

АНАЛІЗ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ МЕТОДОМ НОРМОВАНОГО РОЗМАХУ (R/S-АНАЛІЗ)

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано новий підхід до аналізу нерівномірності графіків електричних навантажень методом нормованого розмаху або R/S-аналізу, придатного для практичного застосування на рівні промислових підприємств.

Ключові слова: графік електричних навантажень, нерівномірність, фрактальний аналіз, коефіцієнт Херста, метод нормованого розмаху, R/S-аналіз.

Вступ

Внаслідок наявності випадкової складової, природного зростання навантаження та нескоординованих дій споживачів виникає ситуація, коли часовий ряд електроспоживання має суттєво стохастичну компоненту. Добова нерівномірність навантаження негативно впливає на процес виробництва, передавання та розподілу електричної енергії. Кінцева ефективність заходів із вирівнювання навантаження визначається, безумовно, довершеністю системи характеристик графіка електричних навантажень (ГЕН), на основі яких приймаються керувальні рішення. Тому розроблення характеристик, що надають нові можливості, є актуальним.

Ефективно здійснити процес управління навантаженням можливо лише на основі досконалих моделей добового електроспоживання, які б давали критерій оцінювання нерівномірності графіка навантаження підприємства.

Показники нерівномірності ГЕН та методи його вирівнювання викладені у роботах В. І. Гордєєва, А. А. Федорова, Е. М. Рістхейна, О. О. Єрмілова, С. Д. Волобрінського, А. В. Праховника [1—5]. Ці вчені були засновниками класичної теорії оцінювання ГЕН, згідно з якою для оцінювання нерівномірності споживання вводились низка коефіцієнтів:

- середньодобове навантаження (P_c);
- середньоквадратичне навантаження ($P_{ск}$);
- дисперсія (D_p) і середньоквадратичне відхилення або стандарт (σ_p) графіка навантаження;
- коефіцієнт форми (K_Φ) графіка навантаження;
- коефіцієнт максимуму (K_M) навантаження;
- коефіцієнт заповнення (K_3) графіка навантаження;
- коефіцієнт нерівномірності (K_H) навантаження.

Дуже актуальною постає задача створення принципово нових підходів оцінки нерівномірності ГЕН, які б мали місце для практичного застосування на рівні промислових підприємств.

Метою роботи є розроблення нового підходу до аналізу нерівномірності графіків електричних навантажень методом нормованого розмаху або R/S-аналізу, який був би придатний для практичного застосування на рівні промислових підприємств.

Результати дослідження

Застосування методів аналізу, основаних на фракталах, дозволяють знаходити закономірності у часових рядах, які на перший погляд є абсолютно випадковими. Найпоширенішим є фрактальний аналіз на основі коефіцієнта Херста. Для вивчення таких процесів, як споживання електроенергії може бути використаний показник Херста, що дозволяє виявити і кількісно оцінити фундамента-

льні характеристики часових рядів: наявність довготермінової пам'яті, її глибину, трендостійкість, хаотичність або стохастичність аналізованого процесу [6, 7].

Гарольд Едвін Херст ввів безрозмірне відношення за допомогою ділення розмаху R на стандартне відхилення спостережень S . Цей спосіб аналізу став називатись методом нормованого розмаху або R/S -аналіз.

Г. Е. Херст показав, що більшість природних явищ підкорюються «зміщеному випадковому блуканню» — тренду з шумом. Кількісне значення коефіцієнта H характеризує відношення сили тренда (детермінований фактор) до рівня шуму (випадковий фактор). Сила тренда і рівень шуму можуть бути оцінені тим, як змінюється нормований розмах з часом, або, іншими словами, на скільки величина H перевершує 0,5.

Показник Херста (H):

- має широке застосування в аналізі часових рядів завдяки своїй чудовій стійкості;
- містить мінімальні припущення про систему, що вивчається, і може класифікувати часові ряди;
- може відрізнити випадковий ряд від невивпадкового, навіть якщо випадковий ряд не нормально розподілений.

