

Береснев Алексей Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: beresneval@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Береснев Максим Алексеевич – e-mail: mberesnev@sfedu.ru; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Быстрицкий Андрей Владимирович – e-mail: bistritskiy@sfedu.ru; аспирант.

Beresnev Aleksei Leonovich – Southern Federal University; e-mail: beresneval@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrotechnics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Beresnev Maksim Alekseevich – e-mail: mberesnev@sfedu.ru; the department of electrotechnics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Bystritskii Andrei Vladimirovich – e-mail: bistritskiy@sfedu.ru; postgraduate student.

УДК 681.3.062

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-174-184

С.И. Клевцов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Состояние технического объекта определяется на основе оценки его параметров, текущей и прогнозной. На объект воздействуют различные внешние факторы, которые приводят к деградации параметров объекта. Если изменение параметров станет недопустимым для рабочего режима объекта, он может выйти из строя, а это может привести к аварийной ситуации. Чтобы этого не допустить, необходимо не только контролировать параметры в процессе работы, но и прогнозировать их значения на шаг и более вперед по оси времени. Однако, достоверный и удовлетворяющий по точности прогноз возможен, если поведение параметра определяется предысторией, то есть данными, которые к текущему моменту известны, а тренд для временного ряда параметра сохраняет характер монотонности еще какое-то время. Для анализа возможного поведения временного ряда параметра, включая оценку стабильности тренда, определения точек изменения его динамики, использовался метод нормированного размаха Хёрста. Метод нормированного размаха не ставит дополнительным условием для анализа соответствие совокупности измерений нормальному закону распределения. Для временных рядов параметров это условие практически не выполняется. На основе определения величины показателя Хёрста ряды классифицируются на антиперсистентные, случайные и персистентные. Если ряд классифицирован как антиперсистентный, то он обладает ярко выраженными фрактальными свойствами, а если он персистентный, то его тренд обладает «исторической» памятью и для его прогнозирования можно использовать обычные методы временных рядов. С помощью показателя Хёрста можно определить не только оценку отношения силы тренда к уровню шума, но и по величине показателя оценить необходимость выполнения процедур фильтрации шумовой составляющей сигнала. На основании обработки данных об ускорении технического объекта методом нормированного размаха сделан вывод о целесообразности применения показателя Хёрста при решении задач прогнозирования параметров технических объектов. Чем выше для рассматриваемого ряда показатель Хёрста из диапазона $(0,5 \div 1,0]$, тем более точным может быть прогноз значений параметра. При значениях показателя Хёрста, приближающихся к величине 0,5, требуется дополнительная обработка данных перед процедурой прогнозирования для снижения погрешности оценки значений ряда.

Временной ряд; модель, прогнозирование; технический параметр; показатель Хёрста; метод нормированного размаха.

S.I. Klevtsov

USING THE METHOD OF NORMALIZED EXPANSION TO ANALYZE THE BEHAVIOR OF A TECHNICAL OBJECT PARAMETER

The condition of the technical object is determined on the basis of the assessment of its parameters, current and forecast. The object is affected by various external factors that lead to degradation of the object parameters. If changing the parameters becomes invalid for the operating mode of the object, it can fail, and this can lead to an emergency. To prevent this, it is necessary not only to control the parameters during operation, but also to predict their values one step and more forward along the time axis. However, a reliable and satisfying forecast is possible if the behavior of the parameter is determined by the background, that is, by the data that are currently known, and the trend for the time series of the parameter retains the character of monotony for some time. To analyze the possible behavior of the time series of the parameter, including the assessment of trend stability, determining the points of change in its dynamics, the method of normalized Hurst scope was used. The normalized-scale method does not put an additional condition for the analysis of compliance with the normal law of distribution. For time series of parameters, this condition is practically not met. On the basis of determining the value of the Hurst exponent ranks are classified on antipersistent, random and persistent. If a series is classified as antipersistent, it has pronounced fractal properties, and if it is persistent, then its trend has a "historical" memory and for its prediction you can use conventional time series methods. With the help of the Hurst exponent, it is possible to determine not only the estimation of the ratio of the strength of the trend to the noise level, but the magnitude of the index. thread the necessity of implementing procedures for filtering a noise component of the signal. On the basis of data processing about acceleration of the technical object by the method of normalized amplitude a conclusion about expediency of application of the Hurst exponent in the solution of problems of forecasting parameters of technical objects. The higher the Hurst indicator from the range (0.5÷1.0) for the considered series, the more accurate the forecast of the parameter values can be. For values of the Hurst exponent approaching the value of 0.5, additional data processing is required before the forecasting procedure to reduce the error in estimating the series values.

