

АНАЛИЗ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ПРИМЕРЕ ИНДЕКСА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА КОМПЬЮТЕРОВ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

А.А. Додонова

nasya.dodonova@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Ключевое место в данной статье занимает анализ и выбор оптимального метода прогнозирования временных рядов. Сложность прогнозирования такого рода данных в том, что зачастую они представляют собой отражение сложных хаотичных систем, на которые влияет огромное число различных факторов. Особое внимание в работе уделено важности применения новых, более точных методов прогнозирования, поскольку в условиях быстро изменяющейся среды организации требуется сократить время реагирования на возникающие изменения. Рассмотрен пример проведения фрактального анализа временного ряда индекса промышленного производства компьютеров, электронных и оптических изделий с целью оценки возможностей дальнейшего прогнозирования данного временного ряда.

Ключевые слова

Индекс промышленного производства, прогнозирование, временные ряды, фрактальный анализ, индекс фрактальности, самоподобие, регрессия, стохастические процессы.

Поступила в редакцию 28.03.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Количество создаваемой в мире информации с каждым годом удваивается. Практически любая деятельность начинается с запроса в Интернете, и если раньше людей волновало, каким образом найти информацию, то сейчас актуальными стали вопросы хранения данных и их анализа [1]. Данные не только позволяют получать знания о текущем положении дел, но и дают возможность заглянуть в будущее, что помогает наблюдать за состоянием различных систем и прогнозировать их поведение [2, 3]. Природа таких систем может носить самый разный характер — от организма человека до сложных экономических систем.

Если раньше прогнозы имели сценарный характер, обращаясь к рассуждениям «если — то что», то сейчас существует масса математических методов, которые могут выдать точный результат. Особенно это актуально для сложных систем, поведение которых трудно предсказать на основе рассуждений, поскольку на системы такого рода обычно влияет не один, а целая совокупность факторов, определить которые одним показателем проблематично.

Цель работы — изучение фрактального анализа и выбор оптимального метода для прогнозирования временных рядов на примере индекса промышленного производства компьютеров, электронных и оптических изделий.

Анализ моделей прогнозирования временных рядов. Понятие «прогнозирование» сводится к исследованию конкретных перспектив развития изучаемого объекта, т. е. чаще всего имеется в виду, что объектом исследования служит временной ряд значений того или иного показателя.

Временной ряд — это ряд последовательно расположенных во времени числовых значений, которые характеризуют уровень состояния и изменения явления или процесса.

Выделяют четыре основные группы моделей прогнозирования на основе временных рядов: 1) регрессионные модели; 2) авторегрессионные модели; 3) модели экспоненциального сглаживания; 4) прочие модели.

Регрессионный анализ — это инструмент для оценки отношений между переменными, иными словами, данный анализ сводится к поиску такой функции, которая описывает зависимость между исходной переменной и множеством внешних факторов (регрессов). Данная модель является достаточно простой и гибкой в использовании, на каждом этапе моделирования существует возможность анализа промежуточных вычислений. Однако недостатком такой модели является низкая адаптивность, отсутствие возможности моделирования нелинейных процессов, а также трудоемкость определения параметров и вида функциональной зависимости модели [4].

Авторегрессионная модель прогнозирования основана на том, что значение временного ряда находится в линейной зависимости от предыдущих значений того же временного ряда. На данный момент модели этого класса являются одними из наиболее часто используемых во многих областях, поскольку обладают прозрачностью и простотой моделирования. Сложности использования авторегрессионной модели заключаются в низкой адаптивности модели, отсутствии возможности моделирования нелинейных процессов и трудоемкости определения большого количества параметров модели.

Модель экспоненциального сглаживания базируется на постоянном пересмотре прогнозных значений по мере поступления фактических, при этом последние доступные наблюдения имеют большее влияние на прогнозное значение, чем старшие наблюдения. Модель экспоненциального сглаживания наиболее удобна при использовании в целях краткосрочного планирования. Ее преимущество — возможность оперативно изменять коэффициент сглаживания в зависимости от целей планирования. Недостатками данной модели является то, что коэффициент сглаживания чаще всего определяется экспертно, что может негативно влиять на точность прогноза [5].

Анализ временных рядов представляет собой вычисление корреляционных функций векторов состояний системы [6]. На его основе разрабатывают микро-

скопические модели, которые позволяют отразить развитие сложных систем во времени [7].

