

УДК 629.4.001.4

С. В. ЕПИФАНОВ<sup>1</sup>, Б. А. ЩЕРБАНЬ<sup>1</sup>, Н. Д. БАГАУТДИНОВ<sup>2</sup>, Ю. В. ЧЕРКАСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*<sup>2</sup> *Государственное предприятие «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро им. акад. А. Г. Ивченко «Прогресс»*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Наличие алгоритмов прогнозирования в составе комплексов параметрической диагностики дает возможность осуществлять эксплуатацию авиационных ГТД по состоянию. Цель прогнозирования – оценить вероятность выхода диагностических показателей за диапазоны допустимых значений на фиксированном этапе перспективной эксплуатации. Результаты прогнозирования дополняют и обобщают выводы, полученные при выполнении допускового контроля и трендового анализа. В данной статье предложен алгоритм прогнозирования, основанный на комбинации аппроксимации методом наименьших квадратов, оценки доверительных интервалов для аппроксимации и интеграции нормальной функции плотности вероятности для распознавания исправного и неисправного состояния. Алгоритм математически формализован и реализован программно на ЭВМ. Предложенная методика используется в составе наземного автоматизированного комплекса «Диагностика-18Т» для оценки технического состояния ТРДД Д-18Т серии 3 и 3М.*

**Ключевые слова:** наземный комплекс диагностики, ТРДД, диагностический показатель, функция плотности вероятности, допусковый контроль, тренд-анализ, прогнозирование.

### Введение

Развитие авиационных ГТД военного и гражданского назначения сопровождалось совершенствованием их технических и экономических показателей, вследствие чего увеличивались конструктивная и технологическая сложность, а, следовательно, и стоимость двигателей. Условием повышения рентабельности эксплуатации авиационных ГТД в условиях высокой стоимости двигателей и жесткой конкуренции между авиакомпаниями является переход к их эксплуатации по текущему техническому состоянию.

Такая стратегия позволяет максимально снизить вероятность возникновения неисправностей и отказов, а, следовательно, сократить время обслуживания и ремонта и максимально увеличить годовой налет. Обслуживание проводится в заранее установленные сроки, а план требуемых работ формируется на основании результатов анализа полетной информации. Реализация данной стратегии требует наличия эффективных комплексов параметрической диагностики.

### 1. Основные направления параметрической диагностики

Параметрической диагностикой принято называть совокупность методик оценки технического

состояния объектов, основанных на анализе результатов измерения параметров рабочего процесса в ходе эксплуатации и испытаний. Применительно к авиационным ГТД применяются такие виды параметрического диагностирования, как допусковый контроль, трендовый анализ, прогнозирование и распознавание технического состояния.

Неисправностью в дальнейшем будем называть несоответствие диагностических показателей эксплуатационным ограничениям. Диагностическими показателями (далее – ДП) считаются числовые значения, измеренные или определенные расчетным путем на основании измерений значений других параметров с целью проверки технического состояния двигателя в целом или его отдельных функциональных систем.

Допусковый контроль (рис. 1) заключается в сравнении измеренных параметров или специально подготовленных ДП с нормами, соответствующими исправному состоянию объекта [2, 7, 8, 10]. Нормы могут быть назначены как согласно технической документации (для всех двигателей данной серии), так и определены индивидуально для конкретного двигателя на основании опыта его предыдущей эксплуатации.

Несмотря на простоту реализации, область применения данной методики ограничена. Во-первых, при таком подходе неисправность можно выявить лишь тогда, когда установленные нормы

уже будут нарушены. Во-вторых, допусковый контроль не позволяет корректно объяснить разовые (несистематические) выходы ДП за диапазон допустимых значений.

Для обеспечения эксплуатации по состоянию недостаточно лишь проверить соответствие ДП норме. Необходимо выявить возможные тенденции развития неисправностей – постепенное изменение ДП в сторону предельных значений. Данная задача решается путем трендового анализа.

В предыдущих работах авторы анализировали различные способы реализации данной методики [2, 3]. В ходе выполнения данной работы [4] наиболее соответствующим задаче поиска трендов ДП авиационных ГТД был признан интегральный S-критерий (рис. 2).