Time series; model; forecasting; technical parameter; Hurst exponent; method of normalized amplitude.

Введение. Оценка состояния технического объекта очень часто базируется на анализе изменения параметра или совокупности его параметров [1–5]. На объект воздействуют различные внешние климатические факторы, такие как температура, влажность, давление и другие, которые приводят к деградации параметров объекта. Неправильная эксплуатация также влияет на состояние объекта. Когда деградация приводит к превышению допустимого уровня изменения параметра, объект выходит из строя. Это может, в свою очередь, привести к нештатным ситуациям и авариям, что недопустимо. В связи с этим важно не только отслеживать текущее значение контролируемого параметра объекта, но и попытаться оценить его изменение в будущем на небольшой промежуток времени за границей текущего временного отсчета [6–10].

Прогнозирование параметра основывается на предположении, что его поведение на последующем временном промежутке не претерпит существенных изменений, временной ряд параметра будет персистентным, то есть обладающим долговременной памятью [11, 12]. Кроме того, даже если временной ряд параметра будет антиперсистентным рядом, важно оценить периоды колебаний, что может помочь построить процедуру оценки параметра в этом случае [11, 13].

Постановка задачи. Имеется временной ряд контролируемого параметра технического объекта $y = f(t)$. Для определения состояния объекта необходима оценка возможных значений параметра в моменты времени, следующие за текущим отсчетом. Контролируемый параметр характеризуется высоким уровнем шума. Кроме того, тренд временного ряда параметра может менять направление.

Предлагаемые для прогнозирования параметра во времени методы временных рядов [14–21] позволяют провести прогнозную оценку в условиях реального времени и без предварительной обработки, обладают низкой алгоритмической сложностью, что позволяет их реализовывать в микроконтроллере в фоновом режиме. Но погрешность прогноза довольно высокая и эти методы не имеют механизмов оценки персистентности ряда, что не позволяет своевременно реагировать на смену динамики изменения параметра, что объясняет возрастание запаздывания прогнозирующего ряда относительно фиксируемого в эксперименте.

Для повышения точности и достоверности прогнозирования параметра с помощью временных рядов необходимо знать, насколько стабилен тренд на интервале прогнозирования, какой длительности временной интервал стабильного роста или снижения тренда, есть ли цикличность в росте и спаде тренда и можно ли зафиксировать, хотя бы ориентировочно, моменты времени, когда возможны изменения его поведения.

Решение хотя бы на части перечисленных вопросов могут существенно повысить достоверность прогноза изменения параметра во времени и, соответственно, оценки работоспособности технического объекта.

Метод нормированного размаха для анализа поведения временного ряда.

Для анализа возможного поведения временного ряда параметра, включая оценку стабильности тренда, определения точек изменения его динамики, предлагается использовать метод нормированного размаха Хёрста [12, 22–29]. В процессе исследований Хёрст определил, что большинство физических событий, с которыми мы встречаемся в реальной жизни, такие как изменения температуры, выпадение осадков, разливы рек, если их характеризовать параметрами, описываются временными рядами, в основе которых лежит тренд с шумом [23, 24, 26, 27]. Оценка отношения силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор) определяется с помощью показателя Хёрста H . Метод нормированного размаха широко используется в финансовой сфере [22, 25], для анализа речевых патологий [23], сетевого трафика [24]. Метод Херста можно использовать и для анализа временных рядов технических объектов [13].

Важно отметить, что метод нормированного размаха (другое название – R/S анализ) не ставит дополнительным условием для анализа соответствие совокупности измерений нормальному закону распределения, что для временных рядов параметров технических объектов практически никогда не выполняется [12].

Для большинства временных рядов на основе практики применения метода нормированного размаха определены следующие положения:

- ◆ зависимость между предыдущими и последующими значениями ряда медленно уменьшается;
- ◆ горизонт прогнозирования ограничен, его можно оценить, за пределами оценки горизонта прогнозирования прогноз становится недостоверным;
- ◆ с помощью определения показателя Хёрста временные ряды можно классифицировать на антиперсистентные, случайные и персистентные.

