УДК 629. 735. 083. 02 /.03. 004. 58 (043.3)

О.Н. Цуриков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрены вопросы создания имитационной модели прогнозирования динамики технического состояния изделий авиационной техники в процессе эксплуатации. Проведена адаптация модели к изделиям, техническое состояние которых оценивается с помощью нескольких контролируемых параметров.

Определение оптимального режима контроля изделий авиационной техники (АТ) является одной из наиболее важных и актуальных задач, решаемых в процессе эксплуатации. Решение этой задачи невозможно без формирования прогноза динамики технического состояния этих изделий [1]. Прогнозирование динамики технического состояния изделий АТ усложняется как многообразием конструктивно-эксплуатационных факторов, которые могут повлиять на техническое состояние изделий, так и наличием управляющих воздействий, которые направлены на его восстановление. Оценка технического состояния многих изделий АТ в процессе эксплуатации производится контролируемыми параметрами. В этом случае техническое состояние изделий АТ прогнозируют на основании динамики параметров технического состояния с помощью имитационного моделирования. Исходными данными моделирования являются статистические характеристики динамики параметров в процессе эксплуатации АТ. Результат моделирования представляет собой распределение значений параметров на протяжении заданного интервала эксплуатации.

Существующие имитационные модели имеют ряд недостатков. Для определения технического состояния изделий АТ используется в большинстве случаев только один параметр. Оценка параметра производится, в основном, по величинам математического ожидания и центральных моментов первого и второго рода. По этой причине точность оценки динамики параметра, а следовательно, и технического состояния изделий АТ составляет 15-20%, что явно мало для инженерных расчетов. Многие имитационные модели недостаточно адаптированы к учету влияния конструктивно-эксплуатационных факторов и возможных управляющих воздействий на техническое состояние в процессе эксплуатации. Кроме этого, приспособленность многих имитационных моделей к возможности компьютерной реализации и учету эксплуатационной статистики весьма низкая, что уменьшает их практическую ценность.

В предлагаемой имитационной модели изделия АТ рассматривают как невосстанавливаемые в процессе эксплуатации, техническое состояние которых возможно оценить с помощью одного или нескольких контролируемых параметров. В соответствии с принятой моделью отказа выход любого параметра за пределы определенной в технической документации области работоспособности приводит к функциональному отказу изделия[2; 3].

Динамика параметра аппроксимирована с помощью однородной поглощающей марковской цепи [3]. Достоинством такой модели является получение достаточного количества квантов (например, 21), что предоставляет возможность оценки распределения значений параметра с точностью до 5% от величины области работоспособности.

Для повышения универсальности имитационной модели проведена нормировка основных моделируемых физических величин. Алгоритм нормировки сформирован в работе [2]. Проведенная нормировка позволяет определить область работоспособности всех параметров в безразмерном интервале [0,1], а моделирование динамики параметра производить на безразмерном интервале наработок [0,1].

Компьютерная реализация имитационной модели предопределяет использование марковской цепи с дискретным временем. Для этого моделируемый интервал наработки изделия T предлагается разделить на 500 шагов счета. Такое разделение позволяет определять распределение вероятностей пребывания величины параметров через интервал наработки ΔT, равный 0.002T.

Математический аппарат, позволяющий моделировать динамику распределения вероятностей пребывания параметра по квантам марковского процесса для случая однопараметрической модели, представляет собой систему уравнений Колмогорова-Чепмена вида:

$$\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_i(t_k)\Big]=\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_i(t_{k-1})\Big]+\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_{i-1}(t_{k-1})\,\lambda_{i-1,i}\Big]-\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_{i+1}(t_{k-1})\cdot\lambda_{i,i+1}\Big], \tag{1}$$

где $k\in[1,500]$-шаг счета имитационной модели; $i\in[1,21]$-номер кванта марковского процесса; $P_i(t_k)$-вероятность пребывания параметра в i-м кванте в момент времени t_k; t_k - момент времени на протяжении моделируемого интервала наработки, равный k0.002T; $\lambda_{i-1,i}$-интенсивность перехода из (i-1)-го в i-й квант.

Алгоритм определения интенсивностей перехода марковской модели разработан в работе [2]. За счет изменения интенсивностей перехода имитационная модель может учитывать большинство конструктивно-технологических факторов, влияющих на динамику технического состояния изделий АТ в эксплуатации.

