

УДК 004.942

В. Ф. МИРГОРОД<sup>1</sup>, Е. В. ДЕРЕНГ<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «Элемент», Одесса, Украина<sup>2</sup> ИПМЭ НАНУ, Киев, Украина

## ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД

*В работе обосновывается подход к прогнозной оценке значений временных рядов, образованных параметрами регистрации состояния силовых и энергетических установок в их длительной эксплуатации. Предлагаемый подход основан на формировании статистической модели в виде полиномиальной аппроксимации трендов отклонений взаимозависимостей измеряемых выходных переменных в установившихся режимах. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет преобладающее собственное значение, связанное с трендовой компонентой, на основе ее экстраполяции и решения обратной задачи МГК выполняется прогноз будущих значений ряда. Решена прикладная задача прогноза значений параметров регистрации технического состояния силовой установки летательного аппарата в его длительной эксплуатации.*

**Ключевые слова:** диагностика, временные ряды, трендовый анализ, прогнозная оценка.

### Введение

Проблемным вопросом усовершенствования систем технической диагностики (СТД) изменения технического состояния силовых и энергетических установок (СиЭУ) на основе газотурбинных двигателей (ГТД) во время их длительной эксплуатации является статистическая оценка совокупности будущих значений регистрируемых параметров по данным предыдущих наблюдений. Такая оценка может установить возможность последующей эксплуатации и ее возможный срок. Основанием для такой оценки является предположение, что в процессе длительной эксплуатации СиЭУ тренд параметров неизбежно присутствует ввиду естественной выработки ресурса.

Важную научно-прикладную задачу составляет обоснование методов, методик и прикладных алгоритмов прогноза значений временных рядов данных регистрации технического состояния СиЭУ на будущий период эксплуатации.

### 1. Формулирование проблемы

Известные преимущества группы методов SSA [1, 7, 8], развивающих основные подходы метода главных компонент (МГК) [2, 3], обусловили их широкое применение для анализа временных рядов различной физической природы [1]. Решение задачи прогноза поведения временного ряда в рамках указанного подхода сталкивается со значительными трудностями, вызванными необходимостью по-

строения адекватной его модели. Такой моделью является, в частности, так называемый «ряд конечной размерности» [11]. Широко применяемые классические методы прогноза основаны на моделях авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) временного ряда [2, 5]. Общим недостатком указанных подходов является недостаточная надежность прогноза, поскольку в их основе лежат статистические модели случайной компоненты временного ряда.

Основная идея предлагаемого подхода к прогнозированию изменения временных рядов состоит в том, что статистическая модель строится не для непосредственно временного ряда, а для семейства его главных компонент, имеющих, как известно [1, 3], более высокую степень стабильности к случайным факторам.

Целью настоящей работы является обоснование подхода к прогнозированию временных рядов на основе их предварительного анализа методом SSA, и создание программно-алгоритмических средств для его реализации.

### 2. Решение проблемы

Гипотеза предлагаемого исследования состоит в следующем: если первая главная компонента, соответствующая трендовой компоненте временного ряда, установлена с высокой достоверностью, то ее последующее значение может быть определено методом экстраполяции (это может быть линейный тренд, полиномиальный, либо модель типа авторегрессии). Тогда последующее значение элементов

временного ряда определяется решением обратной задачи МГК. Такая гипотеза основана на высокой стабильности собственных значений и собственных векторов матрицы автокорреляции.

Следуя известным методам трендового анализа (SSA, "Гусеница"), сформируем траекторную матрицу  $X$  [1]:

$$X = \begin{bmatrix} x_k x_{k+1} \dots x_n \\ x_{k-1} x_k \dots x_{n-1} \\ \dots \\ x_1 x_2 \dots x_{n-k} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица (1) содержит  $k$  строк (лаг анализа) и  $n-k$  столбцов, где  $n$  – объем выборки. Естественно,  $k < n$ .

Следует отметить, что, в отличие от известного подхода [1,11], первая строка в предлагаемой траекторной матрице содержит последние  $n-k$  отсчетов исследуемого временного ряда, а последняя строка – первые  $n-k$  отсчетов исследуемого временного ряда.

Согласно [6], далее решается задача на собственные значения и собственные векторы корреляционной матрицы

$$XX^T U = DU, \quad (2)$$

где  $U$  –  $k \times k$  матрица собственных векторов,

$D$  – диагональная матрица собственных чисел.

