УДК 658.562: 629.421.1 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92509**

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ПЕРЕДАЧ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

Інж. В. І. Бульба

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ПЕРЕДАЧ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Инж. В. И. Бульба

ESTIMATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF TRACTION TRANSFERS OF ELECTRIC TRAINS

Eng. V. I. Bulba

Предметом даного дослідження є розроблення технології оцінки технічного стану тягових передач електропоїздів. У її основу покладено підходи з фрактального аналізу віброакустичних сигналів. Як діагностичний параметр запропоновано фрактальний показник Херста. Визначено чисельні діапазони його зміни та їх безпосередній зв'язок з виникаючими дефектами. Це дозволяє оцінювати технічний стан тягових передач і прогнозувати на майбутнє їх працездатність в експлуатації.

Ключові слова: *вібрація, контроль, показник Херста, прогнозування, сигнал, тягова передача, фрактал, електропоїзд.*

Предметом данного исследования является разработка технологии оценки технического состояния тяговых передач электропоездов. В ее основу положены подходы по фрактальному анализу виброакустических сигналов. В качестве диагностического параметра предложен фрактальный показатель Херста. Определены численные диапазоны его изменения и их непосредственная связь с возникающими дефектами. Это позволяет оценивать техническое состояние тяговых передач и прогнозировать на будущее их работоспособность в эксплуатации.

Ключевые слова: *вибрация, контроль, показатель Херста, прогнозирование, сигнал, тяговая передача, фрактал, электропоезд.*

Subject of the given research is development of technology of an estimation of a technical condition of traction transfers of electric trains. Approaches are put in her basis on фрактальному to the analysis vibrating acoustics signals as temporary numbers which are determined at carrying out of scheduled procedural works. For this purpose the wheel pair with a traction reducer is suspended above rails on hydraulic jacks. Further on the traction electric motor the lowered voltage of a meal which forces wheel pair to rotate moves. After that the vibrating gauge in the certain place removes a signal and enters the name on a digital dictophone. As diagnostic parameter it is offered fractal Hurst's parameter. Are certain numerical ranges of his change and their direct communication with arising defects. Examples of revealing of defects in traction transfers on the basis of hit of numerical value of a parameter of Hurst in the certain interval are resulted. It allows to estimate a technical condition of traction transfers and to predict on the future their working capacity in operation.

Keywords: *vibration, the control, Hurst's parameter, forecasting, signal, traction transfer, fractal, electric train.*

Вступ. Для передачі потужності на електропоїздах існує спеціальний тяговий привод – електродвигуни, обертання якоря яких передається безпосередньо на ведучу колісну пару.

Через свої конструктивні особливості доступ до тягового привода при експлуатації й обслуговуванні ускладнено, що створює певні проблеми у визначенні його технічного стану. Все це вимагає впровадження сучасних системних методів і технічних засобів для одержання актуальних об'єктивних даних про його працездатність. До них, насамперед, варто віднести віброакустичну діагностику, що дозволяє без розбирання цього механізму одержати сигнал, що несе в собі всю необхідну інформацію про технічний стан тягового привода. У той же час виявлення дефектів зубчастих коліс тягового редуктора на основі акустичних сигналів і методика аналізу звукового сигналу по своїй суті й використовуваних методах є дуже багатоплановим завданням і дотепер повною мірою не вирішено. Це у свою чергу дозволяє впевнено говорити про актуальність даного напрямку досліджень, до якого належить прогнозування технічного стану тягових передач електропоїздів на основі фрактального аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час існує значна кількість фізичних методів неруйнуючого контролю, які застосовуються у практиці контролю якості матеріалів і виробів. Серед них особливе місце займає акустичний контроль, заснований на застосуванні пружних коливань, збуджуваних або виникаючих в об'єкті контролю [1]. У роботі [2] викладено фізичні основи, методи й засоби акустичного контролю – одного з найпоширеніших, що швидко розвиваються, видів неруйнуючого контролю. При цьому в ній не зовсім чітко розкриваються положення про те, що неруйнуючий контроль і діагностика являють собою важливі складові проблеми безпеки. У дослідженнях [3] розглядаються загальні положення технічної діагностики тягових передач, а також аналізуються властивості акустичного шуму й вібрації. Особливий акцент робиться на аналіз спектральних складових отриманого сигналу, однак не виділяються конкретні критерії, за якими можна визначити технічний стан об'єкта. У роботі [4] розглянуто питання акустичної діагностики машин, розповсюдження коливальної енергії по машинних конструкціях і методи зниження рівнів їхніх шумів і вібрацій. У той же час у ній не розкриваються повністю джерела зародження і причини,

