

УДК 004.942

В. Ф. МИРГОРОД¹, Е. В. ДЕРЕНГ²¹ АО «Элемент», Одесса, Украина² ИПМЭ НАНУ, Киев, Украина

ОЦЕНКА ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ТРЕНДОВОЙ КОМПОНЕНТЫ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В работе обосновывается подход к интервальной оценке трендовой компоненты временных рядов, образованных параметрами регистрации состояния силовых и энергетических установок в их длительной эксплуатации. Предлагаемый подход основан на формировании диагностической модели в виде полиномиальной аппроксимации взаимозависимостей измеряемых выходных переменных в установившихся режимах и выделении отклонений от указанной модели. Для полученных многомерных массивов отклонений последовательно используются известные методы сингулярного спектрального и трендового анализа. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет превалирующее собственное значение, установлена интервальная оценка трендовой компоненты. Решена прикладная задача интервальной оценки трендовой компоненты для установления и прогноза технического состояния силовой установки летательного аппарата в его длительной эксплуатации.

Ключевые слова: диагностика, временные ряды, трендовый анализ, интервальная оценка.

Введение

Для управления жизненным циклом ГТД в составе силовых и энергетических установок в настоящее время используется стратегия эксплуатации по их техническому состоянию. Повышение надежности статистических выводов о техническом состоянии таких объектов является основной проблемой, как для теории, так и для практики применения систем технической диагностики (СТД). Ее решение достигается как на основе усовершенствования инструментальных средств, так и путем использования и развития методов трендового анализа временных рядов, образуемых регистрируемыми термогазодинамическими и вибропараметрами (изменяемыми переменными состояниями и выходными переменными ГТД).

Задача исследования зависимостей, выделения трендов в указанных многомерных временных рядах, установления их интервальных оценок на заданном уровне значимости имеет важное научно-прикладное значение, в частности, применительно к СТД силовых и энергетических установок на основе ГТД, как общепромышленного, так и авиационного назначения.

1. Формулирование проблемы

Объектом настоящего исследования являются процессы изменения технического состояния ГТД в

составе силовых и энергетических установок в длительной эксплуатации в виде трендов регистрируемых параметров.

Предметом исследования являются статистические модели (СМ) порождения данных и методы трендового анализа, позволяющие установить закономерности развития трендовой компоненты и ее доверительные интервалы [1, 2, 4, 6].

Известные трендовые критерии [4] позволяют установить лишь факт отсутствия тренда на заданном уровне значимости, поскольку именно так формулируется опорная гипотеза [8]. Опыт их применения в СТД свидетельствует о недопустимо высоком уровне ошибок как первого (пропуск тренда), так и второго (ложная тревога) рода. Пропуск тренда влечет тяжелые последствия, как это показано в [6]. Для снижения вероятности пропуска тренда порог принятия решения трендового критерия понижается, что приводит к росту потока ложных тревог. Ложная тревога приводит к необоснованному снятию двигателя с эксплуатации и соответствующим экономическим потерям. Поэтому доверие к трендовым критериям в эксплуатирующих организациях в настоящее время находится на весьма низком уровне. Методы трендового анализа, позволяющие непосредственно выделить трендовую компоненту временного ряда, дают возможность повысить надежность статистических выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов. Однако зачастую объем выборки не является значительным, применяемые статистики являются выборочными, по-

этому остается нерешенным вопрос об уровне значимости выделенной трендовой компоненты и доверительных интервалах ее оценки.

Целью настоящего исследования является интервальная оценка трендовой компоненты временного ряда, образованного совокупностью отклонений параметров регистрации состояния силовых и энергетических установок от СМ, и установления уровня ее статистической значимости.

