

УДК 681.5

Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов

**АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В рамках данной статьи рассматривается структура временных рядов, описывающих эксплуатационные параметры промышленных объектов, с точки зрения возможности их прогнозирования. В качестве критериев прогнозируемости временных рядов рассматриваются их стационарность, предсказуемость и нерегулярность.

*Ключевые слова:* временной ряд, прогнозирование, стационарность, предсказуемость, нерегулярность временных рядов.

Автоматизация процессов мониторинга, контроля работоспособности сложных технологических объектов и прогнозирования их технических состояний является мощным фактором повышения их технико-экономической эффективности и надежности. В настоящее время актуально применение стратегии обслуживания по фактическому состоянию, что требует повышения точности и оперативности получения прогноза параметров объекта.

Функционирование объекта можно описать последовательностью постоянно сменяющихся друг друга технических состояний, каждое из которых представляет собой набор значений параметров объекта в определенный момент времени. Задача прогнозирования технических состояний промышленного объекта при этом будем рассматривать как прогнозирование совокупности процессов изменения его технических параметров, представленных в виде временных рядов.

Известно, что определение закономерностей развития процессов и построение на их основе прогнозной модели – трудноразрешимая задача. Объясняется это тем, что изменения технических параметров обусловлены влиянием целого ряда внешних факторов, каждый из которых вносит свой вклад в картину развития процесса. Существует большое количество методов прогнозирования, основанных на математической экстраполяции, корреляционном анализе, использовании экспертных систем, а также комбинирующих известные методы. При этом выбор метода прогнозирования, его трудоемкость и эффективность применения в большой степени зависит от вида временного ряда, описывающего исследуемый процесс. В связи с этим, на практике, при разработке моделей и автоматизации методов прогнозирования, необходимо выполнить исследования в области структуры прогнозируемых процессов.

Временной ряд  $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ , описывающий изменение технического параметра, может быть представлен как комбинация двух различных по своей природе компонент, каждая из которых вносит в процесс анализа временного ряда определенные особенности. Часть временного ряда, определяющая основные закономерности его развития, значимые при решении задачи прогнозирования, называется детерминированной компонентой. Другая часть временного ряда, описывающая случайные отклонения исследуемого процесса, носит название случайной компоненты.

При использовании аддитивной модели временного ряда соотношение детерминированной и случайной компонент описывается в виде суммы  $y_n = d_n + e_n$ , где  $d_n$  –  $n$ -й элемент детерминированной компоненты,  $e_n$  –  $n$ -й элемент случайной компоненты. В матричной форме это выражение записывается в виде  $Y = D + E$ , где  $D$ ,  $E$  – временные ряды, описывающие детерминированную и случайную компоненты исходного ряда  $Y$ .

Аддитивная модель позволяет сделать ряд предположений относительно свойств компонент временного ряда и облегчить процесс его декомпозиции.

Детерминированная компонента несет сведения о процессе изменения технического параметра во времени и является информационной основой при построении прогностических моделей. Она включает в себя эволюционную и квазипериодическую составляющие  $d_n = tr_n + p_n$ , где  $tr_n$ ,  $p_n$  – элементы рядов, описывающих эволюционную и квазипериодическую составляющие соответственно.

Эволюционная составляющая выражает общую направленность изменения показателей процесса. В теории анализа временных рядов носителем эволюционной составляющей является тренд – кривая различной степени усреднения ряда, описывающая общий закон его развития. По степени сложности тренды можно разделять на два вида [1].

К первому можно отнести тренды, которые описываются элементарными математическими функциями, при этом общий вид аппроксимирующей функции может быть определен визуально. Простые тренды описывают нестационарные, слабо изменяющиеся процессы с высокой степенью инерционности. Их прогнозирование не составляет сложности, здесь хорошо работают известные прогностические модели.