що їх породжують. Дослідження [5] присвячено розгляду методів акустичної діагностики. Воно передбачає аналіз шумового сигналу, який пов'язаний з роботою механізму, але практично не розкриває, як його можна використовувати надалі. Публікація [6] присвячена віброакустичним методам, що використовуються для виміру низькочастотних і високочастотних коливань систем і елементів транспортних засобів. Однак у ній не розкриваються повною мірою підходи до прогнозування технічного стану. У роботі [7] розглянуто метод обробки акустичного WAV-файлу на комп'ютері. Як недолік, у ній не наводиться застосування вейвлетного розкладання комп'ютерного сигналу на коригувальні коефіцієнти, що не дозволяє повною мірою оцінити рівень його зашумленості. У роботі [8] розглянуто частотний аналіз стаціонарних акустичних сигналів, який здійснюється за допомогою фільтрів і заснований на швидкому перетворенні Фур'є. Статистичним проблемам виділення сигналів з технічних об'єктів велика увага приділена в дослідженнях [9-12], а в роботі [13] описано питання їхньої фільтрації, дискретизації, а також властивості кореляційних функцій. Слід зазначити, що всі перераховані вище дослідження спираються за своєю суттю тільки на спектральний аналіз Фур'є. Їх недолік полягає в тому, що отримані результати дозволяють охарактеризувати тільки частотний склад вимірюваного сигналу, без прив'язки його складових до певного часового інтервалу. А це у свою чергу не дає можливість вірогідно прогнозувати стан досліджуваного об'єкта.

Останнім часом зростаючий інтерес проявляється до пошуку моделей нелінійного (хаотичного) поводження сигналів, які можуть уловлювати дуже складні динамічні процеси [14]. У цьому значенні найбільш адекватним математичним апаратом для дослідження динаміки й структури таких процесів є фрактальний аналіз [15]. Його особливе значення полягає в тому, що він здатний ураховувати поводження системи не тільки в період вимірів, але його передісторію [16-17]. Як приклад, у цьому напрямку можна виділити дослідження з застосуванням фрактального аналізу в геології [18], медицині [19], хімії [20], фізичних науках [21], комп'ютерній графіці [22] і сейсмографії [23]. Однак у них недостатньо розкриваються властивості отриманих часових рядів і нечітко розкрито ознаки в застосуванні показника Херста від інших статистичних методів.

Таким чином, фрактальний аналіз часового ряду, до якого пропонується відносити отриманий віброакустичний сигнал, являє собою вирішення складного комплексного науково-технічного завдання, для якого розроблена наступна технологія. Це послужило у свою чергу відправною точкою з застосування даного напрямку для прогнозування технічного стану тягових передач електропоїздів на основі фрактального аналізу.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою дослідження є розроблення нової технології для прогнозування технічного стану тягових передач електропоїздів на основі методів фрактального аналізу. Вона повинна за мінімальний час оцінити технічний стан і визначити їхню працездатність між виконанням планових поточних видів ремонту.