2. Решение проблемы

Следуя современным методам трендового анализа (SSA, "Гусеница"), полная информация об изменении временного ряда содержится в траекторной матрице X_t размером $n \times k$ [3]:

$$\begin{aligned} X_1 &= [x_1 x_2 \dots x_n], \\ X_2 &= [x_2 x_3 \dots x_{n+1}], \\ &\dots \\ X_k &= [x_k x_{k+1} \dots x_{n+k-1}]. \end{aligned} \quad (1)$$

В качестве СМ порождения данных в данной работе предлагается следующая модель совокупности трендовой и шумовой компонент:

$$\bar{x}_k = [x_k x_{k+1} x_{k+2} \dots x_{k+n-1}] = \bar{x}_{tr} + \bar{x}_{noise}. \quad (2)$$

Задача анализа выборки данных (1) состоит в разделении каждой из ее строк в виде (2) на заданном уровне значимости.

Решение указанной задачи достигается последовательной реализацией следующих этапов [11]:

1. Выполняется решение задачи на собственные значения

$$X_t X_t^T \bar{u}_i = \lambda_i \bar{u}_i, \quad (3)$$

где столбцы \bar{u}_i образуют матрицу U из ортогональных векторов матрицы $X_t X_t^T$.

2. Определяется [1,5] матрица главных компонент временного ряда

$$F = U^T X_t, \quad (4)$$

где ее строки упорядочены по убыванию собственных чисел матрицы $X_t X_t^T$.

3. Выполняется разложение строк матрицы (1) по главным компонентам (4)

$$\bar{x}_s = \sum_{i=1}^k b_{si} \bar{f}_i, \quad (5)$$

где $s = \overline{1, k}$, b_{si} – коэффициенты влияния, определяемые решением переопределенной ($n > k$) системы линейных алгебраических уравнений:

$$F^T \bar{b}_s = \bar{x}_s. \quad (6)$$

4. Отыскивается решение (6) с использованием псевдообратной матрицы [5]:

$$\bar{b}_s^T = (FF^T)^{-1} F \bar{x}_s^T. \quad (7)$$

Так как $(FF^T) = \text{diag}\{\lambda_i\}, i = \overline{1, k}$, то из (7) следует

$$b_{sj} = \bar{x}_s \bar{f}_j^T / (\bar{f}_j \bar{f}_j^T) = \lambda_j^{-1} \bar{x}_s \bar{f}_j^T, \quad (8)$$

где \bar{f}_j – строки матрицы главных компонент. Если собственное число $\lambda_1 = \lambda_{\max}$ соответствует трендовой компоненте, то согласно (8), получаем

$$\bar{x}_{tr,s} = b_{s1} \bar{f}_1. \quad (9)$$

Как свидетельствует опыт практического применения [6,9] рассмотренного подхода, если во временном ряде присутствует статистически значимый тренд, то он связывается с максимальным собственным числом (дисперсией) матрицы автокорреляций $X_t X_t^T$. Такое собственное число существенно превосходит иные собственные числа. В [11] предлагается гипотеза, что такое существенное различие первого собственного значения от всех иных эквивалентно равномерности элементов связанного с ним собственного вектора.

Для подтверждения предлагаемой гипотезы и установления условий ее применения рассмотрим следующее Утверждение.

Утверждение.

Пусть задан временной ряд и его траекторная матрица (1). Если траекторная матрица удовлетворяет гипотезе о равнокоррелированности ее строк, то первая центрированная компонента (9) временного ряда по первой главной компоненте есть скользящее среднее этого ряда. Такая гипотеза опровергается на заданном уровне значимости распределения

χ^2 решающей статистикой коррелированности признаков (строк траекторной матрицы). Если, кроме того, шумовая компонента удовлетворяет условиям выборки из генеральной совокупности независимых нормально распределенных случайных величин, то доверительный интервал трендовой компоненты определяется интервальной оценкой среднего.

Доказательство Утверждения приведено в [11].

Решающая статистика коррелированности (нормированная матрица автокорреляций $X_t X_t^T$) принадлежит классу матриц и приведена в [1].

Для оценки условий применимости предлагаемого подхода решена прикладная задача интервальной оценки тренда параметров реального объекта. Выполнен дальнейший углубленный анализ баз данных регистрации технического состояния маршевой двигательной установки (МДУ) самолета Ил-76 с двигателем ПС-90А в длительной эксплуатации [6, 9, 10].

