

УДК 519.2 + 681.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/21>

Краснитський С.М.

<https://orcid.org/0000-0003-1856-2215>

Київський національний університет технологій та дизайну

Бобровник В.М.

<https://orcid.org/0000-0003-1779-5375>

КНП «ПСИХІАТРІЯ»

Астістова Т.І.

<https://orcid.org/0000-0002-8452-4797>

Київський національний університет технологій та дизайну

Волох Л.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-4290-795X>

ПРО ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ З ФІКТИВНИМИ ЗМІННИМИ ДЛЯ ОПИСУ КІЛЬКІСНИХ АСПЕКТІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ У НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

Об'єктом дослідження даної роботи є певні кількісні аспекти процесу споживання електроенергії закладом освіти (ЗО). ЗО як об'єкт електроспоживання має свої характерні особливості. Зокрема окрім погодних умов, при фіксованих інших факторах (конструктивні особливості будівель, кількість студентів та персоналу закладу,) відіграють значну роль часові або ситуаційні аспекти направленості навчального процесу (варіанти розкладу занять, і, як наслідок, відповідні варіанти завантаженості аудиторій з належними варіантами їх утеплення).

Взагалі моделювання попиту на електроенергію є складовою комплексу задач аналізу і прогнозування тенденцій розвитку електроенергетики як важливої галузі господарського комплексу високорозвиненої країни. Конкретно для ЗО результати моделювання можуть бути використані при розробці методичних рекомендацій впровадження комплексу енергоощадних заходів та формування управлінських рішень у системі енергоменеджменту.

Задача, що вирішується в даній роботі – представлення математичною моделлю течію кількісних показників процесу електроспоживання в будівлях ЗО на заданому відрізку часу з врахуванням можливих наслідків зміни певних характеристик течії навчальних занять на вказаному часовому відрізку.

В якості математичних моделей кількісних показників споживання електроенергії в інфраструктурі закладів освіти, зокрема, закладів вищої освіти (ЗВО), представлено деякі регресійні рівняння. В зазначених рівняннях знаходять відображення особливості періодів освітнього процесу, сезонності та відповідні аспекти супутнього використання аудиторного фонду. Особливістю підходу до розв'язання задачі є включення в набори регресорів як числові пояснювальні змінні, так і категоріальні.

Як наслідок застосування розширеного сполучення факторів, котрі впливають на процес електроспоживання ЗО, представлені моделі надають можливість розраховувати та прогнозувати числові показники зазначеного процесу на основі не лише сезонних показників, а й враховувати можливі нестационарні та незаплановані зміни течії навчального процесу.

Ключові слова: споживання електроенергії, навчальний заклад, регресійний аналіз, регресори, фіктивні змінні, діаграми розкиду даних типу box plot.

Постановка проблеми. Освітні будівлі (дані Міжнародного енергетичного агентства у розвинених країнах мають найбільше енергоспоживання після житлових та офісних будівель за 2021 рік – див., наприклад, [1, introduction]). Таким чином, прогнозування і обґрунтоване



управління процесами електроспоживання учбових закладів, зокрема закладів вищої освіти (ЗВО), мають суттєве значення з точки зору економії і раціонального споживання світових енергоресурсів. Зазначене питання є одним з суттєвих елементів системи сучасних напрямів і технологій, поєднаних у концепції Smart Grid. Smart Grid (розумна мережа) – набір технологій, інструментів і методів, що перетворюють енергетичну інфраструктуру старого типу на сучасну цифрову систему. Упровадження даної концепції дозволяє підвищити рентабельність, надійність та безвідмовність роботи, знизити технічні та комерційні витрати, підвищити керованість і експлуатаційні показники електричних мереж [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує велика кількість наукових робіт, в яких приділено суттєву увагу побудові математичних моделей тих чи інших аспектів аналізу та керування процесом електроспоживання конкретної інфраструктури (див., наприклад, [4]).

Наведемо кілька прикладів робіт, що стосуються аналізу електроспоживання саме у навчальних закладах.

В роботі [5, с. 8,14] було запропоновано математичну модель зміни у часі електронавантаження навчального закладу у вигляді дійсного випадкового процесу з дискретним часом і некорельованими значеннями при двох режимах роботи – в робочі і вихідні дні відповідно. Наведено деякі застосування зазначеної моделі. В цитованій роботі наводиться також модель у вигляді рівняння простої лінійної регресії, тобто з однією пояснювальною змінною (інакше, незалежною змінною або регресором), що пов'язує величину добового електроспоживання учбового корпусу із значенням середньодобової температури зовнішнього середовища.

В роботі [6, с. 8-22] показники електроспоживання університетської будівлі (гуртожитку) моделюються за допомогою множинної лінійної регресії з пояснюючими змінними «середньодобова температура» та «кількість мешканців» із включенням випадкового ефекту, корельованого з регресорами (зазначені змінні, очевидно, пов'язані з етапами навчального процесу). В роботі [7, розділ Energy analysis], що розглядає питання прогнозування електронавантаження в університетських бібліотеках, була зокрема відмічена та обставина, що фіксовані часові границі для етапів учбового процесу можуть не давати чітких змін значень параметрів регресії (у зв'язку з чим у згаданій роботі прогнозу-

ючи регресійні рівняння були замінені рядами Фур'є). Здається малоімовірним припущення, що часові границі (для таких змінних, наприклад, як показники відвідуваності бібліотеки) не мають зв'язків з навчальним процесом, тобто з реальним розкладом занять.

