

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2019, 1(56): 48–52
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2019.01.0048>

УДК 621.31

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

МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ОЕС УКРАЇНИ ПІД ЧАС НІЧНОГО ПРОВАЛУ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Описано створену модель для оперативного прогнозування потужності ОЕС України в період нічного провалу її графіків електричних навантажень та розроблений алгоритм її роботи. Встановлено фактори впливу на аргументи функції моделі та визначено їх аналітичні залежності. Показано, що максимальні похибки прогнозування виникають на кінцях інтервалу нічного провалу графіків електричних навантажень. Визначено основні причини цих похибок та запропоновано заповіжні заходи. Проведено тестове моделювання потужності ОЕС України під час її нічного провалу графіків електричних навантажень за період з 30.11.2015р. до 30.04.2017 р. показало, що максимальна відносна похибка прогнозування не перевищує 9,4%, а відносне середнє її значення становить 3,9%.

Ключові слова: ОЕС України, модель, графік електричних навантажень, нічний провал, потужність, електроенергія, прогнозування.

Дана стаття є продовженням публікації [1] результатів дослідження графіків електричних навантажень (ГЕН) під час «нічного провалу» ОЕС України. Проведення цих досліджень обумовлено необхідністю пошуку алгоритмів взаємодії диспетчерів енергосистем та систем централізованого теплопостачання (СЦТ) при впровадженні в останніх електричних теплогенераторів (ЕТГ) для ущільнення графіків електричних навантажень під час «нічного провалу» ОЕС України. Під час нічного провалу ГЕН диспетчер енергосистеми буде керувати електричними теплогенераторами, які споживають електричну та виробляють теплову енергію. Ця теплова енергія поступає в СЦТ і якщо не вжити відповідних заходів, то це може спричинити її дисбаланс, що при низьких температурах зовнішнього повітря значно знизить надійність та призведе до виникнення аварійних ситуацій.

Для забезпечення узгодженої та надійної роботи енергосистеми та СЦТ необхідно знати, згідно з яким законом будуть змінювати свою

потужність ЕТГ, яка її величина та швидкість зміни. Тому дане дослідження є актуальним.

Модель нічного провалу ГЕН розроблена на основі досліджень, проведених в Інституті загальної енергетики, основні результати яких наведені в роботі [1]. Згідно цих досліджень нічний провал (проміжок часу з 23⁰⁰ попередньої до 7⁰⁰ поточної доби) з великим ступенем ймовірності апроксимується поліномом другого порядку (параболою). Тобто, потужність ОЕС України під час нічного провалу можна виразити аналітичною формулою – параболою. Примітка. В подальших дослідженнях проміжок часу був збільшений – з 21⁰⁰ попередньої до 9⁰⁰ поточної доби.

Проведені дослідження показали, що в період часу з 20⁰⁰ до 23⁰⁰ ГЕН енергосистеми апроксимується параболою виду

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

а в період часу з 23⁰⁰ – 7⁰⁰ параболою виду

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

де $P(\tau)$ – потужність енергосистеми; a , b , c – коефіцієнти параболи.

Це показано на рис. 1 та 2.

