УДК 629.063.6:629.424.1

Informatics and Mathematical Methods in Simulation
Vol. 7 (2017), No. 1-2, pp. 87-95

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ СПОЖИВАННЯ ПАЛИВА МАНЕВРОВИМ ТЕПЛОВОЗОМ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ю.Є. Калабухін, О.В. Рудковський

Український державний університет залізничного транспорту,
вул. Фейербаха, 7, Харків, 61050, Україна; e-mail: Od.is@rambler.ru

Описується алгоритм R/S аналізу для часових рядів споживання палива маневровим тепловозом при різних умовах експлуатаційної роботи, що виконується. Визначено основні положення методу оцінок показника Херста. На основі розрахунку та аналізу показника Херста зроблено висновок про антиперсистентність часових рядів споживання палива маневровим тепловозом в експлуатації.

Ключові слова: R/S аналіз, показник Херста, фрактал, часовий ряд, маневровий тепловоз, експлуатація, витрата палива.

Вступ

Сучасні умови оновлення або модернізація тягового рухомого складу вимагають необхідність визначення його життєвого циклу. Однією із важливіших енергетичних складових життєвого циклу маневрових тепловозів є споживання палива для здійснення експлуатаційної роботи, яка характеризується стохастичним чергуванням станів «холодного» та «гарячого» простою, виконання маневрової роботи. Споживання палива залежить як від багатьох експлуатаційних факторів, так і від технічного стану тепловоза і має змінний характер за часом. Таким чином, вивчення життєвих циклів маневрових тепловозів неможливе без дослідження та аналізу часових рядів споживання палива. Найбільш адекватним математичним апаратом для дослідження динаміки та структури стохастичних процесів, які володіють довгостроковою залежністю та фрактальною структурою є фрактальний аналіз.

У теперішній час зростає кількість робіт, що присвячені дослідженню часових рядів за допомогою методу нормованого розмаху. За цим методом досліджуються послідовності вимірювань температури атмосферного повітря, кількість опадів, товщина кілець річного приросту деревини та інших природних явищ [1, 2], вартості компанії, коливань обмінних курсів валют та інших економічних показників [3, 4]. В роботі [5] запропонована організація моніторингу технічного стану й створено метод для розрахунку залишкового ресурсу паливної апаратури тепловозів на основі розрахунку й оцінки показника Херста.

Мета роботи

Метою роботи є виклад результатів дослідження часових рядів споживання палива маневровим тепловозом за різних умов експлуатаційної роботи на основі використання методів фрактального аналізу.

Основна частина

Протягом i-ї робочої зміни маневровий тепловоз може знаходитись у стані «холодного» та «гарячого» простою, лінійного пробігу та виконання маневрової роботи.

Тривалість споживання палива маневровим тепловозом протягом i-ї робочої зміни (без урахування часу простою локомотива в «холодному» стані) визначається тривалістю знаходження локомотива в стані «гарячого» простою $\tau_{г.пр.}(i)$, лінійного пробігу $\tau_{л.пр.}(i)$, виконання маневрової роботи $\tau_{м.р.}(i)$, тобто

$$\tau(i) = \tau_{г.пр.}(i) + \tau_{л.пр.}(i) + \tau_{м.р.}(i). \quad (1)$$

Річна тривалість споживання палива маневровим тепловозом визначається за формулою

$$T = \sum_{i=1}^{n} \tau(i). \quad (2)$$

Кількість палива, що споживається маневровим тепловозом $G(i)$ залежить від стану, в якому він знаходиться протягом i-ї робочої зміни, та багатьох експлуатаційних факторів, характерних при виконані тієї чи іншої експлуатаційної роботи.

Годинне споживання палива маневровим тепловозом протягом i-ї робочої зміни визначається за формулою

$$b(i) = \frac{G(i)}{\tau(i)}. \quad (3)$$

На рис. 1-4 наведено часові ряди годинного споживання палива маневровим тепловозом при різних умовах експлуатаційної роботи протягом року.