Ко второму виду относятся тренды, аппроксимация которых одиночными элементарными математическими функциями невозможна. Выделение таких трендов на основе значений временного ряда и подбор аппроксимирующей функции являются сложной задачей, требующей дополнительной информации о логической структуре, взаимосвязях компонент исследуемого процесса и влиянии внешних факторов. Следует отметить, что эволюционная составляющая в большинстве случаев характеризует необратимые процессы старения и износа составных частей промышленного объекта и используется для построения долгосрочных прогнозов.

Квазипериодическая составляющая представляет собой часть временного ряда, обусловленную флуктуациями внешних воздействий. Она может иметь вид периодического процесса, а также процесса, не являющегося периодичным в масштабах некоторой выборки. Квазипериодическая составляющая является переходным звеном между случайной компонентой и эволюционной составляющей. Она не может быть отнесена к случайной компоненте, так как отдельные измерения, входящие в ее состав, не являются независимыми. Она так же не может быть отнесена к эволюционной составляющей, так как описывает процесс изменения с точки зрения кратковременных и непостоянных воздействий.

Как показывает практика, нерегулярная квазипериодическая составляющая является частью временного ряда, который имеет сложный нелинейный закон развития. Поиск модели, описывающей периодическую составляющую ряда, объясняется тем, что учет периодической составляющей в прогнозной модели оправдан при кратковременном прогнозировании процессов изменения технических параметров. Это дает возможность поиска закономерностей его развития во времени и построения прогностических моделей, позволяющих с заданной точностью делать кратковременный прогноз.

Случайная компонента не несет информации о развитии исследуемого процесса и представляет собой случайные отклонения значений временного ряда от детерминированной компоненты. По своему происхождению случайную составляющую можно разделить на две группы: измерительные и внутренние шумы.

Измерительные шумы являются результатом неточного измерения наблюдаемых величин. Причиной их появления могут быть как внешние регулярные воздействия, так и случайные процессы. Если результат воздействия первых можно компенсировать, внося в прогнозную модель определенные поправки, то результат случайных процессов устранить можно только частично. Внутренние шумы – это отражение свойств, присущих самому исследуемому объекту. Как и в случае с внешними шумами, компенсировать их можно лишь частично, используя методы статистического сглаживания. Наличие в исследуемом процессе внутренних шумов, что присуще процессам реальных объектов, значительно осложняет процесс его анализа и затрудняет построение прогностической модели.

При построении прогностических моделей случайная компонента как не несущая по-

лезной информации о закономерностях развития может использоваться, преимущественно, для оценки возможных отклонений фактических значений анализируемого объекта от прогнозных. При решении этой задачи статистические свойства нерегулярной составляющей будут использоваться как критерии достоверности разделения процесса на его составляющие. Как показывает практика, наиболее достоверным является разделение, в основу которого положено предположение о том, что случайная компонента обладает свойствами гауссовского белого шума.

Рассмотрим вопросы анализа стационарности, предсказуемости и нерегулярности временных рядов.

1. *Оценка стационарности временных рядов технических параметров.* Стационарность временных рядов является одним из основных критериев, позволяющих использовать большинство регрессионных методов прогнозирования, и определяет независимость их статистических параметров от выборки. Среди временных рядов, описывающих изменения технических параметров промышленных объектов, присутствуют как стационарные, так и нестационарные процессы. Для стационарных процессов характерен тренд в виде горизонтальной прямой, относительно которой происходят флуктуации процесса. Различают стационарность в широком и узком смысле [2].

Большинство процессов, описывающих технические параметры, являются стационарными в широком смысле, так как они удовлетворяют условию неизменности математического ожидания от объема и расположения выборки во временном ряду и зависимостью автокорреляционной функции только от разности моментов времени, т.е.  $E(y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m)) = \text{const}, \rho_y(t, \tau) = \rho_y(\tau - t)$ . Ряд  $Y$  является стационарным в узком смысле, если совместное распределение вероятности  $m$  наблюдений  $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m) \in Y$  совпадает с распределением вероятности  $m$  наблюдений  $y(t_1 + \tau), y(t_2 + \tau), \dots, y(t_m + \tau) \in Y$  и не зависит при этом от  $\tau$  и  $m$ :  $F(y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m)) = F(y(t_1 + \tau), y(t_2 + \tau), \dots, y(t_m + \tau))$ .