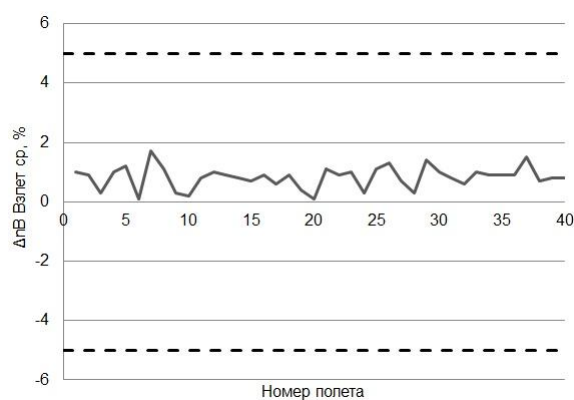


Рис. 1. Реализация допускового контроля

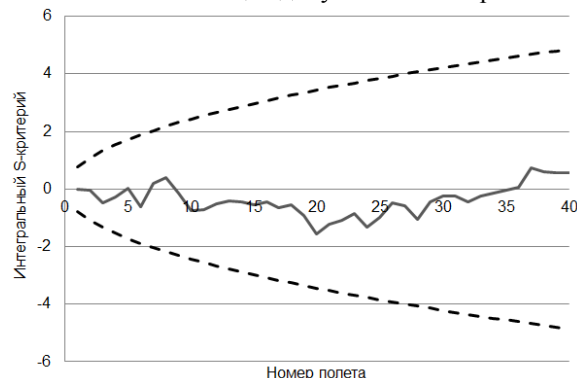


Рис. 2. Реализация трендового анализа с помощью интегрального S-критерия

Результат применения критерия тренда – проверка наличия или отсутствия стабильности проверяемого числового ряда. В качестве эталона стабильности используется интервал, назначенный пользователем. Таким образом, с помощью критерия тренда можно лишь проверить, сохранилась ли стабильность, зафиксированная на эталонном интервале в ходе последующих измерений.

Выявленная тенденция еще не свидетельствует о развитии неисправности. Во-первых, изменение параметра может происходить в сторону, противоположную предельному значению. Во-вторых, темп

тренда может быть достаточным для того, чтобы тренд был выявлен, но недостаточным для достижения порогового уровня в обозримом будущем.

Для того чтобы проверить, является ли выявленный тренд предпосылкой к неисправности, необходимо выполнить прогнозирование дальнейшего изменения ДП. Конечная цель прогнозирования – оценить, какова вероятность того, что в ходе дальнейшего развития тренда ДП выйдет за диапазон значений, соответствующий исправному состоянию двигателя.

Таким образом, все основные направления параметрической диагностики взаимно дополняют друг друга, решая свойственные им задачи. Допусковый контроль констатирует текущее техническое состояние двигателя. Трендовый анализ оценивает стабильность ДП. Прогнозирование оценивает вероятность его выхода за диапазон допустимых значений на период перспективной эксплуатации. Распознавание технического состояния решает задачу формирования конкретных эксплуатационных предписаний на основании результатов параметрического контроля. В данной статье авторы предлагают разработанный, программно реализованный и проверенный на основании полетной информации алгоритм прогнозирования.

## 2. Обзор методов прогнозирования

Существует два основных направления в прогнозировании: индивидуальное (применительно к отдельному объекту) и групповое (применительно к серии двигателей). В свою очередь, различают методы индивидуального прогнозирования, использующие для принятия решения результаты последнего определения состояния объекта, и методы, учитывающие также результаты ранее выполненных проверок [8]. К первой группе относятся следующие методы:

- прогнозирование по упрежденному допуску (сужение границ допускового контроля по сравнению с диапазоном, соответствующим исправному состоянию);
- граничный контроль (контроль на режиме работы, при котором наиболее ярко проявляется изменение технического состояния);
- прогнозирование по наличию симптомов (выявление признаков, свидетельствующих о развитии неисправностей ГТД при сохранении работоспособного состояния).

Среди методов второй группы особое место занимают алгоритмы, основанные на экстраполяции функции, образованной рядами ДП. При этом осуществляется накопление от проверки к проверке качественных и количественных признаков развития

неисправностей объекта. Этот принцип лежит в основе двух методов, предложенных в работе [8]:

- прогнозирования значения ДП по одной реализации процесса;
- прогнозирования с учетом характеристик случайного процесса изменения ДП.

В работе [7] предложены методики прогнозирования значений параметров и показателей качества объекта, в основе которых лежит полиномиальная экстраполяция числового ряда, соответствующего процессу изменения ДП, и формирование вектора параметров на основании результатов экстраполяции. Компонентами вектора являются дискретно измеренные значения параметра и ошибки выполненных измерений.

В работах [11, 12] предложена методика, представляющая собой развитие и модернизацию известного метода «Гусеница» [13]. В основе этой методики лежит выделение главной компоненты прогнозируемого временного ряда. Критериями качества методики являются достоверность и цена прогноза.

Перечисленные методики обладают двумя существенными недостатками. Во-первых, их конечная цель – оценка значения прогнозируемого ДП в последующих полетах. Поскольку исследуемый процесс является случайным, необходимо искать не само значение ДП, а диапазон, в котором он может находиться. Во-вторых, высокая математическая (а, следовательно, и программная) сложность их реализации. В данной работе предложена методика, частично решающая обе эти проблемы.