Використання показника Херста для аналізу нерівномірності електроспоживання надає можливість детальнішої оцінки ГЕН. Основні властивості, які мають бути притаманні ГЕН, за умови їх фрактальності:

- графіки навантажень мають фрактальну розмірність ($1 < D < 2$);
- графіки навантажень мають властивість масштабної інваріантності (різні часові інтервали самоподібні);
- графіки навантажень завжди утворюють певну структуру, яка має унікальні властивості;
- графіки навантажень, як фрактали, «зберігають пам'ять» про свої початкові умови.

У класичному вигляді показник Херста може бути отриманий зі співвідношення

$$(R/S) = (\alpha \cdot N)^H,$$

де R — максимальний розмах досліджуваної величини (навантаження); S — середньоквадратичне відхилення; N — час спостережень (або обсяг вибірки); α — деяка постійна; H — показник Херста.

Метод нормованого розмаху (R/S -аналіз) передбачає такі кроки:

1. Визначається розмах часового ряду

$$R = \max_{1 \leq t \leq N} P(t, N) - \min_{1 \leq t \leq N} P(t, N).$$

2. Обчислюється середнє значення часового ряду

$$P_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P(t).$$

3. Знаходиться відхилення ряду вимірів $P(t)$ від середнього P_{cp}

$$P(t, N) = \sum_{t=1}^N (P(t) - P_{cp}).$$

4. Середньоквадратичне відхилення визначається за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (P(t) - P_{cp})^2}.$$

5. Показник Херста розраховується так:

$$(R/S) = (N/2)^H; \text{ або } (R/S) = (\alpha \cdot N)^H;$$

$$\log(R/S) = H \cdot \log \alpha + H \cdot \log N \Rightarrow H = \frac{\log(R/S)}{\log \alpha + \log N}.$$

У таблиці подана відповідність значень показника Херста кольору шуму та здійснено опис основних особливостей.

Відповідність значень показника Херста кольору шуму

Значення H	Колір шуму	Особливості
0...0,1	Коричневий шум	Відповідає максимальній фрактальній розмірності часового ряду і повній невизначеності у відношенні прогнозованості, або відповідає броунівському випадковому процесу, для якого відсутні ефекти пам'яті або мають місце процеси, в яких тренд відсутній
$0,3 \pm 0,1$ (0,2 ... 0,4)	Рожевий шум	Характеризується атиперсистентністю, тобто є таким, що не підтримує поточну тенденцію
$0,5 \pm 0,1$ (0,4...0,6)	Білий шум	Відповідає хаотичній поведінці часового ряду і, відповідно, найменшій надійності прогнозу або найменшій прогнозованості. Ряди з властивостями «білого шуму» характеризуються «повною непередбачуваністю», їм властиві циклічність, часта зміна трендів, що супроводжується втратою персистентності
0,6...1	Чорний шум	Чим більше значення H , тим більша трендостійкість властива відповідному проміжку часового ряду. Зі значеннями H значно більшими 0,5 досліджуваний часовий ряд є персистентним або трендостійким, тобто таким, що підтримує поточну тенденцію (якщо ряд зростає протягом деякого періоду, то досить ймовірно, що він збереже цю тенденцію деякий час в майбутньому). Така трендостійкість поведінки підсилюється з наближенням H до 1,0. Коли H наближається до 1,0, ряд стає менш зашумленим і має більше послідовних спостережень з однаковим знаком. Спадкоємність синергетичних і класичних статистичних методів забезпечується коли $H > 0,9$.

Показник Херста може бути перетворений у фрактальну розмірність

$$D = 2 - H.$$

Фрактальна розмірність — це критична розмірність, яка характеризує те, як об'єкт або часовий ряд заповнює простір. Вона описує структуру предмета при зміні коефіцієнта збільшення, або при зміні масштабу предмета. Так фрактальний об'єкт заповнює простір нерівномірно, оскільки його частини залежні або корельовані.