© В.О. ДЕРІЙ, 2019

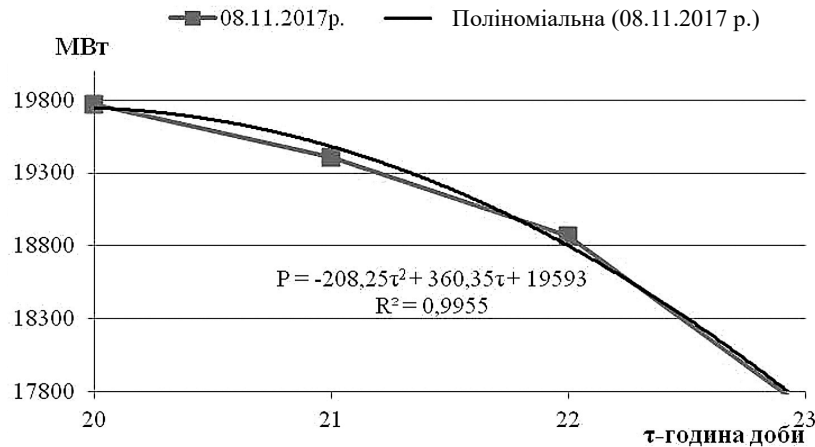


Рис. 1. ГЕН в період з 20:00 до 23:00 год

Загальновідомо [2], що коефіцієнти рівняння параболи можна вирахувати по координатах трьох її будь яких точок згідно з формулою

$$a = \frac{y_3 - \frac{x_3(y_2 - y_1) + x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1}}{x_3(x_3 - x_1 - x_2) + x_1x_2}; \quad (3)$$

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - a(x_1 + x_2); \quad (4)$$

$$c = \frac{x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1} + ax_1x_2. \quad (5)$$

Сказане вище і було використано для розробки моделі прогнозування потужності ОЕС України під час нічного провалу її ГЕН. У моделі застосовано комбінований підхід, що складається з трьох етапів прогнозування, диференційованих за часом (рис. 2). У загальному вигляді модель може бути представлена виразом:

$$P_i(\tau_j) = F \left[P_{i-1}(20^{00}), P_{i-1}(21^{00}), P_{i-1}(22^{00}), P_i(\tau_{j-1}), P_i(\tau_{j-2}), P_i(\tau_{j-3}), P_{i-1}^{\min} \pm \Delta P(t^\circ, \tau_{\text{сд}}), f(D, M) \right], \quad (6)$$

де $P_i(\tau_j)$ – потужність енергосистеми в i -й день, в j -ту годину нічного провалу ГЕН; $P_{i-1}(20^{00})$, $P_{i-1}(21^{00})$, $P_{i-1}(22^{00})$ – потужності енергосистеми в попередню добу о 20, 21 та 22 год; $P_i(\tau_{j-1})$, $P_i(\tau_{j-2})$, $P_i(\tau_{j-3})$ – потужності енергосистеми в поточну добу на 1, 2 та 3 год. раніше, ніж година прогнозування; P_{i-1}^{\min} – мінімальна потужність в попередню добу; $\Delta P(t^\circ, \tau_{\text{сд}})$ – приріст потужності та фактори впливу: t° – температура зовнішнього повітря; $\tau_{\text{сд}}$ – тривалість світлового дня в дану добу; $f(D, M)$ – фактори, які визначають розташування мінімальної потужності по осі часу: d – тип дня (робочий, вихідний або святковий); m – поточний місяць.

Алгоритм роботи моделі наступний. Так, як нічний провал ГЕН починається о 23⁰⁰, то на першому етапі для прогнозування потужності в цей час необхідно знати потужності о 20, 21 та 22 год.

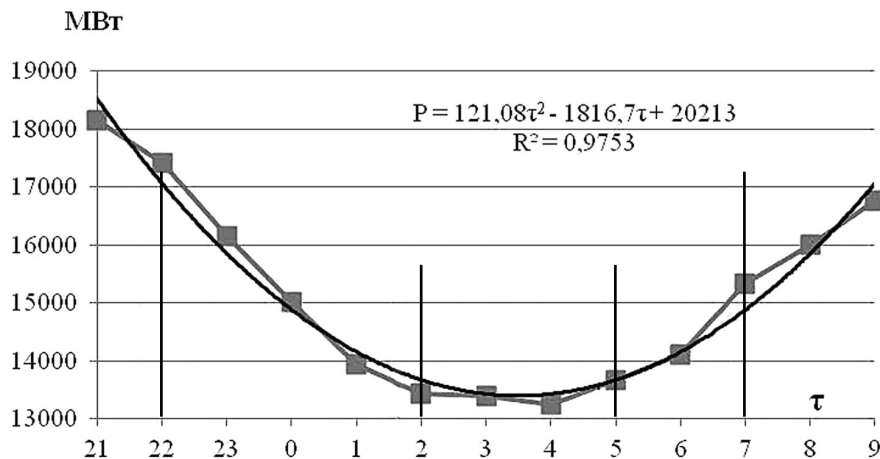


Рис. 2. Потужність ОЕС України під час нічного провалу 10–11.04.2017 р.