В роботі [8] розроблено математичний апарат для прогнозів електроспоживання в будівлях кампусу університетського містечка. Регресійна модель виконує прогнозування щоденного споживання енергії на добу наперед. Дані погодного плану включають температуру, швидкість вітру, тривалість опадів тощо.

Відзначимо: в цитованій роботі [8, підрозділ 6] явним чином відмічається, що для подальшого підвищення точності прогнозу моделі бажано ввести змінні, пов'язані з розкладом, оскільки величини електроспоживання залежать і від «змінної зайнятості».

Результати, наведені нижче, підтверджують, що змінні, котрі пов'язані з розкладом, можуть суттєво уточнювати прогнози електроспоживання, зроблені лише на основі прогнозів погодних умов. При цьому автори даної статті не можуть вказати роботи інших авторів, де задача прогнозування електронавантаження з урахуванням можливих варіантів розкладу занять була б досить загальним чином розв'язана.

Постановка завдання. Основною задачею даної роботи є демонстрація варіанту регресійної моделі кількісних аспектів електроспоживання в учбових корпусах ЗО з певним врахуванням розкладу занять та його можливої зміни. Конкретні розрахунки виконуються за даними щодо електроспоживання одного з учбових корпусів Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД).

Виклад основного матеріалу. В якості математичних моделей електроспоживання в навчальних корпусах розглядаються варіанти загальної лінійної моделі (ЗЛМ) вигляду:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1} + \varepsilon, \quad (1)$$

де y – залежна змінна або відгук, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ коефіцієнти, x_1, \dots, x_{p-1} – незалежні, інакше, пояснювальні змінні або регресори, ε – випадкова складова.

В якості залежної змінної y , що характеризує показник електроспоживання, береться середнє значення добового електроспоживання в кВт×год за обраний проміжок часу. Без обмеження загальності в даній роботі в якості такого проміжку обрано календарний місяць.

Комбінації можливих пояснювальних змінних x_j для моделей виду (1) обираються з наступних факторів:

N – номер календарного місяця, $1 \leq N \leq 12$;

n – кількість врахованих календарних місяців для конкретної моделі;

z – рівень завантаженості аудиторного фонду (в процентах) у даному місяці;

t – температура зовнішнього середовища (середня добова температура у даному місяці в градусах за Цельсієм);

φ – так звана фіктивна змінна (dummy variable) [9, с. 299-325], котра у даній роботі залежить від певних характеристик навчального процесу, притаманних даному місяцю (в даному учбовому році). Ця змінна приймає лише два значення: 0 та 1. Її роль полягає в віднесенні рівня споживання електроенергії до одного з двох типів: більш-менш звичайного для даного місяця або екстремального (підвищеного або зниженого в залежності від характеру навчальних занять). Наприклад, рівність $\varphi(1) = 1$ для конкретного учбового корпусу (далі часто – корпус або об'єкт № 1) відповідає заліково-екзаменаційній направленості учбового процесу у даному корпусі в місяці січні при відносно малій кількості аудиторних занять, отже при відносно зниженому рівні затрат електроенергії на додатковий обігрів аудиторій. Надалі при розгляданні конкретних ситуацій значення змінної φ уточняється.

Зауваження. Такі показники як конструктивні особливості навчального корпусу (наприклад, товщина стін або будівельні матеріали), безсумнівно, мають вплив на процес електроспоживання. Врахування згаданих конструктивних особливостей навчальних корпусів доцільне (і важливе) при аналізі роботи сукупності об'єктів даного типу (техноценозу). Але при аналізі роботи окремої будівлі за допомогою регресійної моделі зазначені особливості мають вплив лише на величину постійної складової моделі, яка оцінюється на основі загальних даних по електроспоживанню у даній будівлі.

Таким чином, в даній роботі математичні моделі споживання електроенергії є варіантами регресійних залежностей типу

$$y = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 z + \beta_3 t + \beta_4 \varphi + \varepsilon, \quad (2)$$

в яких $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$ – сталі коефіцієнти, ε – випадкова величина, а оцінки функцій регресії, які позначаються далі e ($e = e(N, z, t, \varphi)$) мають вигляд:

$$e = b_0 + b_1 N + b_2 z + b_3 t + b_4 \varphi, \quad (3)$$

де b_0, b_1, \dots, b_4 відповідно, оцінки коефіцієнтів $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$ за МНК (методом найменших квадратів).

Далі ми наведемо результати побудови і аналізу регресійних моделей для одного з навчальних корпусів КНУТД. Як було вже сказано вище, він іменується як об'єкт або корпус № 1. Цей об'єкт являє собою будівлю мішаного призначення – для проведення учбових занять та науково-дослідних робіт і для розміщення адміністрації, загальною площею 38,9 тис. м².