Фрактальний часовий ряд змінює масштаб статистично, у часі. Фрактальна розмірність випадкового часового ряду становить 1,5 і є функцією зміни масштабу в часі. Фрактальна розмірність часового ряду надзвичайно важлива, тому що вона вказує, що процес може бути десь між детерміністичним (лінія з фрактальною розмірністю 1) і випадковим (фрактальна розмірність 1,5). Статистика часового ряду з фрактальною розмірністю, відмінною від 1,5, значно відрізняється від гаусової статистики і не обов'язково знаходиться в межах нормального розподілу.

Топологічна розмірність прямої дорівнює одиниці, а фрактальна розмірність збільшується у міру зростання звивистості, вона стає рівною 1,02 для злегка звивистої лінії, 1,15 — для більш звивистої, 1,53 — для дуже звивистої. Часто значення фрактальної розмірності зв'язують із кількістю незалежних змінних, які формують стохастичний часовий ряд.

Отже, якщо $H = 0,5$, то $D = 1,5$. Обидві величини характеризують незалежну випадкову систему. Величина $1 < H < 0,5$ буде відповідати фрактальній розмірності, ближчій до кривої лінії. Це, за термінологією Херста, персистентний часовий ряд, який дає більш гладку, менш зазубрену лінію, ніж випадкове блукання. Антиперсистентна величина H ($0 < H < 0,5$) дає, відповідно, більш високу фрактальну розмірність і більш переривчасту лінію, ніж випадкове блукання, і, відповідно, характеризує систему, яка більш схильна до змін. Це в точності відповідає антиперсистентному часовому ряду.

Фрактальна розмірність є показником складності графіка навантаження. Аналізуючи чергування ділянок з різною фрактальною розмірністю і тим, як на систему впливають зовнішні і внутрішні фактори, можна навчитися передбачати поведінку системи. І що найголовніше, діагностувати і передбачати нестабільні стани.

Суттєвим моментом є наявність критичного значення фрактальної розмірності графіка навантаження, з наближенням до якого система втрачає стійкість і переходить у нестабільний стан, а параметри швидко зростають або зменшуються, в залежності від тенденції, що має місце в певний час. Тобто фрактальна розмірність графіка навантаження може використовуватися як індикатор кризи.

Також величина фрактальної розмірності може бути індикатором кількості факторів, що впливають на систему електроспоживання. Коли фрактальна розмірність:

- менше 1,4 — на систему впливає одна або кілька сил, що рухають систему в одному напрямку;
- близько 1,5 — сили, що діють на систему, різноспрямовані, але більш-менш компенсують один одного (поведінка системи в цьому випадку є стохастичною і добре описується класичними статистичними методами);
- значно більше 1,6 — система стає нестійкою і готова перейти в новий стан.

Під час достатньо стабільних періодів і повільних підйомів фрактальна розмірність часового ряду залишалася досить невисокою, в той час як в періоди криз сумарна фрактальна розмірність зростає.

У випадку, коли знайдена аномальна величина H , виникає питання, чи обґрунтована оцінка такої величини. Перевірити обґрунтованість результатів можна шляхом змішування даних, в результаті чого порядок спостережень стане повністю відмінним від початкового ряду. Через те, що спостереження залишаються такими ж, їх частотний розподіл також залишається незмінним. Далі обчислюється показник Херста перемішаних даних. Якщо ряд дійсно є незалежним, то показник Херста не зміниться, оскільки був відсутній ефект довготермінової пам'яті, тобто кореляції між спостереженнями. В цьому випадку змішування даних не впливає на якісні характеристики даних.

Якщо мав місце ефект довготермінової пам'яті, то порядок даних електричних навантажень дуже важливий. Змішуючи дані, тим самим руйнуємо структуру системи. Оцінка H при цьому буде значно нижчою і буде наближатись до 0,5, навіть якщо частотний розподіл спостережень не зміниться.

Вплив теперішнього на майбутнє (довготермінова пам'ять) для ГЕН може бути виражений кореляційним співвідношенням

$$C = 2^{2H-1} - 1,$$

де C — міра кореляції; H — показник Херста.

