

УДК 681.2.083, 681.2.087

Измерение и анализ в реальном времени локальных повреждений при износоусталостных испытаниях

С.С. Щербаков

Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
ул. Академическая, 1, г. Минск 220072, Беларусь

Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 25.07.2018

Принята к печати 14.05.2019

При испытаниях на контактную усталость обычно измеряют сближение осей один раз за цикл или за несколько циклов нагружения из-за трудности обработки большого количества данных при многоцикловых испытаниях. Целью работы являлась разработка и апробация в режиме реального времени модели сглаживания измеряемых центром SZ-01 в виде временных рядов экспериментальных данных с использованием вейвлет-преобразования.

С помощью центра SZ во время износоусталостных испытаний был измерен момент трения в системе ролик/вал, что позволило изучить изменение коэффициента сопротивления качению в зависимости от уровня контактной и бесконтактной изгибающей нагрузки. Также измерялась величина сближения осей контактирующих тел (ролика и вала) в восьми точках на окружности дорожки качения за один цикл, что позволило изучить неоднородность локальных повреждений в условиях контактной и контактно-механической усталости. При разработке программного модуля для сглаживания большого объема экспериментальных данных, поступающих от испытательного центра, использовались различные методы сглаживания временных рядов: скользящая средняя; экспоненциальная скользящая средняя; вейвлет-преобразование и простая скользящая средняя, примененная к разностям вейвлет-коэффициентов; вейвлет-преобразование и экспоненциальная скользящая средняя, примененная к разностям вейвлет-коэффициентов.

Результаты численного моделирования показали, что наилучшее приближение к исходному ряду дает вейвлет-преобразование с использованием экспоненциальной скользящей средней для сглаживания разностей между коэффициентами вейвлет-преобразования.

Применение программного модуля, основанного на данной модели, в центре SZ-01 позволило сгладить временные ряды, характеризующие изменение сближения осей ролика и вала и крутящего момента.

Ключевые слова: трибофатика, испытательный центр SZ, локальные повреждения при контактной усталости, временной ряд, вейвлет-преобразование.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

Адрес для переписки:

С.С. Щербаков
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: sherbakovss@mail.ru

Address for correspondence:

S.S. Sherbakov
Belarusian State University,
Nezavisimosti ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: sherbakovss@mail.ru

Для цитирования:

С.С. Щербаков.
Измерение и анализ в реальном времени локальных повреждений при износоусталостных испытаниях
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 207–214.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

For citation:

S.S. Sherbakov.
[Measurement and Real Time Analysis of Local Damage in Wear-and-Fatigue Tests].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 207–214 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

Measurement and Real Time Analysis of Local Damage in Wear-and-Fatigue Tests

S.S. Sherbakov

State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus
Academicheskaya str., 1, Minsk 220072, Belarus
Belarusian State University,
Nezavisimosti ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 25.07.2018

Accepted for publication 14.05.2019

Abstract

In rolling fatigue tests the approach of the axes is usually measured once per cycle or for several loading cycles because of the difficulties of processing a large amount of data in multi-cycle testing. The aim of this work was the development and tests of smoothing model for measured by the SZ-01 center time series experimental data using wavelet transform.

With the help of the SZ center, the frictional moment in the roller/shaft system was measured allowing for studying the change in the coefficient of rolling resistance as a function of the level of the contact and non-contact bending load during wear-fatigue tests. Also the axes approach of the contacting bodies (roller and shaft) was measured at eight points on the raceway circumference in one cycle. This allowed studying the heterogeneity of local damages under conditions of rolling and mechano-rolling fatigue. When developing a software module for smoothing a large amount of experimental data from the test center, various methods of time series smoothing were used: moving average; exponential moving average; wavelet transform and moving average applied to the differences of the wavelet coefficients; wavelet transform and exponential moving average applied to the difference of the wavelet coefficients.

The results of numerical simulation showed that the best approximation to the original series was provided by the wavelet transform using an exponential moving average to smooth the differences between the coefficients of the wavelet transform.

The use of a software module based on this model in SZ-01 center allowed smoothing the time series characterizing the change of roller and shaft axes approach and torque.

