

Раздел I. Искусственный интеллект и нечеткие системы

УДК 681.3.05

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-6-15

С.И. Клевцов

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Основной задачей системы мониторинга технического объекта является слежение за значениями его параметров в текущий момент времени и предсказание возможных изменений параметров на заданный временной промежуток. Оценка изменений параметра на промежуток времени, на который рассчитывается прогноз, базируется на обработке ранее полученных данных. Горизонт и точность прогнозирования зависят от качества временных рядов данных, которые используются для расчетов. От характера рядов данных также зависит выбор конкретной модели прогнозирования, необходимость и выбор метода их предварительной обработки. Чем более неустойчив тренд временного ряда параметра, тем меньше возможностей для оценки значений параметра за пределами текущего временного отсчета. Трендоустойчивость ряда определяется с помощью метода нормированного размаха. Результатом использования метода является оценка характера временного ряда в целом. Однако, большинство методов прогнозирования временных рядов использует ограниченный участок ряда, непосредственно примыкающий к временной точке начала процесса прогнозирования. И характер этого участка влияет на точность прогноза. Если этот участок ряда можно определить как персистентный, то прогноз возможен. Для анализа значений параметра, принадлежащих небольшому участку ряда, метод нормированного размаха не подходит, поскольку требует для реализации выборку данных большого объема. В этом случае можно использовать индекс фрактальности, который позволяет проводить локальный анализ. В данной работе представлена схема поэтапного фрактального анализа данных временного ряда параметра технического объекта. На первом этапе проводится предварительный анализ с использованием метода нормированного размаха. Определяется характер ряда в целом. Если ряд персистентный, то на следующем этапе выполняется локальный фрактальный анализ ограниченного участка ряда значений параметра. Оценивается возможность использования этого участка ряда для реализации задачи прогнозирования. Локальный фрактальный анализ можно проводить участка, ограниченного фиксированным временным окном, которое перемещается на каждом шаге прогнозирования, следуя за этим процессом. Подобная схема поддержки прогнозирования позволяет повысить точность и достоверность прогноза.

Локальный фрактальный анализ; прогнозирование; персистентность; индекс фрактальности; метод нормированного размаха; временной ряд.

S.I. Klevtsov

FRactal ANALYSIS OF TECHNICAL PARAMETERS FOR FORECASTING TASKS

The main objective of the monitoring system of a technical object is to monitor the values of its parameters at the current time and to predict possible changes in parameters for a given time period. The assessment of parameter changes for the period of time for which the forecast is calculated is based on the processing of previously obtained data. The horizon and forecasting accuracy depend on the quality of the time series of data used for the calculations. The nature of the data series also determines the choice of a specific forecasting model, the need and the choice of the

method of their preliminary processing. The more unstable the trend of the parameter's time series, the less possibilities there are for estimating the parameter values outside the current time frame. Trend resistance of a series is determined using the normalized range method. The result of using the method is to assess the nature of the time series as a whole. However, most methods of forecasting time series use a limited part of the series directly adjacent to the time point of the beginning of the forecasting process. And the nature of this section affects the accuracy of the forecast. If this part of the series can be defined as persistent, then a forecast is possible. To analyze the parameter values belonging to a small part of the series, the normalized span method is not suitable, since it requires a large amount of data to be sampled. In this case, you can use the fractality index, which allows local analysis. This paper presents a phased fractal analysis of the time series data of a technical object parameter. At the first stage, a preliminary analysis is carried out using the normalized scale method. The nature of the series as a whole is determined. If the series is persistent, then the next step is the local fractal analysis of a limited area of a series of parameter values. The possibility of using this section of the series for the implementation of the forecasting problem is estimated. A local fractal analysis can be performed on a site limited by a fixed time window that moves at each forecasting step following this process. A similar forecasting support scheme can improve the accuracy and reliability of the forecast.

Local fractal analysis; forecasting; persistence; fractality index; normalized range method; time series.

Введение. В системах мониторинга оценки значений параметров определяют текущую и прогнозную работоспособность контролируемого технического объекта. Определяется принадлежность полученных значения параметров допустимой зоне их изменения. Выход параметра за пределы допустимой зоны может привести к выходу технического объекта из строя и развитию аварийной ситуации. Чтобы не допустить развития негативного сценария, необходимо контролировать параметры в процессе работы и прогнозировать их значения [1–3]. На этом основании принимаются решения о корректировке режимов работы объекта в процессе управления. Для предупреждения аварийных ситуаций важно иметь достоверный прогноз изменения параметров объекта. Достоверный прогноз возможен, если поведение параметра определяется предысторией, то есть данными, которые к текущему моменту известны [1, 4–6]. Тренд для временного ряда параметра должен быть монотонным на период прогноза [4].