Основна частина дослідження. Говорячи про вібраційний контроль, слід зазначити, що сьогодні значна кількість локомотиворемонтних підприємств має сучасні потужні засоби вібраційного контролю, до яких належать "Вектор-2000" і "Прогноз-1" [3]. Їх основне призначення – діагностика й прогноз ресурсу вузлів обертання, таких як підшипники кочення й ковзання, ротори, сполучні муфти, шестірні, ремені, робочі колеса потоко-створюючих агрегатів, електромагнітні системи електричних машин. Однак

застосування цих пристроїв на регламентних видах ТО-3 і ПР-1 електропоїздів практично неможливо через значні витрати часу на проведення діагностування з зіставленням часу простою на них.

Із цією метою була розроблена нова технологія одержання віброакустичного сигналу з його наступною обробкою. Суть її полягає в такому.

Перед початком вимірів колісну пару моторного вагона електропоїзда піднімають за допомогою гідравлічних домкратів на висоту 5-7 мм над головкою рейки. Після цього на тяговий електродвигун, що зв'язаний з тяговою передачею, яка перевіряється, подають знижену напругу від зварювальної живильної мережі. Ретельно очищають місце знімання сигналу на кожусі тягового редуктора від бруду. Коли колісна пара почне стійке обертання, прикладають вібродатчик до кожуха тягового редуктора у встановленому місці й протягом декількох секунд записують віброакустичний сигнал на цифровий диктофон. Після запису віброакустичного сигналу його пересилають на комп'ютер для подальшої обробки.

Одним із сучасних напрямків у розробленні фрактальних методів аналізу й прогнозування часових систем є метод Херста, або **R/S**-метод, що одержав також назву методу нормованого розмаху. Даний емпіричний метод був запропонований для статистичного аналізу часових рядів ще на початку XX століття Херстом [26]. Цей метод дослідження добре відомий у статистичній практиці економіки й фінансів [27]. Однак у технічних науках його поширення іноді обмежується труднощами фізичної інтерпретації. У той же час метод Херста, який є робастним, дозволяє виявити в статистичних даних такі властивості, як кластерність, тенденція слідувати за напрямком тренду, сильна післядія, належна пам'ять, швидка зміна послідовних значень, фрактальність, наявність періодичних і неперіодичних циклів, здатність розрізняти "стохастичну" і "хаотичну" природу шуму й т. д. Крім основної роботи Г. Херста в розвитку теорії **R/S-методу** й застосуванні її на практиці, значну роль відіграла робота Б. Мандельброта [17]. Вона ґрунтується на так званому методі накопиченого відхилення (або методі нормованого розмаху). Відповідно до цього методу аналізуються не суми даних, з яких складається динамічний часовий ряд, а розмах суми відхилень цих даних від середнього арифметичного, нормований шляхом ділення на стандартне відхилення.

Підсумкові дані цих відхилень підраховуються для різних періодів часу (або для різної кількості послідовних моментів спостережень), які виступають як масштаб вимірювання.

Основна відмінність методу нормованого розмаху (або **R/S-методу** прогнозу) від інших існуючих статистичних методів для аналізу часових рядів полягає в тому, що даний метод включає у свій аналіз напрямок часу, у той час як інші відомі методи стосовно цього часу інваріантні.

Вирішення завдання методу **R/S**-прогнозу на основі аналізу віброакустичного сигналу полягає в такому. Насамперед необхідно встановити, чи є досліджуваний ряд фрактальним або просто стохастичним процесом. З цією метою визначається фрактальна розмірність $\boldsymbol{D}$ як

$$\boldsymbol{D} = 2 - \boldsymbol{H}, \qquad (1)$$

де $\boldsymbol{H}$ – показник Херста.

Якщо отримане значення $\boldsymbol{D}$ дробове і складає більше одиниці ($\boldsymbol{D}$ >1), то можна вважати, що досліджуваний часовий ряд є фрактальним і має всі необхідні особливості для його фрактальної оцінки.