Для даного об'єкту при апроксимації даних по електроспоживанню фіктивна змінна φ задається рівністю:

$$\varphi = \varphi(N) = \begin{cases} 1, N = 1, 7, 8, 12 (\text{січень, липень, серпень, грудень}) \\ 0 \text{ в інших випадках} \end{cases}. \quad (4)$$

При розрахунках використовувалися помісячні статистичні дані служби енергоменеджменту КНУТД за період з вересня 2014 по вересень 2016 років, що пов'язано із зручністю доступу до даних щодо завантаження навчальних аудиторій. Відповідні дані за 12 наступних місяців використовувалися для ілюстрації прогностичних властивостей одержаних моделей.

Для порівняннi якості одержаних в роботі моделей застосовані наступні статистичні показники. R – вибірковий множинний коефіцієнт кореляції (у даному разі – показник лінійної залежності між реальними і розрахунковими значеннями відгуку e), $F_{m,l}$ – значення F -статистики Фішера критерію значущості лінійної моделі типу (1) ($m = p - 1, l = n - p$, де n – кількість спостережень y_i), S – стандартна помилка регресійної оцінки. Рівень значущості статистичних критеріїв тут і далі береться рівним 0,05. Квантиль рівня β розподілу Фішера $F(m, l)$ позначається $u_{\beta}^{F(m, l)}$. Крім величин означених статистичних показників ми будемо цікавитися виконанням у конкретних випадках нерівності

$$F_{p-1, n-p} > 4u_{1-\alpha}^{F(p-1, n-p)}, \quad (5)$$

наявність якої є емпіричною позитивною характеристикою якості регресійної моделі [9, с. 243-250].

Для наочного представлення результатів щодо якості наближення реальних даних моделлю використовувалися деякі графічні способи представлення залишків моделі, тобто величин $y_i - e_i, i = 1, \dots, n$. Зокрема використовувалися діаграми вибіркового даних типу *box-and-whisker plot* (інакше, діаграми розкиду чи «ящик з вусами» [10, розділ 2]; надалі скорочено *Box Plot*). Оскільки в різних статистичних додатках зміст таких діаграм при схожих зовнішніх рисах може варіюватися

[11, с. 25-26], зробимо відповідне уточнення. При побудові зазначеної діаграми числова вибірка розбивається на дві частини: основну і додаткову – множину так званих викидів. Множина викидів (яка може бути і пустою) складається з вибірових значень, котрі знаходяться на достатньо великій відстані від центру вибірки (вибіркової медіани). Для виконання зазначеного розбиття використовується методика, що описана в монографії [10, розділ2]. Типовий вигляд діаграми Box Plot представлено на наступному рисунку.

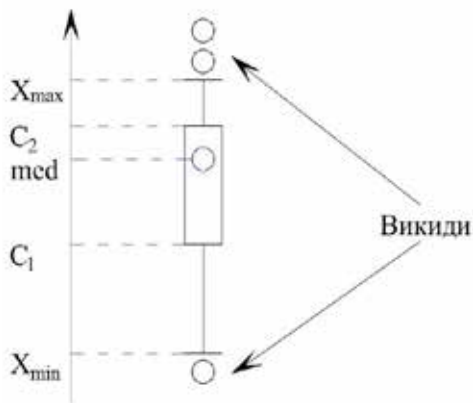


Рис. 1. Загальний вигляд діаграми box-and-whisker plot

Тут для вибірки x_1, x_2, \dots, x_n позначено: *med* – вибіркова медіана (точка, що ділить вибірку на дві частини, рівні за кількістю вибірових значень), C_1, C_2 – вибірові кватилі (точки, для яких інтервали $[x_{min}, C_1]$ та $[C_2, x_{max}]$ містять приблизно по 25% вибірових значень, x_{min} та x_{max} – мінімальне та максимальне значення основної частини вибірки.

Для ілюстрації степені подібності розподілу ймовірностей залишків моделей до нормального розподілу використовувалися нормальні ймовірнісні графіки. Побудова вищезазначених діаграм і графіків виконувалася засобами комплексу програм STATISTICA 10.0.

Використовуючи зазначені показники, спочатку були порівняні між собою моделі простої лінійної регресії, тобто кожна з однією пояснювальною змінною (з числа введених вище).

1.1) $e = e(N) = 2773,668 + 3,668N$;

2.1) $e = e(z) = 2025,643 + 30,181z$;

3.1) $e = e(t) = 3706,075 - 91,058t$;

4.1) $e = e(\varphi) = 2976,842 - 537,995\varphi$.

Моделі 1.1 – 4.1 та їх характеристики, подані нижче в табл. 1, наведено для з'ясування питання, чи може динаміка зміни величини електроспоживання бути поясненою найпростішим чином. Маються на увазі моделі простої лінійної регресії тобто з однією пояснювальною змінною. У випадку 1.1 – це проста залежність від календарної змінної N . 2.1 – аналогічна залежність від організації завантаженості аудиторій; 3.1, 4.1 – прості регресійні залежності від зміни температури навколишнього середовища та, відповідно, від (фіктивної) змінної φ .