Постановка задачи. Оценка стабильности тренда временного ряда параметра, анализ возможного его поведения может определяться с помощью метода нормированного размаха [7–10]. Определение показателя Хёрста для временных рядов позволяет их классифицировать на антиперсистентные, случайные и персистентные [10, 11]. Ряд обладает ярко выраженными фрактальными свойствами, если он антиперсистентный. Если же ряд персистентный, то его тренд обладает памятью и для его прогнозирования можно использовать обычные методы временных рядов [12, 13].

Однако, у метода есть ограничения [14, 15]. Показатель Херста определяет в целом характер временного ряда. Кроме того, для его расчета нужна выборка большого размера [16, 17]. С помощью показателя Херста можно определить точки изменения динамики временного ряда параметра, однако, с учетом необходимого объема выборки, неизменный характер ряда должен прослеживаться на сотни и тысячи значений параметра [16, 18, 19]. Но временной ряд параметра может быть неоднородным. У ряда есть участки возрастания и убывания тренда. А есть участки, где поведение ряда можно характеризовать как фрактальное. В этом случае нецелесообразно использовать методы прогнозирования временных рядов, поскольку вероятность получить неправильный результат значительно возрастает.

Для проведения локального фрактального анализа временного ряда можно использовать метод минимального покрытия [20, 21]. С помощью индекса фрактальности, вычисляемого в рамках метода минимального покрытия, можно клас-

сифицировать отдельные участки временного ряда. Для его вычисления достаточно выборки небольшого размера [22, 23]. Предварительная оценка характера поведения участка временного ряда позволит получить достоверный результат при прогнозировании.

Однако, метод минимального покрытия показал свою эффективность при проведении анализа финансовых временных рядов [20–25]. Временные ряды технических параметров отличаются по поведению от финансовых временных рядов. Поэтому необходимо провести исследование возможности оценки характера временного ряда параметра технического объекта с помощью индекса фрактальности, определить ограничения применения и схему реализации процесса.

Расчет индекса фрактальности. Для задач прогнозирования временного ряда параметра технического объекта будем использовать способ вычисления индекса фрактальности, который базируется на расчете величины размерности минимального покрытия графика изменения параметра во времени [20–22].

Пусть функция $y(t)$ определяет временной ряд параметра технического объекта на отрезке $[a, b]$. Отрезок $[a, b]$ разобьем на m равных временных интервалов длиной $\delta_m = (b - a) / m$. Минимальная площадь покрытия графика функции $y(t)$ на временном интервале $[t_i, t_{i+1}] = \delta_m$ будет равна площади прямоугольника с основанием δ_m и высотой $A_i(\delta)$. Величина $A_i(\delta)$ равна разности между максимальным и минимальным значениями функции $y(t)$ на временном интервале $[t_i, t_{i+1}] = \delta_m$. Минимальная площадь покрытия графика функции $y(t)$ на временном интервале $[a, b]$ равна сумме минимальных площадей покрытия графика функции $y(t)$ на каждом временном интервале $[t_i, t_{i+1}] \in [a, b]$.

Полная площадь минимального покрытия функции равна [20, 22]:

$$S_m(\delta) = V_m(\delta) \cdot \delta_m, \quad V(\delta) = \sum_{i=1}^m A_i(\delta), \quad (1)$$

где $V_m(\delta)$ – сумма разностей $A_i(\delta)$ между максимальным и минимальным значениями функции $y(t)$ на каждом временном интервале $[t_i, t_{i+1}] \in [a, b]$. Весь временной промежуток разбит на интервалы длиной δ_m .

Поскольку величина $V_m(\delta)$ зависит от выбора значения δ_m , то чем меньше δ_m , тем точнее будет вычислена $V_m(\delta)$.

Известно [21, 25], что величина $V_m(\delta)$ при изменении δ_m меняется по закону:

$$V(\delta) \approx \delta^{-mi}, \quad (2)$$

если $\delta \rightarrow 0$, где mi – индекс фрактальности.