Порядок визначення показника Херста полягає в такому. Щодо віброакустичного сигналу приймаємо, що

він являє собою часову залежність $y(t)$ з різними значеннями величин амплітуд y протягом дискретних цілочисельних моментів часу t. Уявімо собі, що y є деякою накопиченою величиною, яка може бути представлена як сума деяких елементарних внесків Δt у деякому обмеженому інтервалі часу t від 1 до τ. Тоді середнє значення часового ряду буде визначатися як

$$\bar{y}(\tau) = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\Delta y(t), \qquad (2)$$

або

$$\bar{y}(\tau) = \frac{y(\tau)}{\tau}. \qquad (3)$$

Після цього обчислюється накопичене відхилення ряду $\Delta y(t)$ вимірів від середнього $\bar{y}(\tau)$ як

$$y(t,\tau) = \sum_{i=1}^{t}\left[\Delta y(i) - \bar{y}(\tau)\right]. \qquad (4)$$

Різниця між максимальним і мінімальним значеннями (розмахом) процесу $y(t)$ на інтервалі часу τ визначається як

$$R = max_{1\le t\le\tau}\, y(t,\tau) - min_{1\le t\le\tau}\, y(t,\tau). \qquad (5)$$

Середньоквадратичне відхилення приростів випадкового процесу на інтервалі τ складе

$$S = \sqrt{\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left[\Delta y(t) - \bar{y}(\tau)\right]^2}, \qquad (6)$$

де $\Delta y(t)$ – елементарний приріст $y(t)$ на кроці t.

Розмах визначається за співвідношенням

$$R/S = (a\cdot\tau)^H, \qquad (7)$$

де a – постійна Херста, що обумовлюється як $a = 0{,}5$.

Далі отримані значення логарифмуються:

$$log\left(R/S\right) = log\,(a\cdot\tau)^H = H\,log\,(a\cdot\tau) = H\left[log(\tau) + log(a)\right]. \qquad (8)$$

Після цього, використовуючи заміну $\boldsymbol{log}(\tau)=\varphi$ та $\boldsymbol{H}\,\boldsymbol{log}(\boldsymbol{a})=\boldsymbol{c}$, масив апроксимується лінійною залежністю

$$\boldsymbol{f}(\varphi)=\boldsymbol{H}\cdot\varphi+\boldsymbol{c}. \qquad (9)$$

Показник Херста знаходиться шляхом визначення тангенса нахилу прямої даної лінійної залежності.

На підставі цього при проведенні досліджень віброакустичні сигнали оброблялися за допомогою вільно розповсюджуваної в інтернеті програми Fractan 4.4. Особливістю даної програми є те, що досліджувані сигнали в ній проходять спеціальну обробку й переводяться в цілочисельні ряди, що дозволяє швидше провадити обчислення.

Отриманий при розрахунках показник Херста для віброакустичного сигналу, з погляду оцінки працездатності тягової передачі, можна інтерпретувати в такий спосіб [26].

При знаходженні показника Херста в інтервалі 0< $\boldsymbol{H}$ <0,5 значення досліджуваного часового ряду (сигналу) не є незалежними. Кожне з них несе пам'ять про попередні події. У цьому випадку час є важливим чинником, що впливає на всю систему (тягову передачу в цілому). Даний діапазон відповідає антиперсистентному (ергодичному) ряду, тобто "повернення до середнього". Якщо часовий ряд демонструє зростання в попередній період, то надалі почнеться його спад і можна чекати появи несправності.

При значенні показника Херста $\boldsymbol{H}=0{,}5$ досліджуваний часовий ряд являє собою випадкове блукання. При цьому всі значення є випадковими і некорельованими, тобто сьогодення не впливає на майбутнє (система знаходиться в невизначеному стані).