Тобто, о 23⁰⁰, використовуючи значення потужності за три попередні години включно та згідно з виразів (3) – (5), визначаються коефіцієнти параболі для рівняння (1). Далі, змінюючи параметр τ , знаходимо значення потужності о 23⁰⁰. Прогнозування потужності в подальші години нічного провалу ГЕН (0⁰⁰–4⁰⁰) відбувається по іншій схемі (другий етап), що обумовлено не стаціонарністю зміни потужності в період часу з 2⁰⁰ до 5⁰⁰ (рис. 2). Розглянемо це на прикладі потужності енергосистеми о 0⁰⁰. Після настання 23⁰⁰ стає відома фактична потужність енергосистеми в цей час. Для визначення потужності в 0⁰⁰ використаємо три її значення: в 22⁰⁰, 23⁰⁰ (фактичне значення) та значення мінімальної потужності за попередню добу P_{i-1}^{min} . Причому це значення мінімальної потужності необхідно скоригувати на величину $\Delta P(t^\circ, \tau_{CD})$, яка враховує поточні температури повітря та тривалості світлового дня тобто,

$$P_i^{min} = P_{i-1}^{min} + \Delta P(t^\circ) + \Delta P(\tau_{CD}), \quad (7)$$

де P_i^{min} – мінімальна потужність енергосистеми в i -ту добу; $\Delta P(t^\circ)$ – приріст потужності обумовлений зміною температури зовнішнього повітря; $\Delta P(\tau_{CD})$ – приріст потужності, обумовлений зміною тривалості світлового дня.

Виходячи із виразів, які наведено в [1], в першому наближенні приріст потужності можна визначити за формулою

$$\Delta P(t^\circ) = k_1(t_i^\circ - t_{i-1}^\circ), \quad (8)$$

де t_i°, t_{i-1}° – середні температури зовнішнього повітря в дану та попередню добу; k_1 – коефіцієнт пропорційності, який в опалювальний період складає – 209,46; а в неопалювальний – + 92,03.

Аналогічно визначається приріст потужності за рахунок зміни тривалості світлового дня

$$\Delta P(\tau_{CD}) = k_2(\tau_i - \tau_{i-1}), \quad (9)$$

де τ_i, τ_{i-1} – тривалості світлового дня в дану та попередню добу відповідно; k_2 – коефіцієнт пропорційності, який згідно з [1], дорівнює – 38,4.

Розташування мінімальної потужності по осі часу визначається залежно від типу дня (робочий, вихідний/святковий) та поточного місяця $f(D, M)$. Далі використовуючи формули (3) – (5) визначаються коефіцієнти параболі для рівняння (2) та

знаходимо прогнозне значення потужності в 0⁰⁰. Аналогічним чином прогнозуються потужності енергосистеми в інші години нічного провалу ГЕН аж до координати з мінімальною потужністю. Тобто, для прогнозування використовуються тільки три точки, причому попередньо прогнозовані приводяться до фактичних значень.

Після проходження координати часу з мінімальною потужністю енергосистеми, для прогнозування наступних точок використовуються всі попередні фактичні значення потужності починаючи з 23⁰⁰ попередньої доби. Для мінімізації похибки застосовується метод найменших квадратів.