### 3. Задачи прогнозирования

В процессе прогнозирования решаются две задачи. Во-первых, оценивается функция плотности вероятности (далее – ФПВ) времени, необходимого ДП для достижения порогового уровня. Во-вторых, оценивается вероятность выхода ДП за пороговый уровень в каждом последующем полете.

К авиационным ГТД первая задача практически не имеет применения, поскольку в ходе эксплуатации двигателя его свойства постоянно изменяются в связи с постепенным износом лопаток и уплотнений, увеличением зазоров и т.д. Кроме того, выполнение работ по обслуживанию двигателя, как правило, сказывается на параметрах рабочего процесса. Следовательно, выполнять прогнозирование можно лишь на относительно коротком участке, в ходе которого влияние внешних факторов на изменение свойств системы незначительно.

Поэтому для эксплуатации ГТД более востребована вторая задача прогнозирования. Например, при выявлении тренда какого-либо из ДП есть воз-

можность оценить вероятность развития неисправности в течение заранее известного количества полетов до ближайшего запланированного технического обслуживания двигателя. Результат прогнозирования позволит принять решение о целесообразности проведения досрочного технического обслуживания. В данной работе рассмотрен алгоритм, адаптированный для решения именно этой задачи.

### 4. Описание алгоритма

Предлагаемый алгоритм последовательно реализует следующие методики:

- линейную аппроксимацию числового ряда с помощью метода наименьших квадратов;
- определение области допустимых значений для аппроксимирующей линии [14];
- построение нормальной ФПВ для оценки относительной площади участков, соответствующих вероятности неисправности [9].

Рассматриваемый период эксплуатации двигателя можно условно разделить на три интервала (рис. 3). В качестве эталонного (первого) участка выбирается интервал времени, на котором двигатель был исправен. Контрольный участок (второй) продолжается от завершения эталонного  $N_{Этал}$  до выполнения последнего полета  $N_{Полет}$ . На данном этапе выполняется тренд-анализ диагностических показателей, а также два первых этапа алгоритма прогнозирования. Граница между первым и вторым участками назначается пользователем. Участок прогнозирования (третий) представляет последующий период эксплуатации двигателя.

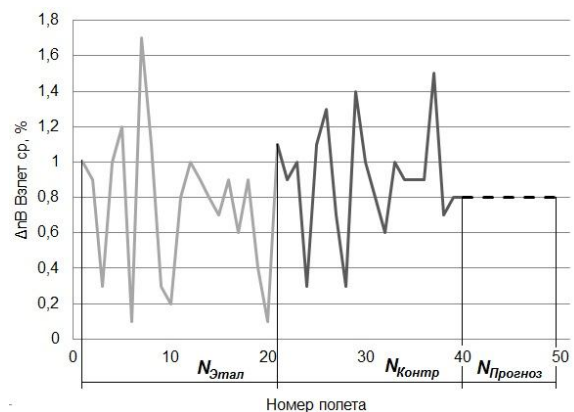


Рис. 3. Этапы времени эксплуатации двигателя при решении задачи прогнозирования

В качестве примера реализации алгоритма рассмотрим прогнозирование изменения среднего отклонения  $\Delta n_{Взлет\ ср}$  приведенной частоты вращения ротора вентилятора на контрольном участке этапа взлета от дроссельной характеристики, построенной по данным прямо-сдаточных испытаний двигателя.

Первым этапом алгоритма является линейная аппроксимация исследуемой выборки на контрольном участке методом наименьших квадратов. Использование линейной аппроксимации, по сравнению с полиномом 2-го порядка и выше, позволяет избежать последующего искривления линии прогноза. Это связано с тем, что при увеличении степени полинома характеристика становится чувствительной к случайным колебаниям числового ряда, следовательно, в этом случае ошибка прогноза увеличивается [8]. Метод наименьших квадратов выбран как наиболее простой в реализации. Итог аппроксимации – расчет коэффициентов уравнения линии прогноза  $k_0$  и  $k_1$ :

$$Y_{\text{аппр } i} = k_0 + k_1 \cdot i. \quad (1)$$

Для этого необходимо решить систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} a_{00}k_0 + a_{01}k_1 = b_0, \\ a_{10}k_0 + a_{11}k_1 = b_1. \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения  $a$  и  $b$ :

$$\begin{aligned} a_{r,k} &= \sum_{i=0}^n (X_i^{r+k}), \\ b_r &= \sum_{i=0}^n (X_i^r * Y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Y$  – значения исследуемого ДП;

$X$  – соответствующие  $Y$  значения времени.