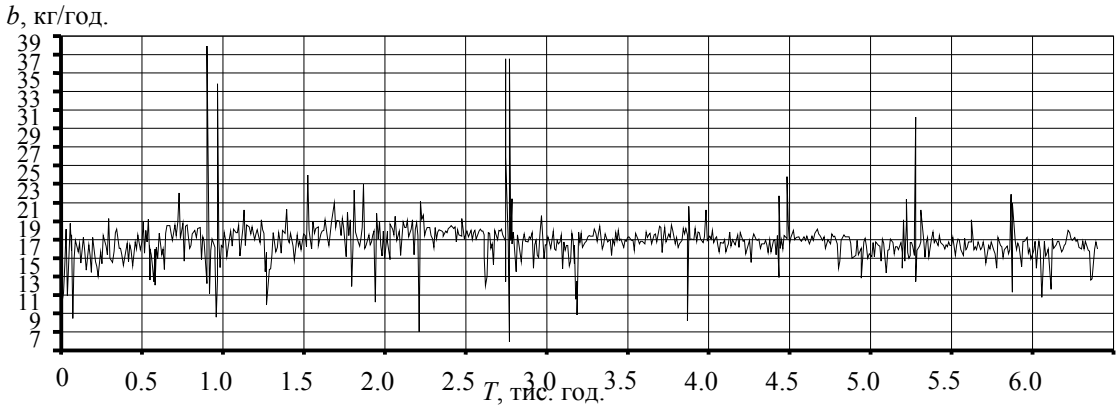

Рис. 1. Часовий ряд годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання сортувальної роботи

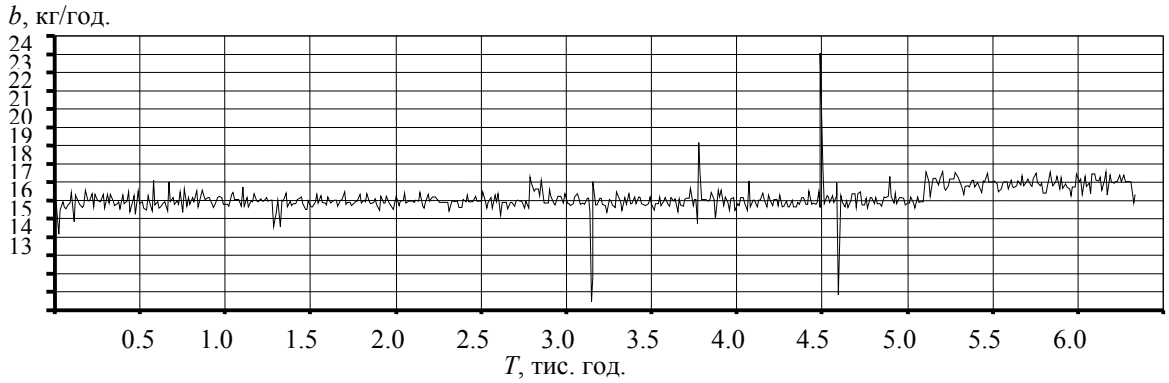

Рис. 2. Часовий ряд годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи по депо

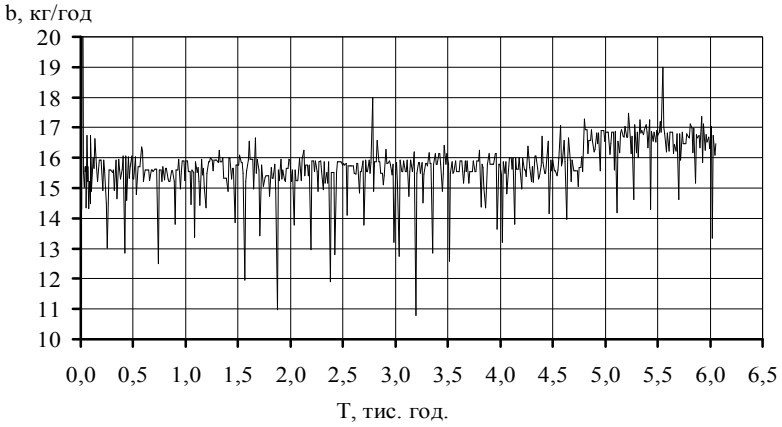

Рис. 3. Часовий ряд годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи по станції

