УДК 621.311.1:622.012.2

Ю.Т. Разумний д-р техн. наук, проф.,
А.В. Рухлов канд. техн. наук, доц.

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: 7169103@i.ua

ОЦІНКА ВИТРАТ ПАЛИВА ПРИ НЕРІВНОМІРНОСТІ ГРАФІКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Yu.T. Razumnyi Dr. Sc. (Tech.),
A.V. Rukhlov Cand. Sc. (Tech.)

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,
e-mail: 7169103@i.ua

ESTIMATION OF FUEL CONSUMPTION BY IRREGULARITY OF ELECTRICITY CONSUMPTION DIAGRAM

Виконано критичний аналіз існуючого підходу до визначення питомої витрати умовного палива, визначено його основні недоліки та сфера застосування. Отримано залежність з визначення питомої витрати палива на вироблення 1 кВт·год електроенергії тепловими електростанціями. Залежність враховує якісні характеристики процесу використання вугілля та дозволяє оцінювати вплив нерівномірності графіка електроспоживання на загальні та питомі витрати палива.

Ключові слова: *питома витрата, нерівномірність, умовне паливо, графік електроспоживання, потужність, навантаження*

Основна властивість електромагнітної енергії не дозволяє її накопичувати у великих обсягах, тобто генерація та споживання енергії мають бути одночасними. Умовою такої властивості є не перевищення пропозиції над попитом, а гнучка й швидка реакція пропозиції на зміну попиту. Фактично це означає наявність нерівномірного графіка споживання енергії. Чим більша нерівномірність графіка електричного навантаження (ГЕН), тим більші витрати палива на генерацію енергії. Режими нерівномірного навантаження вкрай невигідні як у енергетичному, так і в економічному відношенні, до того ж призводять до додаткових екологічно шкідливих викидів.

Нерівномірність ГЕН енергосистеми характеризується коефіцієнтом нерівномірності, що змінюється залежно від пори року, дня тижня та інших чинників

$$\alpha = P_{\min} / P_{\max},$$

де $P_{\min}$ і $P_{\max}$ – відповідно мінімальне та максимальне електричне навантаження.

Без наявності необхідних маневрених потужностей зростання нерівномірності графіка навантаження призведе до негативних наслідків, пов’язаних з труднощами підтримки пікових та напівпікових режимів електричних навантажень енергосистеми країни. Зараз ця проблема в деякій мірі вирішується за допомогою паротурбінних енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС), що за цієї причини працюють у дуже неекономічних режимах глибокого розвантаження, а також з нічними зупинками. Це призводить до суттєвого зменшення експлуатаційного коефіцієнту корисної дії (ККД) ТЕС. Останнє наочно ілюструється статистичними даними Мінпаливенерго. У 2007 році всіма ТЕС України вироблено 88,6 млрд кВт·год електроенергії та витрачено 34,5 млн т у.п. (1,8 млн т мазуту, 20,58 млрд м^3 природного газу та 18 млн т кам’яного вугілля). Поділивши теплову енергію палива на вироблену електроенергію, отримаємо, що середній електричний ККД ТЕС складає 29,5% проти 35–36% при роботі ТЕС у базовому режимі (при рівномірному ГЕН).

На практиці принципові розрахунки питомої витрати умовного палива g_0 здійснюються за фактичними даними вироблення електроенергії W та загальною витратою палива G шляхом ділення G/W. Однак такі розрахунки не дають повного розуміння того, з яких компонентів складається витрата умовного палива.

Проф. В.В. Михайловим у роботі [1] запропонована залежність, що враховує дві складові: першу постійну (при рівномірному ГЕН) та другу, залежну від нерівномірності графіка електроспоживання. Він вважав, що зміна паливної складової витрат, залежно від

© Разумний Ю.Т., Рухлов А.В., 2011

кількості годин використання потужності, зумовлена техніко-економічними характеристиками енергетичного обладнання. Витрата палива може бути визначена за паливними характеристиками, що відображають залежність витрати палива від виробленої електроенергії, режиму вироблення та техніко-економічних характеристик основного обладнання, за формулою

$$g_0 = 0,29 + \frac{200}{T_м}. \qquad (1)$$

Загальний вид цієї залежності такий

$$g_0 = g_{0w} + g_{0p}, \qquad (2)$$

де g_{0w} – питома витрата умовного палива на вироблення електроенергії при рівномірному ГЕН; g_{0p} – питома витрата умовного палива на вироблення електроенергії для покриття (забезпечення) нерівномірної частини ГЕН; $T_м$ – річне число годин використання максимального електричного навантаження.