Традиционные разделы статистики посвящены анализу временных рядов, представляющих собой стационарные случайные, диффузионные или точечные процессы. Чаще всего в статистическом анализе элементы системы позиционируются как случайные и могут быть рассмотрены только в совокупности, т. е. детерминистическое объяснение невозможно. Из этого следует, что процесс, породивший временной ряд, имеет много составных частей (степеней свободы) и зачастую подчиняется гауссовскому распределению. Несмотря на этот факт, многие временные ряды обладают такими свойствами, как масштабная инвариантность, что приводит к анализу случайных самоподобных процессов. Анализ такого рода процессов не подвластен стандартной гауссовой статистике, поэтому в данном случае приходится прибегать к описанию процессов как фрактальных множеств [8].

Определение фрактальности. Понятие фрактала появилось более 40 лет назад. Данный термин ввел французский математик Бенуа Мандельброт в 1975 г. в своей книге «Фрактальная геометрия природы» [9].

Фрактал носит множество определений в зависимости от сферы его применения. Общий смысл фрактала в том, что это название носят объекты, форма которых не изменяется в зависимости от того, с какого расстояния их рассматривают.

Фрактальные свойства присущи процессам, протекающим во времени и имеющим самоподобную структуру. Данный вид фракталов называют фрактальными временными рядами. Они определяются как класс фрактальных кривых, используемых для описания и моделирования разного рода явлений. Такие структуры можно представить в виде функции независимых переменных, чьи графики демонстрируют формы и паттерны, напоминающие более распространенные пространственные фракталы. Несмотря на данную схожесть, аналитические инструменты, используемые при исследовании пространственных фракталов, отличаются от тех, которые используют для временных.

Фрактальные временные ряды описаны во множестве литературных источников. Изучение фракталов и их свойств способствует моделированию и анализу финансовых, экономических, технических и прочих систем, а также дает возможность строить прогнозы, моделировать и диагностировать возникновение критических значений систем. Одной из самых популярных является сфера финансов. Анализ финансовых рынков оказывает огромное влияние на экономику стран и корпораций. Прогнозирование фондового рынка, анализ динамики цен, акций и курсов криптовалют — все эти процессы можно смоделировать с помощью фрактальных кривых [10].

Значение фрактальных характеристик временного ряда дает возможность определить, является ли текущее состояние ряда случайным или же является

трендом (флэтом). Одними из таких характеристик являются индекс фрактальности μ и размерность минимального покрытия D_μ .

Фрактальная размерность помогает оценить, как совокупность данных занимает пространство. Оценка фрактальной размерности сводится к вычислению площади или объема в том пространстве, где эта совокупность находится. Если ряд является независимым, значение фрактальной размерности будет приближено к значению топологической размерности, однако если ряд обладает «памятью», на его графике не будет ярко выраженных трендов, а фрактальная размерность будет существенно меньше топологической.

Индекс фрактальности как локальная характеристика временного ряда. Индекс фрактальности μ , в свою очередь, является локальной характеристикой временного ряда. При $\mu > 0$ считается, что временной ряд обладает «отрицательно» памятью, т. е. существующий тренд с большей вероятностью сменится противоположным. При $\mu < 0,5$ считается, что временной ряд обладает «положительной» памятью, т. е. существующий тренд сохранится. При значении $\mu = 0,5$ временной ряд принято считать винеровским процессом, т. е. изменение ряда не связано с предыдущими значениями [11].

Из представленного выше можно сделать вывод о том, что изучение фрактальных характеристик временного ряда помогает оценить текущее состояние временного ряда и спрогнозировать будущие его состояния, основываясь на основном свойстве фракталов — самоподобие.

Анализ временного ряда динамики индекса промышленного производства (ИПП) компьютеров, электронных и оптических изделий. Рассмотрим временной ряд динамики ИПП за период с января 1995 г. по январь 2021 г. (рис. 1) по данным Института «Центра развития» Национального исследовательского университета — Высшей школы экономики с использованием данных Росстата и Росалкогольрегулирования. Индекс промышленного производства — относительный показатель, характеризующий изменение масштабов производства в сравниваемых периодах. Индекс промышленного производства используется при анализе динамики физического объема продукции, он отражает состояние отрасли в целом.