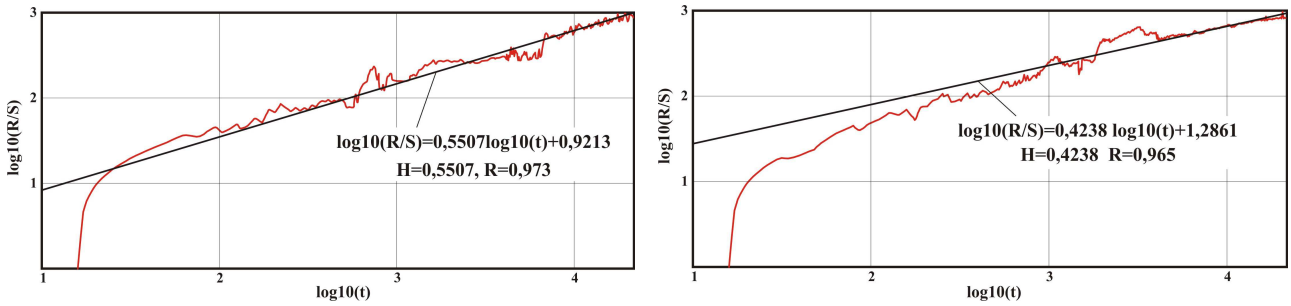
При знаходженні показника Херста в інтервалі 0,5< $\boldsymbol{H}$ <1,0 значення досліджуваного часового ряду є залежними. Трендостійкість поведінки значень ряду (сила персистентності) збільшується при наближенні значень $\boldsymbol{H}$ до одиниці. При цьому чим ближче $\boldsymbol{H}$ до значення 0,5, тим більше зашумлений ряд і менше виражений його тренд. Якщо ряд зростає в попередній період, то цю тенденцію він буде зберігати і в майбутньому, тобто поява несправності не очікується.

На рисунку наведено результати розрахунку показника Херста за програмою Fractan 4.4 для двох вібродіагностичних сигналів.

З отриманого значення показника Херста (рис. а) можна зробити висновок про те, що досліджуваний віброакустичний сигнал має фрактальність і не є породженням чисто стохастичного процесу, тому що $\boldsymbol{D}=2-0{,}5507=1{,}4493$. Отже, до даного сигналу можна застосовувати фрактальні методи з метою виявлення оптимальної конфігурації системи, для якої виконується прогнозування. З погляду прогнозу значення показника Херста знаходиться вище значення 0,5, тому можна зробити висновок, що надалі дана тягова передача буде зберігати задану працездатність, і дефектів у ній на майбутній період не передбачається.

Результати розрахунку показника Херста (рис. б) теж підтверджують його фрактальність, оскільки $\boldsymbol{D}=2-0{,}4238=1{,}5762$. Однак, з погляду прогнозу, у цьому випадку показник Херста знаходиться нижче значення 0,5 і можна припустити зародження у вузлі дефекту, що надалі може призвести до поломки й виходу з ладу тягової передачі.

За запропонованою технологією на планових видах ТО–3 і ПР–1 перевірялися тягові передачі на електропоїздах, які знаходились в експлуатації. Усього за час проведення випробувань було перевірено 192 тягові передачі. Для більшості з них (близько 86 %) розрахунковий показник Херста знаходився в межах 0,56–0,65. Це приймалося як відсутність у них яких-небудь дефектів і електропоїзд відправлявся в експлуатацію.



а б

Рис. Результати розрахунку показника Херста $\boldsymbol{H}$: а – показник, що потрапляє в інтервал 0,5< $\boldsymbol{H}$ <1,0; б – показник, що потрапляє в інтервал 0< $\boldsymbol{H}$ <0,5

У той же час у результаті проведення експерименту на окремих тягових передачах були зафіксовані й візуально підтверджені при розбиранні значні дефекти.