Залежність (1) не може бути репрезентативною для теоретичного розгляду складових будь-яких реалізацій ГЕН. Вона не враховує якості палива, наявності відповідної кількості маневрених потужностей, можливості розгляду добових графіків електроспоживання, які є основою режимів роботи ТЕС. Безумовно, для умов роботи Єдиної Енергетичної системи колишнього СРСР 70–80 років минулого сторіччя з його структурою генеруючих потужностей і для загальної оцінки питомої витрати умовного палива тільки якогось узагальнюючого ГЕН великої країни можна було користуватися залежністю (1).

Якщо припустити, що ГЕН рівномірний, тобто $T_м = 8760$ год, то другий доданок $200/T_м$, що дорівнює питомій витраті умовного палива на виробництво електроенергії для покриття нерівномірної частини графіку, повинен обертатися в нуль, проте він дорівнює 0,023 кг/кВт·год. Загальна витрата умовного палива за залежністю (1) для наведених умов складатиме 0,29 + 0,023 = 0,313 кг у.п./кВт·год, що не відповідає дійсності (табл. 1). Тому такий підхід для визначення питомих витрат умовного палива на генерацію електроенергії є простим з математичної точки зору, однак призводить до помилок з причини недостатнього врахування впливу процесів фізичного характеру. Значно більш адекватні моделі можна отримати шляхом прагнення до фізичного обгрунтування. З наведеного випливає необхідність проведення досліджень для вирішення важливої наукової задачі з визначення витрат умовного палива з урахуванням нерівномірності графіка електроспоживання.

Таблиця 1

Питомі витрати умовного палива на ТЕС, г/кВт·год

Період року	Тарифні зони		
	Пік	Напівпік	Ніч
Осінньо-зимовий	538	382	369
Весняно-літній	423	371	365
Середньозважені за рік	504,5	380,2	367,6

При зміні навантаження на ΔP протягом часу $t_1 - t_2$ зміна витрати палива складе

$$\Delta G = \int_{t_1}^{t_2} \varphi \Delta P(t) dt, \qquad (3)$$

де φ – відносний приріст витрати палива – перша похідна витрати палива по навантаженню або збільшення витрати палива при зміні навантаження на одиницю. Цей показник змінюється залежно від навантаження. При переході ТЕС із базового режиму в напівпіковий та далі в піковий (рис.1) потужність станції збільшується та витрачається додаткова кількість палива, необхідна для забезпечення підвищеного навантаження.

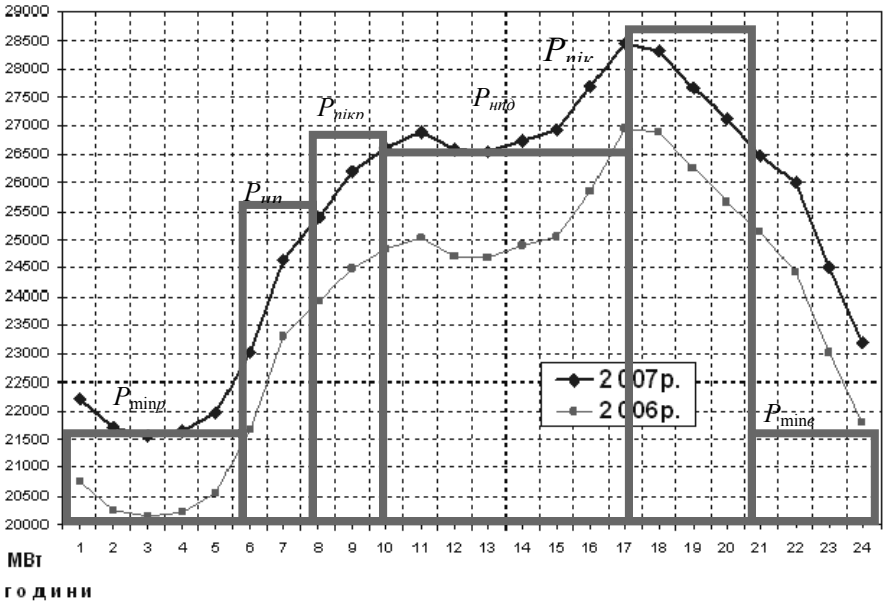

Рис. 1. Добовий ГЕН енергетичної системи Україні в грудні 2006 та 2007 років за робочі дні

Узагальнюючи дані з приросту потужності в періоди максимальних і мінімальних електричних навантажень, питомих витрат палива на один пуск енергоблоку та їх кількість, ефективності використання палива за тарифними зонами, питомих витрат палива на холостому ході, отримані необхідні показники для оцінки енергоефективності, що відповідають умовам залежності (3) (табл.1).