Коэффициенты  $a_{r,k}$  и  $b_r$  образуют матрицы  $A$  и  $B$ . После их расчета по формуле (3) система уравнений (2) решается путем замены столбцов матрицы  $A$  столбцом матрицы  $B$ . Коэффициенты  $k_0$  и  $k_1$  равны отношению определителя матрицы, полученной при замене соответствующего столбца к определителю исходной матрицы  $A$ :

$$k_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta}, \quad k_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – определитель исходной матрицы  $A$ ;

$\Delta_0, \Delta_1$  – определители матриц, полученных при замене соответствующих столбцов матрицы  $A$  столбцом матрицы  $B$ .

Полученная аппроксимирующая линия является наиболее вероятным вариантом дальнейшего протекания процесса. Диапазон возможных вариантов аппроксимации, в свою очередь, зависит от двух факторов: значения среднеквадратического отклонения исследуемого ДП и количества точек на контрольном интервале. Чтобы учесть все варианты и ограничить область возможного протекания процесса, необходимо рассчитать и построить доверительные интервалы (далее – ДИ) для выполненной ранее аппроксимации. Общая формула для расчета координат ДИ [14]:

$$\begin{aligned} Y_{\text{ДИ } i} &= Y_{\text{аппр } i} \pm \tau_a \sigma_{R i}, \\ i &= N_{\text{Этал}} \dots N_{\text{Полет}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tau_a$  – коэффициент распределения Стьюдента, зависит от количества точек на контрольном участке  $\Delta N$  и принятой вероятности правильного диагноза;

$\sigma_{R i}$  – выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО).

Оценка СКО уравнения линии прогноза:

$$\begin{aligned} \sigma_{R i} &= \sqrt{\sigma_{k0} + (X_i - X_{\text{ср}})^2 \cdot \sigma_{k1}}, \\ i &= N_{\text{Этал}} \dots N_{\text{Полет}}. \end{aligned} \quad (6)$$

СКО коэффициентов  $k_0$  и  $k_1$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{k0} &= \sigma_Y^2 \left( \frac{1}{\Delta N} + \frac{X_{\text{ср}}}{\sum_{i=N_{\text{Этал}}}^{N_{\text{Полет}}} (X_i - X_{\text{ср}})^2} \right), \\ \sigma_{k1} &= \frac{\sigma_Y^2}{\sum_{i=N_{\text{Этал}}}^{N_{\text{Полет}}} (X_i - X_{\text{ср}})^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\sigma_Y$  – СКО исследуемого ДП на контрольном интервале.

На рис. 4 показаны результаты аппроксимации массива ДП, а также ДИ для аппроксимирующей линии, полученные по описанной методике средствами Microsoft Excel.

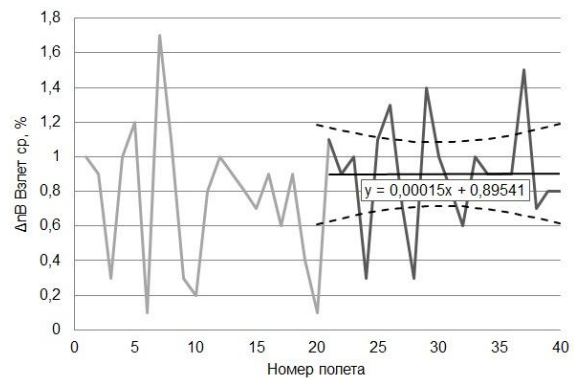


Рис. 4. Результат построения ДИ для аппроксимирующей линии

Третий этап – экстраполяция аппроксимирующей линии и границ ДИ на интервал прогнозирования. Экстраполяция линии прогноза заключается в продлении ее по формуле (1) на установленное количество последующих полетов. Экстраполяцию границ ДИ предлагается осуществить путем построения касательных к описывающим их линиям. Для этого необходимо аппроксимировать границы ДИ по методике, идентичной описываемой ранее, с той лишь разницей, что в данном случае точки заменяются не прямой линией, а квадратичной параболой (полиномом 2-го порядка).

По мере удаления от точки, соответствующей последнему выполненному полету, диапазон, в котором может протекать процесс, увеличивается. Чем меньше точек содержит контрольный интервал и чем выше СКО исследуемого ДП, тем большим будет это расхождение (рис. 5, 6). Опыт применения

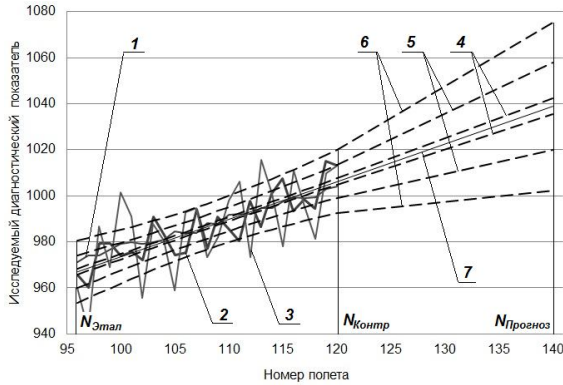


Рис. 5. Влияние СКО выборки ДП на ширину границ ДИ:

1, 2, 3 – исследуемая выборка (соответственно  $\sigma_1 = 1,3$ ;  $\sigma_2 = 7,0$ ;  $\sigma_3 = 14$ ); 4, 5, 6 – границы ДИ; 7 – экстраполяция аппроксимирующей линии

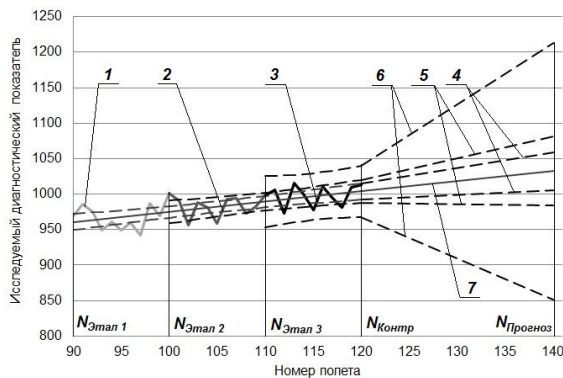


Рис. 6. Влияние размера контрольного интервала на ширину границ ДИ:

1, 2, 3 – исследуемая выборка (соответственно  $N_{\text{Контр} 1} = 30$ ,  $N_{\text{Контр} 2} = 20$ ,  $N_{\text{Контр} 3} = 10$ ); 4, 5, 6 – границы ДИ; 7 – экстраполяция аппроксимирующей линии

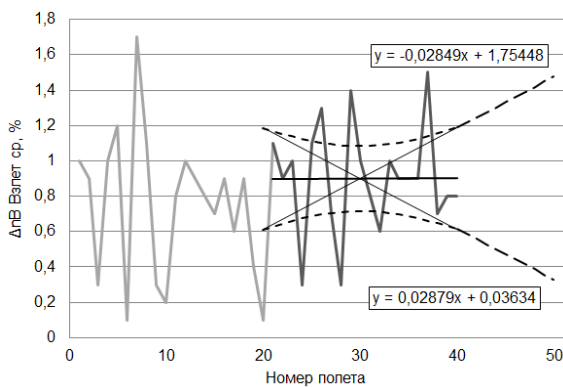


Рис. 7. Результат экстраполяции аппроксимирующей линии и границ ДИ

методики показывает, что количество последующих полетов для прогнозирования рекомендуется выбирать в диапазоне от 5 до 30. Результат экстраполяции показан на рис. 7.

Завершающий этап прогнозирования – оценка вероятности выхода ДП за диапазон допустимых значений на этапе прогнозирования. В качестве модели принимается допущение, что рассматриваемый числовой ряд случайных величин имеет нормальное распределение.

Линия, экстраполирующая результат аппроксимации, показывает наиболее вероятный вариант протекания процесса, его математическое ожидание (далее – МО). Линии, продлевающие ДИ, показывают диапазон между наиболее интенсивным и наименее интенсивным вариантами протекания процесса. Фактически эти линии ограничивают диапазон разброса случайной величины. По мере отдаления от момента начала прогнозирования поле допуска расширяется, следовательно, значение СКО ДП увеличивается:

$$\sigma_{\text{Прогноз } i} = \frac{1}{6}(Y_{\text{Верх } i} - Y_{\text{Нижн } i}), \quad (8)$$

$$i = N_{\text{Полет}} \dots N_{\text{Прогноз}}$$

Вероятности выхода параметра за пороговый уровень соответствует относительная площадь участка, отделенного линиями предельных значений (рис. 8). В рассматриваемом примере ДП имеет два пороговых уровня, и вероятности в обоих случаях считаются отдельно. Относительная площадь участка, отделенного пороговым уровнем:

$$\bar{S}_{\text{Макс } i} = 0,5 - \frac{Y_{\text{Макс}} - Y_{\text{аппр } i}}{\sigma_{\text{Прогноз } i}};$$

$$\bar{S}_{\text{Мин } i} = 0,5 - \frac{Y_{\text{аппр } i} - Y_{\text{Мин}}}{\sigma_{\text{Прогноз } i}}, \quad (9)$$

$$i = N_{\text{Полет}} \dots N_{\text{Прогноз}}$$

Полученное значение относительной площади преобразуется в соответствующее значение вероятности. Вероятность выхода ДП за пороговый уровень сравнивается с назначенным предельным значением. В качестве последнего использовалось значение  $P = 7\%$ .

Оценка вероятности выхода ДП за диапазон предельных значений не выполняется в двух случаях. Первый соответствует ситуации, когда ДП вышел за этот диапазон до начала прогнозирования или в ходе него. В этом случае вероятность выхода ДП за норму априори считается равной 100%. Второй соответствует ситуации, когда тренд изменения ДП направлен в сторону, противоположную границе допустимых значений (для ДП с односторонним диапазоном допустимых значений); в этом случае



вероятность выхода ДП за предельное значение считается равной 0%.