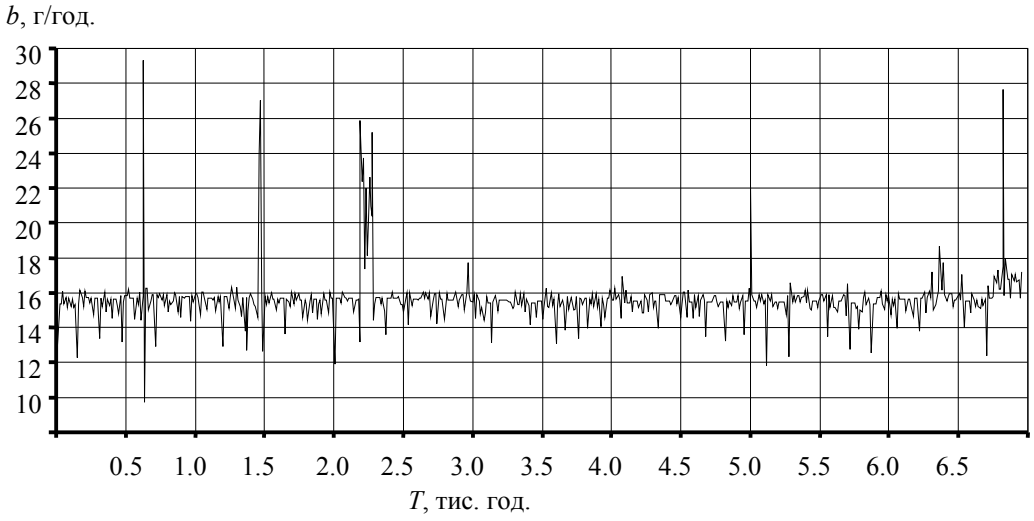

Рис. 4. Часовий ряд годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи на маневровій горці

Розглянемо одномірний часовий ряд годинного споживання палива маневровим тепловозом: $b(1), b(2), \ldots, b(n)$. Кожне визначення $b(i)$ відповідає моменту часу $t(i)$ заміру споживання палива $G(i)$, що параметрично визначає функцію дійсної змінної $b(t)$ на деякій дискретній множині точок.

Показник Херста для ряду $b(n)$ визначається наступним чином [1, 6]. Вводиться змінна середня приростів $b(n)$ на кроці n по виборці довжини k

$$\bar{b}(n,k) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=n-k+1}^{n} b(i) \tag{4}$$

або з урахуванням формули (3)

$$\bar{b}(n,k) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=n-k+1}^{n} \frac{G(i)}{\tau(i)}$$

та розраховується накопичене відхилення від середнього для вибірки довжиною k

$$R(n,k) = \max_{j \le n} \left\{ \sum_{i=n-k+1}^{j} (b(i) - \bar{b}(n,k)) \right\} - \min_{j \le n} \left\{ \sum_{i=n-k+1}^{j} (b(i) - \bar{b}(n,k)) \right\}. \tag{5}$$

Розраховується також змінна дисперсія часового ряду, що розглядається по виборці довжини k

$$\sigma_b^2(n,k) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=n-k+1}^{n} \left[b(i) - \bar{b}(n,k) \right]^2, \tag{6}$$

після чого розраховується логарифм відношення розмаху до шуму

$$\zeta(n,k) = \ln\left(\frac{R(n,k)}{\sigma_b^2(n,k)}\right). \tag{7}$$

Фіксується мінімальна довжина вибірки k_0 та максимальна довжина N, яка відповідає часовому горизонту аналізу. Встановлений порядок визначення (4)-(7) робиться для вибірок довжин k таких, що $1 < k_0 \le N$.

Показник Херста $H_N(n)$ за вибіркою довжиною N на кроці n визначається як коефіцієнт регресії величини $\zeta(n,k)$ на логарифм довжини вибірки

$$\zeta(n,k) - \bar{\zeta}_N(n) = H_N(n) \cdot \left\{ \ln k - \frac{\ln \dfrac{N!}{(k_0-1)!}}{N - k_0 + 1} \right\} + \varepsilon(k), \tag{8}$$

$$\bar{\zeta}(n) = \frac{1}{N - k_0 + 1} \cdot \sum_{k=k_0}^{N} \zeta(n,k), \tag{9}$$

де $\varepsilon(k)$ – являє собою залишок регресії.