В соответствии с изложенным в [6] подходом, анализу подвергались ряды из отклонений параметров регистрации от полиномиальных регрессионных моделей взаимозависимостей переменных в установившихся режимах (статических характеристик). Результаты применения предлагаемого подхода для МДУ иллюстрируют рис. 1, на котором представлены выборка, тренд и его интервальная оценка для временного ряда отклонений от полиномиальной статической модели (СМ) приведенных параметров повышения давления за компрессором, рис. 2, характеризующий те же параметры по температуре газов, и рис. 3 по оборотам турбины низкого давления.

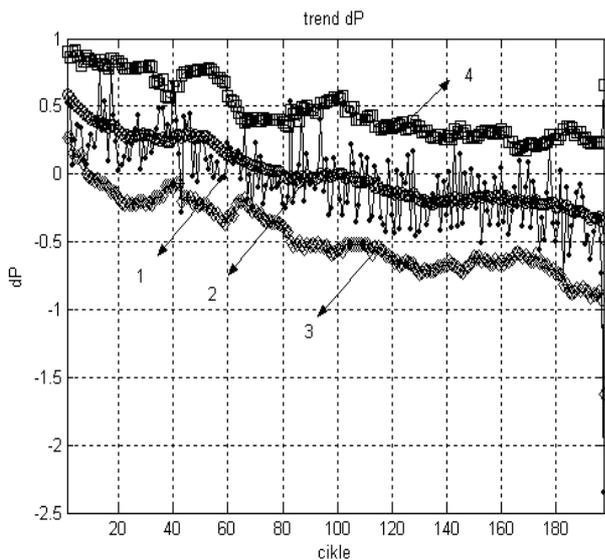


Рис. 1. Параметры давления:
1 – выборка отклонения от СМ, 2 – тренд,
3 – нижний доверительный интервал, 4 – верхний доверительный интервал

Анализ выполнен по траекторным матрицам параметров двигателя, которые регистрировались в течение 218 полетных циклов (более года). Окно трендового анализа составило 20 полетных циклов.

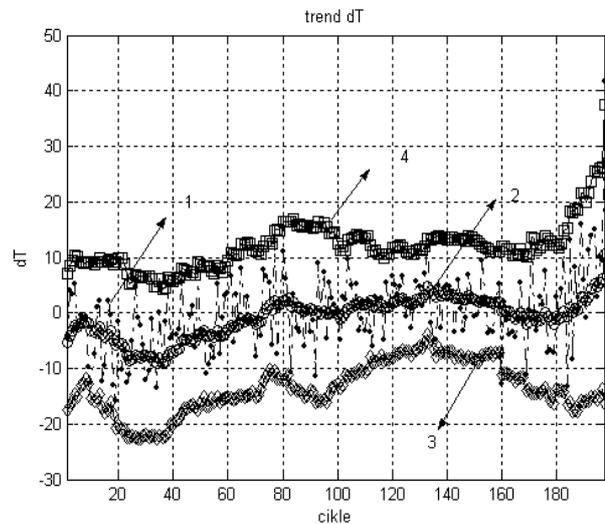


Рис. 2. Параметры температуры:
1 – выборка отклонения от СМ; 2 – тренд;
3 – нижний доверительный интервал;
4 – верхний доверительный интервал