Эта классификация дает оценку «случайности» временного ряда [23, 26].

Если показатель Хёрста H находится в диапазоне от 0,5 до 1,0, то анализируемый временной ряд является персистентным, а его тренд характеризуется как стабильно возрастающий, если он начал возрастать или стабильно убывающий, если убывает в настоящий момент. Трендоустойчивость ряда повышается при стремлении показателя Хёрста к 1. В случае персистентного ряда возможности прогнозирования возрастают.

Обратное движение показателя и его приближение к значению 0,5 характеризует временной ряд как стремящийся к стохастичному ряду. При $H=0,5$ ряд характеризуется случайной динамикой.

Если H находится в диапазоне от 0 до 0,5, то рассматриваемый временной ряд является антиперсистентным. При этом, если значения ряда растут в каком-либо диапазоне времени, то на следующем интервале нужно ожидать снижение значений и наоборот. Приближение показателя к нулю означает, что этот колебательный процесс будет устойчивее. В этом случае имеет место тенденция повторяемости процессов изменения ряда во времени, то есть, можно говорить о наблюдаемом процессе, как обладающем признаками фрактальности. Прогнозирование в этом случае также возможно, однако, достоверность и удовлетворительная погрешность прогноза зависит от точности определения временных параметров циклов спада и возрастания параметра технического объекта.

Хёрстом было определено экспериментальное соотношение для нормированного размаха, которое характерно для многих временных рядов [12, 23, 26]:

$$R / S = (a \cdot \tau)^H, \quad (1)$$

где a – некоторая константа, обычно принимается равной 0.5 [23], τ – текущее значение длины выборки, H – показатель Хёрста, R/S – нормированный размах.

Величина R (размах) равна разности между максимальным и минимальным накопленными отклонениями в рамках текущей выборки длины τ :

$$R(\tau) = \max_t X(t, \tau) - \min_t X(t, \tau), \quad t = \overline{1, \tau}$$

где $\tau = \overline{3, T}$; T – длина всей выборки.

Накопленное отклонение значений величины $x(t)$ от ее среднего значения $\bar{x}(\tau)$ за время t определяется согласно выражению:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - \bar{x}(\tau)),$$

где $\bar{x}(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{\tau} x(i)$.

Стандартное отклонение данных $S(\tau)$ предназначено для сравнения различных типов временных рядов и рассчитывается по следующей формуле:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{\tau} (x(i) - \bar{x}(\tau))^2}.$$

Из соотношения (1) следует:

$$H(\tau) = \frac{\log(R/S)}{\log(a \cdot \tau)}. \quad (2)$$

Далее строится график зависимости значения $\log(R/S)$ от $\log(a\tau)$. Полученные точки аппроксимируются, например, с помощью метода наименьших квадратов. Оценка показателя Хёрста H реализуется с помощью определения угла наклона полученной прямой.

Оценка поведения временного ряда параметра с использованием показателя Хёрста. Проведем оценку возможности прогнозирования для временных рядов параметров технического объекта методом нормированного размаха. В качестве исходных данных использовались данные, снимаемые с акселерометра, установленного на автомобиле. Зависимость ускорения от времени представляет собой быстроизменяющуюся знакопеременную функцию с существенным разбросом значений. Рассматривались значения проекций ускорения на оси X, Y, Z, снятые для различных с точки зрения опасности участков движения. Значения параметра рассматривались без предварительной обработки.

На рис. 1 представлена зависимость ускорения по оси X от времени. График характеризует резкие изменения ускорения на большей части рассматриваемого участка временной оси [30].

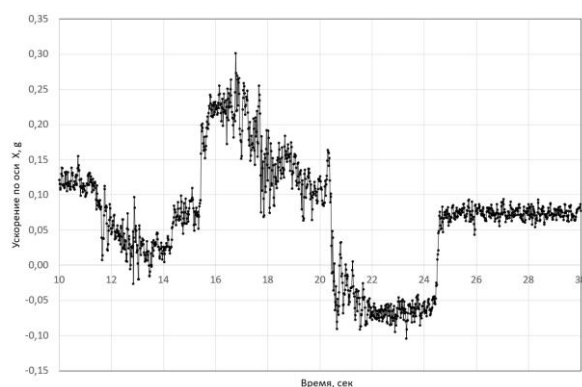


Рис. 1. Зависимость ускорения по оси X от времени

Тем не менее, зависимость значения $\log(R/S)$ от $\log(a\tau)$ носит монотонно возрастающий характер, без изломов (рис. 2). Показатель Хёрста $H=0,83598$, что означает высокую персистентность (трендоустойчивость) данного временного ряда и, соответственно, потенциальную возможность получения достоверных прогнозных оценок параметра на основе его тренда. Кроме того, результат анализа показывает не случайный характер изменения данного параметра или, по крайней мере, незначительное влияние случайной составляющей на итоговый результат.