Кут ухилу прямої регресії дорівнює показнику Херста. Співвідношення $\dfrac{R(n,k)}{\sigma_b^2(n,k)}$ в літературних джерелах позначається як R/S. На рис. 5-8 наведено співвідношення R/S у логарифмічному масштабі при різних умовах експлуатаційної роботи маневрового тепловоза.

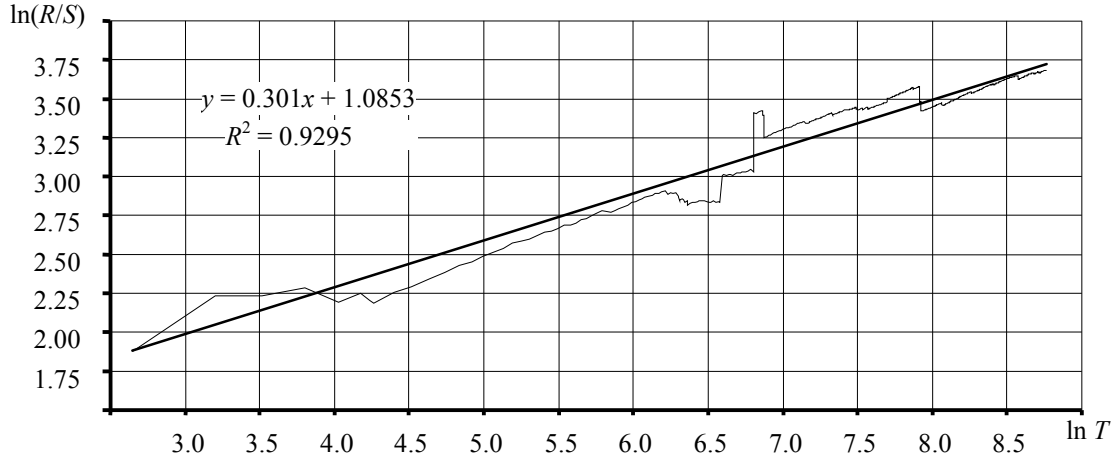

Рис. 5. Співвідношення R/S у логарифмічному масштабі за умови виконання маневровим тепловозом сортувальної роботи

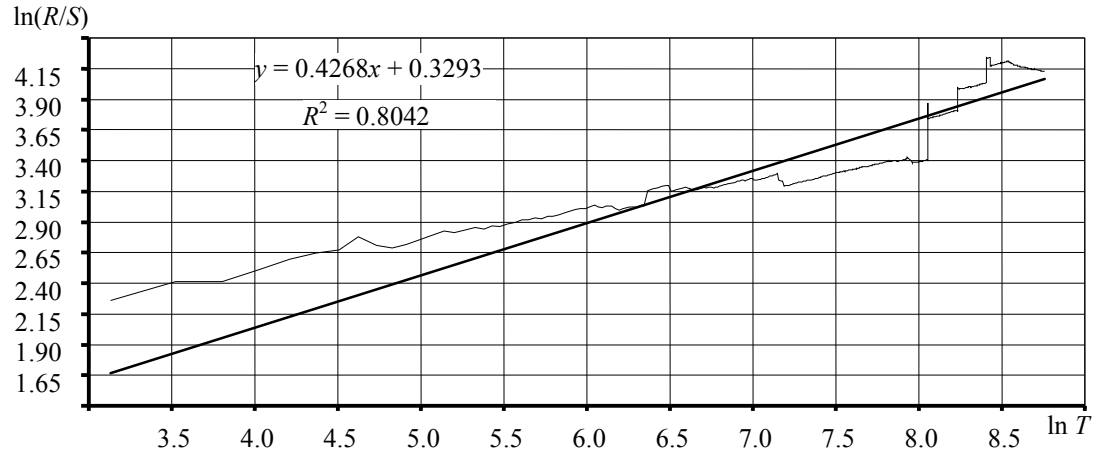

Рис. 6. Співвідношення R/S у логарифмічному масштабі за умови роботи маневрового тепловоза по депо