Бачимо, що найгірші показники має модель 1.1 – проста залежність рівня споживання електроенергії від календарних місяців. Зокрема, модель незначуща (тут, застосовуючи критерій Фішера, маємо: $u_{0,95}^{F(1,22)} \cong 4,301 > F_{1,22} = 0,00439$), тобто вона не краща для даного випадку ніж залежність виду $y = const$. Зауважимо, що аналогічного результату слід очікувати для будь-якої моделі простої лінійної регресії, в якій залежність від змінної N представлена монотонною функцією $g(N)$ від цієї змінної. Дійсно, якщо для конкретності, $g(N)$ – строго зростаюча функція, то рівень споживання електроенергії, який прогнозується відповідною оцінкою функції регресії для літніх місяців буде вищим, ніж, наприклад у січні. У даній роботі модель 1.1 розглядається здебільшого з метою порівняння числових характеристик якості інших моделей з її відповідними характеристиками.

Незначущою виявилася і модель 4.1, хоча знак коефіцієнта при пояснюючій змінній φ відповідає змістовій направленості цієї змінної. Відзначимо, що в більш повних моделях, в певних комбінаціях з іншими пояснюючими змінними зазначена змінна, як і змінна N , може становитися значимою (див. далі моделі 5.1–8.1).

Коефіцієнт при змінній z (модель (2.1)) також відповідає змістовій направленості даної змінної і є значимим, але інші показники недосить задовільні.

Таблиця 1

Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання 1.1–4.1

№ моделі	Модель	R	$F_{1,22}$	S	Примітки
1.1	$e(N)$	0,0141	0,00439	936,4	Модель незначуща
2.1	$e(z)$	0,565	10,316	772,66	
3.1	$e(t)$	0,8924	86,044	422,59	
4.1	$e(\varphi)$	0,2828	1,9132	898,25	Модель незначуща

З даних табл. 1 ми бачимо, що модель 3.1 (залежність від середньої температури зовнішнього середовища) є кращою поміж вказаними чотирма моделями за всіма показниками. Крім того, для моделі 3.1 виконується нерівність (5) (для $p=2, n=24$). В подальшому буде виконано порівняння прогнозуючих можливостей моделі 3.1 з більш повними (такими, що включають більшу кількість пояснювальних змінних) моделями.

Наступний рисунок ілюструє порівняльні якості моделей 1.1. – 1.4 за допомогою вказаних діаграм.

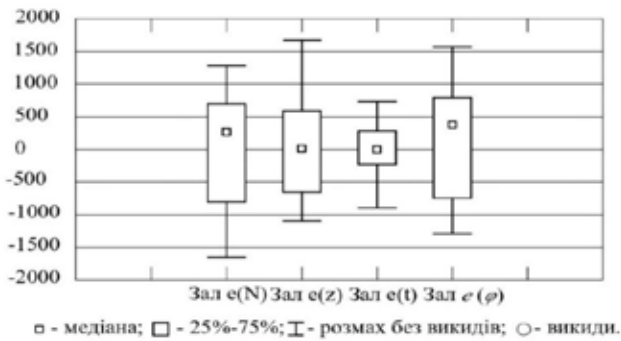


Рис. 2. Діаграми Box Plot для сукупності залишків регресійної моделі 1.1 – 4.1

Тут позначення типу $Зале(\cdot)$ відноситься до діаграми залишків, що відповідає моделі $e(\cdot)$. Очевидно, третя зліва діаграма (яка відповідає моделі 3.1) має суттєво менший розкид значень і є дещо більш симетричною відносно центральної точки (медіани), ніж інші діаграми. Останнє

свідчить на користь припущення про більшу подібність розподілу залишків моделі 3.1 до нормального розподілу, ніж це має місце для сукупності залишків інших моделей. Наступні ймовірнісні графіки відповідності нормальному розподілу, в цілому, відповідають цьому спостереженню.

Розглянемо декілька регресійних моделей електроспоживання для того ж об'єкту № 1, що залежать від двох пояснювальних змінних (регресорів).

$$5.1) y = y(z, N) = 240,106 + 30,267z - 28,419N;$$

$$6.1) y = y(t, N) = 3448,320 - 93,995t + 44,162N;$$

$$7.1) y = y(t, z) = 3258,192 - 81,390t + 14,332z;$$

$$8.1) y = y(t, \varphi) = 3873,910 - 90,680t - 514,833\varphi;$$

В наведеній нижче таблиці у явному вигляді містяться введені вище статистичні показники даних моделей

Дані табл. 2 свідчать, що статистичні показники моделей 6.1 – 8.1 є доволі близькими один до одного, причому всі вони помітно переважають відповідні показники моделі 5.1. Нерівність (5) виконується для моделей 6.1 – 8.1: $u_{0,95}^{F_{2,21}} = 3,468$. Інші можливі моделі з двома регресорами мають гірші ймовірнісні характеристики, і тому не наводяться.