Если рассматривать дискретный процесс изменения технического параметра, то стационарность в широком смысле подразумевает наличие флуктуаций процесса вокруг определенного уровня. При этом нестабильность процессов, описывающих изменение технического параметра во времени, может быть вызвана специфической природой развития процесса, дрейфом технических параметров, вызванным процессами старения и износа составных элементов промышленного объекта или возникновением внештатных ситуаций.

Рассмотрим временной ряд, описывающий параметры промышленных объектов со сложной нестационарной природой развития. На рис. 1 изображены графики, описывающие изменение температуры обмотки и тока статора промышленного электродвигателя в предаварийной ситуации.

В данном случае причиной роста дрейфа температуры являлся рост тока статора и выход его за пределы допустимых значений. Проведем анализ каждого из временных рядов с точки зрения их стационарности.

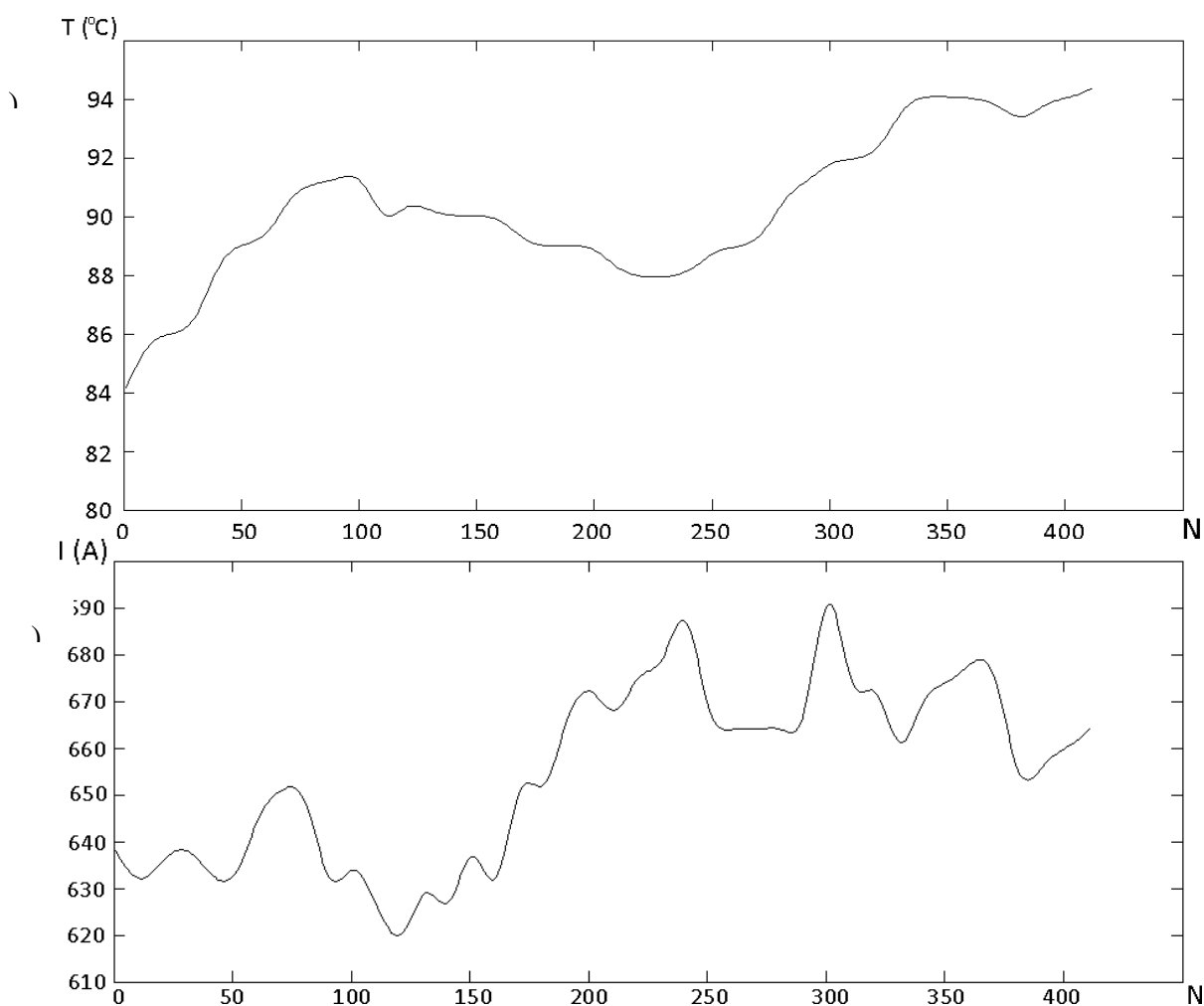
Проверку гипотезы о стационарности данного процесса будем производить на основе критерия Фишера [3]. Для этого разделим весь временной ряд  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  на две равные части  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n/2}\}$  и  $Y = \{y_{\frac{n}{2}+1}, y_{\frac{n}{2}+2}, \dots, y_n\}$ . Вычислим для каждой из частей соответственно математические ожидания  $E_1, E_2$  и дисперсии  $D_1, D_2$ :