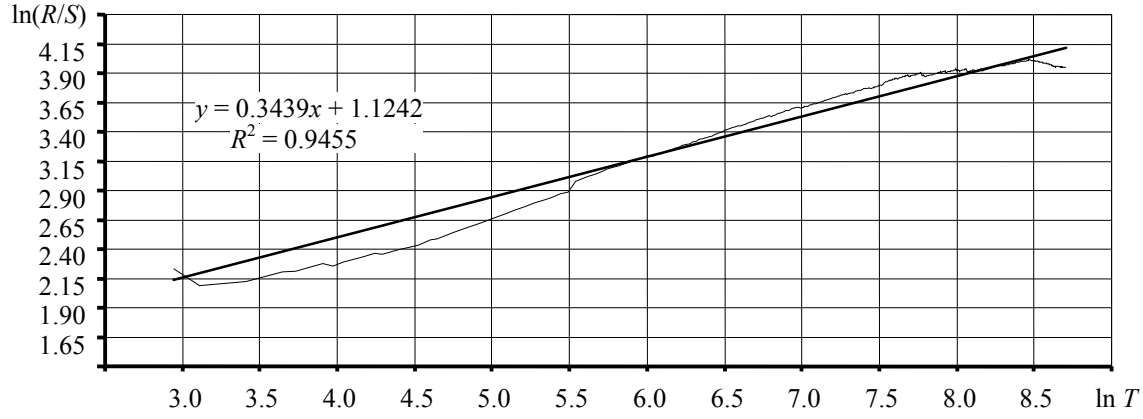

Рис. 7. Співвідношення R/S у логарифмічному масштабі за умови роботи маневрового тепловоза на станції

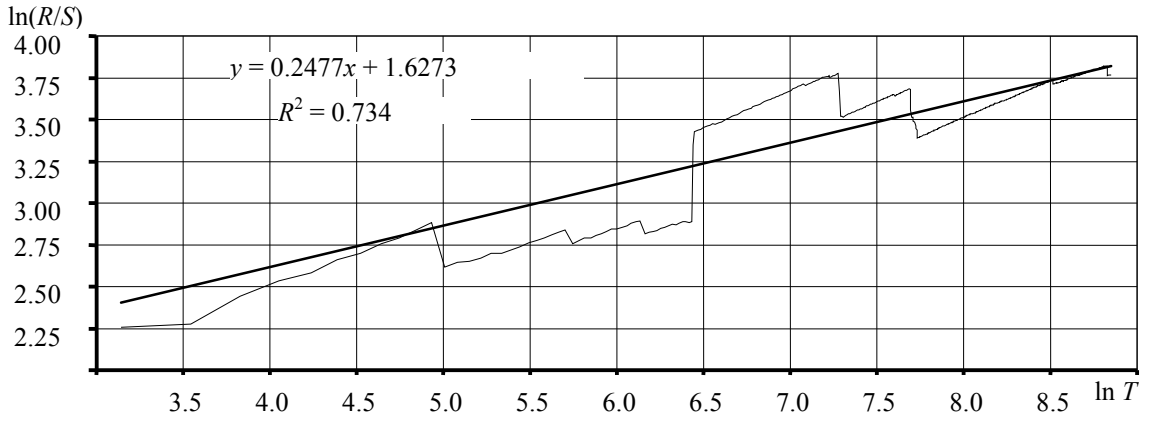

Рис. 8. Співвідношення *R*/*S* у логарифмічному масштабі за умови роботи маневрового тепловоза на маневровій горці

Приймаючи для всіх видів експлуатаційної роботи маневрового тепловоза мінімальну довжину вибірки $k_0 = 2$, отримаємо

$$H_N(n) = \frac{\sum_{k=2}^{N}\left\{(\zeta(n,k) - \bar{\zeta}_N(n)) \cdot (\ln k - \ln\frac{N!}{N-1})\right\}}{\sum_{m=2}^{N}\left\{(\ln m - \ln(\frac{N!}{N-1})\right\}}. \qquad (10)$$

Оскільки для всіх видів експлуатаційної роботи маневрового тепловоза $N >> 1$, то у формулі (10) можливо використати формулу Стірлінга для апроксимації факторіала, та, нехтуючи різницею $N-1$ від N, отримаємо більш зручний вираз показника Херста:

$$H_N(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left\{(\zeta(n,k) - \bar{\zeta}_N(n)) \cdot (1 + \ln\frac{k}{N})\right\}. \qquad (11)$$

В результаті при фіксованій довжині вибірки *N* отримаємо набір показників Херста на послідовності кроків з номерами *n*.