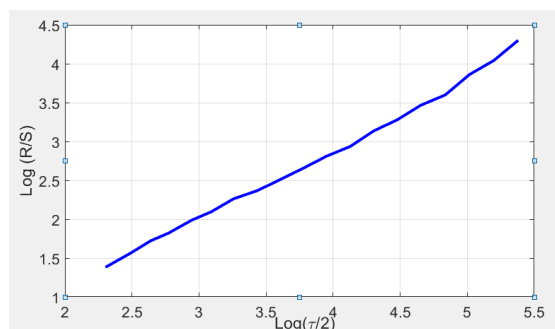


Рис. 2. Результаты R/S анализа для ускорения по оси X от времени

Полученные выводы о высокой персистентности временного ряда параметра подтверждаются результатами прогнозирования на временном интервале [8...9] секунд графика зависимости ускорения по оси X от времени (рис. 1), которые бы-

ли представлены в работе [30]. Для прогнозирования использовалась модель сглаживающего временного ряда первой степени, который обладает низкой сложностью и хорошими адаптивными свойствами, α – постоянная сглаживания ряда.

Максимальные значения погрешности прогнозирования для наиболее успешного варианта ($\alpha = 0,55$) составили величины $15 \div 18 \%$, результаты были получены без предварительной обработки подученных от датчика данных.

С точки зрения физики движения, составляющая ускорения по оси X определяется особенностями движения автомобиля в горизонтальной плоскости и, в значительной степени, стабильностью работы двигателя и работы трансмиссии. Случайные изменения ускорения, которые можно связать с неровностями дорожного полотна, в результирующей составляющей ускорения по оси X представлены слабо. Однако, если рассматривать поперечную составляющую ускорения, то есть по оси Y системы декартовых координат, то случайная составляющая в данном случае играет большую роль по сравнению с ранее рассмотренным случаем, на что указывают результаты R/S анализа (рис. 3).

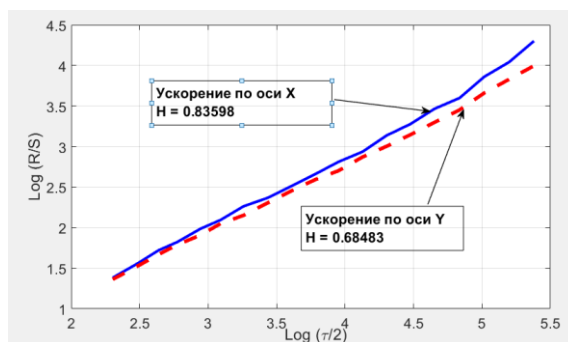


Рис. 3. Результаты R/S анализа для ускорения по оси X и Y от времени

Показатель Хёрста в этом случае $H=0,68483$. Величина показателя значительно меньше, чем в предыдущем случае, но тем не менее ряд характеризует как персистентный и прогнозная оценка может быть реализована с использованием уже отработанных алгоритмов [30].

Для этого ряда максимальные значения погрешности прогнозирования составили величины $24 \div 28 \%$ (рис. 4 и 5), результаты также, как и в предыдущем случае, были получены без предварительной обработки подученных от датчика данных.