Исследуемый временной ряд можно принять как функцию $y = f(t)$, определенную на отрезке $[a, b]$. Плоскость, на которой определен график временного ряда, сначала необходимо равномерно разбить на клетки шириной δ , а затем подсчитать число таких клеток $N(\delta)$, которым принадлежит как минимум одна точка этого графика.

При прогнозировании экономических временных рядов используют выражение, предложенное Ф. Хаусдорфом в 1919 г., которое определяет фрактальную размерность:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)} \right], \quad (1)$$

где $N(\delta)$ — наименьшее число прямоугольников с основанием δ , покрывающих множество.

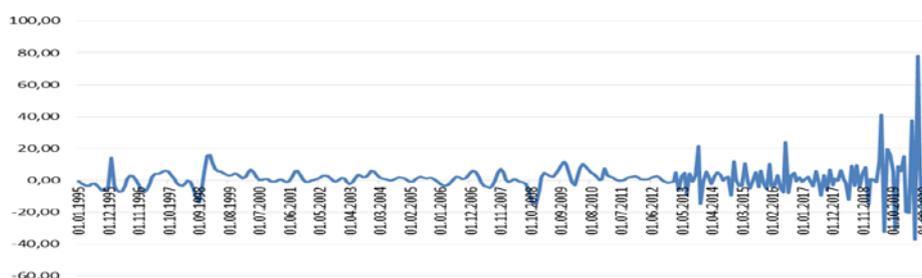


Рис. 1. График изменения ИПП в процентах к предыдущему месяцу с января 1995 г. по январь 2021 г.

Иллюстрации зависимости минимальной площади покрытия при разных значениях δ для временного ряда, состоящего из 290 наблюдений, приведена на рис. 2 и 3. В работе также были сделаны вычисления для $\delta = 2, 4, 6, 12, 16$.

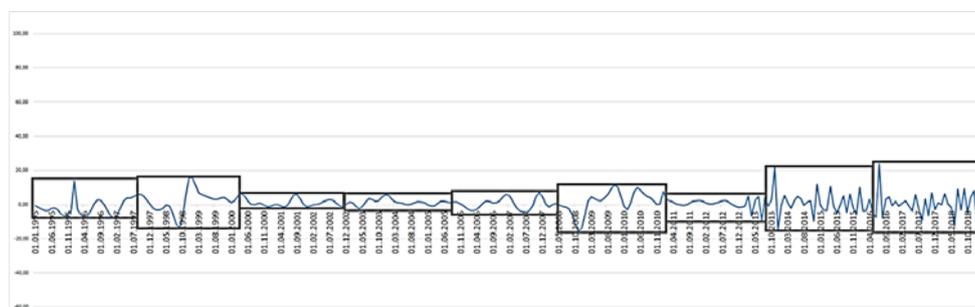


Рис. 2. Вычисление площади покрытия при $\delta = 32$

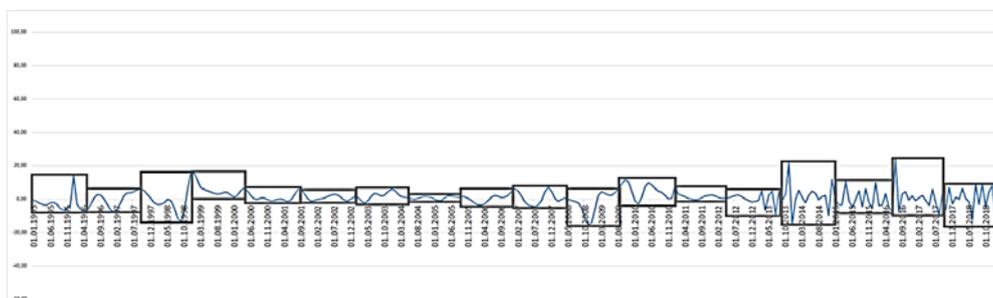


Рис. 3. Вычисление площади покрытия при $\delta = 16$

Для того чтобы определить высоту каждого прямоугольника на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$, необходимо вычислить разность функции $f(t)$ на каждом отрезке $A_i(\delta)$. Тогда амплитудной вариацией функции $f(t)$, соответствующей масштабу разбиения δ на отрезке $[a, b]$ будет являться величина

$$V_f(\delta) = \sum_{i=1}^m A_i(\delta).$$

Таким образом, площадь минимального покрытия можно вычислить следующим образом:

$$S_\mu(\delta) = V_f(\delta)\delta.$$

Далее из (1) следует, что

$$V_f(\delta) \sim \delta^{-\mu}, \tag{2}$$

где индекс фрактальности

$$\mu = D - 1.$$

Обработка результатов. Таблица получившихся значений анализа временного ряда динамики ИПП компьютеров, электронных и оптических изделий за период с января 1995 г. по январь 2021 г. приведена ниже.