Keywords: Tribo-Fatigue, SZ-01 test center, local damages under contact fatigue, time series, wavelet transform.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

Адрес для переписки:

С.С. Щербakov
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: sherbakovss@mail.ru

Address for correspondence:

S.S. Sherbakov
Belarusian State University,
Nezavisimosti ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: sherbakovss@mail.ru

Для цитирования:

С.С. Щербakov.
Измерение и анализ в реальном времени локальных повреждений при износоусталостных испытаниях
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 207–214.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

For citation:

S.S. Sherbakov.
[Measurement and Real Time Analysis of Local Damage in Wear-and-Fatigue Tests].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 207–214 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-207-214

Введение

В трибофатике установлено, что циклические напряжения оказывают существенное влияние на характеристики контактной и фрикционной усталости [1, 2]. Также установлено, что процессы трения и износа, реализующиеся при контактном взаимодействии твердых тел, приводят к значительному изменению характеристик сопротивления механической усталости [3, 4].

Особый вид предельного состояния при контактной и контактно-механической усталости, характерный для системы типа колесо/рельс, – образование остаточных волнообразных повреждений установлен и описан в работах [5, 6]. Источниками нестационарности на дорожке качения являются первоначальные неровности материала, которые и вызывают образование остаточных волнообразных повреждений. Образование таких повреждений есть результат нестационарного, нерегулярного процесса упругопластического деформирования [7, 8]. В процессе износоусталостных испытаний возникает и развивается существенная деформационная анизотропия свойств материала на поверхности качения. Анизотропия физико-механических свойств материала в локальных зонах вдоль дорожки качения обуславливает анизотропию деформации в этих зонах, она служит источником нестационарности. Чем сильнее анизотропия деформации, тем выше динамическая сила, возбуждаемая при локальном соударении ролика и образца. Таким образом, в данном случае описанная форма запредельного состояния обусловлена нестационарными ударно-усталостными процессами [9].

Центр для износоусталостных испытаний SZ-01 позволяет с достаточной точностью производить измерение таких параметров как момент трения, вибрации, сближение осей, остаточные деформации в процессе испытаний силовых систем. При измерении показателей непосредственно во время проведения испытаний выходным сигналом является временной ряд. Данный временной ряд может быть нестационарным и включать в себя шумы от внешних источников случайных вибраций, поэтому необходима разработка методов, которые смогут в режиме реального времени убрать из исходного временного ряда посторонние шумы и сгладить случайные выбросы. Кроме того, актуальной является задача по данным временных рядов сделать прогноз и вывод о дости-

жении системой своего предельного состояния. С целью сглаживания временного ряда можно использовать различные методы. Одними из самых простых методов сглаживания являются простая и экспоненциальная скользящие средние, однако они обладают недостатком – между реальными данными и сглаженными существует временной лаг. В настоящее время одними из перспективных методов сглаживания нестационарных высокочастотных временных рядов являются методы, основанные на вейвлет-преобразовании [10, 11]. Целью работы являлась разработка и апробация модели сглаживания измеряемых центром SZ-01 в виде временных рядов экспериментальных данных с использованием вейвлет-преобразования.

Испытания на контактную и контактно-механическую усталость

Испытания по изучению закономерностей влияния контактных и неконтактных циклических напряжений на образование повреждений при качении для вала и ролика из сталей 45 и 25ХГТ проводились по схеме, представленной на рисунке 1 (см. таблицу 1).

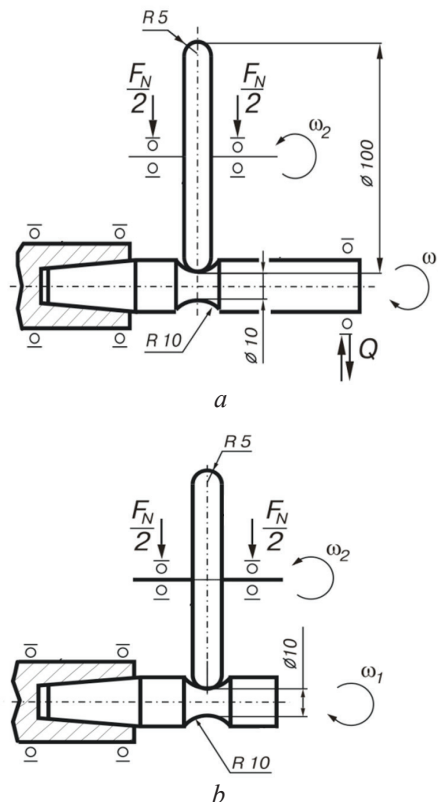


Рисунок 1 – Схемы испытаний на контактно-механическую (а) и контактную (б) усталость