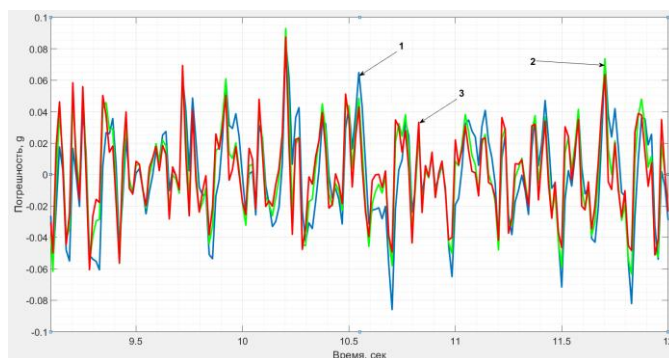


Рис. 4. Погрешности прогнозирования ускорения по оси Y при различных значениях α : график 1 – погрешность при $\alpha = 0,15$; график 2 – при $\alpha=0,35$; график 3 – при $\alpha=0,55$

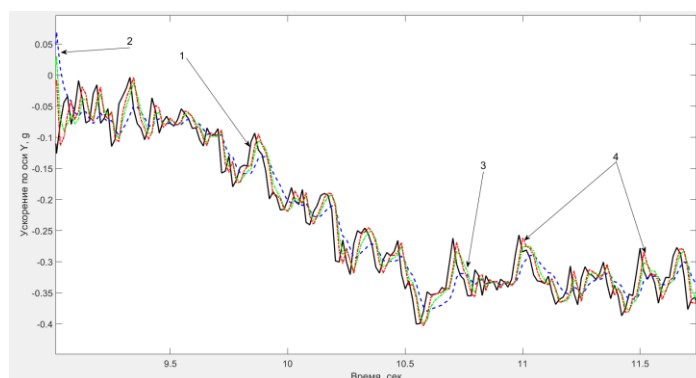


Рис. 5. Результаты прогнозирования ускорения по оси Y при различных значениях α : график 1 – экспериментальная зависимость ускорения от времени; график 2 – прогноз при $\alpha = 0,15$; график 3 – при $\alpha=0,35$; график 4 – при $\alpha=0,55$

Поэтому, при таких значениях показателя Хёрста рекомендуется перед реализацией прогнозной оценки ряда провести фильтрации шумовой составляющей, чтобы повысить эффективность прогнозирования.

Если же рассматривать вертикальную составляющую вектора ускорения автомобиля (проекция на ось Z , рис. 6), то показатель Хёрста в этом случае $H=0,63684$, что достаточно близко к критической величине $H=0,5$, характерной для стохастического ряда.

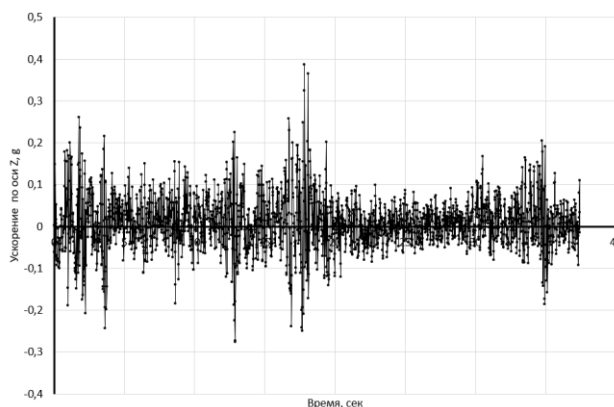


Рис. 6. Зависимость ускорения по оси Z от времени

В данном случае на результат прогнозирования сильное влияние будет оказывать случайная составляющая снимаемого сигнала. Экспериментальные точки расположились в основном равноудаленно относительно оси времени. При прямолинейном движении существенное изменение ускорения объекта в вертикальном направлении отсутствует, а наблюдаемые на рисунке всплески можно объяснить неровностями дороги. При прогнозировании кривая будет повторять поведение экспериментальной кривой с некоторым сдвигом. Погрешность, очевидно, будет еще значительнее, чем в предыдущих случаях.

Выводы. Анализ результатов моделирования показывает, что эффективность прогнозирования временного ряда стандартными методами может определяться с помощью метода нормированного размаха. На основе определения величины по-

казателя Хёрста ряды классифицируются на антиперсистентные, случайные и персистентные. Если ряд классифицирован как антиперсистентный, то он обладает ярко выраженными фрактальными свойствами, а если он персистентный, то его тренд обладает «исторической» памятью и для его прогнозирования можно использовать обычные методы временных рядов.

С помощью показателя Хёрста можно определить не только оценку отношения силы тренда к уровню шума, но и по величине показателя оценить необходимость выполнения процедур фильтрации шумовой составляющей сигнала.