$$E_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} y_i; \quad D_1 = \frac{1}{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=1}^{n/2} (y_i - E_1)^2; \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n y_i; \quad D_2 = \frac{1}{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n (y_i - E_2)^2.$$

Критерий Фишера  $F$  имеет следующий вид

$$F = \begin{cases} D_1 / D_2; D_1 > D_2 \\ D_2 / D_1; D_2 > D_1 \end{cases} . \quad (2)$$



**Рис. 1. Дрейф технических параметров электродвигателя:**  
*a* – температура меди статора; *b* – ток статора

Для временных рядов, описывающих изменение температуры и тока статора (рис. 1), были вычислены коэффициенты Фишера, которые равны  $F_T=3.56$  и  $F_I=5.11$  для параметров температуры и тока соответственно. Исходя из табличных данных, коэффициент Фишера для стационарных временных рядов объемом до 1000 отсчетов должен лежать в пределах  $F=1.0-1.423$ . На основании этого можно сделать вывод, что процессы дрейфа температуры и тока статора не являются стационарными в узком смысле, так как их дисперсии  $D$  не постоянны во времени. Для окончательной проверки гипотезы воспользуемся  $t$ -критерием Стьюдента [3]:

$$t = \frac{|E_1 - E_2|}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} , \quad (3)$$

где  $n_1, n_2$  – количество элементов, входящих в  $Y_1$  и  $Y_2$ ;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение разности математических ожиданий:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)D_1 + (n_2 - 1)D_2}{n_1 + n_2 - 2}}. \quad (4)$$

Коэффициенты Стьюдента временных рядов температуры и тока статора равны соответственно  $t_t=3.23$  и  $t_t=4.1$ , в то время как табличное значение границы стационарности временных рядов равно  $t_{et}=2.41$ . На основании этого можно сделать вывод, что рассматриваемый процесс является нестационарным по математическому ожиданию.

Оценка стационарности временных рядов, описывающих изменение во времени температуры и тока статора, показывает, что описываемые ими процессы являются нестационарными. Проведенные в результате моделирования исследования на временных рядах со сложными законами развития показали, что большие коэффициенты Стьюдента свидетельствуют о наличии точки смены тенденции в процессе изменения временного ряда и немонотонности его тренда.