Що до аналізу залишків даних моделей, то з наступного рис. 4 бачимо: моделі 6.1–8.1 мають значно менший розкид регресійних залишків у порівнянні з моделлю 5.1, при цьому також помітно невелику перевагу моделей 7.1, 8.1 над моделлю 6.1.

Рис. 5, що подано нижче, ілюструє степінь подібності розподілу ймовірностей залишків

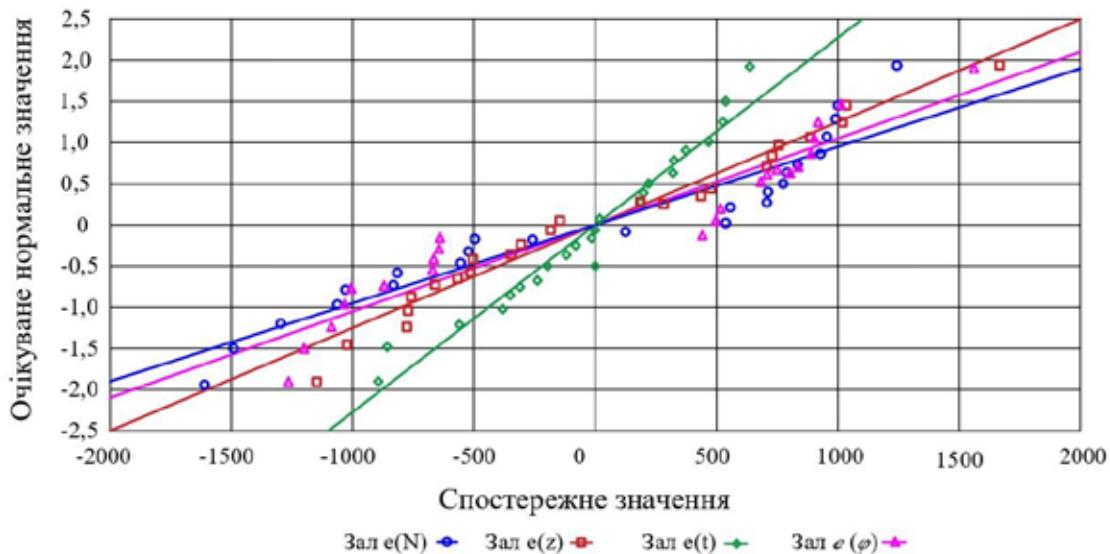


Рис. 3. Нормальні ймовірнісні графіки сукупності залишків регресійних моделей 1.1–4.1

Імовірнісно-статистичні характеристики моделей енергоспоживання 5.1 – 8.1

№ моделі	Модель	R	$F_{p-1, n-p}$	S	Примітки
5.1	$e(z, N)$	0,5602	4,814	794,03	Коефіцієнт при N незначущий
6.1	$e(t, N)$	0,9079	49,316	401,60	Коефіцієнт при N незначущий
7.1	$e(t, z)$	0,9279	65,113	357,19	Всі коефіцієнти є значущими
8.1	$e(t, \varphi)$	0,9325	70,041	346,09	Всі коефіцієнти є значущими

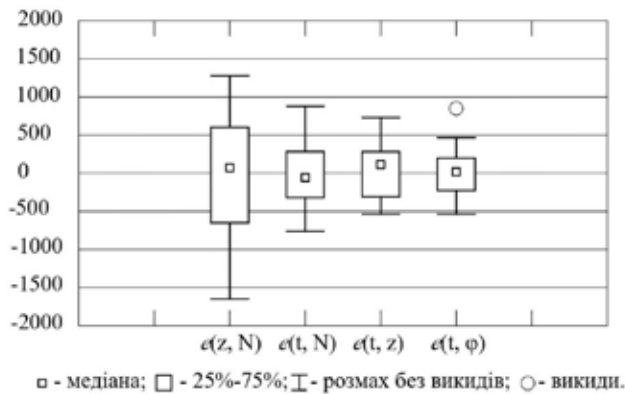


Рис. 4. Діаграми Box Plot для сукупності залишків регресійної моделі 5.1–8.1

моделей 5.1–8.1 до нормального розподілу. Перевагу і в даному аспекті мають моделі 7.1, 8.1, хоча й відповідний графік моделі 6.1 є доволі близьким до вказаних графіків.

Враховуючи результати порівняння моделей №№ 1.1–4.1, а також №№ 5.1–8.1, порівняємо ще живані вище графічні аспекти поведінки моде-

лей 3.1 та 7.1, 8.1. Результати порівняння представлено на рис. 6.

Більша компактність діаграм моделей 7.1 ($e(t, z)$) і 8.1 ($e(t, \varphi)$) порівняно з 3.1 ($e(t)$) особливо помітна на важливих процентних інтервалах 25% – 75%. Показники R та S також кращі у моделей 7.1, 8.1. Це дозволяє зробити висновок про те, що розширення моделі 3.1 за рахунок включення в число пояснювальних змінних змінної z (завантаження аудиторного фонду) або φ (фіктивна змінна, що символізує означену інтенсивність навчального процесу), є доцільним.