Так для временного ряда ускорения объекта по оси X показатель Хёрста $H=0,83598$. Это достаточно высокий показатель, характеризующий ряд как персистентный, его тренд обладает устойчивостью и несмотря на сложную конфигурацию, максимальная погрешность прогнозирования ряда равна величинам порядка $15 \div 18 \%$, причем результаты были получены без предварительной обработки снимаемых с датчика данных.

С другой стороны, для временного ряда ускорения объекта по оси Y показатель ниже, чем для вышеупомянутого ряда и равен $H=0,68483$. Это означает, что, хотя ряд и является персистентным, составляющая шума в сигнале, поступающем с датчика значительно выше, тренд менее устойчив к воздействию шума, что подтверждается результатами прогнозирования. Для этого ряда максимальные значения погрешности прогнозирования составили величины $24 \div 28 \%$, что больше $15 \div 18\%$ для ряда с $H=0,83598$.

В случае предварительной подготовки ряда с использованием фильтрации шумов прогнозирование может быть выполнено с более высокой точностью.

Заключение. На основании обработки данных об ускорении технического объекта методом нормированного размаха можно сделать вывод о целесообразности применения показателя Хёрста при решении задач прогнозирования параметров технических объектов. Чем выше для рассматриваемого ряда показатель Хёрста из диапазона $(0,5 \div 1,0]$, тем более точным может быть прогноз значений параметра. При значениях показателя Хёрста, приближающихся к величине 0,5, требуется дополнительная обработка данных перед процедурой прогнозирования для снижения погрешности оценки значений ряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ярошенко И.В.* Математическая модель и метод классификации технического состояния высоковольтных мехатронных модулей // Инженерный вестник Дона. – 2014, – № 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2330.
2. *Клевцова А.Б.* Параметрическая зонная оценка состояния технического объекта с использованием режимной карты // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5 (106). – С. 107-111.
3. *Detlev W. Gross.* Partial Discharge Measurement and Monitoring on Rotating Machines // IEEE Int. Sym. On Elect. Insul, Boston MAUSA, April 7-10, 2002. – P. 33-41.
4. *Клевцова А.Б., Клевцов Г.С.* Модели параметрической экспресс-оценки состояния технического объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 11 (88). – С. 15-19.
5. *Klevtsov S.I.* Identification of the State of Technical Objects Based on Analyzing a Limited Set of Parameters // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 - Proceedings. 2016. – P. 749-752.
6. *Клевцов С.И., Клевцова А.Б., Буринов С.В.* Модель параметрической качественной иерархической оценки состояния технической системы // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3088.
7. *Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran.* A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference. – Wuhan, China, 2010. – P. 4912-4915.

8. *Клевцов С.И.* Прогнозирование изменений физической величины в реальном времени с использованием линейного адаптивного фильтра // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 180-185.
9. *Darkhovsky B., Brodsky B.* Asymptotically Optimal Methods of Early Change-point Detection // Sequential Analysis. – 2013. – No. 32. – P. 158-181.
10. *Matuszewski J.* Application of clustering methods for recognition of technical objects // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference. – 2010. – P. 39-40.
11. *George E.P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel.* Time series analysis : forecasting and control. – 4th ed. – A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2015. – 712 p.
12. *Федер Е.* Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
13. *Антипов О.И., Неганов В.А.* Применение метода нормированного размаха Хёрста к анализу стохастических временных рядов в импульсных стабилизаторах напряжения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 78-85.
14. *Peter J. Brockwell, Richard A. Davis.* ITSM: An Interactive Time Series Modelling Package for the PC. – Springer New York. 1991. – 105 p.
15. *Сидоров С.Г., Никологорская А.В.* Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 1-3.
16. *Vovk S.P., Giniş L.A.* Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems // European Researcher. – 2012. – Vol. (20), No. 5-1. – P. 541-545.
17. *Клевцов С.И.* Моделирование алгоритма краткосрочного прогнозирования изменения быстроменяющейся физической величины в реальном времени // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3 (21). – С. 199-205.
18. *Darkhovsky B., Piratinska A.* Novel Methodology for Segmentation of Time Series Generated by Different Mechanisms // Proceedings of International work-conference on Time Series (ITISE-2014). Iss. 1. Granada: Copicentro Granada S.L., 2014. – P. 273-285.
19. *Клевцов С.И.* Особенности выбора параметров настройки модели сглаживающего временного ряда для осуществления краткосрочного прогнозирования изменения физической величины // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 5 (118). – С. 133-138.
20. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
21. *Бриллинджер Д.Р.* Временные ряды. Обработка данных и теория: монография / под ред. А.Н. Колмогорова: пер. с англ. – М., 1980. – 536 с.
22. *Биченова Н.* Вычисление показателя Херста для динамики стоимости компании // Automated control systems. Transactions. Georgian Technical University. – 2015. – No. 1 (19).
23. *Кузенков Н.П., Логинов В.М.* Использование метода нормированного размаха при анализе речевых патологий неврологического генеза // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 5. – С. 775-791.
24. *Бельков Д.В., Едемская Е.Н., Незамова Л.В.* Статистический анализ сетевого трафика // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка". – 2011. – Вип. 13 (185). – С. 66-75.
25. *Кириченко Л., Чалая Л.* Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов // International Journal "Information Technologies & Knowledge". – 2014. – Vol. 8, No. 1. – P. 22-28.
26. *Калуш Ю.А., Логинов В.М.* Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. 5, № 4. – С. 29-37.
27. *James B. Bassingthwaight, Gary M. Raymond.* Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series // Ann Biomed Eng. – 1995. – Vol. 23 (4). – P. 491-505.
28. *Roel F. Ceballos, Fe F. LargoOn.* The Estimation of the Hurst Exponent Using Adjusted Rescaled Range Analysis, Detrended Fluctuation Analysis and Variance Time Plot: A Case of Exponential Distribution. // Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR). – 2017. – Vol. 3, Issue 8. – P. 424-434.
29. *Cervantes-De la Torre F., Gonz'alez-Trejo J.I., Real-Ramirez C.A., Hoyos-Reyes L.F.* Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – No. 475. – P. 1-10.
30. *Клевцов С.И.* Использование моделей временных рядов для краткосрочного прогнозирования в микроконтроллере изменений параметров объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 194-201