Figure 1 – Schemes of tests for mechano-rolling (a) and rolling (b) fatigue

Таблица 1/Table 1

Характеристики испытываемых материалов

Characteristics of the test materials

Материал Material	Термообра- ботка Heat treatment	Твердость Hardness	Предел выносли- вости при изгибе с вращением σ_{-1} , МПа Fatigue limit for bending with rotation σ_{-1} , MPa	Предел текучес- ти при растяже- нии σ_T , МПа Tensile yield limit σ_T , MPa	Предел прочнос- ти при растяже- нии σ_b , МПа Tensile strength limit σ_b , MPa
Сталь/Steel 25ХГТ	Поверхностная закалка Surface hardening	700 HV	760	900	1700
Сталь/Steel 45	Нормализация Normalization	470 HV	270	380	610

Экспериментальные исследования осуществ-
лялись на центре для износоусталостных испы-
таний SZ-01 при частоте вращения образца 3000
оборотов в минуту в соответствии со стандарта-
ми ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 30755-2001.

Центр SZ-01 позволяет помимо традицион-
ного измерения среднего за некоторый период
испытаний сближения осей (износа) также ис-
следовать локальные повреждения (износ) в 8-ми
точках вдоль пути трения для каждого цикла на-
гружения.

После проведения испытаний полученные
результаты представляются в виде кривых изме-
нения износа по времени и в виде кругов износа
для конкретных моментов.

Одной из основных измеряемых при изно-
соусталостных испытаниях характеристик явля-
ется момент трения M_T . Данная характеристика
представляется в виде временного ряда в зави-
симости от количества циклов нагружения.

Из рисунка 2 видно, что при постоянной
контактной силе $F_N = 254$ Н, которой соот-
ветствует максимальное контактное давле-
ние $p_0 = 2400$ МПа, величина момента тре-
ния M_T изменяется при росте неконтактной
изгибающей силы Q . Это явление в трибофа-
тике получило название обратного эффекта.
В условиях рассматриваемого испытания при
увеличении неконтактной изгибающей вал
силы Q с 200 до 350 МПа момент трения M_T

в области контактного взаимодействия ролика
и вал увеличивался при неконтактном осевом
сжатии ($\sigma(Q) < 0$) и уменьшался при некон-
тактном осевом растяжении ($\sigma(Q) > 0$) при-
мерно на 12 %.

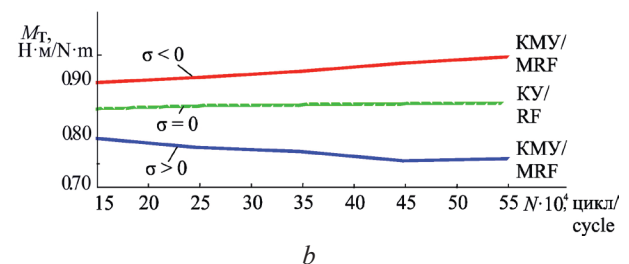
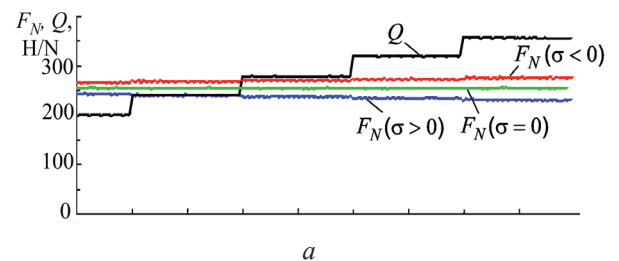


Рисунок 2 – Осредненные протоколы испытаний
на контактную (КУ) (а) и контактно-механическую
(КМУ) (б) усталость: F_N – контактная сила; Q – не-
контактная изгибающая вал сила; M_T – момент тре-
ния