Условиями нормировки (1) являются выражения:

$$\sum_{i=1}^{21}P_i(t_k)=1; \tag{2}$$

$$P_1(0)=1. \tag{3}$$

Выражение (2) является математической формулировкой утверждения о том, что параметр может находиться только в одном из определенных квантов марковского процесса. Выражение (3) математически формирует начальные условия моделирования, которые заключаются в том, что в начальный момент времени параметр находится в 1-м наилучшем с точки зрения технического состояния кванте марковского процесса.

В случае многопараметрической модели математический аппарат (1)-(3) несколько видоизменяется:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_i(t_k)\Big]=\sum_{n=1}^{N}\Big[\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_i(t_{k-1})\Big]+\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_{i-1}(t_{k-1})\,\lambda_{i-1,i}\Big]-\sum_{k=1}^{500}\Big[\sum_{i=1}^{21}P_{i+1}(t_{k-1})\cdot\lambda_{i,i+1}\Big]\Big]; \tag{4}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{21} P_i(t_k)=1; \tag{5}$$

$$\sum_{n=1}^{N} P_1(0)=1, \tag{6}$$

где N-количество параметров, по которым происходит оценка технического состояния; n-номер параметра.

Выражение (4) определяет динамику параметров для многопараметрической модели. Выражение (5) по аналогии с уравнением (2) является математической формулировкой утверждения о том, что любой из параметров может находиться только в одном из квантов марковского процесса. Выражение (6) математически формулирует начальные условия моделирования, которые заключаются в том, что в начальный момент времени все параметры находятся в 1-м наилучшем с точки зрения технического состояния кванте марковского процесса.

Для упрощения расчетов допустим постоянную для всех квантов интенсивность перехода λ. Такое упрощение практически не влияет на точность моделирования [3]. В соответствии с принятым допущением перепишем выражение (1) в виде:

$$\sum_{k=1}^{500} [\sum_{i=1}^{21} P_i(t_k)]= \sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_i\,(t_{k-1}\,)]+ \sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_{i-1}(t_{k-1})\,\lambda\,]- \sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_{i+1}(t_{k-1})\,\lambda\,]; \tag{7}$$

а выражение (4) в виде:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{500} [\sum_{i=1}^{21} P_i(t_k)]= \sum_{n=1}^{N}[\sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_i\,(t_{k-1}\,)]+ \sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_{i-1}(t_{k-1})\,\lambda\,]- \sum_{k=1}^{500}[\sum_{i=1}^{21} P_{i+1}(t_{k-1})\,\lambda\,]]. \tag{8}$$

Выражения (2), (3), (7) являются математическим аппаратом для однопараметрической модели прогноза, а выражения (5), (6), (8) - для многопараметрической модели. В виде выражений (2), (3), (7) и (5), (6), (8) модель прогноза не адаптирована к управляющим воздействиям на техническое состояние изделий АТ в процессе эксплуатации.

На основании рассмотренного математического аппарата разработана имитационная модель, реализованная на компьютере. С помощью однопараметрической и многопараметрической имитационной модели проведены расчеты динамики параметров технического состояния изделий АТ. В качестве примера многопараметрической модели принята пятипараметрическая модель. Результаты расчета позволяют построить зависимости математического ожидания и распределения значений параметра от приведенной наработки изделия. Фрагменты таких графиков для момента времени, равного 150 шагов счета, показаны на рис. 1, 2, где приняты следующие обозначения: П - нормированная величина параметра, N – номера квантов марковского процесса, t – нормированная наработка, ОТК - квант марковского процесса, соответствующий отказу, ПР – квант марковского процесса, соответствующий профилактическим работам (зарезервирован для расширения модели), k – шаг счета модели, (P_i – r) – вероятность пребывания r-го параметра в i-м кванте на k-м шаге счета.

Для проведения адаптации модели к управляющим воздействиям рассмотрим механизм их реализации для исследуемых невосстанавливаемых изделий АТ. В этом случае управляющие воздействия заключаются в снятии с эксплуатации тех изделий, параметры которых попали в поле упреждающего допуска в момент контроля. Такие управляющие воздействия называются профилактическими работами.