REFERENCES

1. Yaroshenko I.V. Matematicheskaya model' i metod klassifikatsii tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh mekhatronnykh moduley [Mathematical model and method of classification of technical condition of high-voltage mechatronic modules], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2330.
2. Klevtsova A.B. Parametricheskaya zonnaya otsenka sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta s ispol'zovaniem rezhimnoy karty [Parametric conditioning assessment of the condition of a technical object with the use of a modal map], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 5 (106), pp. 107-111.
3. Detlev W. Gross. Partial Discharge Measurement and Monitoring on Rotating Machines, *IEEE Int. Sym. On Elect. Insul, Boston MAUSA, April 7-10, 2002*, pp. 33-41.
4. Klevtsova A.B., Klevtsov G.S. Modeli parametricheskoy ekspress-otsenki sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta [Models of parametric Express assessment of the state of a technical object], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 11 (88), pp. 15-19.
5. Klevtsov S.I. Identification of the State of Technical Objects Based on Analyzing a Limited Set of Parameters, *2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 - Proceedings. 2016*, pp. 749-752.
6. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B., Burinov S.V. Model' parametricheskoy kachestvennoy ierarkhicheskoy otsenki sostoyaniya tekhnicheskoy sistemy [A parametric hierarchical model for quality assessment technical systems], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2015, No. 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3088.
7. Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran. A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process, *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference*. Wuhan, China, 2010, pp. 4912-4915.
8. Klevtsov S.I. Prognozirovaniye izmeneniy fizicheskoy velichiny v real'nom vremeni s ispol'zovaniem lineynogo adaptivnogo fil'tra [The prediction of changes of physical quantities in real time using a linear adaptive filter], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 180-185.
9. Darkhovskiy B., Brodskiy B. Asymptotically Optimal Methods of Early Change-point Detection, *Sequential Analysis*, 2013, No. 32, pp. 158-181.
10. Matuszewski J. Application of clustering methods for recognition of technical objects, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference*, 2010, pp. 39-40.
11. George E.P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel. Time series analysis: forecasting and control. 4th ed. – A JOHN WILEY & SONS, INC., Publication, 2015, 712 p.
12. Feder E. Fraktaly [Fractals]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1991, 254 p.
13. Antipov O.I., Neganov V.A. Primeneniye metoda normirovannogo razmakha KHersta k analizu stokhasticheskikh vremennykh ryadov v impul'snykh stabilizatorakh napryazheniya [Application of the Hirst normalized range method to the analysis of stochastic time series in pulse voltage stabilizers], *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2009, Vol. 12, No. 3, pp. 78-85.
14. Peter J. Brockwell, Richard A. Davis. ITSM: An Interactive Time Series Modelling Package for the PC. Springer New York. 1991, 105 p.
15. Sidorov S.G., Nikologorskaya A.V. Analiz vremennykh ryadov kak metod postroeniya prognoza potrebleniya elektroenergii [Time series analysis as a method of forecasting electricity consumption], *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2010, Issue 3, pp. 1-3.
16. Vovk S.P., Gini L.A. Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems, *European Researcher*, 2012, Vol. (20), No. 5-1, pp. 541-545.
17. Klevtsov S.I. Modelirovaniye algoritma kratkosrochnogo prognozirovaniya izmeneniya bystromenyayushchey fizicheskoy velichiny v real'nom vremeni [Modeling of algorithm of short-term forecasting of change of rapidly changing physical quantity in real time], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 3 (21), pp. 199-205.
18. Darkhovskiy B., Piratinska A. Novel Methodology for Segmentation of Time Series Generated by Different Mechanisms, *Proceedings of International work-conference on Time Series (ITISE-2014). Iss. 1. Granada: Copicentro Granada S.L., 2014*, pp. 273-285.