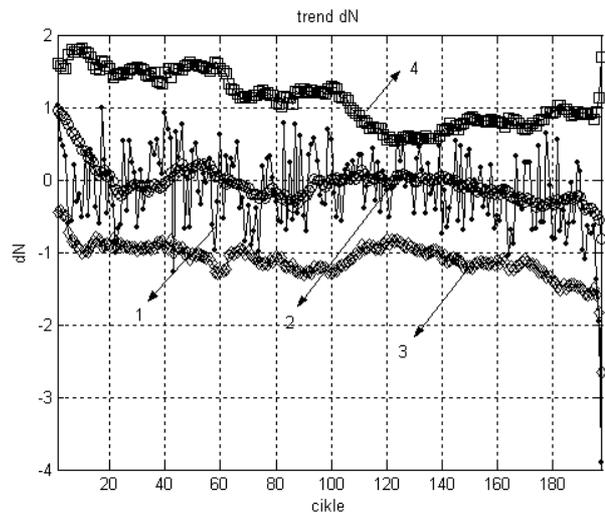


Рис. 3. Параметры оборотов:
1 – выборка отклонения от СМ; 2 – тренд;
3 – нижний доверительный интервал; 4 – верхний доверительный интервал

Приведенное выше Утверждение подтверждается для всех анализируемых временных рядов. Рисунок 4 иллюстрирует превалирующее значение первого собственного числа в распределение собственных значений матрицы автокорреляций временного ряда параметров давления, на рис. 5 представлено практически равномерное распределение элементов первого собственного вектора.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) для элементов первого собственного вектора составило

1,5449e-004. Тест Стьюдента равнокоррелированности строк траекторной матрицы подтверждается на уровне значимости 0,05 для всех анализируемых временных рядов. СКО тренда, полученного согласно (9), и скользящего среднего составило 0,45 % для параметров давления, 2,5 % для параметров температуры, 2,9 % для параметров оборотов. Таким образом, оценка трендовой компоненты методом скользящего среднего не имеет статистически значимой разницы по сравнению с оценкой методом SSA. Однако вычислительная сложность такого подхода существенно меньше и позволяет установить доверительные интервалы трендовой компоненты.

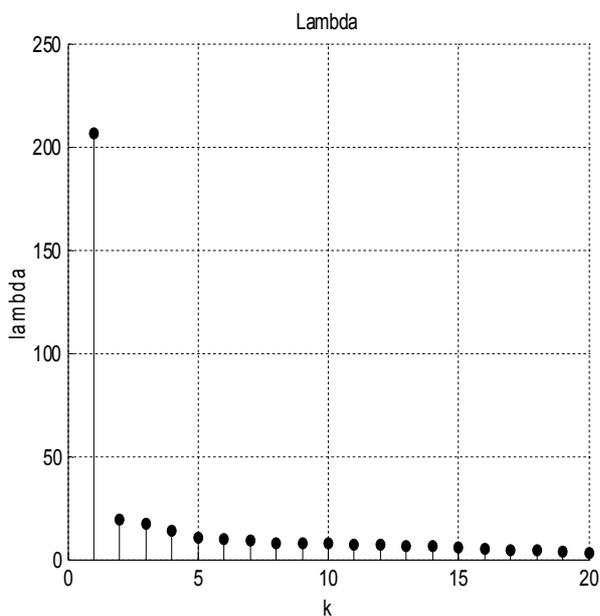


Рис. 4. Распределение собственных значений

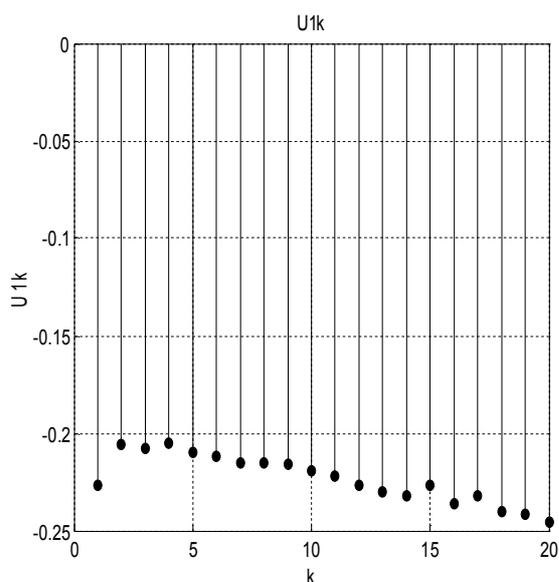


Рис. 5. Распределение элементов первого собственного вектора

Доверительные интервалы трендов определены для вероятности 99,99 %. Для всех анализируемых параметров характерно расширение доверительных интервалов на финишном участке эксплуатации МДУ (рис. 6 и рис. 7), что может быть существенным диагностическим признаком.

