

# СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy. 2017, 4(51):52-59  
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2017.04.052>

УДК 621.31

**В.О. ДЕРІЙ**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
**О.В. ЗГУРОВЕЦЬ**, провідний інженер  
Інститут загальної енергетики НАН України,  
вул. Антоновича, 172, 03150, м. Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЇХ УЩІЛЬНЕННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ

*В роботі проведено детальний аналіз «нічних провалів» графіків електричних навантажень в різні періоди 2016 р. для визначення основних залежностей та факторів, що впливатимуть на можливість регулювання електричного навантаження за допомогою електротеплових генераторів. Запропоновано апроксимувати цю частину графіка електричних навантажень поліномом другого ступеня (параболою). Визначено середньостатистичні показники коефіцієнтів параболи для різних періодів року. Досліджено вплив температури зовнішнього повітря та тривалості світлового дня на нічний провал графіка електричних навантажень. Визначено коефіцієнти кореляції та запропоновано апроксимувати ці залежності лінійними функціями, оцінено похибки, які при цьому виникають. Виконане числове диференціювання дозволило визначити максимальні швидкості зміни потужності в ОЕС України під час нічного провалу та фактори впливу на них.*

*Ключові слова:* ОЕС України, графік електричних навантажень, нічний провал, потужність, температура, електроенергія.

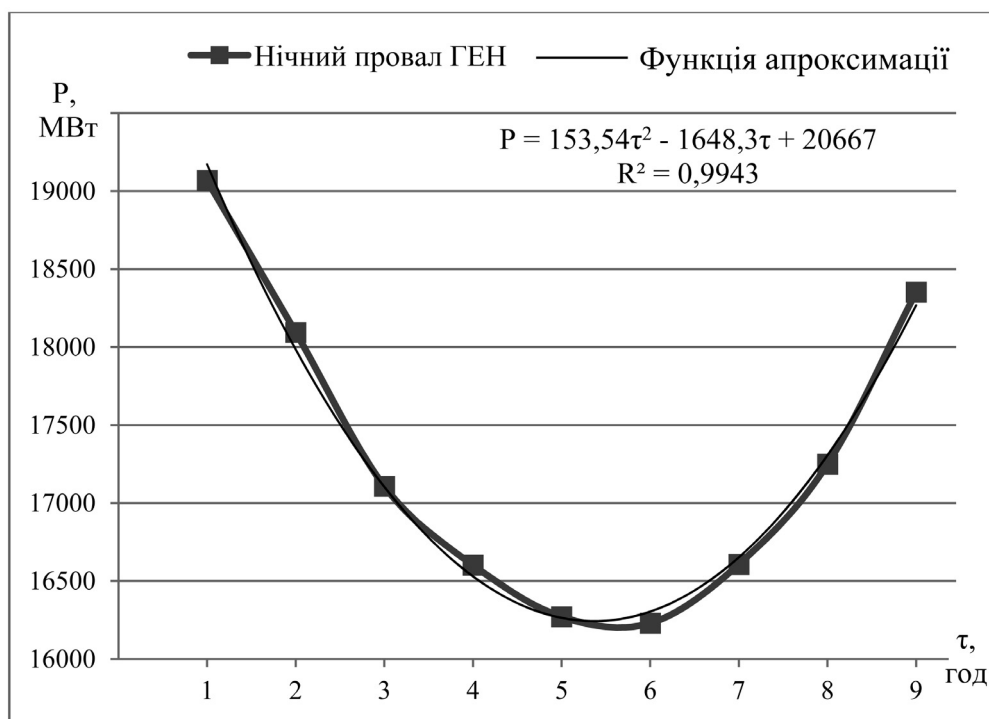
Проведення дослідження, якому присвячена дана стаття, зумовлено необхідністю пошуку алгоритмів взаємодії диспетчерів енергосистем та систем централізованого теплопостачання (СЦТ) при впровадженні в останніх електричних теплогенераторів (ЕТГ) для вирівнювання графіків електричних навантажень (ГЕН) під час «нічного провалу» ОЕС України [1, 2]. При регулюванні електричного навантаження енергосистеми виникне ситуація спільної роботи ЕТГ, які будуть керуватися диспетчером енергосистеми та СЦТ, режими роботи яких задаються їх диспетчерами виходячи із температурних графіків. Для забезпечення узгодженої та надійної роботи цих систем виникнуть питання: згідно з яким законом будуть змінювати свою потужність ЕТГ, яка її величина та швидкість зміни, а

також, які фактори впливають на процес. Тому дане дослідження є актуальним та необхідним.

Графіки електричних навантажень неодноразово досліджувалися та аналізувалися, наприклад, в [3–5]. В роботах [3, 4] досліджувалися перспективні ГЕН та довгострокові прогнози їх змін за різними сценаріями. В роботі [5] аналізувалися виробництво та споживання електроенергії, досліджувалися добові ГЕН 2012 та 2013 рр. Але ніхто не досліджував питання взаємодії ЕТГ та СЦТ, зокрема, закономірність зміни потужності ОЕС України під час її нічного провалу. Це може стати перешкодою до масового впровадження ЕТГ в СЦТ для вирішення системних проблем ОЕС України.