Розглянемо першу складову g_{0w} залежності (2). Із фізики відома теоретична кількість теплової енергії, що міститься в 1 кВт·год (Q_w = 3,6 МДж), та теплота згоряння умовного палива ($Q_{уп}$ = 29,3 МДж/кг). Простим поділом 3,6/29,3 отримаємо теоретичну кількість умовного палива для вироблення 1 кВт·год енергії (g_{0m} = 0,12287 кг у.п./кВт·год). Фактична кількість умовного палива при рівномірному ГЕН $g_{0w} = g_{0m} / \eta_{вп}$, де $\eta_{вп}$ – коефіцієнт використання палива, що залежить від технічного стану котельного агрегату та його ККД, якості палива. Ураховуючи всі складові $\eta_{вп}$, його значення знаходиться в межах 0,3÷0,45. Тоді g_{0w} = 0,4÷0,27 кг у.п./кВт·год.

Друга складова g_{0p} залежності (2) з'являється у випадку нерівномірності ГЕН. Ураховуючи залежність (3), по суті необхідно отримати відносний приріст витрати палива у вигляді коефіцієнта, що відображає властивості ГЕН, наведеного на рис.1.

Графіки електричних навантажень описуються різними показниками. Нерівномірність графіка в часі характеризує коефіцієнт форми. Своє найменше, рівне одиниці значення, він приймає при рівномірному в часі навантаженні. У роботі [2] доведена залежність коефіцієнта форми від коефіцієнта нерівномірності ГЕН, що представлена у вигляді

$$K_ф = \frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}}.$$

Однак коефіцієнт нерівномірності характеризує нерівномірність усього ГЕН, а зміна потужності відбувається декілька разів на добу, тому ми вводимо поняття α_Σ – середньозважений коефіцієнт нерівномірності електричного навантаження. Він являє собою середньоарифметичне від коефіцієнтів нерівномірності в моменти проходження ранкового напівпіка, ранкового піка, денного напівпіка й вечірнього піка (рис.1). Тобто, у час підйому навантаження

$$\alpha_\Sigma = \frac{\alpha_{\min p}^{нпр} + \alpha_{нпр}^{пікр} + \alpha_{нпд}^{пікв}}{3},$$

де

$$\alpha_{\min p}^{нпр} = \frac{P_{\min p}}{P_{нпр}},\ \alpha_{нпр}^{пікр} = \frac{P_{нпр}}{P_{пікр}},\ \alpha_{нпд}^{пікв} = \frac{P_{нпд}}{P_{пікв}}.$$

Таким чином, у формулу для визначення питомої витрати умовного палива вводимо другий доданок, чутливий до змін навантаження

$$g_{0p} = \frac{g_{0m}}{\eta_{вп}}(K_ф - \alpha_\Sigma) = \frac{0{,}12287}{\eta_{вп}}(K_ф - \alpha_\Sigma).$$

Для отримання α_Σ треба мати ГЕН, проте в статистичних даних частіше можна отримати просто α. Також треба вивести залежність між середньозваженим та загальним коефіцієнтами нерівномірності ГЕН. Для цього було проаналізовано понад 100 графіків електричних навантажень різних енергетичних систем за 2007 рік, для кожного з них були розраховані α та α_Σ (рис. 2).

Для визначення залежності використовуємо метод найменших квадратів. Відомо, що при емпіричному (експериментальному) вивченні функціональної залежності однієї величини y від іншої x виконують ряд вимірювань y при різних значеннях величини x. Задача полягає у знаходженні аналітичної залежності, що описує результати експерименту (рис. 2). Її особливість у тому, що присутність випадкових похибок вимірювання (або „шуму" в експерименті) робить нерозумним підбір такої формули, яка б точно описувала всі значення, отримані експериментально. Іншими словами, графік функції не повинен проходити через усі точки рис. 2, а повинен згладжувати „шум".

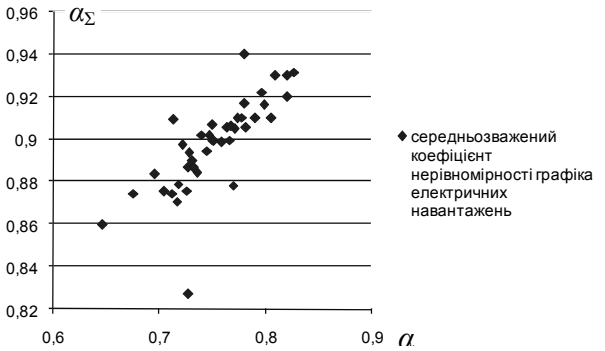

Рис. 2. Експериментальна залежність середньозваженого (α_Σ) від загального (α) коефіцієнта нерівномірності ГЕН