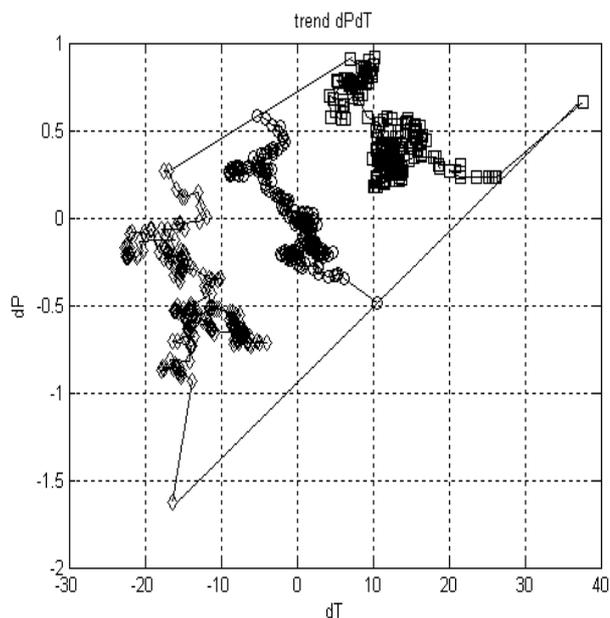


Рис. 6. Совместные доверительные интервалы трендов давления и температуры

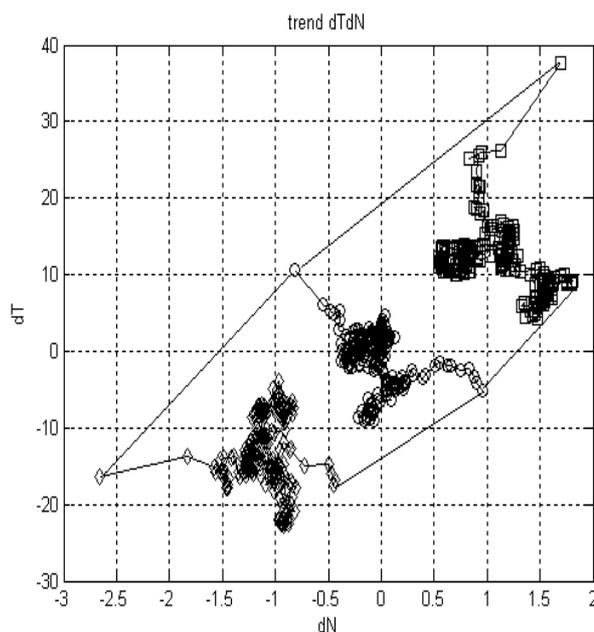


Рис. 7. Совместные доверительные интервалы трендов температуры и оборотов

Как это следует из результатов обработки данных регистрации и видно на иллюстрациях, информативность трендового анализа может быть существенно повышена при использовании предлагаемой

интервальной оценки трендовой компоненты временного ряда. Дополнительным диагностическим признаком является изменение ширины коридора вероятного нахождения тренда на заданном уровне значимости.

Снижение степени повышения давления при поддержании оборотов турбины высокого давления означает, что на рабочей характеристике двигателя верхняя компрессорная ветка постепенно проваливалась, что сопровождалось потерей запасов газодинамической устойчивости. Увеличение дисперсии флуктуаций давления за компрессором как предвестника помпажа двигателя хорошо известный факт. Увеличение дисперсии отклонений температуры газов обусловлено повышением расхода топлива для поддержания тяги, что привело к переходу на участок характеристики двигателя температура-расход топлива с большей крутизной. Таким образом, полученные результаты интервальной оценки трендов допускают ясную физическую интерпретацию, что подтверждает их правомерность.