2. *Оценка предсказуемости временных рядов технических параметров.* С точки зрения детерминистического подхода непредсказуемость временного ряда интерпретируется как высокая сложность законов его развития, превосходящая возможности применяемых прогностических методов. Если использовать концепцию частичной детерминированности, то любой процесс можно описать аддитивной моделью, содержащей детерминированную и случайную компоненты. Степень детерминированности процесса определяется участием детерминированной компоненты в развитии процесса во времени и пространстве: чем поведение процесса более упорядочено и лучше поддается формализации, тем выше степень участия детерминированной составляющей.

В качестве критерия предсказуемости временного ряда будем использовать оценку максимального периода упреждения его прогноза [4], определяемую равенством автокорреляционной функции определенному пороговому значению  $\beta$ , при котором исследуемый процесс считается независимым по отношению к своей предыстории:

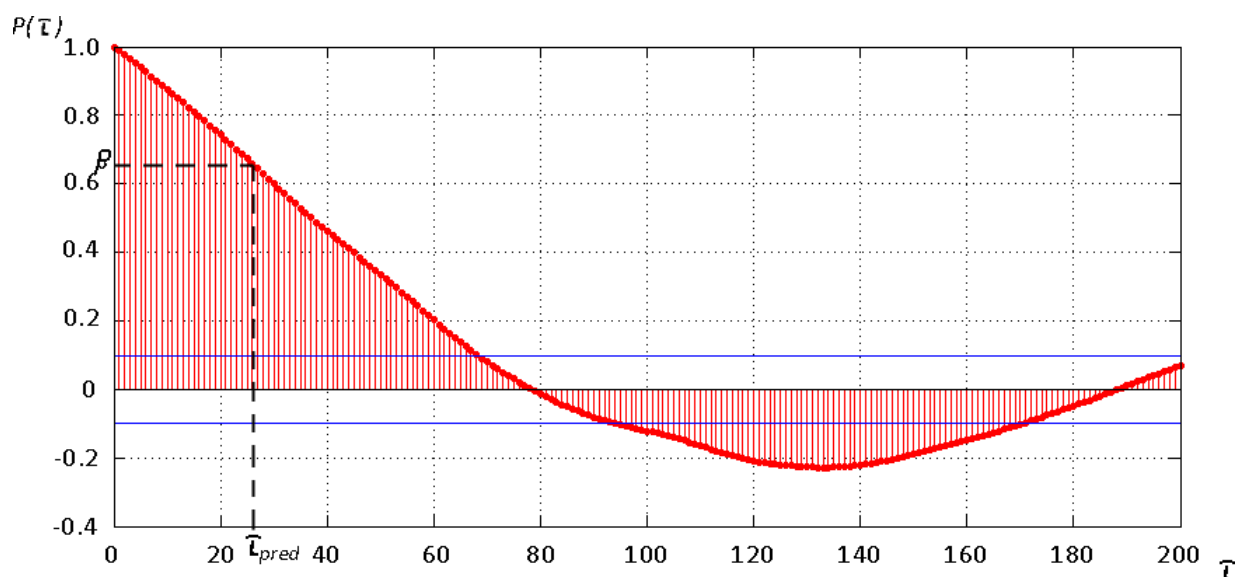
$$\frac{\sum (y(t) - \overline{y(t)}) \cdot (y(t + \tau_{pred}) - \overline{y(t + \tau_{pred})})}{\sqrt{\sum (y(t) - \overline{y(t)})^2 \cdot \sum (y(t + \tau_{pred}) - \overline{y(t + \tau_{pred})})^2}} = \beta. \quad (5)$$

где  $\tau_{pred}$  – оценка максимального упреждения прогноза;  $y(t)$  – элемент прогнозируемого временного ряда.

При условии, что прогнозируемый процесс обладает невысокой нерегулярностью, данный критерий позволяет достаточно точно оценивать границу прогнозного упреждения. Проведенное моделирование показало, что с ростом степени нерегулярности исследуемого процесса точность данного метода падает, давая более пессимистический результат по сравнению сполучаемым реально. Данный критерий способствует автоматизации процесса анализа прогнозируемости временных рядов и получению априорной оценки максимального периода прогнозного упреждения.