Метою даного дослідження є встановлення аналітичної залежності зміни потужності ОЕС України під час «нічних провалів» ГЕН

© В.О. ДЕРІЙ, О.В. ЗГУРОВЕЦЬ, 2017



**Рис. 1.** Нічний провал ГЕН ОЕС України 27–28 січня 2016 р.

*Примітка.* Вісь часу  $\tau$  зміщена вправо на одну годину (за 0 взято 23<sup>00</sup> 27 січня)

та визначення факторів впливу на неї. На рис. 1 показано графік виробництва/споживання електроенергії в ОЕС України на проміжку часу з 23<sup>00</sup> 27 по 7<sup>00</sup> 28 січня 2016 р.

Як видно із рис. 1, період нічного провалу ГЕН добре апроксимується поліномом другого ступеня (параболою) при високому коефіцієнті достовірності апроксимації  $R^2$ :

$$P = a\tau^2 - b\tau + c, \quad (1)$$

де  $P$  – сумарна потужність генерації;  $\tau$  – параметр часу;  $a, b, c$  – коефіцієнти параболі.

З метою визначення коефіцієнтів достовірності апроксимації  $R^2$  та коефіцієнтів параболі ( $a, b, c$ ) були проаналізовані нічні провали ГЕН для кожної доби протягом січня – грудня 2016 р. Результати аналізу наведені в табл. 1 та 2. В табл. 1 показані середньомісячні коефіцієнти достовірності апроксимації та їх від-

носне середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{R^2}$ . Як видно із табл. 1, ці коефіцієнти дуже близькі до одиниці, а їх відхилення від середньої величини незначні, вони не перевищують  $\pm 1,17\%$ . Все це свідчить про те, що функцію апроксимації нічного провалу ГЕН вибрано вдало, і вона з високою імовірністю описує зміну потужності навантаження ОЕС в цей період часу.

В табл. 2 наведені середньомісячні коефіцієнти параболі та їх відносні середньоквадратичні відхилення для кожного місяця 2016 р.

Як видно із табл. 2, відхилення коефіцієнтів функції апроксимації нічного провалу ГЕН незначні як протягом місяця, так і протягом опалювального періоду (січень – квітень, жовтень – грудень). Максимальне відхилення протягом місяця в робочі дні не перевищують  $\pm 9,5\%$ , а у вихідні –  $\pm 13,4\%$ . Цей факт можна використати для прогнозування зміни потужності електричних теплогенераторів під час вирівнювання нічного провалу ГЕН, базую-

**Таблиця 1 – Коефіцієнти достовірності апроксимації**

Місяць	01.2016	02.2016	03.2016	04.2016	05.2016	06.2016	
R <sup>2</sup>	0,9854	0,9814	0,9746	0,9823	0,9786	0,9877	
σ <sub>R</sub> <sup>2</sup> , %	1,13%	0,97%	2,42%	0,96%	1,31%	0,59%	
Місяць	07.2016	08.2016	09.2016	10.2016	11.2016	12.2016	Середнє
R <sup>2</sup>	0,9878	0,9846	0,9715	0,9816	0,9749	0,9751	0,9816
σ <sub>R</sub> <sup>2</sup> , %	0,77%	1,18%	1,47%	0,96%	1,47%	1,73%	1,17%

**Таблиця 2 – Коефіцієнти функції апроксимації**

Місяць	Робочі дні			Вихідні дні		
	a ± σ	b ± σ	c ± σ	a ± σ	b ± σ	c ± σ
січень	153,9±3%	1308,4±3,5%	19200,6±3,6%	105,3±7,6%	1052,3±6,9%	18603,3±3,9%
лютий	157,2±4,5%	1301,6±4,4%	17806,9±2,3%	102,2±7%	1027,8±5,4%	17685,5±1,8%
березень	150,3±3,8%	1244,6±5,4%	17082,8±1,8%	96,4±13,8%	944,9±11,2%	16685,9±1,6%
квітень	155,7±4,7%	1346,3±6%	15738,3±3,5%	109,1±8,1%	1129,3±5,6%	15714±3,3%
травень	139,5±5,3%	1202,7±5,9%	14540,9±1,7%	90,8±11,4%	951,8±13,1%	14373,4±3,8%
червень	135,8±6,5%	1252,5±6,4%	14945,4±4,1%	102,9±8,1%	1105,2±8,7%	15029,6±4,5%
липень	116,8±7,3%	1132,7±7,1%	15421,6±2,7%	91,3±8,1%	1012,7±8,5%	15356,7±3,5%
серпень	107±6,6%	986,4±7,6%	14782,4±3,4%	79,2±5,3%	846,7±4,8%	14610,1±3,3%
вересень	139,3±9,5%	1170,3±9,2%	14864,3±3,1%	87,9±13,4%	914,4±11%	14657±2,8%
жовтень	163,7±5%	1365,1±6,4%	17020,3±7,1%	106,8±8,7%	1083±7,8%	16790,5±6,7%
листопад	158,7±3,7%	1298,1±3,7%	18061,3±3,6%	102,6±10,7%	1027,1±8,4%	17853,8±2,6%
грудень	161±4%	1331±4%	19262±2%	105,7±8%	1064,2±7,9%	19040,2±2,8%

чись на середніх значеннях за місяць.