Заключение

Последовательное сочетание методов выделения трендовой компоненты и вероятностной оценки ее доверительных интервалов позволяет расширить признаковое пространство принятия решений и, тем самым, повысить надежность диагностических выводов. Такое расширение возможно на основе формирования многомерных массивов из данных регистрации технического состояния и их аппроксимации методом главных компонент. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет преобладающее собственное значение, может быть найдена интервальная оценка трендовой компоненты.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов прогноза интервальной оценки трендов.

Литература

1. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности [Текст] : справ. изд. / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, Е. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин ; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.*
2. *Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] : моногр. / Дж. Бендат. – М. : Мир, 1989. – 540 с.*
3. *Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница” [Текст] / под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жигляевского. – СПб. : Санкт-Петербургский ун-т, 1997. – 566 с.*
4. *Епифанов, С. В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, В. И. Кузнецов, И. И. Богдаенко. – К. : Техника, 1998. – 312 с.*
5. *Марпл мл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] : пер. с англ. / 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 // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9(56). – С. 192-197.*
7. *Elsner, J. B. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis [Text] / J. B. Elsner, A. A. Tsonis. – New York, London: Plenum Press, 1996. – 164 p.*
8. *Perron, P. Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Further Evidence from a New Approach [Text] / P. Perron // *Journal of Economic Dynamic and Control*. – 1988. – Vol. 12, No. 2. – P. 297-332.*
9. *Миргород, В. Ф. Трендовый анализ на основе диагностических параллелепипедов [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // *Системні технології : Регіональний міжвузівський 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 міжвузівський зб. наук. праць*. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 4(87). – С. 21-27.*
11. *Миргород, В. Ф. Интервельная оценка трендовой компоненты временных рядов [Текст] / В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг, И. М. Гвоздева // *Системные технологии : материалы 12 Междунар. научно-практ. конф.* – Днепропетровск, 2014. – Вип. 3 (92)/ – С. 57-65.*

Поступила в редакцию 14.04.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. Б. Копытчук, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

ОЦІНКА ДОВІРЧИХ ІНТЕРВАЛІВ ТРЕНДОВОЇ КОМПОНЕНТИ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ*В. М. Миргород, Е. В. Деренг*

В роботі обґрунтовується підхід до інтервальної оцінки трендової компоненти тимчасових рядів, утворених параметрами реєстрації стану силових і енергетичних установок в їх тривалій експлуатації. Запропонований підхід засновано на формуванні діагностичної моделі у вигляді поліноміальної апроксимації взаємозалежностей вимірюваних вихідних змінних в режимах, що встановилися, і виділенні відхилень від вказаної моделі. Для отриманих багатовимірних масивів відхилень послідовно використовуються відомі методи сингулярного спектрального і трендового аналізу. Для тимчасових рядів, матриця автокореляції яких має переважаюче власне значення, встановлена інтервальна оцінка трендової компоненти. Вирішена прикладна задача інтервальної оцінки трендової компоненти для встановлення і прогнозу технічного стану силової установки літального апарату в його тривалій експлуатації.

Ключові слова: діагностика, часові ряди, трендовий аналіз, інтервальна оцінка.

CONFIDENTIAL INTERVALS ASSESSMENT OF TREND COMPONENTS OF TEMPORARY RANKS*V. F. Mirgorod, E. V. Dereng,*

Approach to an interval assessment of trend components of the temporary ranks formed by registration parameters of a state of power and power plants during their long operation is justified in this article. Offered approach is based on formation of diagnostic model in the form of polynomial approximation of interdependence of measured output variables in the modes which established and by allocation of deviations from the specified model. To receive multidimensional massifs of deviations well known methods of the singular spectral and trend analysis consistently are used. For the temporary ranks which matrix of autocorrelation has prevailing own value, the interval assessment trend components is established. The applied problem of an interval assessment of trend components for establishment and the forecast of technical state of the aircraft power plant during its long operation is solved.

Keywords: diagnostics, temporary ranks, trend analysis, interval assessment.

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 НАНУ, Киев, Украина, e-mail: ipme@ipme.kiev.ru.