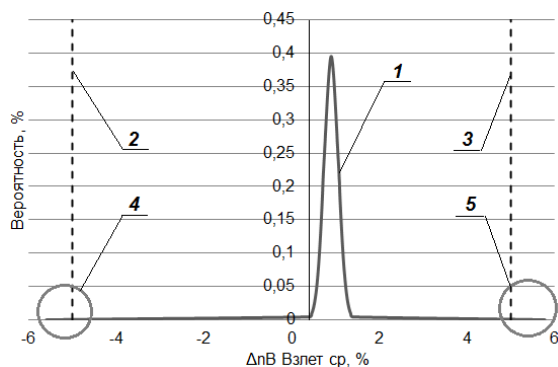


Рис. 8. Функция плотности вероятности выхода ДП за диапазон допустимых значений: 1 – ФПВ; 2, 3 – минимальный и максимальный пороговые уровни для ДП; 4, 5 – участки, относительные площади которых соответствуют вероятности выхода ДП за диапазон допустимых значений

## 5. Применение алгоритма

Как уже говорилось ранее, описанный в данной статье алгоритм прогнозирования включен в структуру наземного автоматизированного комплекса «Диагностика-18Т», предназначенного для эксплуатационного сопровождения ТРДД Д-18Т серий 3 и 3М в составе маршевых силовых установок самолетов Ан-124 «Руслан» и Ан-225 «Мрия». Рассмотрим результаты применения алгоритма к анализу полетной информации одного из двигателей в период с января по август 2010 года. За это время двигатель совершил 267 полетов, ремонтные работы в этот период не проводились.

В качестве диагностических показателей использовались параметры проточной части и показатели вибрации на контрольных участках этапов взлета и горизонтального полета. Методика выбора диагностических показателей для ретроспективного контроля описана в работе [15]. Результаты прогнозирования фиксируются ежемесячно. В качестве интервала прогнозирования использовался период последующих 15 полетов. Результаты сравнения способов выбора эталонного и контрольного этапов сведены в таблицы 1-3.

В ходе поиска оптимальной методики прогнозирования был выполнен сравнительный анализ трех способов выбора эталонного и контрольного участков. Первый способ предусматривал фиксированный эталонный этап (первые 20 полетов). В этом случае, по мере увеличения продолжительности контрольного этапа, наблюдалось снижение чувствительности критерия тренда из-за расширения гра-

ниц порогового уровня. В то же время, такой подход позволяет отслеживать тренды, имеющие длительный период развития (малый темп изменения ДП). Кроме того, по мере увеличения продолжительности этапа контроля будет сужаться диапазон возможных значений ДП на этапе прогнозирования (рис. 7), что увеличит точность прогнозирования.

Второй способ предусматривал фиксированный контрольный этап (последние 20 полетов). В этом случае к эталонному этапу будут относиться все точки, предшествующие началу контрольного этапа. При таком подходе при увеличении объема эксплуатационной информации в эталонный этап войдет процесс постепенного изменения ДП в связи с износом деталей и узлов двигателя. Следовательно, будет увеличиваться расчетное значение СКО ДП и смещаться его МО. Соответственно, чувствительность критерия тренда будет снижаться в связи с расширением порогового уровня, который зависит от значения СКО анализируемого параметра [2, 4].

Третий способ заключается в фиксации эталонного и контрольного этапов (соответственно первые и последние 20 полетов). Такой подход позволяет решить проблему снижения чувствительности критерия тренда, возникающую при выделении этапов первыми двумя способами. В то же время, при такой постановке задачи критерий способен выявить лишь тренды, темп которых делает возможным достижение порогового уровня в течение 20 точек контрольного этапа. Тренды с малой интенсивностью могут быть пропущены по причине ограниченной длины этапа контроля.

Таким образом, для решения задач прогнозирования путем оценки вероятности выхода ДП за диапазон допустимых значений можно рекомендовать первый и третий способы выделения эталонного и контрольного этапов. Первый способ позволит решить задачи выявления неисправностей с длительным периодом развития. Третий способ решает задачу выявления интенсивных трендов и сопутствующих ему неисправностей. Второй способ в наименьшей степени подходит для решения задач трендового анализа.

Следующей задачей после отработки алгоритма прогнозирования является разработка экспертной системы, которая сможет сопоставить результаты разных способов параметрического контроля и сформулировать конкретные рекомендации по дальнейшей эксплуатации двигателя.

## Заключение

Предложена методика прогнозирования технического состояния ГТД, основанная на анализе ретроспективной эксплуатационной информации и

оценке вероятности развития неисправностей на перспективном периоде эксплуатации. Алгоритм представляет собой комбинацию ранее разработанных и отлаженных методов: аппроксимации МНК, оценка ДИ для аппроксимации и применение функции плотности вероятности для оценки технического состояния двигателя.