Однією із цілей дослідження було визначення положення нічного провалу ГЕН в координатах – потужність  $P$  та час  $\tau$ . Відомо, що положення параболи на графіку при відомих коефіцієнтах можна визначити по положенню її вершини. Тому були визначені координати вершини параболи (мінімальна потужність під час нічного провалу ГЕН). Аналіз даних ГЕН показав, що мінімальна потужність ОЕС України спостерігалася в період часу від 3<sup>00</sup> до 5<sup>00</sup>. Розподіл імовірності мінімальної потужності такий: 3-тя година – 0,27; 4-та година – 0,58; 5-та година – 0,15.

Далі досліджувалася глибина нічного провалу ГЕН – різниця між середньодобовою потужністю енергосистеми та мінімальною її величиною. Найбільша величина глибини ніч-

ного провалу ГЕН спостерігалася 19.06.2016 р. і становила 3825 МВт, а найменша – 1759 МВт, яка спостерігалася 02.05.2016 р. Середня величина глибини нічного провалу за 2016 р. становила 2591 МВт. Вплив температури навколишнього повітря та тривалості світлового дня на глибину нічного провалу незначний, про що свідчать рис. 2 та 3.

Коефіцієнт кореляції між множиною значень глибин нічного провалу та температури становить 0,11, а тривалості світлового дня – 0,2.

Вплив температури навколишнього повітря на нічний провал ГЕН досліджувався при його мінімальній потужності. На рис. 4 показаний графік мінімальної потужності та температури навколишнього повітря протягом грудня 2015 р. – січня 2017 р.