Матрица главных компонент (ГК) образуется известным образом в виде

$$F = UX. \quad (3)$$

Для первой ГК (соответствующей тренду), которая связывается с максимальным собственным значением, из (3) получим:

$$\bar{u}_1 X = \bar{f}_1. \quad (4)$$

Для построения одношагового прогноза выполним расширение траекторной матрицы, дополнив ее еще одним столбцом

$$X_r^{(1)} = [X, \text{col}[x_{n+1} x_n \dots x_{n+k-1}]], \quad (5)$$

где будущее значение временного ряда  $x_{n+1}$  является неизвестным.

Заметим, что первый столбец траекторной матрицы может при этом удаляться для сохранения размерности задачи и упрощения алгоритма или сохраняться. Если выполнить экстраполяцию первой ГК, например, путем построения полиномиальной модели на основе метода наименьших квадратов, то может быть записано следующее уравнение

$$\bar{u}_1 X_r^{(1)} = [\bar{f}_1 f_{1,n+1}], \quad (6)$$

где  $f_{1,n+1}$  есть экстраполированное на один шаг вперед значение первой ГК.

Из (6) следует соотношение для одношагового прогноза

$$x_{n+1} = (f_{1,n+1} - u_{12} x_n - u_{13} x_{n-1} - \dots - u_{1k} x_{n-k+1}) / u_{11}.$$

Следующее расширение траекторной матрицы имеет вид

$$X_r^{(2)} = [X_r^{(1)}, \text{col}[x_{n+2} x_{n+1} \dots x_{n+k-2}]],$$

где неизвестным является уже значение  $x_{n+2}$  (прогноз на два шага вперед). Далее процедура повторяется  $k-1$  раз, пока в столбце расширения не будут исчерпаны истинные значения временного ряда.

Достоверность прогноза, естественно, шаг за шагом снижается, поскольку истинные значения временного ряда заменяются вычисленными значениями.

Для примера диагностирования состояния маршевой двигательной установки самолета Ил-76, рассмотренного в [6, 9, 10], выполнено тестирование предлагаемого подхода. Временные ряды образованы из данных полетной регистрации параметров на взлетном режиме двигателя в виде рядов отклонений от обоснованной статистической диагностической модели. Размерность выборки составила 218 полетных циклов в течение примерно полутора лет эксплуатации от ее начала. Рисунки 1 - 4 иллюстрируют его результаты для срезов размером  $n=60$  и  $n=100$  по отклонению степени повышения давления за компрессором от диагностической модели. Лаг прогноза составляет  $k=12$  полетных циклов. В качестве меры достоверности выбрано значение коэффициента взаимокорреляции между известной истинной и прогнозной выборкой. Первая главная компонента в приведенном примере является трендовой и для нее выбрана достаточно простая модель линейного тренда.

Как это следует из результатов обработки данных, расчетов и иллюстраций, достоверность прогноза по выбранному критерию достаточно высока для первых шагов, затем снижается до статистически незначимого уровня.

Тем не менее, прогноз даже на 1-2 полетных цикла может иметь существенное значение, поскольку указывает на возможность таких отклонений параметров регистрации ГТД, которые выйдут за пределы, установленные РЭ на конкретный двигатель. Такая информация может быть важной для принятия решения о диагностировании состояния ГТД инструментальными средствами в межцикловый период.

## Заключение

В работе обоснован подход к прогнозной оценке значений временных рядов, образованных параметрами регистрации состояния силовых и энергетических установок в их длительной эксплуатации. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является формирование диагностической стати

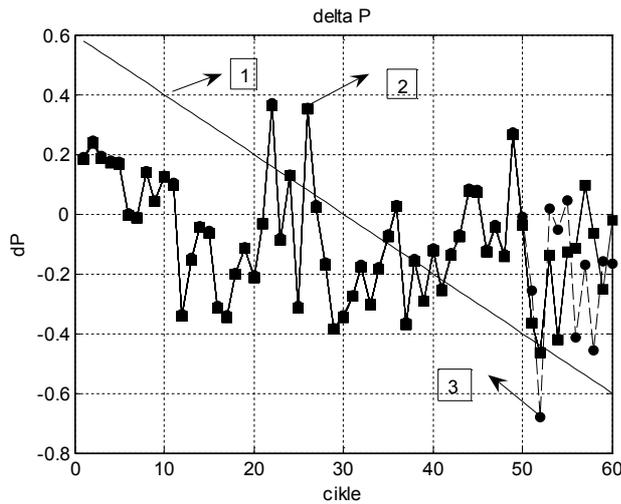


Рис. 1. Прогноз по 60 полетным циклам: 1 – аппроксимация тренда, 2 – прогноз, 3 – выборка