Для аналізу нерівномірності графіків електричних навантажень використано графік півгодинних навантажень промислового підприємства за один місяць, загалом 1488 значень, які отримані з АСКОЕ. Вихідний ряд має вигляд, зображений на рис. 1.



Рис. 1. Графік півгодинного навантаження промислового підприємства

Розраховано R/S -залежність для ряду півгодинного навантаження промислового підприємства (рис. 2). Отриманий показник Херста (рис. 3) $H = 0,6708$, фрактальна розмірність $D = 1,3292$.

Випадок, коли $H > 0,67$ відповідає «чорному шуму», тобто чим більше H , тим більша трендостійкість відрізка часового ряду. Зі значеннями H , що помітно перевершують 0,5, розглянутий часовий ряд є персистентним або трендостійким, тобто якщо ряд зростає або спадає протягом деякого періоду, то досить ймовірно, що він збереже цю тенденцію якийсь час у майбутньому.

За різких змін ГЕН показник Херста реагує відповідним чином. На рис. 3 видно три спади H , які відповідають моментам різкого зниження навантаження (див. рис. 1).

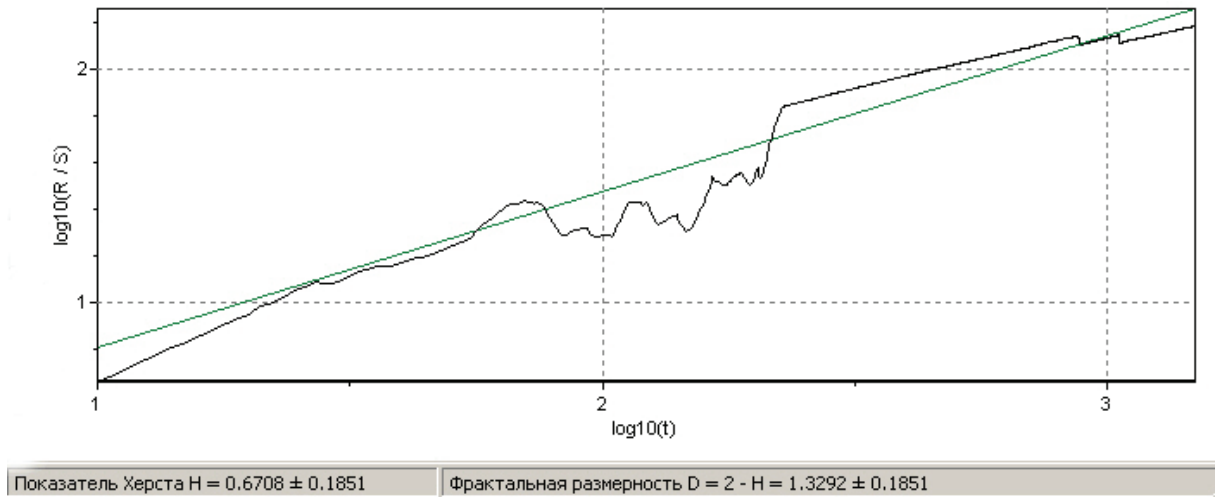


Рис. 2. R/S -залежність для ряду півгодинного навантаження промислового підприємства