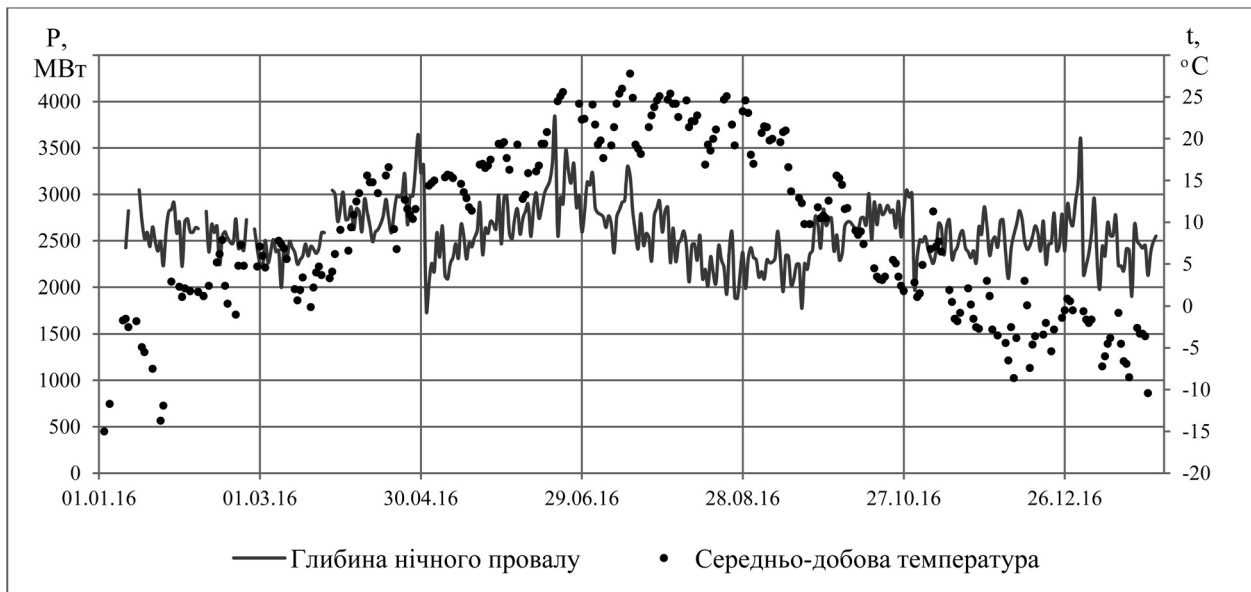


Рис. 2. Графіки глибини нічного провалу ГЕН та температури навколишнього повітря

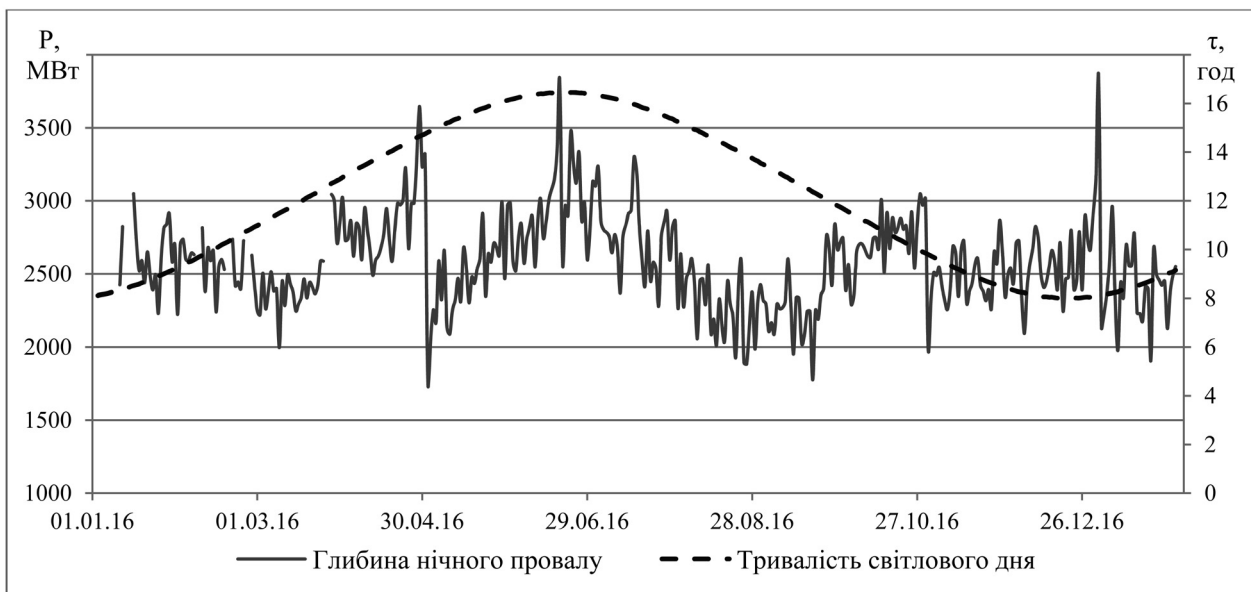
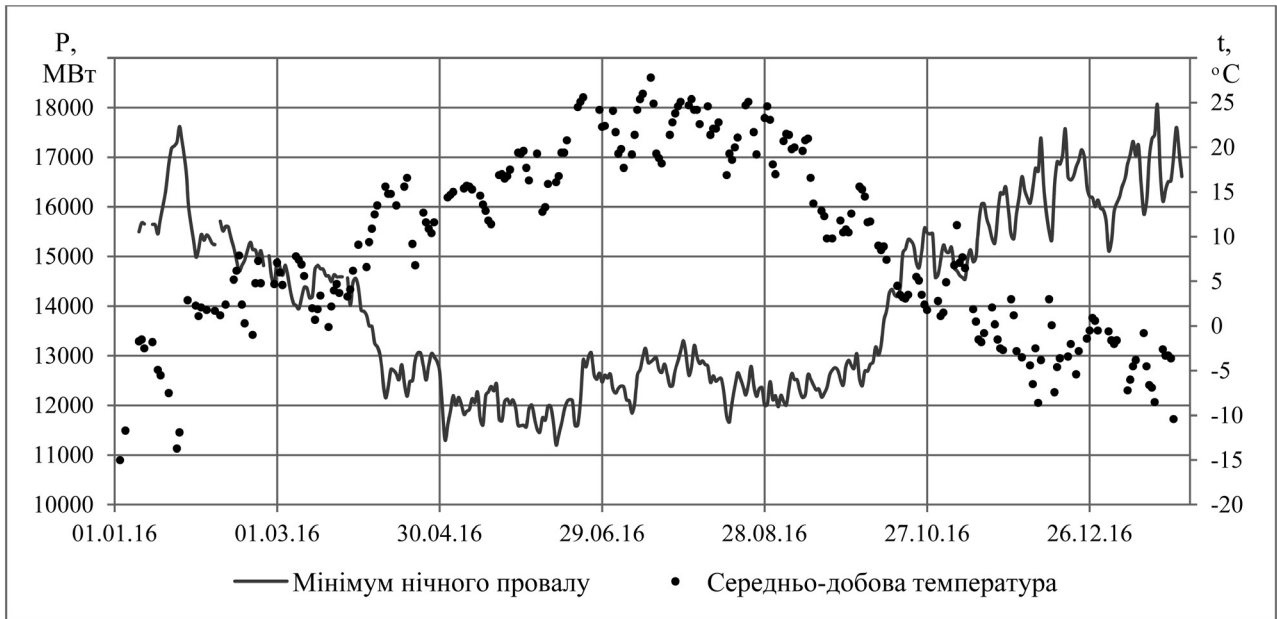


Рис. 3. Графіки глибини нічного провалу ГЕН та тривалості світлового дня

Із рис. 4 видно, що із збільшенням температури навколишнього повітря мінімальна потужність зменшується і навпаки. Для підтвердження зв'язку температури та мінімальної потужності було побудовано графік з ковзаючим інтервалом кореляції періодом 60 днів множин значень температури та мінімальної потужності, який показано на рис. 5.

Із графіка на рис. 5 видно, що в місяці опалювального періоду коефіцієнт кореляції від'ємний (чим менша температура навколишнього повітря, тим більша потужність ОЕС) та має досить велике значення (від 0,7 до 0,9). Така залежність пояснюється використанням електроенергії для опалення та теплостачання. Зменшення коефіцієнта кореляції в період з 22.02. по 11.03. пояснюється