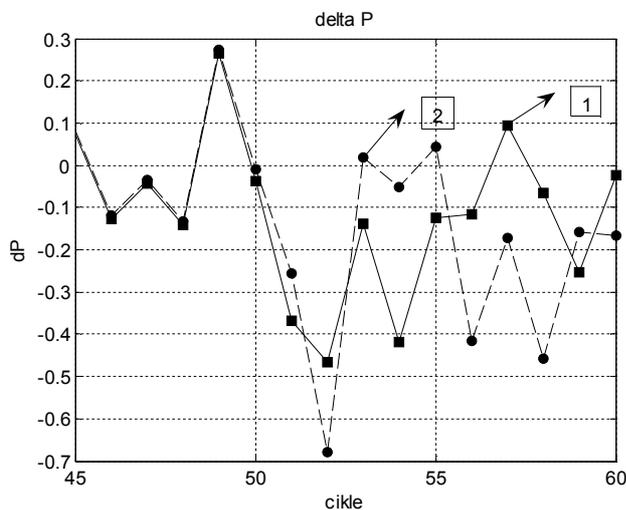


Рис. 2. Фрагмент прогноза по 60 полетным циклам: 1 – прогноз; 2 – выборка

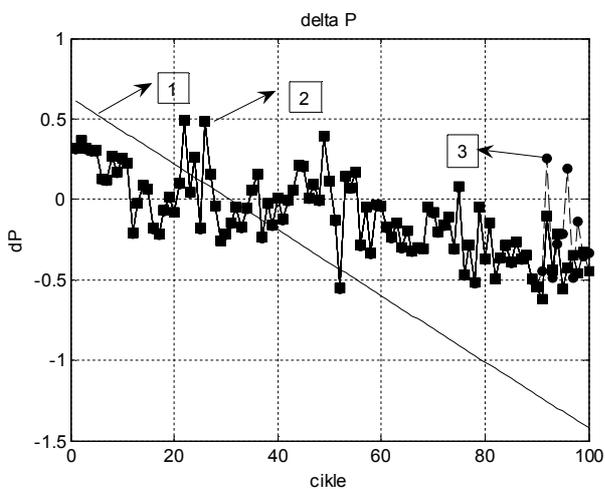


Рис. 3. Прогноз по 100 полетным циклам: 1 – аппроксимация тренда; 2 – прогноз; 3 – выборка

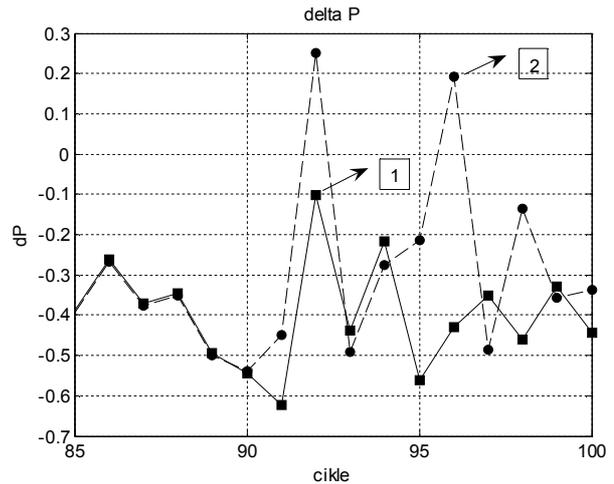


Рис. 4. Фрагмент прогноза по 100 полетным циклам: 1 – прогноз; 2 – выборка

стической модели порождения данных в виде полиномиальной аппроксимации трендов отклонений взаимозависимостей измеряемых выходных переменных в установившихся режимах. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет преобладающее собственное значение, связанное с трендовой компонентой, на основе ее экстраполяции и решения обратной задачи МГК выполняется прогноз будущих значений ряда.