Тестова перевірка моделювання потужності нічного провалу ГЕН та алгоритму її роботи виконувалася на прикладі даних по навантаженню ОЕС України за грудень 2016 р. За цей місяць максимальна похибка прогнозування потужності енергосистеми піл час її нічного провалу складала не більше ніж 6,5%. Аналіз тестових розрахунків показав, що в більшості випадків максимальне відхилення прогнозованої потужності від фактичної спостерігалось на границях нічного провалу – о 23⁰⁰ та 7⁰⁰. Встановлено, що ці відхилення обумовлені зламами графіка електричних навантажень о 22⁰⁰ попередньої та 7⁰⁰ поточної доби. Для зменшення похибки прогнозування потужності енергосистеми на границях нічного провалу було вирішено використати середні швидкості зміни потужності в ці години. Ідея використання середньої швидкості зміни потужності зумовлена її відносною стабільністю між типовими днями та незначними відхиленнями відносної зміни потужності між сусідніми днями. Для прикладу в табл. 1 наведені ці показники за період з 29.11.2016 р. до 30.12.2016 р.

На першому та останньому етапах (о 23⁰⁰ та 7⁰⁰) потужність визначається згідно з виразом

$$P_i^{23} = P_i^{22} + V_{i-1}^{23}(\beta, \gamma) \cdot \Delta \tau, \quad (10)$$

де P_i^{23} – прогнозована потужність енергосистеми о 23⁰⁰; V_{i-1}^{23} – середня швидкість зміни потужності за попередню аналогічну добу (робочий чи вихідний день); β, γ – впливові фактори; $\Delta \tau$ – крок осереднення (1 год).

Аналогічним чином прогнозується потужність енергосистеми і на четвертому етапі (о 7⁰⁰). На

Таблиця 1. Відносні показники зміни потужності ОЕС України

Тип дня	Середній відносний приріст потужності енергетичної системи в межах одного нічного провалу ГЕН та його середнє квадратичне відхилення, %		Максимальна відносна зміна приросту потужності енергетичної системи між двома нічними провалами ГЕН та його середнє квадратичне відхилення, %	
	Часовий інтервал нічного провалу			
	22 ⁰⁰ –23 ⁰⁰	6 ⁰⁰ –7 ⁰⁰	22 ⁰⁰ –23 ⁰⁰	6 ⁰⁰ –7 ⁰⁰
Робочий	5,63±0,69	8,75±0,88	2,1	2,79
Вихідний	5,43±0,78	3,17±0,38	2,16	1,31

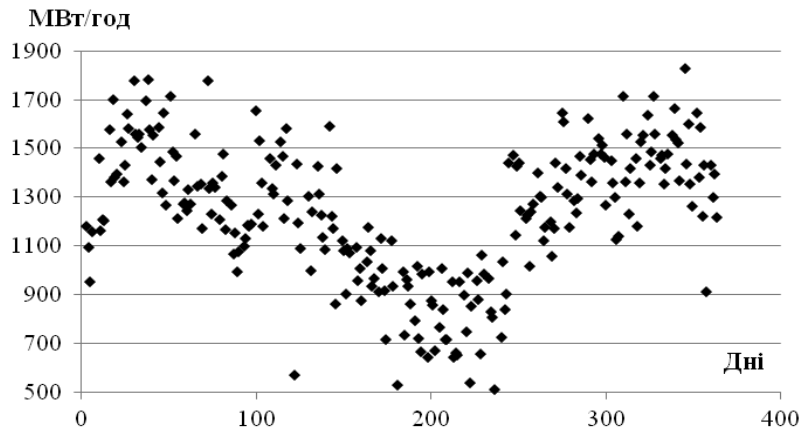


Рис. 3. Швидкості зміни потужності ОЕС України під час нічного провалу ГЕН в робочі дні

другому та третьому етапах прогнозування відбувається так, як описано на початку.

Для визначення впливових факторів на швидкість зміни потужності були проведені додаткові дослідження ГЕН за період 04.01.2016 р. – 14.04.2017 р. Було встановлено наявність сезонної залежності швидкостей зміни потужності тільки в робочі дні під час нічного провалу ГЕН і тільки в ранковий її підйом, як це показано на рис. 3.