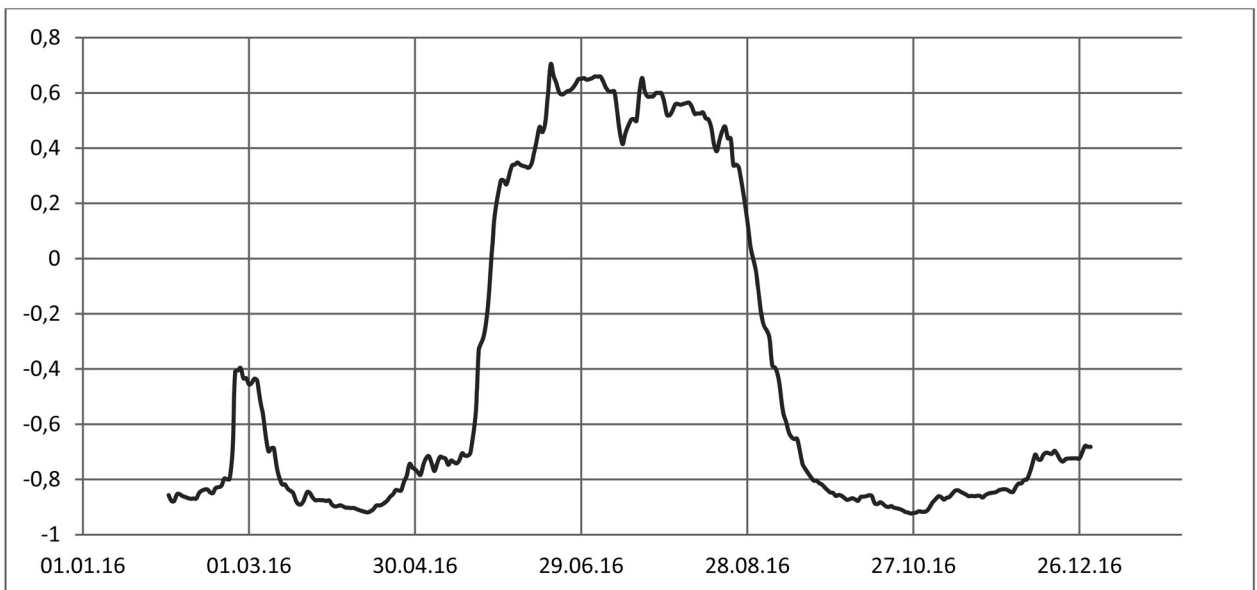


**Рис. 4.** Графіки температури навколишнього повітря та мінімальної потужності ОЕС

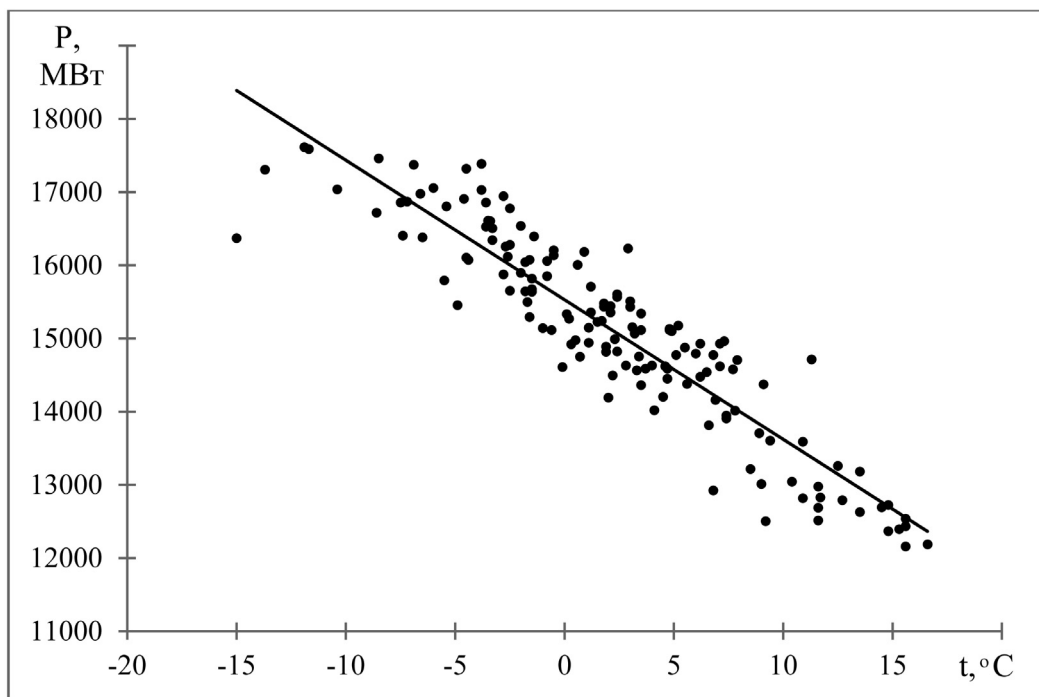
тим, що середні температури навколишнього повітря в ці дні були більше нуля (5,6 – 7,8 °С). В літні місяці коефіцієнт кореляції позитивний (чим вища температура, тим більше електроенергії використовується системами кондиціонування та охолодження продуктів харчування). Для визначення аналітичної залежності мінімальної потужності ОЕС

України від температури в опалювальний та неопалювальний періоди були побудовані графіки в координатах – температура, мінімальна потужність, які показані на рис. 6 та 7.