Зауважимо, що подальше утворення моделей електроспоживання типу (1), (2) за рахунок вживання більшої кількості зумовлених вище пояснювальних змінних (до трьох або чотирьох) не призвело до покращення їх якості: за приблизно тими ж, що й вище, значеннями показників R , F , S , кожна така модель містить незначущі коефіцієнти, що фактично зводить її до однієї з попередніх моделей 3.1, 7.1 або 8.1.

Попередня інформація стосувалася якості апроксимації моделями 1.1 – 8.1 відомих даних

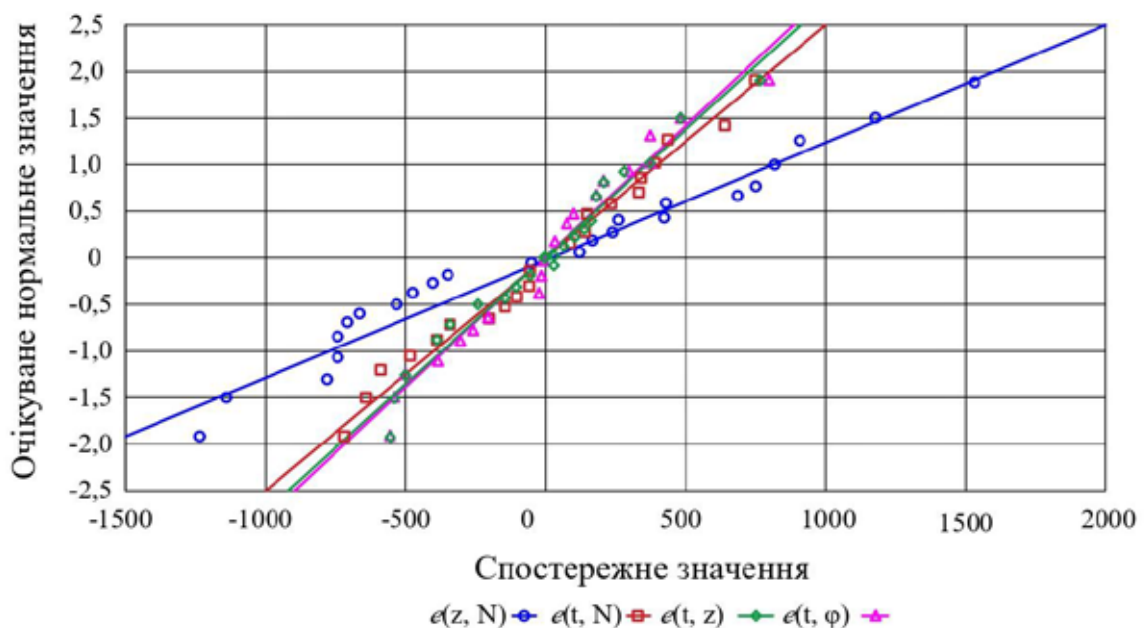


Рис. 5. Нормальні імовірнісні графіки сукупності залишків регресійних моделей 5.1–8.1

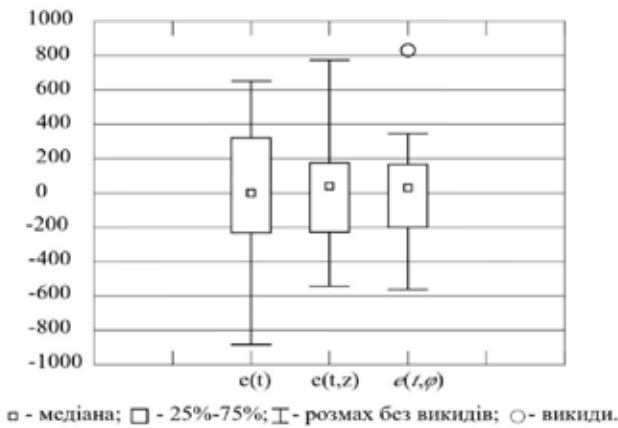


Рис. 6. Діаграми Box Plot для сукупності залишків моделей 3.1 та 7.1, 8.1

по енергоспоживанню (вересень 2014 – вересень 2016 років). В наступній таблиці 3 наводяться деякі результати щодо прогнозування за допомогою вказаних моделей величин електроспоживання за даними з вересня 2016 по серпень 2017 року. Коментар до зазначених результатів буде наведено нижче.

Зауважимо, що за браком точної інформації реальні значення регресора z замінені тут екстрапольованими значеннями за даними кількох мину-

лих років. З цієї причини прослідкувати з повною достовірністю за плановою зміною інтенсивності навчальних занять в аудиторіях з допомогою значень цього регресора ϵ дещо проблематичним, враховуючи відзначену наближеність останніх. З іншого боку, виявилось, що реальний графік навчального процесу в розглядуваному часовому проміжку більш відповідав значенням змінної φ , котра позначена в таблиці як φ_1 . Тому результати прогнозування за допомогою моделі 8.1 представлені в таблиці 3 двічі: при значеннях змінної φ , що наведені в стовпці 4 (вони відповідають рівності (2)) і для $\varphi = \varphi_1$ (значення φ_1 – в стовпці 5). Зауважимо, що в останньому випадку коефіцієнти моделі 8.1 не перераховувалися. Отже якщо дані стовпця 9 (прогноз за 8.1(φ)) є результатами прогнозування моделлю 8.1 по змінній t , то дані стовпця 10 є результатами прогнозування по парі змінних (t, φ) тією ж моделлю.