Задача прогнозной оценки значений временного ряда очевидным образом противоречит обычно принимаемой статистической модели порождения данных [1, 6]: аддитивная смесь детерминированного тренда и случайной компоненты. Если среднеквадратическое отклонение случайной компоненты соизмеримо с известными погрешностями измерительных каналов, то указанная статистическая модель имеет основания для принятия. Если же такое условие не выполняется, и среднеквадратическое отклонение случайной компоненты существенно превышает указанные погрешности, то необходимо искать первопричину отклонений. В рассматриваемом примере такой первопричиной является межцикловое изменение температуры на входе двигателя Твх.

Поскольку рассматриваемый двигатель типа ПС-90 регулировался по программе поддержания приведенных оборотов турбины высокого давления, зависящей, согласно формул приведения, от Твх, то, в действительности, отклонения термодинамических параметров, превышающие ошибки измерений, случайными не являются. Именно поэтому имеется возможность краткосрочной прогнозной оценки значений временных рядов указанных параметров. По-видимому, предлагаемый подход может быть эффективным для временных рядов, имеющих свойства самоподобия.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в оценке уровня статистической значимости прогноза временного ряда и применении более совершенных математических моделей трендовой компоненты. Представляется перспективным установить возможность и достоверность прогнозной оценки значений временных рядов при наличии циклической (сезонной) компоненты, характерной для СиЭУ наземного применения.

### Литература

1. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» [Текст] / под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. – Санкт-П. ун-т, 1997. – 280 с.
2. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсон. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
3. Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / В. М. Бухитабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
4. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, В. И. Кузнецов, И. И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
5. Марпл мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Миргород, В. Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко, В. М. Кравченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 9(56). – С. 192-197.
7. Elsner, I. B. *Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis [Text]* / I. B. Elsner, A. A. Tsonis. – New York, London : Plenum Press, 1996. – 164 p.
8. Perron, P. *Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Furter Evidence from a New Approach [Text]* / P. Perron // *Journal of Economic Dynamic and Control*. – 2007. – № 12. – P. 297-332.
9. Миргород, В. Ф. Трендовый анализ на основе диагностических параллелепипедов [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // *Системні технології. Регіональний Міжвуз. зб. наук. праць*. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3(80). – С. 97-104.
10. Деренг, Е. В. Комбинированный метод ТАТ обработки многомерных временных рядов [Текст] / Е. В. Деренг, И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород // *Системні технології. Регіональний Міжвуз. зб. наук. праць*. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 4(87). – С. 21-27.
11. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница» - SSA: анализ временных рядов [Текст] / Н. Э. Голяндина. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.

Поступила в редакцию 1.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. Б. Копытчук, ОНПУ, Одесса.

## ПРОГНОЗ ПОВЕДІНКИ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТД

**В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг**

В роботі обґрунтовується підхід до прогнозування значень тимчасових рядів, утворених параметрами реєстрації стану силових і енергетичних установок в їх тривалій експлуатації. Запропонований підхід ґрунтовано на формуванні статистичної моделі у вигляді поліноміальної апроксимації трендів відхилень взаємозалежностей вимірюваних вихідних змінних в режимах, що встановилися. Для тимчасових рядів, матриця автокореляції яких має переважаюче власне значення, пов'язане з трендовою компонентою, на основі її екстраполяції і рішення зворотної задачі МГК виконується прогноз майбутніх значень ряду. Вирішено прикладну задачу прогнозу значень параметрів реєстрації технічного стану силової установки літального апарату в його тривалій експлуатації.

**Ключові слова:** діагностика, тимчасові ряди, трендовий аналіз, прогнозна оцінка.

### BEHAVIOR PROGNOSIS OF TIME SERIES IN PROBLEMS OF GTE TECHNICAL STATE ESTIMATION

**V. F. Mirgorod, E. V. Dereng**

Approach to prognosis estimation of temporal series values that formed by registration parameters of the power and power options state during their protracted exploitation is justified in the article. Offered approach based on statistical model forming as polynomial approximation of trends of interconnection rejections of which of measurable output variables at set modes. For time series, the matrix of autocorrelation has the predominating own value that related to the trend component on the basis of matrix extrapolation and decision of reverse interconnections of MMC the prognosis of future series values is executed. The applied problem of prognosis of registration parameters values of the technical state of aircraft power-plant during its long exploitation is decided.

**Keywords:** diagnostics, temporal series, trend analysis, prognosis estimation.

**Миргород Владимир Федорович** – вед. науч. сотр., АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

**Деренг Евгения Владимировна** – аспирант, Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова, Киев, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.