Figure 2 – Averaged test protocols for contact (RF) and
mechano-rolling (MRF) fatigue: F_N – contact force;
 Q – non-contact shaft bending force; M_T – frictional
moment

Обработка временных рядов выходных данных

Рассмотрим результаты измерения сближения осей δ ролика и вала при испытаниях на контактно-механическую усталость для ступенчато-возрастающей контактной нагрузки F_N до 850 Н и изгибающей нагрузки $Q = 220$ Н при начальных биениях вала (образца) Δ , равных 10 и 40 мкм (см. рисунок 3). Из рисунка 3 видно, что при большем начальном биении вала (40 мкм) в точке 1 графика начинается нестационарный

процесс деформирования, а в точке 2 начинается виброударный процесс. Задача определения моментов наступления подобных событий не после эксперимента, а в его процессе, довольно сложна из-за большого количества ежесекундно поступающих данных. Действительно, в минуту происходит 3000 оборотов вала и в течение каждого оборота передаются значения сближения осей в 8 точках по окружности образца. Это требует особого подхода к анализу соответствующего временного ряда.

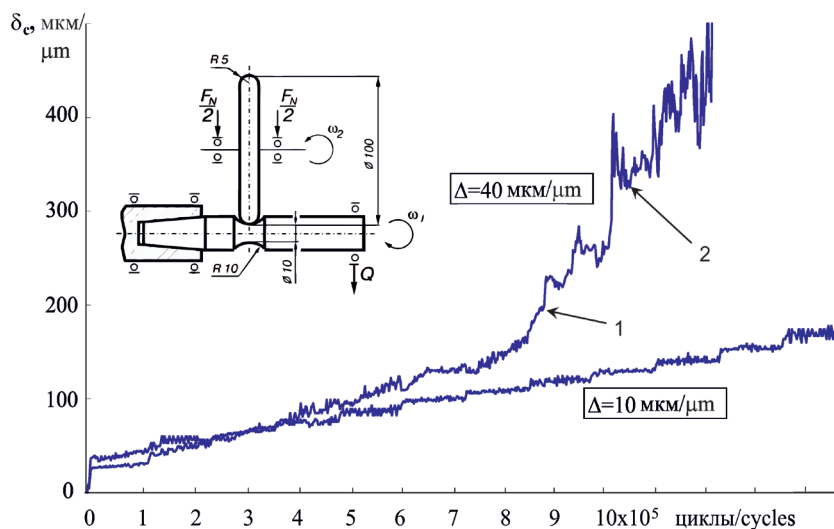


Рисунок 3 – Зависимость сближения осей ролика и вала от количества циклов испытаний при контактно-механической усталости: 1 – начало нестационарного процесса деформирования; 2 – начало виброударного процесса; Δ – начальные биения вала (образца)

Figure 3 – Dependence of roller and shaft axes approach on the number of test cycles under mechano-rolling fatigue: 1 – the beginning of non-stationary deformation process; 2 – the beginning of vibro-impact process; Δ – initial outruns of the shaft (specimen)

На данный момент существует большое количество методов обработки временных рядов. Отметим лишь некоторые из них: простая скользящая средняя, экспоненциальная скользящая средняя, вейвлет-преобразование.

Метод скользящей средней заключается в усреднении поступающего сигнала по некоторому окну из N наблюдений:

$$A_k = \sum_{i=k}^{N+k} \frac{a_i}{N}, \quad (1)$$

где a_i – элемент исходного числового ряда; N – ширина окна; A_k – k -ый элемент обработанного ряда.

Метод экспоненциальной скользящей средней заключается в применении для временного ряда формулы:

$$Ema_i = Ema_{i-1} + \frac{2}{N+1}(a_i - Ema_{i-1}), \quad (2)$$

где Ema_i – последнее значение скользящей экспоненциальной средней; a_i – элемент числового ряда; N – ширина окна.