В наступній табл. 4 містяться деякі кількісні характеристики результатів прогнозування, що представлені в табл. 3.

Висновок щодо моделей лінійної регресії для об'єкту № 1

Як спосіб апроксимації наявних даних перевагу мають моделі 7.1 та 8.1 – $e(t, z)$ і $e(t, \varphi)$

Таблиця 3

Результати прогнозування рівнів електроспоживання з використанням моделей 3.1, 7.1, 8.1

Місяць, рік	t	z	φ	φ_1	спостережуване значення e	Прогноз за 3.1	Прогноз за 7.1	Прогноз за 8.1(φ)	Прогноз за 8.1(φ_1)
09.2016	16,1	36,67	0	1	2045,43	2240,17	2473,33	2413,96	1899,13
10.2016	6,5	38,77	0	0	3252,85	3114,25	3284,77	3284,49	3284,49
11.2016	1,2	38,13	0	0	4062,26	3596,82	3707,06	3765,09	3765,09
12.2016	-1,5	34,50	1	0	4065,19	3842,65	3874,74	3495,09	4009,93
01.2017	-4,9	9,17	1	1	3580,26	4152,22	3788,38	3803,41	3803,41
02.2017	-2,7	28,33	0	1	3863,01	3951,91	3884,02	4118,75	3603,92
03.2017	-1,5	34,95	0	0	3355,24	3842,25	3881,19	4009,93	4009,93
04.2017	10,4	39,50	0	0	2646,57	2759,16	2977,86	2930,84	2930,84
05.2017	15,3	26,72	0	1	1983,67	2313,01	2395,93	2486,51	1971,67
06.2017	20	8,63	0	1	1656,11	1885,08	1754,03	2060,31	1535,37
07.2017	20,9	0	1	1	1192,34	1802,95	1557,15	1463,87	1463,87
08.2017	22,3	0	1	1	1149,63	1675,66	1443,20	1336,91	1336,91

Таблиця 4

Показники відхилень прогнозних значень моделей 3.1, 7.1, 8.1 від результатів спостережень

№ моделі	Середнє значення абсолютних відхилень	Мінімальне значення абсолютних відхилень	Максимальне значення абсолютних відхилень	Середнє значення відносних відхилень	Мінімальне значення відносних відхилень	Максимальне значення відносних відхилень
3.1	331,39	88,88	610,60	0,163	0,023	0,512
7.1	271,70	20,99	525,94	0,119	0,005	0,306
8.1(φ)	337,59	31,64	654,69	0,140	0,010	0,254
8.1(φ_1)	211,93	12,01	654,69	0,082	0,006	0,228

(залежності електроспоживання від температури навколишнього середовища і показників завантаженості аудиторного фонду). Для швидких попередніх розрахунків при прогнозуванні величин електроспоживання для даного об'єкту можна використовувати модель 3.1 (залежність від температури навколишнього середовища). Моделі 7.1, 8.1 як такі, що додають значущим чином, відповідно, ефект рівня зайнятості учбових аудиторій і врахування періодів зниженої інтенсивності навчального процесу, уточнюють прогнозні розрахунки моделі 3.1. При фіксованому рівні зайнятості аудиторій доцільно паралельне використання моделей 7.1 і 8.1 з метою утворення більш надійних прогнозних інтервалів величин електроспоживання.

Висновки. У даному дослідженні запропоновано методику розрахунку кількісних аспектів процесу електроспоживання в інфраструктурі закладу освіти. Дана методика розраховує середнє значення добового електроспоживання в кВт×год за обраний проміжок часу на основі певних регресійних моделей. Порівняно з більш поширеними способами таких розрахунків новим аспектом є пропонувані варіанти врахування зміни розкладу занять на протязі навчального року. Подібні врахування можуть бути застосованими, наприклад, у випадках перенесення в часі викладення того чи іншого комплексу навчальних дисциплін. Зазначені перенесення можуть мати місце, скажімо, з міркувань, економії у зв'язку з різною вартістю експлуатації приміщень в різні проміжки часу.

Запропоновано два способи такого врахування: за допомогою введення в регресійну модель пояснювальної змінної z числового типу або за допомогою пояснювальної змінної φ категоріального типу (фіктивної змінної). Кількісна змінна z є процентом завантаженості аудиторного фонду на даному часовому відрізьку, а фіктивна змінна φ –

це індикатор степеню інтенсивності навчального процесу. Ці змінні, до деякої міри, конкурують одна з одною (включати їх обох в одне рівняння недоречно з причин їх значної взаємної корельованості). Як виявилось, змінна φ має деяку перевагу в застосуванні порівняно із z у випадку ускладнень з достатньо точним визначенням значення першої.