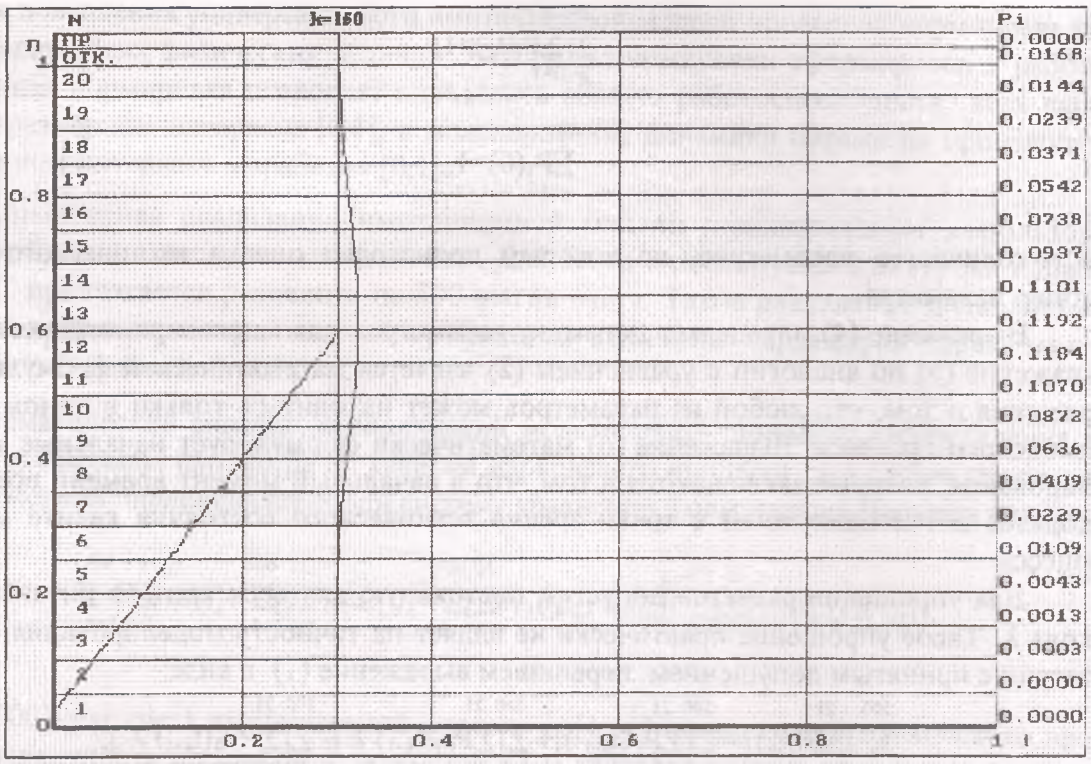

Рис.1. Динамика параметра для однопараметрической модели с интенсивностью перехода параметра λ=0.08