Для рассмотрения вейвлет-преобразования обратимся к временному ряду длительностью $T=2M$:

$$\gamma_t, t = 1, \dots, T. \quad (3)$$

В классическом дискретном вейвлет-преобразовании используется «пирамидальная» схема (алгоритм Малла), когда число вейвлет-коэффициентов на каждом последующем (более высоком) уровне разрешения в два раза больше, чем на предыдущем. Такая схема удобна с точки зрения минимальности объема хранимых данных и вычислительной трудоемкости алгоритма декомпозиции,

однако имеет и ряд своих недостатков: алгоритм реконструкции ряда достаточно сложен; в случае добавления информации к наблюдениям появляется необходимость в пересчете всех вейвлет-коэффициентов; эффективный алгоритм декомпозиции существует только для случая, когда длина временного ряда является степенью 2.

Для устранения этих недостатков (за счет избыточности получаемых коэффициентов) может применяться недецимированное вейвлет-преобразование [12].

Недецимированные вейвлет-коэффициенты определяются следующим образом.

На первом этапе задается число уровней разложения M , на которые производится вейвлет-декомпозиция временного ряда.

На втором этапе строится семейство последовательно «сглаживаемых» временных рядов (вейвлет-коэффициентов) по следующему правилу:

$$c_0(t) = \gamma_t, t = 1, \dots, T; \quad (4)$$

$$c_i(t) = \sum_{k=1}^n h(k) c_{i-1}(t + 2^{i-1} k), i = 1, \dots, M,$$

где $h(k)$ – фильтр длины n , который, как правило, удовлетворяет следующим условиям:

- сумма значений компонент вектора равна t ;
- все компоненты неотрицательны;
- вектор симметричен.

На третьем этапе вычисляются разности вейвлет-коэффициентов:

$$\phi_i(t) = c_{i-1}(t) - c_i(t), \quad (5)$$

Тогда исходный временной ряд можно представить в виде:

$$\gamma_t = c_m(t) + \sum_{j=1}^M \phi_j(t). \quad (6)$$

Применительно к разработке процедуры сглаживания экспериментальных временных рядов на модельном сигнале были испытаны различные методы его обработки (см. рисунок 4):

- скользящая средняя (1) (sma);
- экспоненциальная скользящая средняя (2) (ema);
- вейвлет-преобразование и простая скользящая средняя, примененная к разностям вейвлет-коэффициентов (4) ($wsma$);
- вейвлет-преобразование и экспоненциальная скользящая средняя, примененная к разностям вейвлет-коэффициентов (4) ($wema$).

Анализ рисунка 4 показывает, что наилучшее приближение дает метод $wema$ восстановления сигнала (6) из вейвлет-преобразования (4), (5) с использованием экспоненциальной скользящей средней для сглаживания разностей вейвлет-коэффициентов (5).

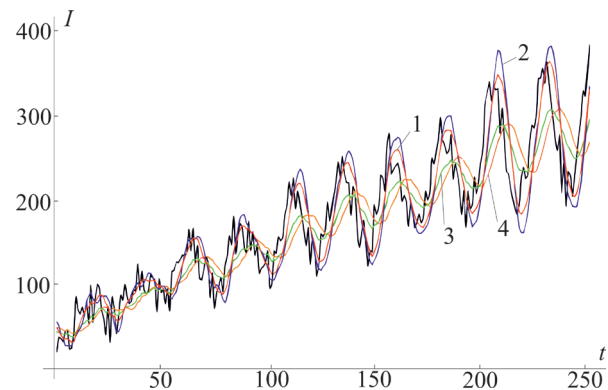
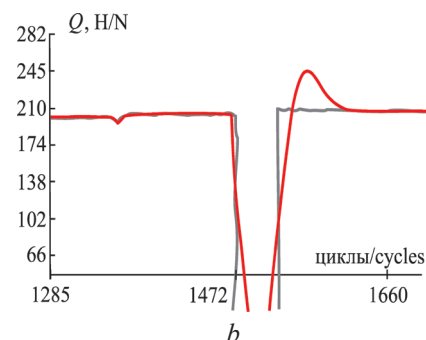
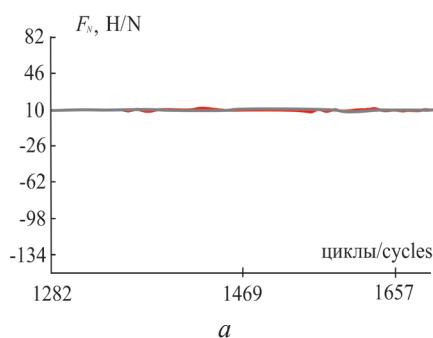