Поиск индекса фрактальности

δ	$N(\delta)$	V	S	$\ln \delta$	$\ln V$
2	156	845,13	1690,252	0,301003	2,926921
4	78	860,33	3441,315	0,602060	2,934664
6	52	747,17	4483,013	0,778151	2,873419
8	39	661,91	5295,270	0,903090	2,820798
12	26	532,27	6387,245	1,079181	2,726132
16	20	479,02	7664,397	1,204120	2,680358
24	13	346,54	8316,925	1,380211	2,539752
32	10	310,50	9935,883	1,505150	2,492057

При логарифмировании формулы (2) получается

$$\ln V_f(\delta) = -\mu \ln \delta.$$

Далее для определения μ необходимо найти линию регрессии $y = ax + b$. Для этого с помощью метода наименьших квадратов построен график зависимости (2) при условии, что $\mu = -a$ (рис. 4).

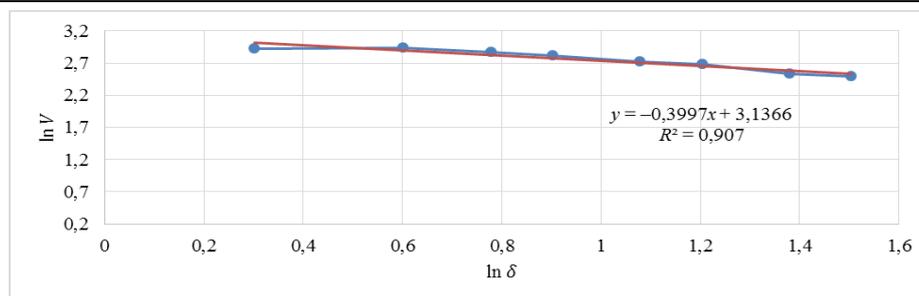


Рис. 4. Результат вычисления индекса фрактальности динамики ИПП компьютеров, электронных и оптических изделий

Индекс фрактальности равен $\mu = 0,3997$. Значение коэффициента детерминации уравнения регрессии $R^2 = 0,907$ свидетельствует о том, что данный индекс вычислен достаточно точно. Поскольку $\mu < 0,5$, это указывает на наличие у временного ряда фрактальных свойств, а также на то, что ряд является персистентным трендоустойчивым.

Заключение. В работе были проанализированы традиционные модели прогнозирования временных рядов: регрессионные модели, авторегрессионные модели, модели экспоненциального сглаживания и прочие модели. На основе этого был сделан вывод о том, что многие временные ряды обладают такими свойствами, как масштабная инвариантность, что приводит к анализу случайных самоподобных процессов. Анализ такого рода процессов неподвластен стандартной гауссовой статистике, поэтому в данном случае приходится прибегнуть к описанию процессов как фрактальных множеств.

Анализ временного ряда был выполнен на примере данных о динамике ИПП компьютеров, электронных и оптических изделий за период с января 1995 г. по январь 2021 г. Полученное значение индекса фрактальности μ позволяет сделать вывод о том, что детальный анализ фрактальных свойств данного временного ряда дает основу для прогнозирования будущих значений изменения ИПП с высокой точностью.

Литература

- [1] Aleksandrov A.A., Pavlov A.M. Application of big data in engineering industry. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 07000. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036191>
- [2] Бром А.Е., Картвелишвили В.М., Омельченко И.Н. Теория и практика моделирования динамики экономических систем в промышленности. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [3] Omelchenko I.N., Lyakhovich D.G., Aleksandrov A.A. et al. Development of a design algorithm for the logistics system of product distribution of the mechanical engineering enterprise. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-62-69>