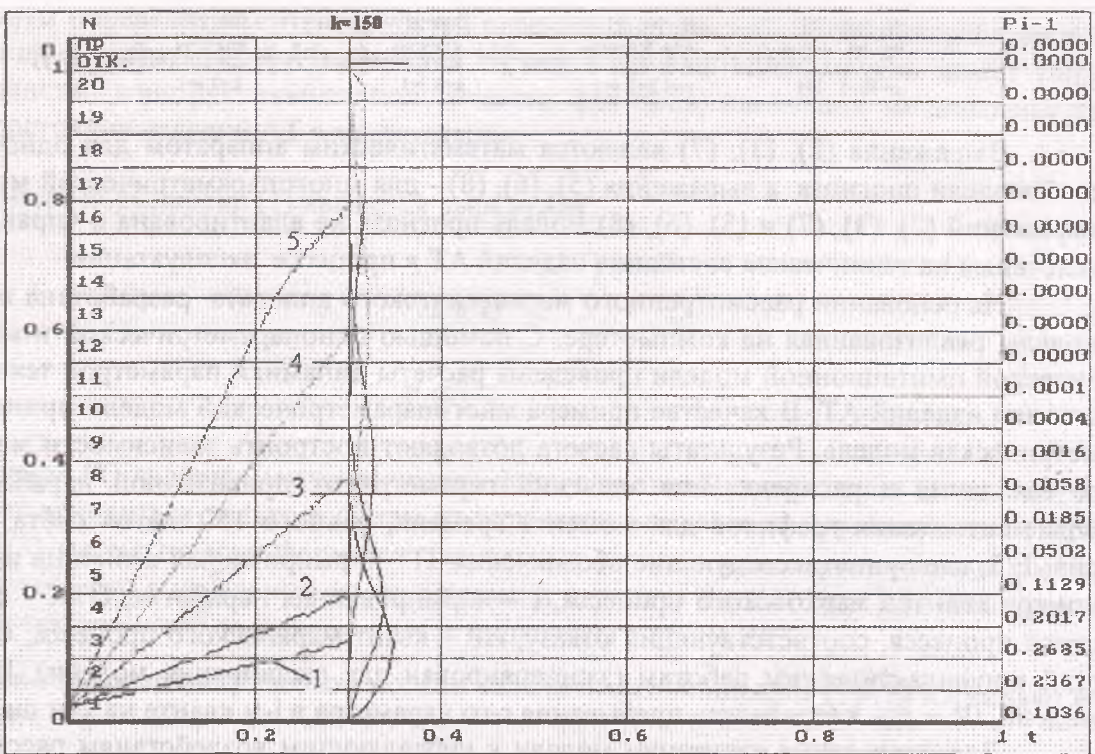

Рис.2. Динамика параметров для пятипараметрической модели с интенсивностью перехода параметров λ_1=0.015, λ_2=0.025, λ_3=0.05, λ_4=0.08, λ_5=0.12:
1, 2, 3, 4, 5 - графики математического ожидания и распределения значений 1, 2, 3, 4 и 5-го параметров

Применительно к нашей модели прогноза упреждающий допуск является величиной, кратной кванту марковского процесса, а профилактические работы будут проводиться на изделиях, параметры которых находились в квантах марковского процесса, попавших в поле упреждающего допуска в момент контроля. Расчет упреждающего допуска произведем следующим образом:

$$У_д = K\ \Psi, \tag{9}$$

где Уд – упреждающий допуск; K- величина кванта марковского процесса; Ψ - положительное целое число.

Допустим, что контроль проводится через равные между собой интервалы наработки изделия – периоды контроля. Период контроля и упреждающий допуск являются основными факторами, формирующими режим контроля. Используем модель режима контроля, предложенную в работе [3].

Условием проведения профилактических работ для изделий, параметр X которых находится в i-м кванте марковского процесса, т.е. $X \in i$, является выражение вида:

$$\text{если} \quad t_k = П_к\ \theta,\ t_k < T \text{ и } X \in i,\ i < У_д,\ i \in [1,20], \tag{10}$$

где t_k - момент времени на протяжении моделируемого интервала наработки; $П_к$ – период контроля; θ - положительное целое число; i – номер кванта марковского процесса (квант, соответствующий отказу изделия, не рассматривается).

Для определения накопленной вероятности проведения профилактических работ введем двадцать второе поглощающее состояние марковского процесса. В теории марковских процессов такое состояние называется псевдосостоянием. Подводя итог, с учетом (2), (3), (7), (9), (10) сформируем математический аппарат однопараметрической модели прогноза проведения профилактических работ:

$$\begin{cases} \text{если } t_k \neq П_к \theta,\ t_k < T, \text{ то} \\ \sum\limits_{k=1}^{500} [\sum\limits_{i=1}^{22} P_i(t_k)] = \sum\limits_{k=1}^{500}[\sum\limits_{i=1}^{21} P_i(t_{k-1})] + \sum\limits_{k=1}^{500}[\sum\limits_{i=1}^{21} P_{i-1}(t_{k-1})\ \lambda] - \sum\limits_{k=1}^{500}[\sum\limits_{i=1}^{21} P_{i+1}(t_{k-1})\ \lambda], \\ \text{если } t_k = П_к\ \theta,\ t_k < T \text{ и } X \in i,\ i < У_д,\ i \in [1,20], \\ P_{22}(t_k) = \sum\limits_{i=1}^{\Psi} P_i(t_k), \\ \sum\limits_{i=1}^{\Psi} P_i(t_k) = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Применительно к многопараметрической модели прогноза условие проведения профилактических работ видоизменяется следующим образом:

$$\text{если } t_k = П_к\ \theta,\ t_k < T \text{ и } \{X_n\} \in \{i_n\} \sum_{n=1}^{N} i < \sum_{n=1}^{N} У_{дn},\ i \in [1,20]. \tag{12}$$

В выражении (12) знак суммы определяет возможность проведения профилактических работ исходя из условия попадания любого контролируемого параметра в поле соответствующего упреждающего допуска.