Выражение (2) можно преобразовать к более удобному виду, если взять натуральный логарифм от обеих его частей:

$$\ln V(\delta) = -mi \cdot \ln \delta. \quad (3)$$

Индекс фрактальности можно определить с помощью выражения (3). Для каждого δ_m необходимо вычислить соответствующее ему значение $V_m(\delta)$ из выражения (1) для всех $m \in \{m_1, m_2, \dots, m_k\}, k = 1, K$. На основе полученных

данных строится график зависимости $V(\delta)$ от δ в двойных логарифмических координатах. Индекс фрактальности равен тангенсу угла наклона прямой к оси X, параметры которой определяются с помощью метода наименьших квадратов на основе массива точек $\{\ln(\delta_m); \ln(V_m(\delta))\}$.

Локальный фрактальный анализ участка временного ряда параметра заключается в расчете его индекса фрактальности и последующей оценке попадания значения индекса в ту или иную зону его изменения, которые определяют характер ряда. Если индекс фрактальности лежит в диапазоне $(0 \leq mi < 0,5)$, то участок временного ряда содержит тренд и может быть использован для прогнозирования, Если же индекс фрактальности лежит в диапазоне $(0,5 < mi \leq 1)$, то участок временного ряда обладает фрактальными свойствами. Участок временного ряда является шумом при значении индекса фрактальности $mi = 0,5$.

Схема и результаты оценки поведения участка временного ряда параметра. Анализ временного ряда параметра технического объекта для поддержки задачи прогнозирования предлагается проводить в два этапа.

На первом этапе важно определить, имеет ли временной ряд параметра в целом трендовую составляющую. Такой анализ доступен и осуществляется с использованием метода нормированного размаха. Показатель Херста в этом случае должен быть в диапазоне $[0,5; 1,0]$. Ряд в этом случае является персистентным и возможен более детальный его анализ. В противном случае ряд обладает ярко выраженными фрактальными свойствами. Прогнозирование такого ряда обычными методами временных рядов может привести к недостоверным результатам.

На втором этапе предлагается перед прогнозированием параметра проводить локальный фрактальный анализ данных, которые будут использованы в качестве базы метода прогнозирования временных рядов [20, 23, 24]. Для анализа используется метод минимального покрытия с вычислением индекса фрактальности. Особенностью метода является возможность работы с небольшими выборками данных [20]. Для анализа выделим небольшое временное окно, которое включает в себя фиксированное количество значений параметра, в том числе текущий отсчет, и перемещается вдоль временной оси. На каждом шаге перемещения окна рассчитывается индекс фрактальности. Если его величина находится в диапазоне $[0; 0,5]$, то участок ряда в пределах временного окна характеризуется устойчивым трендом. Таким образом, оценка и последующее прогнозирование могут осуществляться в реальном времени.

В качестве временных рядов параметров технического объекта рассматривались данные, снимаемые с датчиков ускорения и угловой скорости автомобиля [1, 4]. Пример изменения контролируемых физических величин представлен на рис. 1.

В соответствии с предложенной схемой представленные ряды были проанализированы с помощью метода нормированного размаха. Для каждого ряда рассчитан показатель Херста, характеризующий принадлежность ряда к персистентным или антиперсистентным рядам. Все рассмотренные ряды признаны персистентными, однако показатель Херста значительно отличается в зависимости от ряда. Например, для рядов таких параметров, как угловая скорость по оси Y и Z, ускорение по оси X и Y, показатель Херста достаточно высокий, от 0,79 до 0,98, а для угловой скорости по оси X и ускорению по оси Z от 0,60 до 0,66 (рис. 2).