Так, на електропоїзді ЕР2Р-7070 при перевірці тягових передач моторних вагонів 70704, 70706 і 70708 перед проведенням ТО–3 на основі обробки віброакустичних сигналів розрахунковий показник Херста склав $\boldsymbol{H}$=0,43÷0,48. Фрактальна розмірність при цьому складала $\boldsymbol{D}=1{,}57\div1{,}52$. При прокручуванні тягові передачі видавали сильний шум у низькочастотному діапазоні. Перевіркою було встановлено (за допомогою штатних щупів), що в їхніх кожухах був недостатній рівень мастила. Після його поповнення до необхідного рівня були повторно зняті віброакустичні сигнали. Шум помітно зменшився і за результатами обробки сигналів, показник Херста вже склав $\boldsymbol{H}$=0,52÷0,54.

На двох тягових передачах був отриманий показник Херста відповідно 0,44 і 0,41, а фрактальна розмірність склала $\boldsymbol{D}=1{,}56\div1{,}59$. При прокручуванні колісних пар прослуховувалися стук й удари. Після розкриття тягових передач і їхнього візуального огляду через оглядові люки в кожусі були виявлені відколи й тріщини зубів вінця великого зубчастого колеса. Моторний вагон із цими дефектами був відставлений у ремонт.

Для окремих тягових передач був отриманий розрахунковий показник Херста в межах $\boldsymbol{H}$=0,36÷0,41, а фрактальна розмірність $\boldsymbol{D}=1{,}59\div1{,}64$. При їхньому огляді встановлено підвищене зношування поверхні зубів і, як наслідок, порушення їхньої геометрії.

У цілому слід зазначити, що в результаті обробки віброакустичних сигналів при проведенні експериментальних досліджень завжди утворювалася дробова розмірність $\boldsymbol{D}$, яка підтверджувала не стохастичну, а фрактальну сутність процесів, що протікають у тягових передачах електропоїздів.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку

1. Визначено роль тягової передачі з погляду її працездатності й безпеки руху. Виділено процеси, що протікають безпосередньо в тяговій передачі при перетворенні й передачі потужності від джерела до колісної пари. Оцінювалось навантаження, що виникає під час руху електропоїзда. Встановлено, що тягові передачі, нарівні з колісними парами, тяговими електродвигунами й електроапаратами, знаходяться на одному з перших місць з виходу їх з ладу.

2. Проведено фрактальний аналіз віброакустичних сигналів, що дозволяє обчислити в кожному конкретному випадку межу їхньої передбачуваності. У якості основного діагностичного параметра

запропоновано показник Херста, обчислення якого показує, що вібродіагностичний сигнал для тягових передач може належати як до персистентних, так і до антиперсистентних процесів. Запропоновано діагностичні діапазони для оцінки показника Херста, на підставі яких можна визначати технічний стан тягових передач, а також прогнозувати їхню працездатність в експлуатації.

3. Виконано експериментальні дослідження, які підтвердили фрактальні властивості віброакустичних сигналів, і виявили, що вони можуть змінюватися відповідно до виявлених дефектів у тягових передачах. При цьому підтверджено, що метод **R**/**S**-аналізу є цілком адекватним для оцінки результатів експрес-діагностики й довів коректність його застосування для моніторингу технічного стану тягових передач. Характерні відмови в тягових передачах і передбачуваність їхньої прояви на основі зміни показника Херста дозволили рекомендувати продовження даних досліджень і розширити на весь парк електропоїздів.