Обобщив выражения (5), (6), (8), (11), (12), сформируем математический аппарат многопараметрической модели прогноза, учитывающей возможность проведения профилактических работ:

$$
\begin{cases}
\text{если } t_k \neq \Pi_к \theta, \quad \text{то} \\
\sum\limits_{n=1}^{N}\Big[\sum\limits_{k=1}^{500}\Big[\sum\limits_{i=1}^{22} P_i(t_k)\Big]\Big] = \sum\limits_{n=1}^{N}\Big[\sum\limits_{k=1}^{500}\Big[\sum\limits_{i=1}^{21} P_i(t_{k-1})\Big]+\sum\limits_{k=1}^{500}\Big[\sum\limits_{i=1}^{21} P_{i-1}(t_{k-1})\,\lambda\Big]-\sum\limits_{k=1}^{500}\Big[\sum\limits_{i=1}^{21} P_{i+1}(t_{k-1})\lambda\Big]\Big], \\
\\
\text{если } t_k = \Pi_к\ \theta,\ t_k<T \text{ и } \{X_n\}\in\{i_n\}\ \sum\limits_{n=1}^{N} i<\sum\limits_{n=1}^{N} Y_{дп},\ i\in[1,20], \\
\sum\limits_{n=1}^{N} P_{22}(t_k)=\sum\limits_{n=1}^{N}\sum\limits_{i=1}^{\Psi} P_i(t_k), \\
\sum\limits_{n=1}^{N}\ \sum\limits_{i=1}^{\Psi} P_i(t_k)=0.
\end{cases}
\qquad (13)
$$

Математический аппарат (11)-(13) послужил базой для формирования имитационной модели, с помощью которой проведено моделирование динамики параметров, с учетом возможного проведения профилактических работ. План моделирования соответствует случаю моделирования динамики параметров без учета профилактических работ. Результатами моделирования являются графики математического ожидания и распределения значений параметров (рис. 3,4).

Обозначения, принятые на рис.3, 4, соответствуют обозначениям, принятым на рис.1, 2. Особенностью рис. 3, 4 является наличие состояния профилактических работ, которое обозначено как ПР.

Анализ рис.3, 4 показывает скачкообразное изменение величины математического ожидания параметров, которое является следствием реализации профилактических работ по результатам контроля. Такое изменение объясняется результатом «обрезки» части распределения значений параметра, попавшей в упреждающий допуск во время контроля, что соответствует проведению профилактических работ. С помощью данных, приведенных в литературе [1], проведена

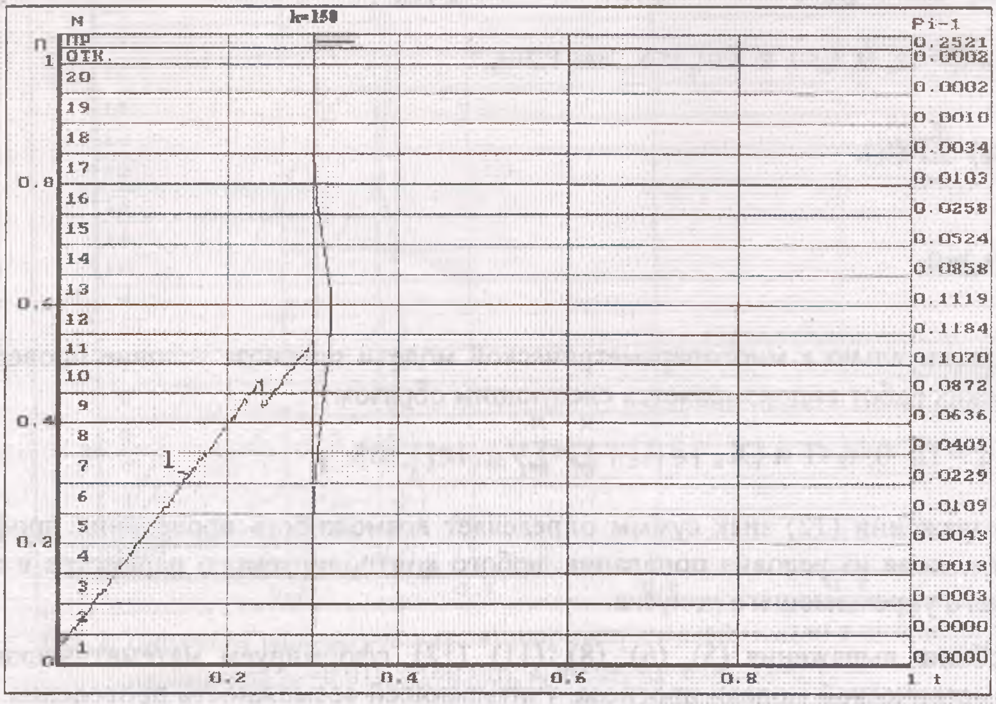

Рис.3. Динамика параметров с учетом проведения профилактических работ для однопараметрической модели прогноза с интенсивностью перехода параметра λ=0.08, периодом контроля – 40 шагов счета, нормированным упреждающим допуском – 0.4