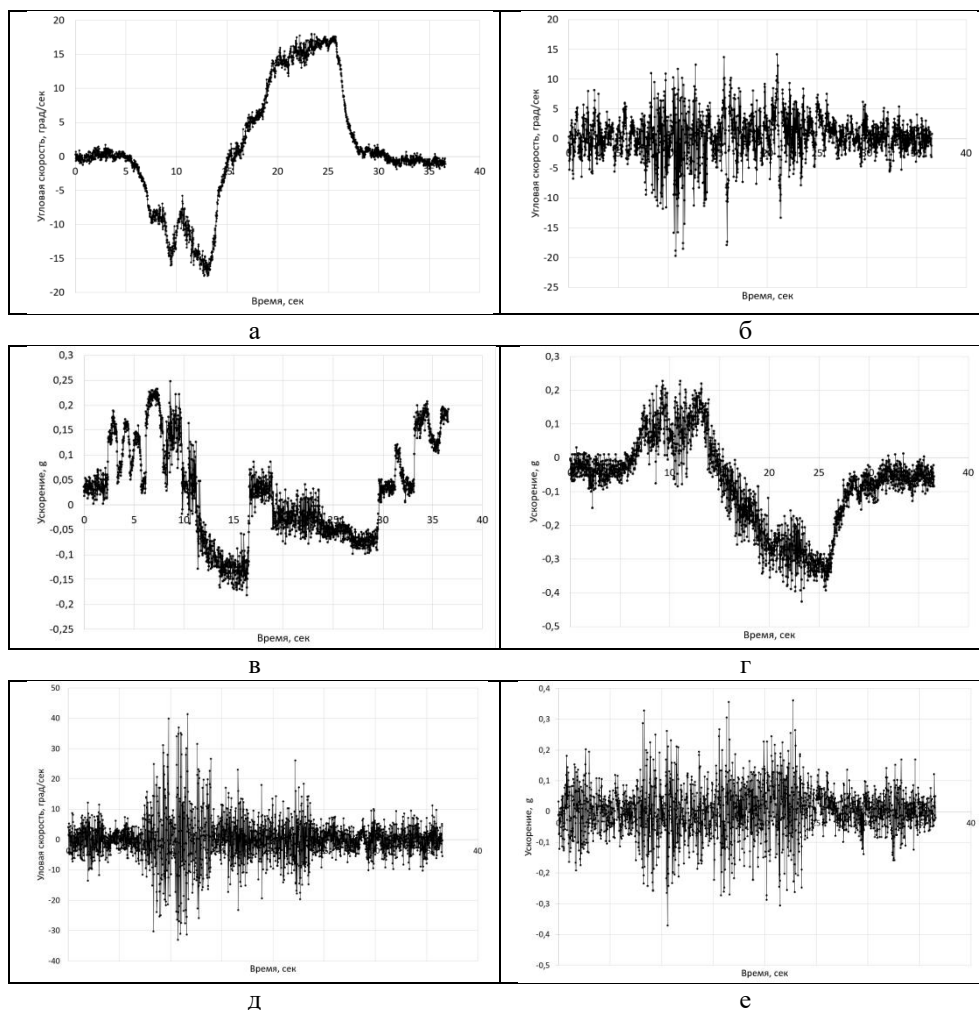


Рис. 1. Изменение параметров движения автомобиля: а – график изменения угловой скорости по оси Z; б – график изменения угловой скорости по оси Y; в – график изменения ускорения по оси X; г – график изменения ускорения по оси Y; д – график изменения угловой скорости по оси X; е – график изменения ускорения по оси Z

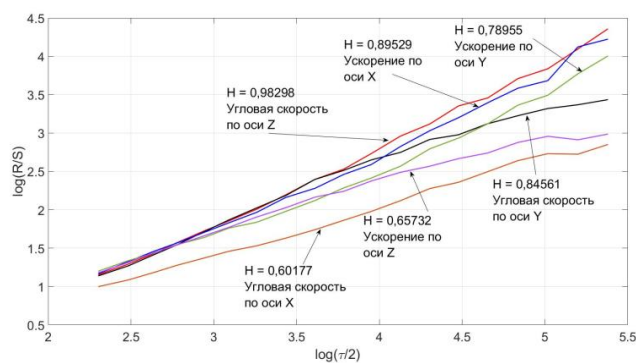


Рис. 2. Показатель Херста для различных параметров движения автомобиля

Достаточно низкое значение показателя Херста для двух последних параметров может указывать на значительную случайную составляющую в составе их временных рядов. Тем не менее, в целом все рассматриваемые ряды имеют тренд и присутствует возможность их прогнозирования на основе предыдущих значений.

Однако, оценка в целом ряда как персистентного, не гарантирует, что участок ряда, ограниченный временным окном, не будет локально антиперсистентным или случайным рядом.

Рассмотрим характер участков временного ряда, состоящего из значений ускорения по оси X. На участках временной оси (в секундах) [12; 17], [2; 10], [19; 24], [16,7; 19], [29,4; 33,2] значения индекса фрактальности равны $mi = 0,8886$; $mi = 0,4487$; $mi = 0,7462$; $mi = 0,6251$ и $mi = 0,3956$ (рис. 3).