В отличие от других наиболее известных методов прогнозирования, предложенный не прогнозирует значение ДП, а оценивает вероятность выхода

его за диапазон допустимых значений. Кроме того, его программная реализация значительно проще по сравнению с другими известными методами.

Алгоритм реализован программно на языке C++, и включен в состав алгоритмов действующего наземного автоматизированного комплекса «Диагностика-18Т». Предложены два способа использования методики для решения задач поиска неисправностей, имеющих как длительные, так и относительно короткие периоды развития.

Таблица 1

Результаты прогнозирования при фиксированном эталонном этапе

Месяц и число полетов	Выходы ДП за диапазон допустимых значений	Выявленные тренды	Вероятность выхода за норму превышает допустимую
Январь (20)	Границы не нарушены	Недостаточно полетов	
Февраль (37)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (единичные)	Снижение: $\Delta n_{ВД}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$ и $\Delta T_{ТСД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Март (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $A_{ВЗ}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $\Delta n_{ВД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Апрель (35)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $A_{ВЗ}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $\Delta n_{ВД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Май (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{ВД}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Июнь (34)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $A_{ВЗ}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $\Delta n_{ВД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Июль (30)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $A_{ВЗ}$ , $A_{ВП}$ , $\Delta n_{ВД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Август (31)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $\Delta n_{ВД}$	$\Delta T_{ТСД}$

Таблица 2

Результаты прогнозирования при фиксированном контрольном этапе

Месяц и число полетов	Выходы ДП за диапазон допустимых значений	Выявленные тренды	Вероятность выхода за норму превышает допустимую
Январь (20)	Границы не нарушены	Недостаточно полетов	
Февраль (37)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (единичные)	Снижение: $\Delta n_{ВД}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$ и $\Delta T_{ТСД}$	$\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$
Март (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Тренды отсутствуют	$\Delta T_{ТСД}$
Апрель (35)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Снижение: $\Delta n_{В}$	$\Delta T_{ТСД}$
Май (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Тренды отсутствуют	$\Delta T_{ТСД}$
Июнь (34)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Тренды отсутствуют	$\Delta T_{ТСД}$
Июль (30)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$ ; Снижение: $\Delta n_{ВД}$	$\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$
Август (31)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Тренды отсутствуют	$\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$

Таблица 3

Результаты прогнозирования при фиксированных эталонном и контрольном этапах

Месяц и число полетов	Выходы ДП за диапазон допустимых значений	Выявленные тренды	Вероятность выхода за норму превышает допустимую
Январь (20)	Границы не нарушены	Недостаточно полетов	
Февраль (37)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (единичные)	Снижение: $\Delta n_{ВД}$ , $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$ и $\Delta T_{ТСД}$	$\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$
Март (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Тренды отсутствуют	$\Delta T_{ТСД}$
Апрель (35)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Снижение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$ и $\Delta T_{ТСД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Май (40)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$	$\Delta T_{ТСД}$
Июнь (34)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Снижение: $\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$	$\Delta T_{ТСД}$
Июль (30)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$ Снижение: $\Delta T_{ТСД}$ , $\Delta n_{СД}$	$\Delta n_{В}$ , $\Delta n_{СД}$ , $\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$
Август (31)	Превышения: $\Delta T_{ТСД}$ (серия превышений)	Увеличение: $\Delta n_{В}$	$\Delta n_{ВД}$ и $\Delta T_{ТСД}$

## Литература

1. Автоматизированная система контроля надежности парка воздушных судов авиакомпании: база данных [Текст] / А. С. Якушенко, В. Е. Мильцов, В.Н. Охмакевич [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7(94). – С. 222–226.

2. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст] : монография / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко [и др.]. – К. : Техника, 1998. – 312 с.

3. Совершенствование методики подготовки исходных данных для алгоритма параметрической диагностики [Текст] / С. В. Епифанов, Б. А. Щербань, Н. Д. Багаутдинов [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7(84). – С. 218–224.

4. Епифанов, С. В. Выбор эффективных критериев тренда для алгоритмов параметрической диагностики [Текст] / С. В. Епифанов, Б. А. Щербань, Ю. В. Черкасов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №8 (95). – С. 232–240.

5. Наземный автоматизированный комплекс диагностики турбореактивного двухконтурного двигателя [Текст] / С. В. Епифанов, Б. А. Щербань, А. В. Товстик [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 10 (107). – С. 146–153.

6. Миргород, В. Ф. Применение методов трендового анализа в задачах диагностики авиационных двигателей [Текст] / В. Ф. Миргород // *Основные результаты научно-технической деятельности* : сб. науч. тр. – Одесса : АО «Элемент». – 2008. – С. 218–226.