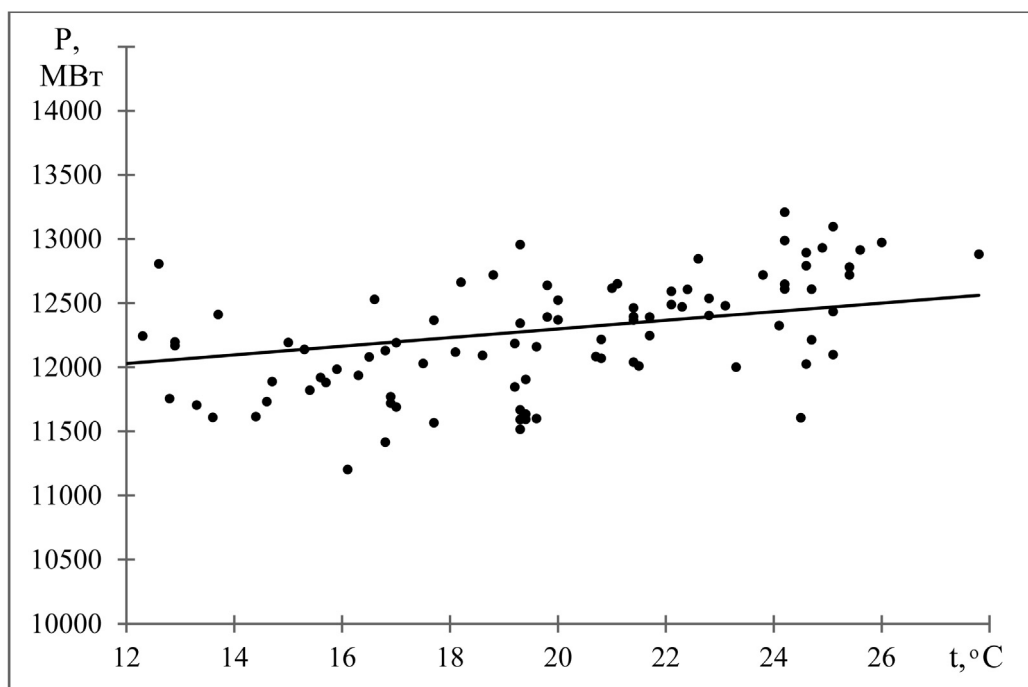
У першому наближенні залежність мінімальної потужності від температури навколишнього повітря можна виразити такими формулами. Для опалювального сезону



**Рис. 5.** Графік кореляції множин температури та мінімальної потужності



**Рис. 6.** Залежності мінімальної потужності ОЕС України від температури повітря в опалювальний сезон



**Рис. 7.** Залежності мінімальної потужності ОЕС України від температури повітря в неопалювальний сезон

$$P_{оп.мін} = -209,46t + 15493, \quad (2)$$

а для неопалювального сезону

$$P_{но.мін} = 92,026t + 10351, \quad (3)$$

де  $P_{оп.мін}$ ,  $P_{но.мін}$  – мінімальна потужність під час нічного провалу в опалювальний та неопалювальний сезони;  $t$  – температура навколишнього повітря.

Величина достовірності апроксимації графіка на рис. 5 лінійною функцією становить  $R^2 = 0,8793$ , а графіка на рис. 6 –  $R^2 = 0,3931$ .

Вплив тривалості світлового дня на величину мінімальної потужності ОЕС України під час нічного провалу ГЕН видно із графіка на рис. 8.

Аналогічно температурі були визначені аналітичні залежності мінімальної потужності від тривалості світлового дня для періодів його зростання та спаду. В період зростання тривалості світлового дня від 8 годин до 16 годин залежність мінімальної потужності  $P_{мін}$  від тривалості світлового дня можна виразити такою формулою:

$$P_{мін} = -38,397\tau + 17143, \quad (4)$$

де  $\tau$  – тривалість світлового дня.

Величина достовірності апроксимації при цьому становить  $R^2 = 0,8254$ .

Аналогічно в період спадання тривалості світлового дня від 16 години до 8 годин,  $P_{мін}$  буде дорівнювати

$$P_{мін} = 30,354\tau + 11458. \quad (5)$$

Величина достовірності апроксимації становить  $R^2 = 0,7529$ .

У процесі виконання роботи досліджувалися також швидкості зміни потужності ГЕН під час нічного провалу та впливу на неї температури навколишнього повітря і тривалості світлового дня. Як відомо, швидкість зміни параболи описується лінійною функцією, яка переходить через нуль в координатах її вершини. Тому максимальні значення швидкості будуть на кінцях інтервалу (нічного провалу ГЕН), який розглядається. В нашому випадку це періоди  $23^{00} - 24^{00}$  та  $6^{00} - 7^{00}$ . Числове диференціювання зібраних даних показало, що в 2016 р. максимальна швидкість зміни потужності ОЕС України під час нічного провалу в проміжку часу  $6^{00} - 7^{00}$  була 09.02.2016 р. і становила 1816 МВт·год, а

