Calculator. URL: <https://scistatcalc.blogspot.com/2013/10/shapiro-wilk-test-calculator.html>

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.03.2026;

прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.03.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.