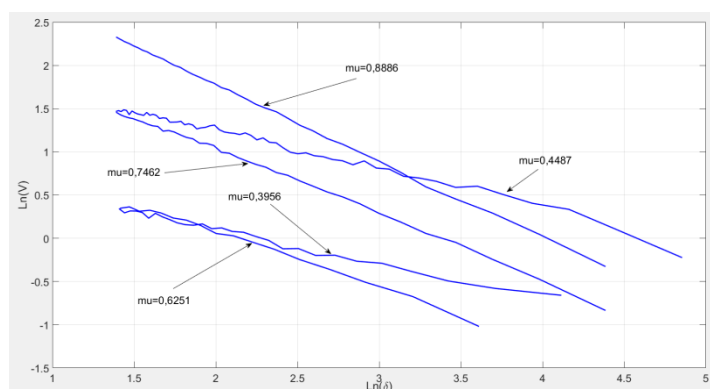


Рис. 3. Расчет индекса фрактальности для временного ряда значений ускорения по оси X

Анализ участков ряда, где значение индекса фрактальности выше границы $mi = 0,5$ показывает, что эти участки характеризуются высокой нестабильностью. Значения ряда в указанных временных диапазонах меняются подобно колебательным движениям относительно дрейфующего во времени среднего значения. Эти повторяющиеся колебательные движения в значительной степени подобны друг другу, поэтому расчет индекса фрактальности характеризует эти участки ряда как обладающие фрактальными свойствами (рис. 4).

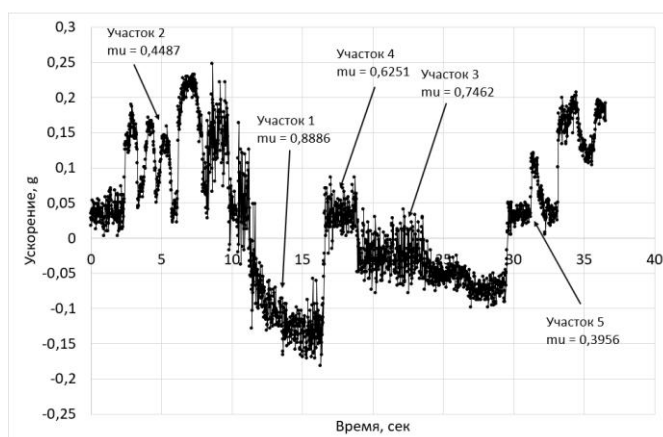


Рис. 4. Индекс фрактальности для различных участков временного ряда значений ускорения по оси X

Там, где индекс фрактальности ниже $m_H = 0,5$, можно фиксировать заметные по времени зоны роста или падения значений параметра. Эти участки ряда имеют устойчивый тренд в рамках отдельных временных зон, что позволяет проводить прогнозирование параметра.

Заключение. Результаты работы показывают, что использование индекса фрактальности позволяет провести анализ отдельных, достаточно ограниченных по времени и объему выборки участков временного ряда. При его использовании можно выявить участки ряда, которые нельзя использовать для прогнозирования и временные интервалы, где прогнозирование нецелесообразно.

Чем меньше индекс фрактальности, тем слабее размах колебаний параметра на этом временном участке относительно тренда и потенциально выше точность прогноза изменения параметра.

На временных участках, где индекс фрактальности характеризует ряд как обладающий свойствами фрактальности, фактически наблюдается колебательное изменение значений ряда. Для использования значений ряда в указанных зонах нестабильности в качестве базы для прогнозирования необходимо провести предварительную специальную подготовку данных.

Применение представленного способа анализа временного ряда может повысить точность и достоверность прогноза изменения параметра и тем самым улучшить качество мониторинга работоспособности технического объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Klevtsov S.* 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.
2. *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.
3. *Клевицова А.Б., Клевицов Г.С.* Модели параметрической экспресс-оценки состояния технического объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 11 (88). – С. 15-19.
4. *Клевицов С.И.* Использование моделей временных рядов для краткосрочного прогнозирования в микроконтроллере изменений параметров объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 194-201.
5. *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.
6. *Darkhovsky B., Brodsky B.* Asymptotically Optimal Methods of Early Change-point Detection // Sequential Analysis. – 2013. – No. 32. – P. 158-181.
7. *Федер Е.* Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
8. *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.
9. *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.
10. *Roel F. Ceballos, Fe F. Largo On.* 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.
11. *F. Cervantes-de la Torre, Jesús Isidro González-Trejo, Cesar Augusto Real-Ramirez, Luis F. Hoyos-Reyes.* Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – No. 475. – P. 1-10.
12. *Klevtsov S.* Using the Method of Normalized Amplitude for Assessing the Quality of the Calibration Tests of the Pressure Sensor // 2019 Ural Symposium on Bio-medical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – Yekaterinburg, Russia, 2019. – P. 197-199.