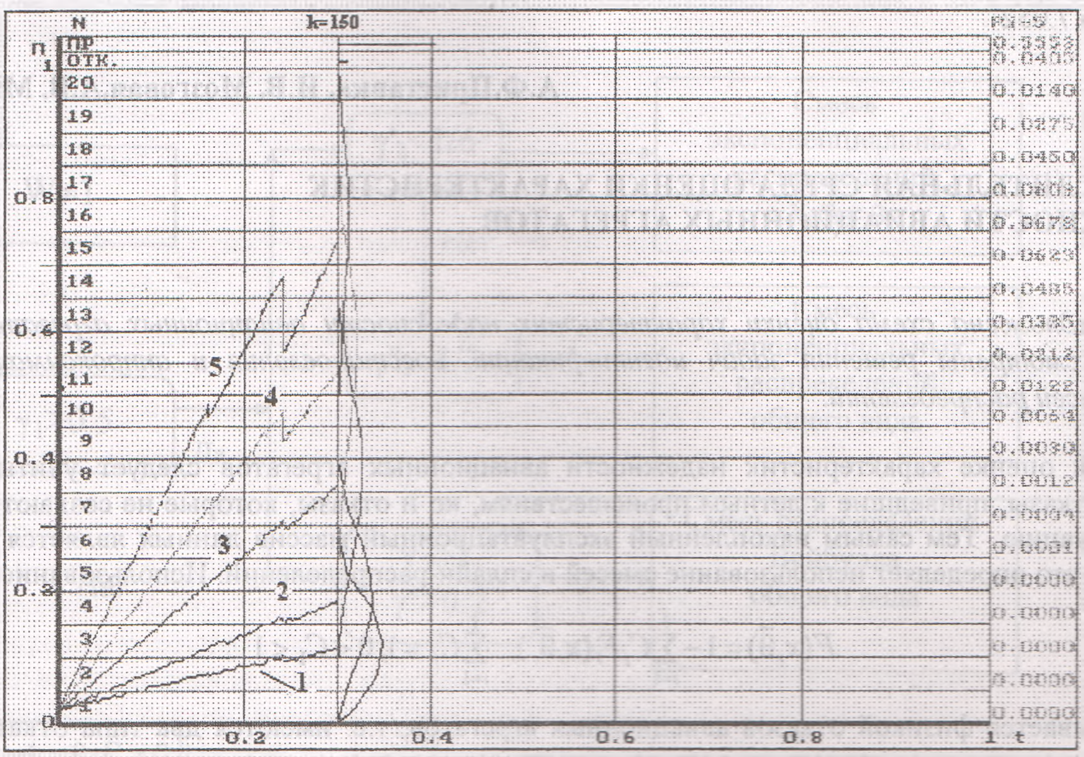

Рис.4. Динамика параметров с учетом проведения профилактических работ для пятипараметрической модели прогноза с интенсивностью перехода λ_1=0.015, λ_2=0.025, λ_3=0.05с, λ_4=0.08, λ_5=0.12, периодом контроля–40 шагов счета, нормированным упреждающим допуском на 1-й параметры - 0.8, 2-й –0.7,3-й - 0.5, 4-й -0.4, 5-й - 0.3:
1, 2, 3, 4, 5 - графики математического ожидания и распределения значений 1, 2, 3, 4 и 5-го параметров

верификация предложенной имитационной модели, которая показала ее достаточную адекватность задачам инженерного прогнозирования динамики технического состояния.

Результаты исследования показали возможность применения предложенной имитационной модели для прогнозирования динамики технического состояния изделий АТ в процессе эксплуатации. Достоинством модели является возможность использования для оценки технического состояния по нескольким контролируемым параметрам.

Список литературы

1. *Барзилович Е.Ю.* Приложение математических методов к задачам эксплуатации авиационной техники. - М.: ВВИА,1967. - 275 с.
2. *Цуриков О.Н., Терейковский И.А.* Исследование режима контроля и промывки фильтров жидкостных функциональных систем воздушных судов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К.: НАН Украины. 1999. - №1. – С.75-85.
3. *Цуриков О.Н., Терейковский И.А.* Оптимизация режима однопараметрического контроля и профилактических работ агрегатов функциональных систем воздушных судов //Вісник КМУЦА. – К.: КМУЦА,1999. - №1. – С. 7-15.

Стаття надійшла до редакції 30 грудня 1999 року.