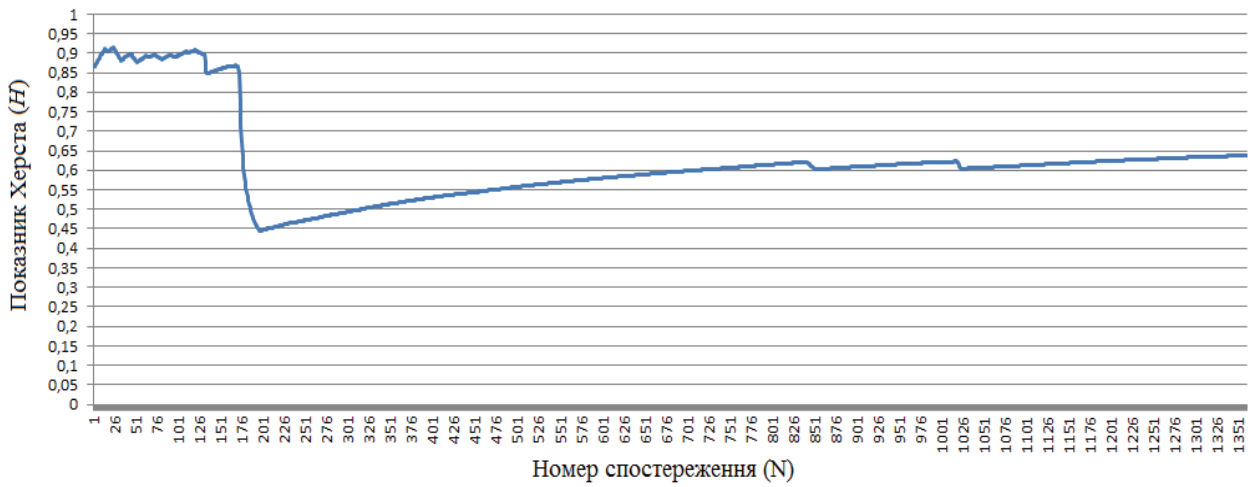


Рис. 3. Значення показника Херста для ряду півгодинного навантаження промислового підприємства

Виникає запитання, чи обґрунтована оцінка H : чи достатньо було даних, або чи працює взагалі R/S -аналіз. Можна перевірити обґрунтованість результатів шляхом випадкового перемішування даних, внаслідок чого порядок спостережень стане повністю відмінним від початкового ряду.

Використовуючи експериментальні дані (див. рис. 1), перевіримо це. На рис. 4 показано графік вихідних даних, які були перемішані, на рис. 5 — ряд із знайденим коефіцієнтом Херста після перемішування.

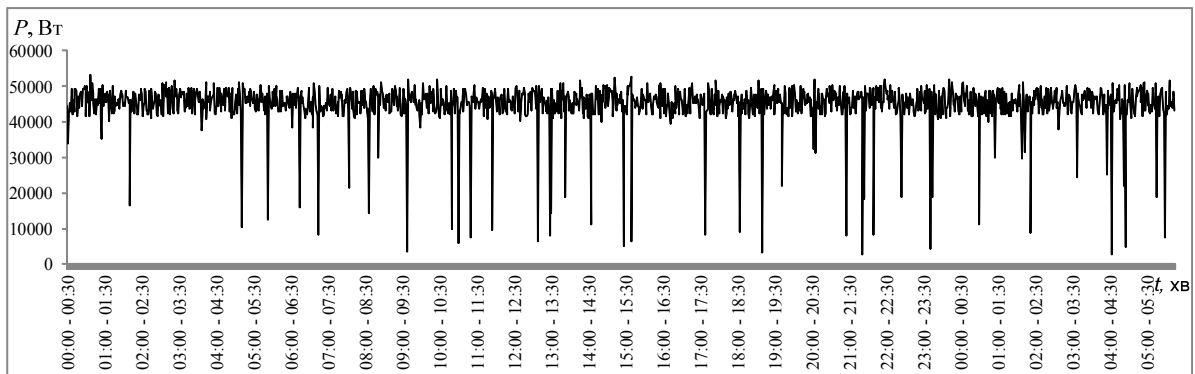
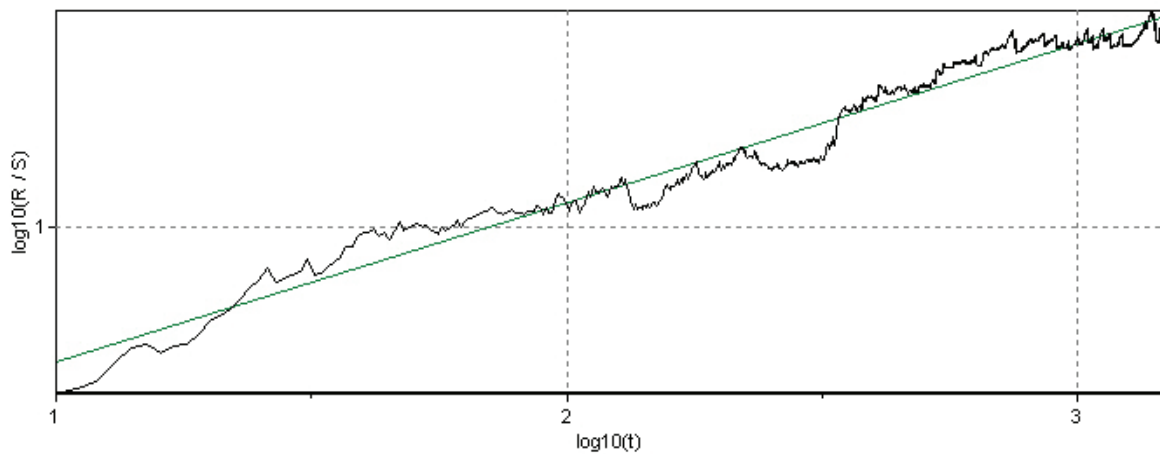