13. *Box 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.
14. *Кириченко Л., Чалая Л.* Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов // International Journal "Information Technologies & Knowledge". – 2014. – Vol. 8, No. 1. – P. 22-28.
15. *Калуш Ю.А., Логинов В.М.* Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сиб. журн. индустр. матем. – 2002. – Т. 5, № 4. – С. 29-37.
16. *Биченова Н.* Вычисление показателя Херста для динамики стоимости компании // Automated Control Systems. Transactions. Georgian Technical University. – 2015. – No. 1 (19).
17. *Кузнецов 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.
18. *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.
19. *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.
20. *Дубовиков М.М., Крянев А.В., Старченко Н.В.* Размерность минимального покрытия и локальный анализ фрактальных временных рядов // Вестник РУДН. – 2004. – Т. 3, № 1. – С. 81-95.
21. *Старченко Н.В.* Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов с помощью индекса фрактальности: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2005.
22. *Васильев В.В.* Вычисление индекса фрактальности временного ряда // Вестник ТГУ. – 2011. – Т. 16. – Вып. 4. – С.1047-1049.
23. *Белолитцев И.И., Фархиева С.А.* Предсказание финансовых временных рядов на основе индекса фрактальности // Мир науки. – 2014. – № 3. – С. 1-12.
24. *Владимирова Д.Б.* Индекс фрактальности в исследованиях детерминированности дискретных временных рядов // Science and Business: Development Ways. – 2015. – No. 8 (50). – P. 86-91.
25. *Dubovikov M.M., Starchenko N.V. and Dubovikov M.S.* Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2004. – Vol. 339, Issues 3-4. – P. 591-608.

REFERENCES

1. *Klevtsov S.* 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.
2. *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.
3. *Klevtsova A.B., Klevtsov G.S.* Modeli parametriceskoy ekspress-otsenki sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta [Parametric model of rapid assessment of the condition of a technical object], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 11 (88), pp. 15-19.
4. *Klevtsov S.I.* Ispol'zovanie modeley vremennykh ryadov dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya v mikrokontrollere izmeneniy parametrov ob"ekta [The use of time series models for short term forecasting in the microcontroller changes to the settings object], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 194-201.
5. *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.
6. *Darkhovsky B., Brodsky B.* Asymptotically Optimal Methods of Early Change-point Detection, Sequential Analysis, 2013, No. 32, pp. 158-181.
7. *Feder E.* Fraktaly [Fractals]: transl. from English. Moscow: Mir, 1991, 254 p.