На рис. 9-12 наведено зміну показника Херста в залежності від довжини часового ряду годинної витрати палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 при різних умовах експлуатаційної роботи.

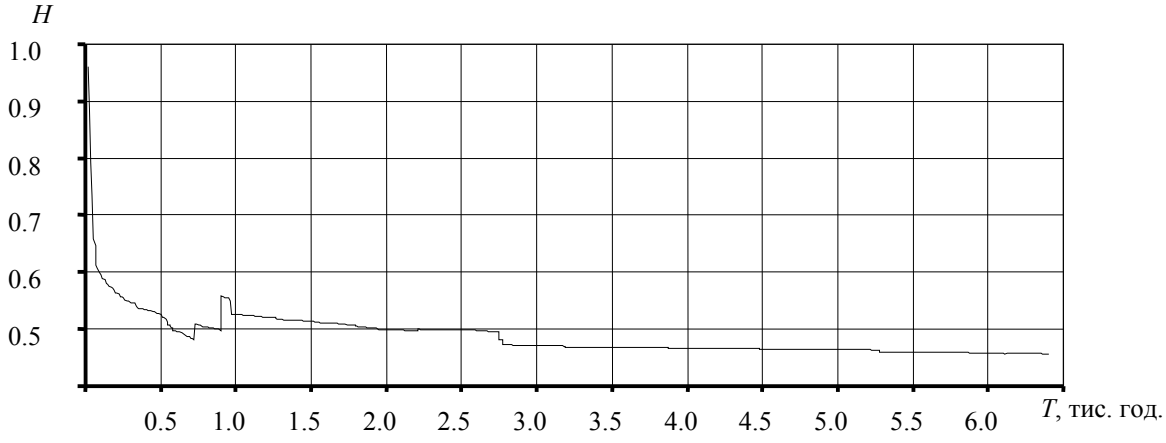

Рис. 9. Зміна показника Херста в залежності від довжини часового ряду годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання сортувальної роботи

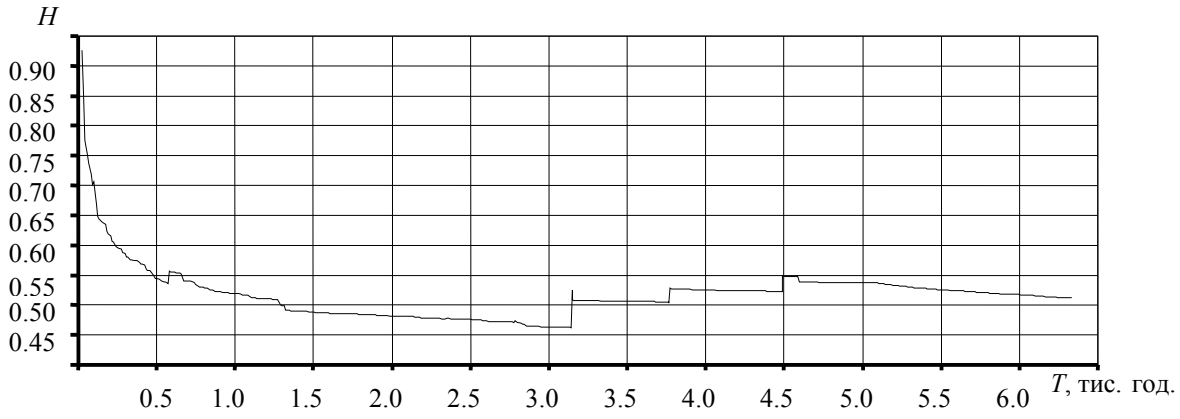

Рис. 10. Зміна показника Херста в залежності від довжини часового ряду годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи по депо