7. Евланов, Л. Г. Контроль динамических систем [Текст] / Л. Г. Евланов. – М. : Наука, 1972. – 424 с.

8. Сиротин, Н. Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Н. Сиротин, Ю. М. Коровин. – М. : Машиностроение, 1979. – 270 с.

9. Kyriazis, A. Gas turbine fault identification by fusing vibration trending and gas path analysis [Text] / A. Kyriazis, A. Tsalavoutas // *Proceeding of ASME Turbo Expo 2009, 8-12 June 2009. – Orlando, Florida. – ASME Paper GT2009-59442.*

10. Барзилович, Е. Ю. Эксплуатация ГТД по состоянию [Текст] : монография / Е. Ю. Барзилович, В. Ф. Воскобоев. – М. : Транспорт, 1981. – 197 с.

11. Миргород, В. Ф. Прогноз поведения временных рядов в задачах оценки технического состояния ГТД [Текст] / В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг, // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 10 (117) – С. 165–168.

12. Миргород, В. Ф. Оценка доверительных интервалов трендовой компоненты временных рядов [Текст] / В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7(114). – С. 175–180.

13. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов [Текст] : учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – СПб. : СПбГУ, 2004. – 74 с.

14. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] : монография ; пер. с нем. / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 957 с.

15. Контроль технического состояния турбореактивного двухконтурного двигателя наземным автоматизированным комплексом параметрической диагностики [Текст] / С. В. Епифанов, Б. А. Щербань, А. В. Товстик [и др.] // *Авиационно-*



космическая техника и технология. – 2014. [Текст] : учеб. пособие. / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, К. А. Малиновский [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 355 с.

16. Елисеев, Ю. С. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей

Поступила в редакцию 01.06.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б. И. Кузнецов, НИИЭМ НАН Украины, Харьков.

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОХКОНТУРНОГО ДВИГУНА

*С. В. Єпіфанов, Б. О. Щербань, Н. Д. Багаутдінов, Ю. В. Черкасов*

Наявність алгоритмів прогнозування у складі комплексів параметричної діагностики дає можливість здійснювати експлуатацію авіаційних двигунів за технічним станом. Мета прогнозування – дати оцінку вірогідності виходу діагностичних ознак за діапазони дозволених значень на фіксованому етапі перспективної експлуатації. Результати прогнозування доповнюють та узагальнюють висновки, що отримані під час виконання допускового контролю та трендового аналізу. В цій статті запропоновано алгоритм прогнозування, заснований на комбінації апроксимації методом найменших квадратів, оцінки довірчих інтервалів для апроксимації та інтеграції нормальної функції щільності ймовірності для розпізнавання справного та несправного стану. Алгоритм математично формалізовано та реалізовано програмно на ЭОМ. Запропонована методика використовується у складі наземного автоматизованого комплексу «Діагностика-18Т» для оцінки технічного стану ТРДД Д-18Т серій 3 та 3М.

**Ключові слова:** наземний комплекс діагностики, ТРДД, діагностична ознака, функція щільності вірогідності, допусковий контроль, тренд-аналіз, прогнозування.

## TURBOFAN TECHNICAL CONDITION FORECAST

*S. V. Yepifanov, B. A. Scherban, N. D. Bagautdinov, Y. V. Cherkasov*

Forecast algorithms which include to the structure of on-ground parametric complexes give possibility to realize aviation GTE operation according to their technical condition. The main forecast purpose is estimation of probability of tolerance value violation by diagnosis feature at the fixed stage of future operation. Forecast results complement and synthesize output data which were calculated in the tolerance control and trend-analysis. Forecast algorithm is proposed in this article. This algorithm is based at combination of few methods: approximation by the method of least squares, the confidence intervals calculation and integration of probability density function which is used to identify normal and faulty technical condition. The algorithm is formalized by math and realized at PC. Method is used in structure of on-ground automatic complex "Diagnosis-18T" that is used to make turbofan D-18T series 3 and 3M technical condition control.

**Keywords:** on-ground diagnosis complex, turbofan, diagnosis feature, probability density function, tolerance control, trend-analysis, forecast.

**Епіфанов Сергей Валерьевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей и энергоустановок, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Щербань Богдан Александрович** – мл. науч. сотр. каф. конструкции авиационных двигателей и энергоустановок факультета авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: bogdanscherban@mail.ru.

**Багаутдинов Наиль Дахиевич** – ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», руководитель группы систем контроля и диагностики авиационных ГТД, Запорожье, Украина, e-mail: BagautdinovND@ivchenko-progress.com.

**Черкасов Юрий Владимирович** – начальник отдела регулирования электрооборудования, Запорожье, Украина, e-mail: progress@ivchenko-progress.com.