-
- [4] Тихонов Э.Е. Прогнозирование в условиях рынка. Невинномысск, НТИ, 2006.
- [5] Alfares H., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *Int. J. Syst. Sci.*, 2002, vol. 33, no. 1, pp. 23–34.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207720110067421>
- [6] Catalao J. An artificial neural network approach for day-ahead electricity prices forecasting. *6th WSEAS Int. Conf. Neural Networks*. Stevens Point, 2005, pp. 80–83.
- [7] Boffetta G., Cencini M., Falconi M. et al. Predictability: a way to characterize complexity. *Phys. Rep.*, 2002, vol. 356, no. 6, pp. 367–374.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(01\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(01)00025-4)
- [8] Олемской А.И., Борисюк В.Н., Шуда И.А. Мультифрактальный анализ временных рядов. *Вестник СумДУ. Сер. Физика, математика, механика*, 2008, № 2, с. 70–81.
- [9] Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Times Books, 1982.
- [10] Петерс Э. *Фрактальный анализ финансовых рынков*. М., Интернет-трейдинг, 2004.
- [11] Prajakta S. *Time series forecasting using holt-winters exponential smoothing*. Kanwal Rekhi School of Information Technology, 2004.

Додонова Анастасия Андреевна — студентка кафедры «Промышленная логистика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Александров Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная логистика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Додонова А.А. Анализ и выбор оптимального метода прогнозирования временных рядов на примере индекса промышленного производства компьютеров, электронных и оптических изделий. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 04(69).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-04-783>

ANALYSIS AND SELECTION OF THE OPTIMAL TIME SERIES FORECASTING METHOD USING THE EXAMPLE OF INDUSTRIAL PRODUCTION INDEX OF COMPUTERS, ELECTRONIC AND OPTICAL PRODUCTS

A.A. Dodonova

nastya.dodonova@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This paper focuses on the analysis and selection of the optimal time series forecasting method. The difficulty in forecasting this kind of data is that it often represents a reflection of complex, chaotic systems, which are influenced by a huge number of different factors. Particular attention is paid to the importance of applying new and more accurate forecasting methods, as the rapidly changing environment of organization requires a shorter response time to emerging changes. An example of conducting a fractal analysis on time series of an industrial production index of computers, electronic and optical products in order to assess the possibility for the further forecasting of this time series is considered.

Keywords

Industrial production index, forecasting, time series, fractal analysis, fractal index, self-similarity, regression, stochastic processes.

Received 28.03.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Aleksandrov A.A., Pavlov A.M. Application of big data in engineering industry. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 07000. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036191>
- [2] Brom A.E., Kartvelishvili V.M., Omel'chenko I.N. *Teoriya i praktika modelirovaniya dinamiki ekonomicheskikh sistem v promyshlennosti* [Theory and practice of modelling economic system dynamics in industry]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018 (in Russ.).
- [3] Omelchenko I.N., Lyakhovich D.G., Aleksandrov A.A. et al. Development of a design algorithm for the logistics system of product distribution of the mechanical engineering enterprise. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-62-69> (in Russ.).
- [4] Tikhonov E.E. *Prognozirovanie v usloviyakh rynka* [Forecasting under market conditions]. Nevinnomyssk, NTI Publ., 2006 (in Russ.).
- [5] Alfares H., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *Int. J. Syst. Sci.*, 2002, vol. 33, no. 1, pp. 23–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207720110067421>
- [6] Catalao J. An artificial neural network approach for day-ahead electricity prices forecasting. *6th WSEAS Int. Conf. Neural Networks*. Stevens Point, 2005, pp. 80–83.
- [7] Boffetta G., Cencini M., Falconi M. et al. Predictability: a way to characterize complexity. *Phys. Rep.*, 2002, vol. 356, no. 6, pp. 367–374. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(01\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(01)00025-4)

- [8] Olemskoy A.I., Borisyuk V.N., Shuda I.A. Multifractal analysis of time series. *Vestnik SumDU. Ser. Fizika, matematika, mekhanika*, 2008, no. 2, pp. 70–81 (in Russ.).
- [9] Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. Times Books, 1982.
- [10] Peters E.E. Fractal market analysis. Wiley, 1994. (Russ. ed.: *Fraktal'nyy analiz finansovykh rynkov*. M., Internet-treyding, 2004.)
- [11] Prajakta S. Time series forecasting using holt-winters exponential smoothing. Kanwal Rekhi School of Information Technology, 2004.

Dodonova A.A. — Student, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Aleksandrov A.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Dodonova A.A. Analysis and selection of the optimal time series forecasting method using the example of industrial production index of computers, electronic and optical products. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 04(69). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-04-783.html> (in Russ.).