Список використаних джерел

1. Баранов, В. М. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях [Текст] / В.М. Баранов. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
2. Ермолов, И. Н. Акустические методы контроля [Текст] / И. Н.Ермолов, Н.П. Алешин. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
3. Барков, А. В. Вибрационная диагностика колесно-редукторных блоков на железнодорожном транспорте [Текст] / А.В. Барков. – СПб.: Изд. центр СПб. ГМТУ, 2002. – 101 с.
4. Артоболевский, И. И. Введение в техническую диагностику машин [Текст] / И.И. Артоболевский, Ю.И. Балицкий, М.Д. Генкин. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 296 с.
5. Павлов, Б. В. Акустическая диагностика механизмов [Текст] / Б.В. Павлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
6. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст] / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 282 с.
7. Кинтцель, Т. Программирование звука на ПК [Текст] / Т. Кинтцель. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 432 с.
8. Рандалл, Р. Б. Частотный анализ [Текст] / Р. Б. Рандалл. – Дания: Кампания Ларсен и сын, 1989. – 389 с.
9. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом [Текст] / Н.И. Иванов. – М.: Логос, 2008. – 423 с.
10. Сосулин, Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов [Текст] / Ю.Г. Сосулин. – М.: Сов. радио, 1978. – 319 с.
11. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов [Текст] / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
12. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин. – М.: Сов. Радио, 1989. – 653 с.
13. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях [Текст] / Ж. Макс. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
14. Бобровников, Я. Ю. Диагностические комплексы электроподвижного состава [Текст] / Я.Ю. Бобровников. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2012. – 94 с.

15. Панчелюга, В. А. Локальный фрактальный анализ шумоподобных временных рядов методом всех сочетаний [Текст] / В.А. Панчелюга, М.С. Панчелюга // Биофизика. – 2015. – Т. 60. – Вып. 2. – С. 395-410.

16. Зиненко, А. В. R/S анализ на фондовом рынке [Текст] / А.В. Зиненко // Бинес-информатика. – 2012. – №3(21). – С. 24-30.

17. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

18. Arne R., Wiebke B., Kai H., Brigitta S., Nicole A. Fractals in topography // Application to geoarchaeological studies in the surroundings of the necropolis of Dahshur, Egypt Quaternary International, V. 266, 17 July 2012, P. 34-46

19. Mohamed J., Guermazi A., Jingbo N., Jeffrey D., John A., Frank W. Multi-dimensional reliability assessment of fractal signature analysis in an outpatient sports nnals of Anatomy // Anatomischer Anzeiger, V. 202, November 2015, pp 57-60.

20. Lazzari S., Nicoud L., Jaquet B., Lattuada M. Morbidelli Fractal-like structures in colloid science // Advances in Colloid and Interface Science, V. 235, September 2016, pp 1-13

21. Pavel Horváth, Petr Šmíd, Ivana Vašková, Miroslav Hrabovský Koch fractals in physical optics and their Fraunhofer diffraction patterns Optik // International Journal for Light and Electron Optics, V. 121, Issue 2, January 2010, pp 206-213.

22. Perugini Diego, Poli Giampiero Chaotic dynamics and fractals in magmatic interaction processes: a different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves // Earth and Planetary Science Letters, V. 175, Issues 1–2, 30 January 2000, pp 93-103.

23. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines — A km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine // International Journal of Coal Geology, V. 71, Issues 2–3, 2 July 2007, pp 209-224.

24. Трофимович, В. В. Механическая часть электроподвижного состава [Текст] / В.В. Трофимович. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2006. – 100 с.

25. Киселев, Б. В. Об интерпретации статистического R–S–анализа (показатель Херста) [Текст] / Б.В. Киселев // Ученые записки СПбГУ. – 2007. – Вып. 40 (440). – С. 121-130.

26. Дьяконов, В. П. Вейвлет–анализ в Matlab реальных осцилограмм [Текст] / В.П. Дьяконов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2010. – №3. – С. 19-25.

27. Зосимов, В. В. Фракталы и скейлинг в акустике [Текст] / В.В. Зосимов, Л.М.Лямшев // Акустический журнал. – 1994. – Т. 40. – №5. – С. 709-737.

Бульба Владислав Ігорович, інженер технічного відділу служби приміських пасажирських перевезень Південної залізниці. Тел.: 093-29-508-79.

Bulba Vladislav, engineer of a technical department service of suburban passenger transportations Southern railway. Tel.: 093–29–508–79.

Стаття прийнята 19.09.2016 р.