8. Antipov O.I., Neganov V.A. Primenenie metoda normirovannogo razmakha KHersta k analizu stokhasticheskikh vremennykh ryadov v impul'snykh stabilizatorakh napryazheniya [Application of the Hurst normalized span 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.
9. 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.
10. Roel F. Ceballos, Fe F. Largo On. 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.
11. F. Cervantes-de la Torre, Jesús Isidro González-Trejo, Cesar Augusto Real-Ramirez, Luis F. Hoyos-Reyes. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, No. 475, pp. 1-10.
12. Klevtsov S. Using the Method of Normalized Amplitude for Assessing the Quality of the Calibration Tests of the Pressure Sensor, *2019 Ural Symposium on Bio-medical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, Russia, 2019, pp. 197-199.
13. Box 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.
14. 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.
15. Kalush Yu.A., Loginov V.M. Pokazatel' Khersta i ego skrytye svoystva [The Hurst exponent and its hidden properties], *Sib. zhurn. industr. matem.* [Journal of Applied and Industrial Mathematic], 2002, Vol. 5, No. 4, pp. 29-37.
16. Bichenova N. Vychislenie pokazatelya KHersta dlya dinamiki stoimosti kompanii [The calculation of the Hurst exponent for the dynamics of a company's value], *Automated Control Systems. Transactions. Georgian Technical University*, 2015, No. 1 (19).
17. 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 research and modeling], 2014, Vol. 6, No. 5, pp. 775-791.
18. Bel'kov D.V., Edemskaya E.N., Nezamova L.V. Statisticheskyy analiz setevogo trafika [Statistical analysis of network traffic], *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya "Informatika, kibernetika ta obchishlyval'na tekhnika"* [Naukovi pratsi DonNTU. Series "Informatics, Cybernetics and computer engineering"], 2011, Issue 13 (185), pp. 66-75.
19. 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.
20. Dubovikov M.M., Kryanev A.V., Starchenko N.V. Razmernost' minimal'nogo pokrytiya i lokal'nyy analiz fraktal'nykh vremennykh ryadov [The dimension of the minimal cover and local analysis of fractal time series], *Vestnik RUDN* [Bulletin of the peoples' friendship university of Russia], 2004, Vol. 3, No. 1, pp. 81-95.
21. Starchenko N.V. Indeks fraktal'nosti i lokal'nyy analiz khaoticheskikh vremennykh ryadov s pomoshch'yu indeksa fraktal'nosti: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Fractal index and local analysis of chaotic time series using fractal index: the author's abstract cand. of phys. and math. sc. diss.]. Moscow, 2005.
22. Vasil'ev V.V. Vychislenie indeksa fraktal'nosti vremennogo ryada [The calculation of the index of fractality in the time series], *Vestnik TGU* [Vestnik TSU], 2011, Vol. 16, Issue 4, pp. 1047-1049.
23. Beloliptsev I.I., Farkhiyeva S.A. Predskazanie finansovykh vremennykh ryadov na osnove indeksa fraktal'nosti [Prediction of financial time series based on fractal index], *Mir nauki* [World of science], 2014, No. 3, pp. 1-12.

24. Vladimirova D.B. Indeks fraktal'nosti v issledovaniyakh determinirovannosti diskretnykh vremennykh ryadov [The index of fractality in the study of a deterministic discrete time series], *Science and Business: Development Ways*, 2015, No. 8 (50), pp. 86-91.
25. Dubovikov M.M., Starchenko N.V. and Dubovikov M.S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2004, Vol. 339, Issues 3-4, pp. 591-608.

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 street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.178

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-15-26

Е.М. Герасименко

**НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО
ДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭВАКУАЦИИ
ЗДАНИЙ***

Данная статья посвящена решению важной задачи эвакуации зданий, а именно, эвакуации максимального количества пострадавших из опасных зон в безопасные в течение заданного временного интервала. Построенная модель эвакуируемого здания представлена транспортной сетью с динамической структурой, так как пропускные способности и параметры времени прохождения потока могут меняться во времени. Кроме того, вершины транспортной сети имеют веса, ограничивающие максимальное количество людей, которые могут находиться в данной вершине-помещении. Нечеткий и неопределенный характер параметров сети ведет к постановке задачи в нечетких условиях, что позволяет моделировать реальную ситуацию эвакуации, при которой пропускные способности дуг в различные временные отрезки точно не известны, а могут быть оценены приблизительно, в некотором интервале и пр. Это приводит к заданию пропускных способностей дуг в нечетком виде. Особенностью алгоритма также является возможность учитывать веса вершин транспортной сети; это реализуется путем замены вершины с пропускной способностью двумя вспомогательными вершинами, дуга между которыми имеет пропускную способность, равную исходной пропускной способности вершины. Решен численный пример, иллюстрирующий работу предложенного алгоритма. Результаты, полученные в ходе решения задачи эвакуации с помощью предложенного алгоритма, могут применяться на практике при решении задач эвакуации зданий в условиях, когда точно не известно количество эвакуируемых и нужно перевести максимально возможное число пострадавших в безопасные зоны, учитывая изменяющиеся во времени пропускные способности и ограничения на вместимость помещений.

Задачи эвакуации зданий; нечеткая транспортная сеть; моделирование эвакуации.

Е.М. Gerasimenko

**FUZZY MODEL FOR THE MAXIMUM DYNAMIC FLOW FINDING
FOR SOLVING THE TASK OF EVACUATION FROM BULDINGS**

This article is devoted to solving the important task of evacuation from building, particularly, evacuating the maximum number of victims from dangerous areas to safe ones within a given time interval. The constructed model of the evacuated building is represented by a transportation network with a dynamic structure, since the capacities and parameters of the flow time can vary in time. In addition, the

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00559 а).