19. *Klevtsov S.I.* Osobennosti vybora parametrov nastroyki modeli sglazhivayushchego vremennogo ryada dlya osushchestvleniya kratkosrochnogo prognozirovaniya izmeneniya fizicheskoy velichiny [Features choice of model settings smoothing time series for the implementation of short-term forecasting of physical size], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 133-138.
20. *Lukashin Yu.P.* Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov [Adaptive methods of short-term time series forecasting]. Moscow: Finansy i statistika, 2003, 416 p.
21. *Brillindzher D.R.* Vremennyye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya: monografiya [Time series. Data processing and theory: monograph], ed. by A.N. Kolmogorova: transl. from engl. Moscow, 1980, 536 p.
22. *Bichenova N.* Vychislenie pokazatelya KHersta dlya dinamiki stoimosti kompanii [Calculation of Hurst index for the dynamics of the company's value], *Automated control systems. Transactions. Georgian Technical University*, 2015, No. 1 (19).
23. *Kuzenkov N.P., Loginov V.M.* Ispol'zovanie metoda normirovannogo razmakha pri analize rechevykh patologiy nevrologicheskogo geneza [The use of the normalized scope method in the analysis of speech pathologies of neurological Genesis], *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer studies and modeling], 2014, Vol. 6, No. 5, pp. 775-791.
24. *Bel'kov D.V., Edemskaya E.N., Nezamova L.V.* Statisticheskii analiz setevogo trafika [Statistical analysis of network traffic], *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya "Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika"* [Scientific works of DonNTU. Series "Informatics, Cybernetics and computer engineering"], 2011, Issue 13 (185), pp. 66-75.
25. *Kirichenko L., Chalaya L.* Kompleksnyy podkhod k issledovaniyu fraktal'nykh vremennykh ryadov [An integrated approach to the study of fractal time series], *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 2014, Vol. 8, No. 1, pp. 22-28.
26. *Kalush Yu.A., Loginov V.M.* Pokazatel' Khersta i ego skrytye svoystva [Hurst exponent and its hidden properties], *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki* [Siberian journal of industrial mathematics], 2002, Vol. 5, No. 4, pp. 29-37.
27. *James B. Bassingthwaighe, Gary M. Raymond.* Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series, *Ann Biomed Eng.*, 1995, Vol. 23 (4), pp. 491-505.
28. *Roel F. Ceballos, Fe F. LargoOn.* The Estimation of the Hurst Exponent Using Adjusted Rescaled Range Analysis, Detrended Fluctuation Analysis and Variance Time Plot: A Case of Exponential Distribution, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2017, Vol. 3, Issue 8, pp. 424-434.
29. *Cervantes-De la Torre F., Gonz'alez-Trejo J.I., Real-Ramirez C.A., Hoyos-Reyes L.F.* Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, No. 475, pp. 1-10.
30. *Klevtsov S.I.* Ispol'zovanie modeley vremennykh ryadov dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya v mikrokontrollere izmeneniya parametrov ob'ekta [The use of time series models for short-term forecasting in the microcontroller of changes in the parameters of the object], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 194-201.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.