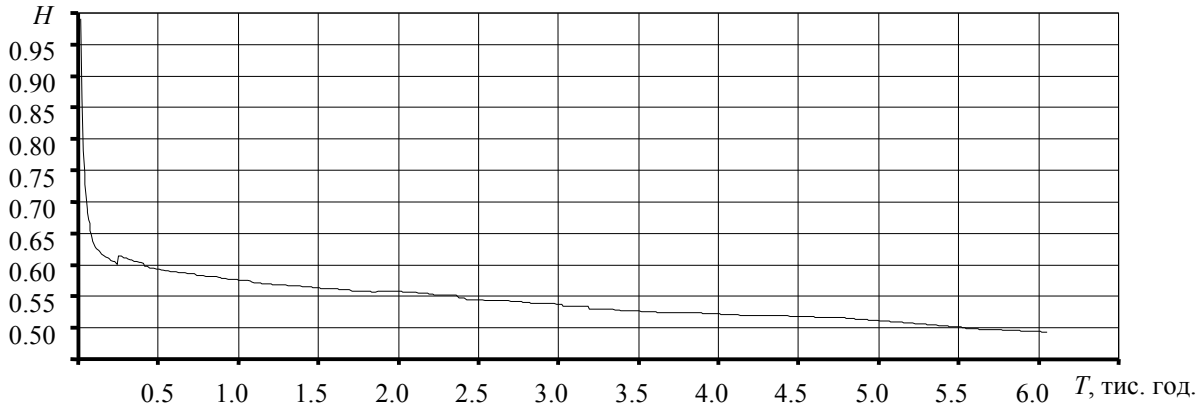

Рис. 11. Зміна показника Херста в залежності від довжини часового ряду годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи по станції

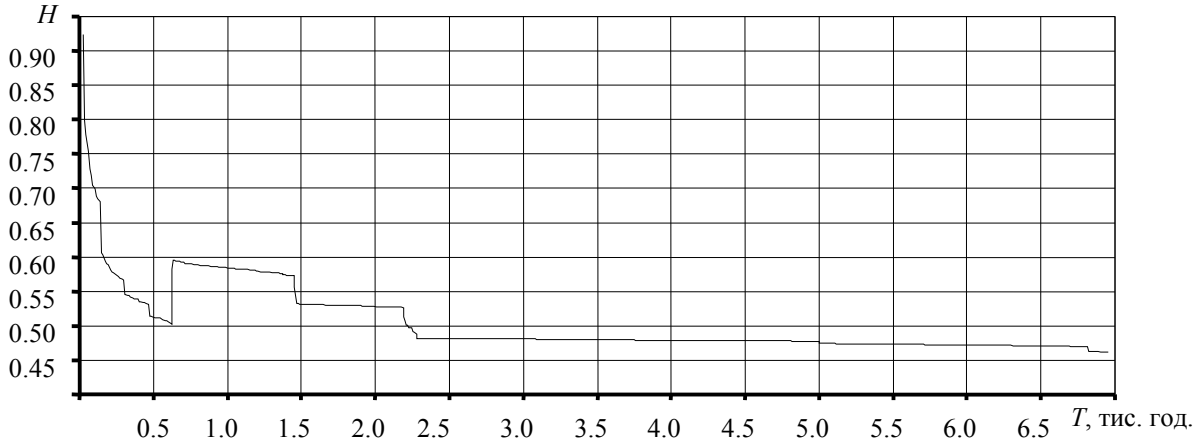

Рис. 12. Зміна показника Херста в залежності від довжини часового ряду годинного споживання палива маневровим тепловозом ЧМЕ3 для виконання роботи на маневровій горці

Результати дослідження часових рядів витрати палива маневровим тепловозом за різних умов експлуатаційної роботи на основі використання методів фрактального аналізу зведено до табл. 1.

Таблиця 1.