Були проведені відповідні розрахунки за даними електроспоживання одного з основних корпусів (корпус № 1) Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД). Зазначені розрахунки показали, що статистичні характеристики регресійних моделей електроспоживання, котрі включають погодні (температурні) показники і вищезазначені показники навчальних навантажень, значним чином покращилися порівняно із характеристиками моделей лише першого або лише другого типу. З іншого боку, при реальному прогнозуванні значень електроспоживання моделі «сумісного типу» давали на 5% – 15% кращі середні показники абсолютних та відносних відхилень порівняно із «чисто погодними» моделями.

Розрахунки для деяких інших приміщень КНУТД, які в роботі не наводяться, підтверджують доцільність введення сумісних характеристик, котрі, як і зазначено вище, формують процес електроспоживання у корпусах ЗО. З іншого боку, тут траплялися і помітні відмінності від моделей корпусу № 1. Так, зустрічалися варіанти, коли, на відміну від викладеного вище, «погодні» моделі були зовсім непридатні, а більш принагідні сумісні моделі вимагали комбінацій більше ніж двох регресорів. Автори вважають доцільним надалі провести дослідження з виявленням причин такої відмінності і сформувані додаткові регресійні моделі, що більш повно відповідають вказаній ситуації.

Список літератури:

1. Baydoğan M.Ç., Özkantar V. Evaluation of daylight performance metrics according to country guidelines: The case of educational buildings in Turkey. *Energy and Buildings*, 2023. Vol. 297, Article 113487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113487>
2. Hilorme T., Sokolova L., Portna O., Lysiak L., Boretskaya N. Smart Grid concept as a perspective for the development of Ukrainian energy platform. *IBIMA Business Review*, 2019, Article 923814. DOI: <https://doi.org/10.5171/2019.923814>
3. Shavolkin O., Shvedchykova I., Kolcun M., Medved' D. Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*, 2023, Vol. 16, №. 15, Article 5851. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16155851>
4. vom Scheidt F., Medinová H., Ludwig N., Richter B., Staudt P., Weinhardt C. Data analytics in the electricity sector – A quantitative and qualitative literature review. *Energy and AI*, 2020, Vol. 1, Article 100009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100009>

5. Марценко С. В. «Математичне моделювання та статистичні методи обробки даних вимірювань в задачах моніторингу електронавантаження»: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 01.05.02, Тернопіль, 2011. 20с.

6. Каплун В.В., Красницький С.М., Бобровник В.М. Математичне моделювання електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, 2019. № 2(132). С. 9–23. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6976.2019.2.1>

7. Chen W.T., Wang C.H., Merrett H.C., Liu S.-H., Chang J.-J. Electricity consumption prediction – A case study of a university library / *Journal of Building Engineering*, 2023. Vol. 76. Article 106990. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106990>

8. Faiq M., Tan K.G., Liew C.P., Hossain F., Tso C.-P., Lim L.L., Wong A.Y.K., Shah Z.M. Prediction of energy consumption in campus buildings using long short-term memory / *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 67, P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.008>

9. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis* / N.R. Draper, H. Smith. – New York: John Wiley & Sons, 1998, 910 p. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118625590>

10. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis* / J.W. Tukey. – Massachusetts: Addison Wesley Publishing Company, 1977, 693 p. DOI: <https://search.worldcat.org/title/Exploratory-data-analysis/oclc/3058187>

11. Оленко А.Я. *Комп'ютерна статистика* / Київ: ВПЦ «Київський університет», 2007, 432 с.

Krasnitskiy S.M., Bobrovnik V.M., Astistova T.I., Voloh L.V. ON THE USE OF LINEAR REGRESSION MODELS WITH DUMMY VARIABLES TO DESCRIBE QUANTITATIVE ASPECTS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

The object of this work research is certain quantitative aspects of the process of electricity consumption by an educational institution (EI). EI as an object of electricity consumption has its own characteristic features. In particular, in addition to weather conditions, with other factors fixed (structural features of buildings, the number of students and staff of the institution), time or situational aspects of the direction of the educational process (class schedule options, and, as a result, the corresponding options for classroom occupancy with appropriate options for their insulation) play a significant role.

As mathematical models of quantitative indicators of electricity consumption in the infrastructure of educational institutions, in particular, higher education institutions (HEIs), some regression equations are presented. The specified equations reflect the peculiarities of the periods of the educational process, seasonality and relevant aspects of the concomitant use of the classroom fund. A feature of the approach to solving the problem is the inclusion in the sets of regressors of both numerical explanatory variables and categorical ones.

As a result of the application of an expanded combination of factors that affect the process of electricity consumption of educational institutions, the presented models provide an opportunity to calculate and forecast numerical indicators of the specified process based not only on seasonal indicators, but also to take into account possible non-stationary and unplanned changes in the course of the educational process.

Keywords: *electricity consumption, educational institution, regression analysis, regressors, dummy variables, box plot data scatter plots.*

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026