Рассмотрим временной ряд, описывающий изменение во времени температуры средней точки статора (рис. 2, а). Для анализа прогнозируемости процесса изменения температуры статора построим и проанализируем автокоррелограмму его временного ряда.

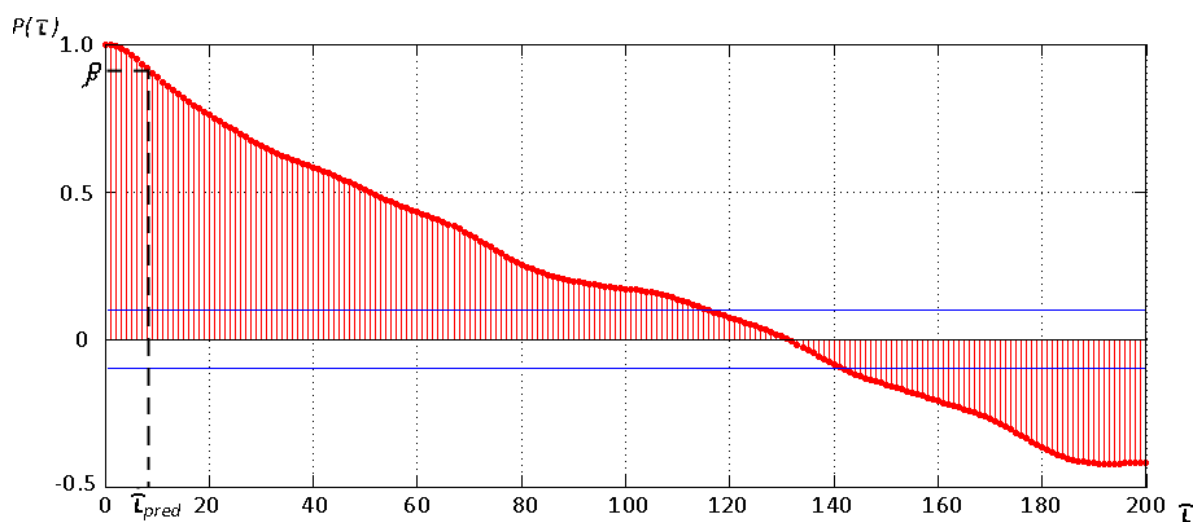
Из приведенного графика видно, что коррелограмма не содержит выбросов и имеет монотонный пологий начальный участок. На основании этого можно утверждать, что временной ряд, описывающий изменение температуры статора, является достаточно инерционным процессом, который может быть спрогнозирован с использованием его предыстории. На основании проведенных исследований, учитывая (5), было найдено пороговое значение автокорреляционной функции  $\beta=0.65$  и получена оценка максимального упреждения прогноза, которая составила  $\tau_{pred}=26$  отсчетов.



**Рис. 2. Автокоррелограмма временного ряда, описывающего изменения температуры статора электродвигателя**

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что прогнозирование временного ряда, описывающего изменение температуры статора, возможно математическими методами, использующими в качестве основания прогноза предысторию развития процесса.

Коррелограмма временного ряда, описывающего изменение тока статора электродвигателя (рис. 3), представляет собой монотонно убывающую функцию, что свидетельствует о высокой инерционности процесса и возможности эффективного применения моделей инерционного прогнозирования.



**Рис. 3. Автокоррелограмма временного ряда, описывающего изменение тока статора электродвигателя**

Коррелограмма временного ряда, описывающего изменение во времени тока статора, не имеет выбросов и монотонна, что свидетельствует о высокой линейной зависимости элементов ряда от их предыстории. Экспериментально было найдено пороговое значение для автокорреляционной функции  $\beta=0.93$ . Его близкое к единице значение объясняется тем, что колебания тока статора происходят в достаточно узком диапазоне значений и с большим статистическим средним, что накладывает более жесткие требования на точность прогноза и ведет к сокращению упреждения прогноза. Используя найденное пороговое значение, на ос-

новании построенной коррелограммы, была определена оценка максимального прогнозного упреждения для данного временного ряда  $\tau_{pred}=8$ .