Подальші статистичні дослідження встановили, що основними впливовими факторами є температура зовнішнього повітря та тривалість світлового дня.

Вплив температури повітря досліджувався на масиві даних швидкостей зміни потужності ОЕС України в ранкове зростання в період 04.01.2016 р. – 14.04.2017 р. Було встановлено, що коефіцієнт кореляції між масивами максимальних швидкостей та температур становить $-0,7$. Тобто, чим менша температура зовнішнього повітря, тим більші швидкості зміни потужності в ранковий

час нічного провалу ГЕН. Результати досліджень наведено на рис. 4.

В першому наближенні вплив температури повітря на швидкості зміни потужності енергосистеми можна виразити залежністю (лінією тренду)

$$V_{i-1}^7(t^\circ) = -19,669t^\circ + 1474,4, \quad (11)$$

де t° – температура зовнішнього повітря.

Вплив тривалості світлового дня досліджувався в період з 04.01.2016 р. до 24.06.2016 р. Встановлено, що коефіцієнт кореляції між масивами максимальних швидкостей та тривалості світлового дня становить $-0,478$. Тобто, чим більша тривалість світлового дня, тим менші швидкості зміни потужності. Результати досліджень показано на рис. 5.

В першому наближенні вплив тривалості світлового дня на швидкості зміни потужності енергосистеми можна виразити залежністю

$$V_{i-1}^7(\tau) = -2,0838t + 1490, \quad (12)$$

де t – тривалість світлового дня.

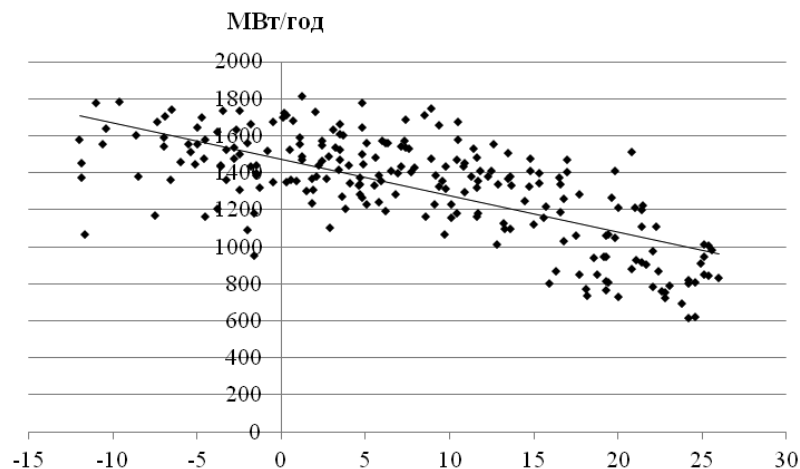


Рис. 4. Залежність швидкості зміни потужності ОЕС України під час нічного провалу ГЕН від температури

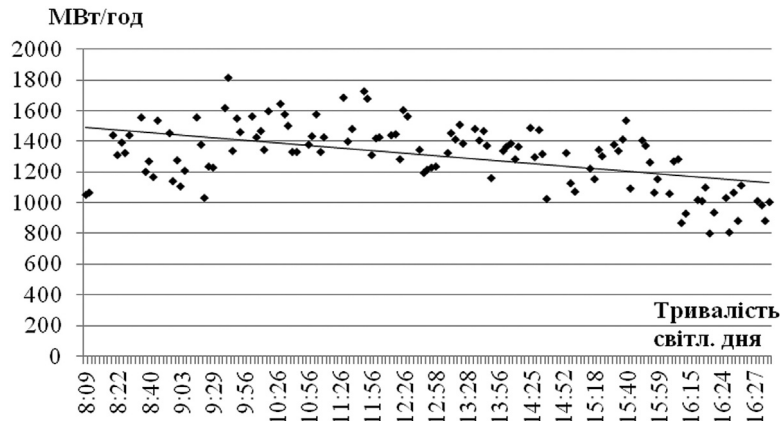


Рис. 5. Залежність швидкості зміни потужності ОЕС України під час нічного провалу ГЕН від тривалості світлового дня