Рисунок 4 – Анализ модельного временного ряда методами вейвлет-преобразования и экспоненциальной скользящей средней, примененной к разностям вейвлет-коэффициентов (1), вейвлет-преобразования и простой скользящей средней, примененной к разностям вейвлет-коэффициентов (2), экспоненциальной скользящей средней (3), скользящей средней (4)

Figure 4 – Model time series analysis by wavelet transform and exponential moving average applied to the difference of the wavelet coefficients (1), wavelet transform and moving average applied to the differences of the wavelet coefficients (2), exponential moving average (3), moving average (4)

Апробированный на модельном ряде метод $wema$ был применен для сглаживания в реальном времени экспериментальных данных, поступающих от испытательного центра (см. рисунок 5).



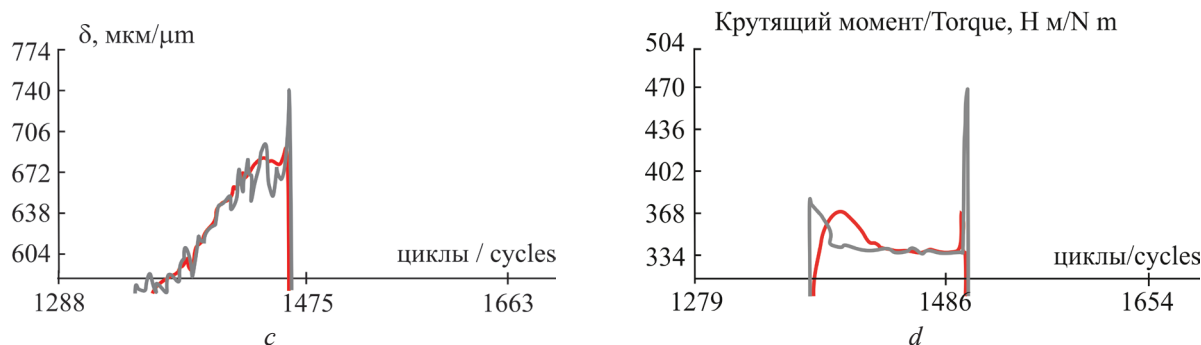


Рисунок 5 – Сглаживание экспериментальных данных методом экспоненциальной скользящей средней, примененной к разностям вейвлет-коэффициентов: контактная нагрузка (а), изгибающая неконтактная нагрузка (б), сближение осей ролика и вала (с), крутящий момент (д)

Figure 5 – Smoothing of experimental data by wavelet transform and exponential moving average applied to the difference of the wavelet coefficients method: contact load (a), bending non-contact load (b), approach of roller and shaft axes (c), torque (d)

На рисунках 5b, d видно характерное запаздывание сглаженного временного ряда при резком ступенчатом изменении исходного сигнала. Однако при сравнительно небольших колебаниях значений исходного сигнала (рисунок 5с, d) применение метода *weta* позволило сгладить временные ряды.

Заключение

Рассмотрено временное измерение момента трения, сближения осей (износа) и локальных повреждений при исследовании контактной и контактно-механической усталости на испытательном центре SZ-01 в зависимости от контактных и неконтактных нагрузок.

Разработан программный модуль для сглаживания экспериментальных данных поступающих от испытательного центра. На тестовом примере показано, что наилучшее приближение к исходному ряду дает вейвлет-преобразование с использованием экспоненциальной скользящей средней для сглаживания разностей между коэффициентами вейвлет-преобразования. Применение данной модели в центре SZ-01 позволило сгладить временные ряды, характеризующие изменение сближения осей ролика и вала и крутящего момента.

Список использованных источников

1. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петраковец. – ИММС НАНБ: Гомель, 2002. – 304 с.

2. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1 – 246 с., Т. 2 – 234 с.

3. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.

4. Щербаков, С.С. Об одном требовании к выбору коэффициента трения в силовой системе / С.С. Щербаков // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71, № 2. – С. 46–48.