Часові ряди та їх параметри за різних умов експлуатаційної роботи маневрового тепловоза ЧМЕ3

Вид експлуатаційної роботи	Максимальна довжина вибірки, N	Середнє значення варіанти, кг/год.	Середня довжина кроку, год.	$\frac{R(n,k)}{\sigma_b^2(n,k)}$	H
Сортувальна робота	687	16.7	9.3	39.84	0.301
Маневрова робота по депо	559	15.2	11.3	61.96	0.4268
Маневрова робота по станції	536	15.7	11.3	51.88	0.3439
Маневрова гірка	613	15.6	11.3	43.29	0.2477

Згідно класифікації для різних показників Херста:

– при $0 < H < 0.5$ – антиперсистентний часовий ряд, тобто ряд, при котрому відбувається так зване «повернення до середнього»: якщо система зростає в якийсь період, то в наступний період слід чекати падіння. Чим ближче H до 0, тим стійкіше ці коливання. Антиперсистентний часовий ряд називають «рожевим шумом»;

– при $H = 0.5$ – часовий ряд стохастичний. Такий процес називають «рожевим шумом»;

– при $0.5 < H < 1$ – персистентний часовий ряд (ці процеси ще називають «чорним шумом» і це тренд стійкі ряди). Часовий ряд характеризується довгостроковою пам'яттю. Якщо ряд почав зростати, то він буде зростати і подалі [3]. Тренд стійкість тим більше, чим ближче H до 1.

Висновки

Таким чином, аналіз часових рядів споживання палива маневровим тепловозом в експлуатації вказує на їх антиперсистентність, що означає зміну періодів зростання споживання палива на періоди його спаду та навпаки. Використання властивості антиперсистентності дозволяє достатньо просто та надійно прогнозувати подальший розвиток процесу споживання палива маневровим тепловозом на основі даних його історії.

Список літератури

1. Hurst, H. Long-term Storage. An Experimental Study / H. Hurst, R. Black, Y. Simaika. – London: Constamble, 1965. – 185 p.
2. Калуш, Ю.А. Показатель Херста и его скрытые свойства / Ю.А. Калуш, В.М. Логинов. // Сиб. журн. индустр. матем. – 2002. – Том 5, №4. – С. 29-37.
3. Петерс, Э. Фрактальный анализ финансовых рынков / Э. Петерс. – М.: Интернет-трейдинг, 2004. – 304с.
4. Никольчев, Е.В. Модели хаоса для процессов изменения курса акций / Е.В. Никольчев // Методы. Алгоритмы. Программы. – 2003. – №1(1). – С. 4.
5. Дробаха, В.І. Аналіз технічного стану та паливної економічності тепловоза з використанням методу Херста / В.І. Дробах, О.Д. Трихліб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – 6/8 (72). – С. 25-28.
6. Распределение показателя Херста нестационарного маркированного ряда. / Д.С. Кирилов и др. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – №11. – 16 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА МАНЕВРОВЫМ ТЕПЛОВОЗОМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю.Е. Калабухин, О.В. Рудковский

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта,
пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина; e-mail: Od.is@rambler.ru

Описывается алгоритм R/S анализа для временных рядов потребления топлива маневровым тепловозом при различных условиях выполняемой эксплуатационной работы. Определены основные положения метода оценок показателя Херста. На основе расчета и анализа показателя Херста сделан вывод об антиперсистентности временных рядов потребления топлива маневровым тепловозом в эксплуатации.
Ключевые слова: R/S анализ, показатель Херста, интервал, фрактал, временной ряд, маневровый тепловоз, эксплуатация, расход топлива

RESULTS ANALYSIS OF TIME SERIES FUEL CONSUMPTION OF USE SHUNTING LOKOMOTIVE

Y.E. Kalabukhin, O.V. Rudkovskiy

Ukrainian state university of railway transport,
Feuerbach area, 7, Kharkov, Ukraine; e-mail: Od.is@rambler.ru

An algorithm R/S analysis of time series of fuel consumption shunting locomotive carried out under different conditions of operational work. The main provisions of the method of the Hurst exponent estimates. Based on the calculation and analysis of the Hurst exponent concluded that fuel consumption antipersistent time series shunting locomotive in operation.
Keywords: R/S analysis, Hurst exponent, interval, fractal time series, shunting locomotive, maintenance, fuel consumption