В основі методу найменших квадратів лежить ствердження, що лінія регресії є найкращим приближенням до вихідного значення. Таким чином отримана залежність $\alpha_\Sigma = 0{,}415981\alpha + 0{,}5843$, що графічно зображена на рис. 3. Використовуючи такий підхід, отримана загальна залежність питомих витрат умовного палива з урахуванням нерівномірності ГЕН

$$g_0 = g_{0w} + g_{0p} = \frac{0{,}12287}{\eta_{вп}} + \frac{0{,}12287}{\eta_{вп}}(K_ф - 0{,}416\alpha - 0{,}584) = \frac{0{,}12287}{\eta_{вп}}\left[1 + \left(\frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}} - 0{,}416\alpha - 0{,}584\right)\right]. \quad (4)$$

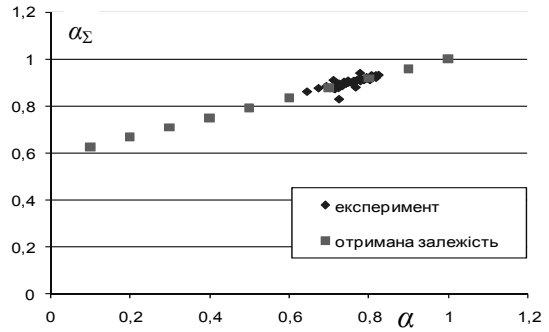

Рис. 3. Отримана залежність середньозваженого (α_Σ) від загального (α) коефіцієнта нерівномірності ГЕН

Вірогідність отриманої залежності можна підтвердити, проаналізувавши ГЕН енергосистеми України за 2007 рік по годинах доби. Наприклад, для грудня (рис. 1): $\alpha_{\min\ р}^{нпр} = 0,84$, $\alpha_{нпр}^{пікр} = 0,95$, $\alpha_{нпд}^{пікв} = 0,93$, $\alpha_\Sigma = 0,907$, $\alpha = 0,75$. Використовуючи залежність (4) можна розрахувати питомі витрата умовного палива в зоні реальних навантажень енергосистеми України. Для того, щоб отриману залежність оцінити та порівняти із залежністю Михайлова В.В., треба знайти зв'язок між $T_м$ та α, який відображено в табл. 2.

Графічне порівняння отриманої залежності (2) із залежністю (1) В.В. Михайлова, адаптованою до сучасних умов роботи ТЕС України, наведено на рис. 4.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта нерівномірності ГЕН α від числа годин використання максимального електричного навантаження $T_м$

α	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$T_м$	876	1752	2628	3504	4380	5256	6132	7008	7884	8760

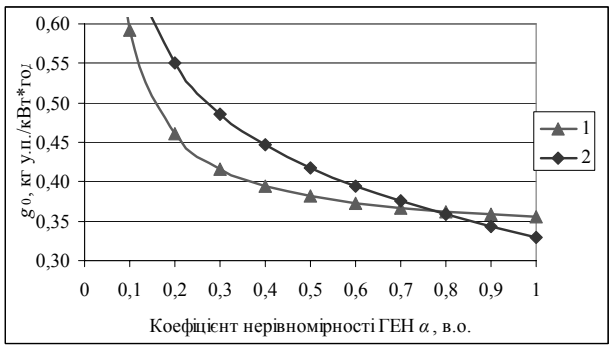

Рис. 4. Питомі витрати умовного палива g_0 за залежностями (1) і (2)

Висновки. Отримана залежність з визначення витрати палива залежно від нерівномірності графіка електроспоживання дозволяє коректно оцінювати її вплив на загальні та питомі витрати палива, а також його вартість при виконанні техніко-економічних розрахунків регулювання режимів електроспоживання. Крім того, залежність враховує якісні характеристики процесу використання вугілля та дозволяє аналізувати добові, тижневі, місячні або річні графіки електричних навантажень.

Список літератури

1. Михайлов В.В. Тарифы и режимы электропотребления / Михайлов В.В. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.

Выполнен критический анализ существующего подхода к определению удельного расхода условного топлива, определены его основные недостатки и сфера применения. Получена зависимость по определению удельного расхода топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии тепловыми электростанциями. Зависимость учитывает качественные характеристики процесса использования угля и позволяет оценивать влияние неравномерности графика электропотребления на общие и удельные расходы топлива.

Ключевые слова: *удельный расход, неравномерность, условное топливо, график электропотребления, мощность, нагрузка*

The critical analysis of existing approach to the determination of specific consumption of equivalent fuel is executed and its central failures and scope are defined. Dependence on the determination of fuel consumption for generation of 1 kWt·h of electric power by the thermal powerstations is got. The dependence takes into account quality characteristics of coal using process and allows estimating the influence of irregularity of the electricity consumption diagram on the overall and specific fuel consumption.

Keywords: *fuel rate, irregularity, equivalent fuel, electricity consumption diagram, power, loading*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.Т. Заїкою. Дата надходження рукопису 23.12.10