З урахуванням наведеного вище була доопрацьована модель прогнозування потужності під час нічного провалу ГЕН, яка має вигляд

$$P_i(\tau_j) = F \left[P_i^{22} \pm \Delta P(V_{i-1}^{22}), P_i(\tau_{j-1}), P_i(\tau_{j-2}), P_i(\tau_{j-3}), \right. \\ \left. P_{i-1}^{\min} \pm \Delta P(t^\circ, \tau_{CD}), f(D, M), P_i^6 \pm \Delta P[V_{i-1}^6(t^\circ, t_{CD})] \right], \quad (13)$$

де P_i^{22} , V_{i-1}^6 – потужність енергосистеми о 22⁰⁰ попередньої доби та о 6⁰⁰ поточної доби; $\Delta P(V_{i-1}^{22}) = V_{i-1}^{22} \times \Delta \tau$ – приріст потужності енергосистеми; V_{i-1}^{22} – швидкість зміни потужності о 22⁰⁰ в попередній однотипний нічний провал; $\Delta \tau$ – приріст часу; $\Delta P[V_{i-1}^6(t^\circ, t_{CD})]$ – приріст потужності обумовлений зміною температури зовнішнього повітря та тривалості світлового дня.

Враховуючи рівняння (11), приріст потужності, обумовлений зміною температури повітря, в першому наближенні можна визначити згідно виразу

$$\Delta P[V_{i-1}^6(t^\circ)] = -19,669(t_i^\circ - t_{i-1}^\circ) \cdot \Delta \tau. \quad (14)$$

А виходячи із рівняння (12), приріст потужності, обумовлений зміною тривалості світлового дня, можна визначити

$$\Delta P[V_{i-1}^6(t)] = -2,0838(t_i - t_{i-1}) \cdot \Delta \tau. \quad (15)$$

Було проведено тестове прогнозування потужності ОЕС України під час нічних провалів її ГЕН за період з 30.11.2015 р. до 30.04.2017 р. з використанням обох моделей (вирази (6) та (13)). Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Як видно із табл. 2, модель, яка описується виразом (13), забезпечує кращі результати, які придатні до використання при регулюванні навантаження енергосистем.

ВИСНОВКИ

1. Створена нова модель для оперативного прогнозування потужності енергосистеми під час

Таблиця 2. Результати тестового прогнозування потужності

Параметр	Варіант 1	Варіант 2
Максимальна похибка прогнозування, %	18,71	9,38
Відносне середнє по модулю значення, %	5,94	3,93
Відносне середньоквадратичне відхилення, %	3,34	1,10

її нічного провалу графіка електричних навантажень, розроблено алгоритм її роботи.

2. У результаті проведеного аналізу встановлено фактори впливу на аргументи функції моделі, визначені їх аналітичні залежності.

3. Показано, що максимальні похибки прогнозування виникають на кінцях інтервалу нічного провалу графіків електричних навантажень. Визначено основні причини та запропоновано запобіжні заходи.

4. Проведене тестове моделювання потужності ОЕС України під час її нічного провалу графіків електричних навантажень за період з 30.11.2015 р. до 30.04.2017 р. показало, що максимальна відносна похибка прогнозування не перевищує 9,4%, а відносне середнє її значення становить 3,9%.

1. Дерій В.О., Згуровець О.В. Дослідження графіків електричних навантажень енергосистеми для визначення можливостей їх ущільнення шляхом використання електричних теплогенераторів *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 4(51). С. 52—60. <https://doi.org/10.15407/pge2017.04.052>.
2. Коэффициенты параболы по заданным координатам 3-х точек. URL: http://econom.misis.ru/s/Hel/Matem/Para_3t.htm (дата звернення: 02.05.2018).

Надійшла до редколегії: 30.01.2019