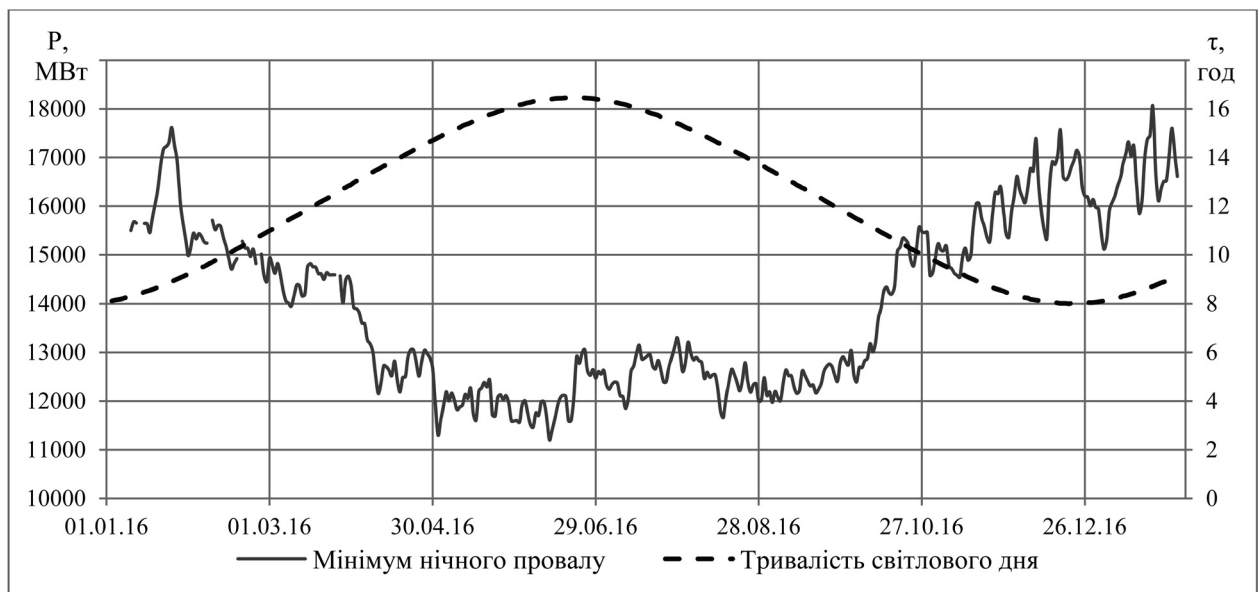


Рис. 8. Залежність мінімальної потужності ОЕС України та тривалості світлового дня

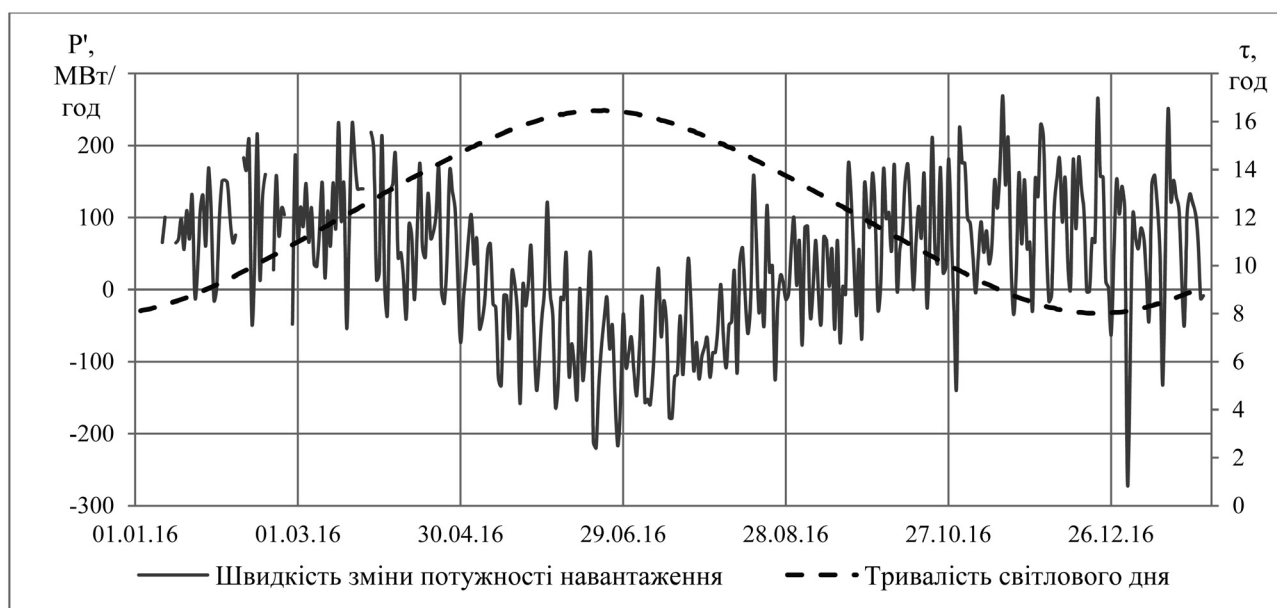


Рис. 9. Графік швидкості зміни потужності ОЕС України та тривалості світлового дня