Рис. 4. Графік початкових даних, що були перемішані

Показатель Херста $H = 0.5294 \pm 0.1177$ Фрактальная размерность $D = 2 - H = 1.4706 \pm 0.1177$ Рис. 5. R/S -залежність для перемішаного ряду півгодинного навантаження промислового підприємства

Початковий ряд дав результативну оцінку $H = 0,6708$, перемішаний — $H = 0,52$. Такий спад величини H свідчить про те, що при перемішуванні була зруйнована структура процесу. Процес перемішування зробив дані незалежними та зруйнував пам'ять ряду.

Висновки

Встановлено, що запропонований підхід дозволяє аналізувати нерівномірності графіків електричних навантажень методом нормованого розмаху або R/S -аналізу. Використання показника Херста для аналізу нерівномірності електроспоживання надає можливість детальнішої оцінки графіка електричних навантажень. Значною перевагою запропонованого підходу є можливість розпізнання порушення динаміки процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гордеев В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 184 с.
2. Федоров А. А. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для ВУЗов / А. А. Федоров, Э. М. Ристхейн. — М. : Энергия, 1981. — 360 с.
3. Ермилов А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Ермилов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 208 с.
4. Волобринский С. Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий / С. Д. Волобринский. — Л. : Энергия, 1976. — 128 с.
5. Праховник А. В. Управление электропотреблением / А. В. Праховник // Изв. АН СССР: Энергетика и транспорт. — 1990. — № 1. — С. 5—16.
6. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень з використанням R/S -аналізу часових рядів / Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 6. — С. 53—56.
7. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень промислових підприємств з врахуванням фрактальних властивостей часового ряду спостережень / Ю. А. Шулле // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : XI Міжнародна конференція. — Вінниця, 2012. — С. 178—179.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.12.2014

Шулле Юлія Андріївна — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: j_shulle@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Analysis of charts of electrical loads of industrial enterprises by method of rescaled range (R/S-analysis)

¹Vinnitsia National Technical University

Where was suggested a new approach to the analysis of uneven charts in electric loads by the means of rescaled range or R/S-analysis, that would take place for practical application at the level of industrial enterprises.

Keywords: charts of electrical loads, uneven, fractal analysis, coefficient Hurst, rescaled range method, R/S-analysis.

Shulle Yulia A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Systems of Power Consumption and Power Management, e-mail: j_shulle@ukr.net

Ю. А. Шулле¹

Анализ графиков электрических нагрузок промышленных предприятий методом нормированного размаха (R/S-анализ)

¹Винницкий национальный технический университет

Предложен новый подход анализа неравномерности графиков электрических нагрузок методом нормированного размаха или R/S-анализа, который бы имел место для практического применения на уровне промышленных предприятий.

Ключевые слова: график электрических нагрузок, неравномерность, фрактальный анализ, коэффициент Херста, метод нормированного размаха, R/S-анализ.

Шулле Юлия Андреевна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: j_shulle@ukr.net