На основании проведенного моделирования и исследования множества временных рядов, описывающих сложные изменения технических параметров во времени, сделан вывод о том, что оценка максимального упреждения прогноза является адекватной и может использоваться для количественной оценки прогнозируемости процесса.

3. *Определение степени нерегулярности временных рядов технических параметров.* Процесс с точки зрения трудоемкости его математического описания и прогнозирования характеризует критерий нерегулярности временного ряда. Нерегулярность временного ряда, в отличие от степени детерминированности, характеризует степень сложности закона его развития и, наряду со степенью детерминированности, описывает гипотетическую степень его прогнозируемости.

В результате анализа подходов и критериев, используемых для оценки степени нерегулярности временного ряда, можно сделать вывод, что наиболее подходящим является коэффициент вариабельности  $K$ , предлагаемый в работе [5]:

$$K = \frac{\overline{|\Delta y|}}{\overline{y}}, \quad (6)$$

где  $\overline{y}$  – статистическое среднее временного ряда;  $\overline{|\Delta y|}$  – средний модуль разности временного ряда, определяемый по формуле

$$|\Delta y| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{i+1} - y_i|, \quad (7)$$

где  $y_i$  –  $i$ -й элемент исследуемого временного ряда;  $N$  – длина временного ряда.

Коэффициент вариабельности  $K$  пропорционален относительной скорости изменения значений временного ряда и может быть использован для классификации временных рядов по характеру их изменения. При этом существуют значения  $K=1$  и  $K=2$  разбивающие все множество временных рядов на три класса:

- временные ряды с преобладающей детерминированной компонентой (преимущественно регулярные) ( $0 < K < 1$ );
- временные ряды с высокой степенью нерегулярности (преимущественно случайные) ( $1 < K < 2$ );
- шумовые последовательности ( $K \geq 2$ ).

Исследования, проведенные в работе [6], показали, что на основании критерия вариабельности можно осуществлять оценку нерегулярности временного ряда и производить их разделение по степени зашумленности.

#### Библиографический список

1. **Афанасьев, В.Н.** Анализ временных рядов / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика. 2001. – 228 с.
2. **Андерсен, Т.** Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсен. – М.: Мир, 1976. – 756 с.
3. **Букреев, В.Г.** Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов. / В.Г. Букреев, С.И. Колесникова, А.Е. Янковская. – Томск: изд. Томского политехнического университета. 2010. – 254 с.
4. **Безручко, Б.П.** Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж». 2005 – 320 с.
5. **Кликушин, Ю.Н.** Количественная оценка свойств «регулярности-предсказуемости» сигналов. // Радиоэлектроники. ИРЭ РАН. 2000. № 11.

6. Ляхманов, Д.А. Выделение детерминированной компоненты временных рядов методом спектрального анализа / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Часть 1. №5. С. 181–184.

*Дата поступления  
в редакцию 06.05.2013*

**E.S. Sokolova, D.A. Lyakhmanov**

**ANALYSIS OF DYNAMIC SERIES DESCRIBES TECHNICAL PARAMETERS  
OF INDUSTRIAL OBJECTS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** This paper deals with considering structure of time series, describes operational parameters of industrial objects from the point of view of forecasting ability. Stability, predictability, irregularity is regard as criterions of forecasting ability.

**Design/methodology/approach:** In this article for predictability estimation use three basic criteria: stationarity, predictability, irregularity. The use of these criteria allows to evaluate the degree of time series predictability.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the results of research in management systems of proactive management.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the forecasting unstable time series of technical parameters.

**Originality/value:** In this research uses a combination of the three most important criteria for determining the hypothetical predictability of time-series.

*Key words:* dynamic series, forecasting, stability, predictability, irregularity of time series.