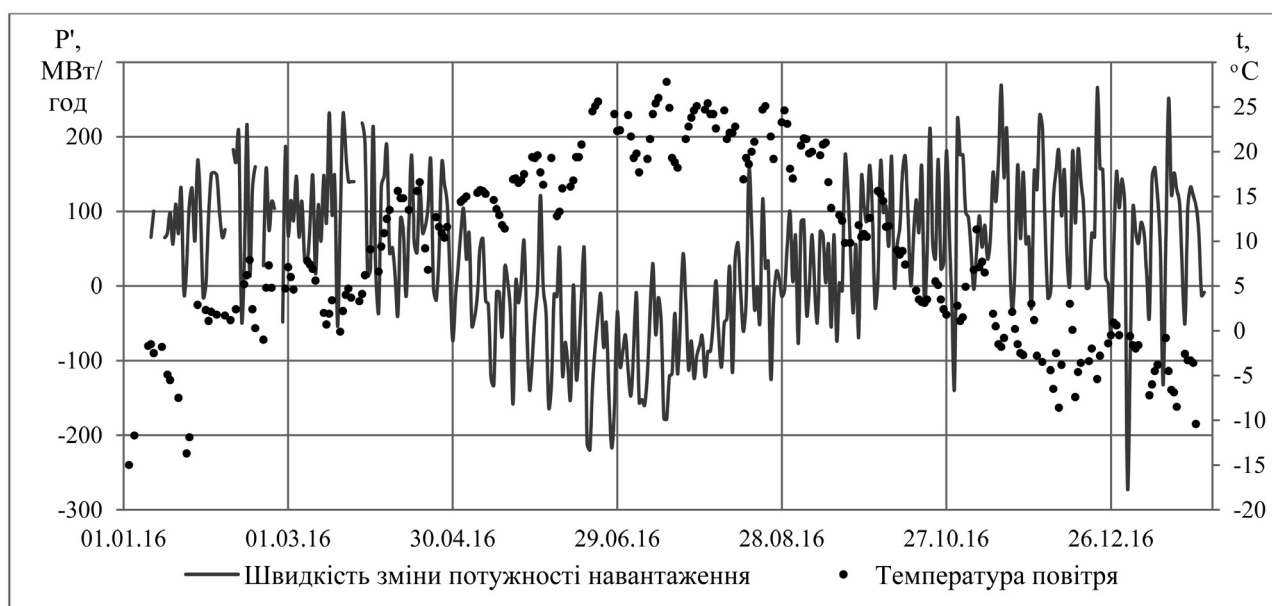


Рис. 10. Графіки швидкості зміни потужності ОЕС України та температури повітря

середня її величина за 2016 р. – 1278 МВт·год. Вплив тривалості світлового дня та температури навколишнього повітря на швидкість зміни потужності показано на рис. 9 та 10.

Дослідження показали, що найбільший вплив даних факторів спостерігається в період від 3-х до 5-ти годин ранку, коли абсолютне значення швидкості зростання потуж-

ності близьке до мінімуму. Коефіцієнт кореляції при цьому від'ємний і його величина становить для впливу тривалості світлового дня  $-0,55$ , а для впливу температури  $-0,59$ . При збільшенні швидкості зростання потужності в період від  $5^{00}$  до  $7^{00}$  коефіцієнти кореляції зменшуються до величин  $-0,3$  та  $-0,41$  відповідно. Це свідчить про те, що на швидкість



зміни потужності починають сильніше впливати інші фактори (зміна навантаження споживачів).

## ВИСНОВКИ

Доведено, що нічний провал ГЕН можна апроксимувати параболічною функцією. Для кожного місяця 2016 р. визначені коефіцієнти функції апроксимації та їх відносні середньоквадратичні відхилення.

Мінімум потужності ОЕС України в переважній більшості спостерігався близько четвертої години ночі. Основними впливовими факторами на величину мінімальної потужності є температура повітря та тривалість світлового дня. Запропоновано аналітичні вирази, які дозволяють в першому наближенні враховувати цей вплив.

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що максимальний дефіцит маневреної потужності під час нічного провалу (глибина нічного провалу) у 2016 р. становив 3825 МВт, а середня його величина була 2591 МВт. Встановлено, що вплив температури та тривалості світлового дня на глибину нічного провалу незначний.

Максимальна швидкість зміни потужності навантаження ОЕС України під час нічних провалів у 2016 р. становила 1816 МВт·год, а середня її величина за 2016 р. – 1278 МВт·год. Встановлено, що вплив температури зовнішнього повітря та тривалості світлового дня на швидкість зміни потужності незначний і спостерігається при невеликій її величині (впродовж часу між 3<sup>00</sup> та 5<sup>00</sup>).

Отримані результати дозволять диспетчерам енергосистеми спрогнозувати необхідні величини потужності електричних теплогенераторів під час нічних провалів електричних навантажень та швидкість їх змін, а диспетчерам систем централізованого тепlopостачання зміну теплових потужностей котлів відповідно.

1. Кулик М.М. Співставний аналіз техніко-економічних характеристик Канівської ГАЕС та комплексу споживачів-регуляторів для покриття графіків електричних навантажень. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 4(39). С. 5—10.
2. Кулик М.М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 1(40). С. 20—28. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.020>.
3. Кулик М.М., Дубовський С.В., Кобрін П.П. . Прогнозування графіків електричних навантажень Об'єднаної енергосистеми на довгострокову перспективу. *Проблеми загальної енергетики*. 2004. Вип. 1(10). С. 7—11.
4. Кобрін П.П. Дослідження та аналіз прогнозних графіків електричного навантаження Об'єднаної енергосистеми України та показників їх форми. *Проблеми загальної енергетики*. 2007. Вип. 1(15). С. 41—46.
5. Маляренко В.А., Щербак И. Е. Анализ производства и потребления электроэнергии в объединенной энергосистеме Украины. URL: [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2013\\_04\\_2/pdf/125malarenko.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2013_04_2/pdf/125malarenko.pdf).

*Надійшла до редколегії 05.10.2017.*