5. Sosnovskiy, L.A. Methods and main results of Tribo-Fatigue tests / L.A. Sosnovskiy [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 66. – P. 207–219.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.04.006

6. Тюрин, С.А. Исследование волн пластичности при контактно-механической усталости / С.А. Тюрин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2001. – № 4. – С. 11–14.

7. Eadie, D.T. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation. Proceedings of 7th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems / D.T. Eadie [et al.] // Brisbane. – 2006. – Vol. 1. – P. 235–243.

8. Kouanga, C.T. On the estimation of finite lifetime under fretting fatigue loading / C.T. Kouanga [et al.] // Int. J. of Fatigue. – 2018. – Vol. 112. – P. 138–152.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.013

9. Тюрин, С.А. Экспериментальное исследование остаточных волнообразных повреждений при инициированном начальном искажении формы образца / С.А. Тюрин, С.С. Щербаков // Вестник БелГУТ: Наука и транспорт. – 2005. – № 2 (11). – С. 88–93.

10. Wang, Y. Discrete Wavelet Transform for Nonstationary Signal Processing / Y. Wang [et al.] //

Discrete Wavelet Transforms – Theory and Applications, InTech. – 2011. – P. 21–42.

11. Akansu, A.N. Emerging applications of wavelets: A review / A.N. Akansu, W.A. Serdijn, I.W. Selesnick // Phys. Communication. – 2010. – Vol. 3, no. 1. – P. 1–18.
DOI: 10.1016/j.phycom.2009.07.001

12. Миротин, Е.А. Прогнозирование временных рядов с использованием непрореженного вейвлет-преобразования и односторонних фильтров / Е.А. Миротин // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 2 – С. 127–132.

References

1. Myshkin N.K., Petrakovets M.I. *Tribologiya. Printsipy i prilozheniya* [Tribology. Principles and applications]. Gomel, MPRI NASRB, 2002, 304 p.

2. Sosnovskii L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of tribo-fatigue]. Gomel, BelSUT, 2003, vol. 1, 246 p., vol. 2, 234 p.

3. Sosnovskii L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-and-fatigue damage]. Gomel, BelSUT, 2007, 434 p.

4. Sherbakov S.S. [On one requirement for the choice of coefficient of friction in the power system]. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory], 2005, vol. 71, no. 2, pp. 46–48 (in Russian).

5. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Yelovoy O.M., Tyurin S.A., Komissarov V.V., Sherbakov S.S. [Methods and main results of Tribo-Fatigue tests]. *International Journal of Fatigue*, 2014. vol. 66. pp. 207–219.
DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.04.006

6. Tyurin S.A. [Investigation of plasticity waves in contact-mechanical fatigue]. *Vestnik BrGTU* [BrSTU Bull.], 2001, no. 4, pp. 11–14 (in Russian).

7. Eadie D.T., Santoro M., Oldknow K., Oka Y. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation. Proceedings of 7th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems. *Brisbane*, 2006, vol. 1, pp. 235–243.

8. Kouanga C.T., Jones J.D., Reville I., Wormald A., Nowell D., Dwyer-Joyce R.S., Araújo J.A., Susmel L. On the estimation of finite lifetime under fretting fatigue loading. *Int. J. of Fatigue*, 2018, no. 112, pp. 138–152.
DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.013

9. Tyurin S.A., Sherbakov S.S. [Experimental investigation of residual wave-like damages at initiated initial distortion of the sample shape]. *Vestnik BelGUT* [BelSUT Bull.], 2005, no. 2 (11), pp. 88–93 (in Russian).

10. Yansong Wang, Weiwei Wu, Qiang Zhu and Gongqi Shen. Discrete Wavelet Transform for Nonstationary Signal Processing. *Theory and Applications, InTech.*, 2011, pp. 21–42.

11. Akansu A.N., Serdijn W.A., Selesnick I.W. Emerging applications of wavelets: A review. *Phys. Communication*, 2010, no. 3, pp. 1–18.
DOI: 10.1016/j.phycom.2009.07.001

12. Mirotin E.A. [Forecasting time series using non-decimated wavelet transform and one-sided filters]. *Vestnik BSU* [BSU Bull.], Ser. 1., 2011, no. 2, pp. 127–132 (in Russian).