



УДК 381
ГРНТИ 78.25.00

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ

*С.Ю. ГРИГОРОВ, кандидат педагогических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*В.В. ЛЕБЕДЕВ, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*А.В. КАЗЬМЕНКО
ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*С.В. МИТРОФАНОВА
ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье рассмотрены особенности эксплуатации объекта при переходе к техническому обслуживанию сложных технических систем с периодическим контролем. Предложены методы декомпозиции, позволяющие применять статистическое и инструментальное прогнозирование технического состояния объекта с целью сокращения затрат на техническое обслуживание.

Ключевые слова: системы эксплуатации, сложные технические системы, прогнозирование, стратегия технического обслуживания, система технического обслуживания.

OBJECT TECHNICAL CONDITION FORECASTING TAKING INTO ACCOUNT THE MAINTENANCE STRATEGY IN THE OPERATION OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS WITH PERIODIC CONTROL

*S.YU. GRIGOROV, Candidate of Pedagogic Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*
*V.V. LEBEDEV, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*
*A.V. KAZ'MENKO
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*
*S.V. MITROFANOVA
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article describes the features of the operation of the object during the transition to maintenance of complex technical systems with periodic control. Methods of decomposition are proposed that allow the use of statistical and instrumental forecasting of the technical condition of an object in order to reduce maintenance costs.

Keywords: operation systems, complex technical systems, forecasting, maintenance strategy, maintenance system.

Введение. Объективной направленностью развития сложных технических систем на настоящем этапе, несмотря на существующие финансовые трудности, является с одной стороны, тенденция по замене морально устаревшей техники на более совершенные комплексы, а с другой, повышение эффективности использования имеющихся сил и средств эксплуатации на подержание техники в исправном боеготовном состоянии.



Однако развитие сложных технических систем в указанном направлении, при существующей системе технического обслуживания по наработке сопровождается резким увеличением материальных, временных и трудовых затрат на эксплуатацию, вследствие чего возросшие потенциальные возможности средств и комплексов не могут быть полностью реализованы.

Актуальность. Актуальность задачи состоит в том, что при известных характеристиках надежности сложных технических систем, полноты и достоверности средств эксплуатационного контроля, с учётом особенностей практического применения и условий эксплуатации оборудования, а также подготовленности обслуживающего персонала требуется разработать такую систему технического обслуживания, которая обеспечивает заданную (максимальную) эффективность практического применения сложных технических систем в целом при фиксированных затратах. В некоторых случаях требуется решать задачу минимизации затрат на техническое обслуживание при обеспечении заданной эффективности его практического применения.

Помимо этого, отличительной особенностью принципов построения сложных технических систем является возможность реализации многофакторного анализа работоспособности (правильности функционирования) ее составных компонентов. Наличие функциональной и структурной избыточности сложных технических систем, а также широкое применение новой элементной базы, цифровой обработки информации и т.д. обусловило специфику ее эксплуатации. Помимо этого, из распределения отказов сложных технических систем можно сделать вывод о том, что на практике процесс изменения технического состояния имеет смешанный характер.

Таким образом, выбор стратегии технического обслуживания является многофакторной задачей и должен осуществляться путём логического анализа эксплуатационно-технических показателей, особенностей практического применения, присущих данной конкретной аппаратуре. Для проведения анализа используются исходные данные, получаемые в процессе эксплуатации, а также при изучении эксплуатационной документации. Важным при определении стратегии технического обслуживания является обеспечение соответствия процесса технического обслуживания характеру, изменения технического состояния оборудования.

В результате проведённого логического анализа для каждого из изделий определяется стратегия технического обслуживания, которая, в свою очередь, определяет необходимые операции по техническому обслуживанию.

В настоящее время известны следующие стратегии технического обслуживания:

- стратегия технического обслуживания по наработке (ресурсу), назначаются операции по техническому обслуживанию (уход, замена отдельных элементов, контроль технического состояния) с определённой периодичностью, не зависящей от действительного, технического состояния военно-технических систем;

- стратегия технического обслуживания с контролем параметров, в которой назначаются операции контроля изделия по определяющим параметрам с периодичностью, зависящей от полноты контроля, его результатов и уровня безотказности;

- стратегия технического обслуживания с контролем уровня надежности, при которой аппаратура эксплуатируется до безопасного отказа или до уровня надежности, выбранного по какому-либо критерию.

Постановка задачи. Формализуем задачу управления техническим состоянием сложных технических систем. Пусть имеется комплекс работ $\{Q_n\}$, $n = 1, \dots, N$, выполнение которых обеспечивает поддержание техники в работоспособном состоянии. В зависимости от технического состояния, установленного с достоверностью d и априорных данных, может быть выбрана любая совокупность работ $\{Q_n\}$, что соответствует принятию одного из допустимых решений $D = \{D_l\}$, $l = 1, \dots, L$. Тогда средние удельные затраты z зависят от решений, принимаемых с учётом текущего технического состояния S :

$$z(D_l/S, d). \quad (1)$$



Обозначим через $P(t, \tau, D_1 / S, d)$ – вероятность безотказной работы на заданном интервале времени $\tau = t + \Delta t$, обеспечиваемую выбором решения в момент τ , с учетом S .

Тогда определение правил управления техническими системами, в зависимости от целевой функции будет формализовано следующим образом:

Максимум эффективности выполнения профилактических работ при заданной безотказности объекта:

$$w_{np}(D_k / S, d) = \max_{D \in D} \{w_{np}(D_k / S, d)\} \quad (2)$$

при $P(\tau, D_k / S, d) \geq P_{дон}(\tau)$.

Минимум средних удельных затрат при заданной безотказности объекта:

$$w_{np}(D_r / S, d) = \min_{D_i \in D} \{w_{np}(D_i / S, d)\} \quad (3)$$

при $P(\tau, D_k / S, d) \geq P_{дон}(\tau)$.

Максимум безотказности объекта при заданном значении удельных затрат:

$$P(\tau, D_m / S, d) = \max_{D_i \in D} \{P(\tau, D_i / S, d)\} \quad (4)$$

при $z(D_m / S, d) \leq z_{дон}$.

Формулировка задачи выбора правил управления техническими системами объекта позволяет объяснить существующую классификацию стратегий технического обслуживания. Эта классификация проводится с учетом конкретизации набора работ $\{Q_n\}$ и способа определения технических систем.

Она основана на двух признаках:

1. Факт наличия в наборе $\{Q_n\}$ профилактических работ;
2. Вид измеряемой величины, используемой для принятия решения о моменте проведения работ по управлению техническими системами.

Таким образом, объём и периодичность технического обслуживания необходимо выбирать с учётом конструктивных, технологических и эксплуатационных показателей объекта, его контролепригодности, возможностей средств эксплуатационного контроля, а также всевозрастающей потребностью снижения затрат на эксплуатацию сложных технических систем, повышением их надежности и эффективности применения. Поэтому при выборе системы технического обслуживания должен учитываться ранг важности показателей по воздействию на принятие решения.

Среди методов классического подхода многокритериального выбора наибольшей универсальностью и теоретической обоснованностью обладают методы теории полезности, методы теории нечетких множеств и метод анализа иерархий [1].

Наиболее универсальным является метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати, основанный на парных сравнениях вариантов по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям. Взаимоотношения между критериями учитываются путем построения иерархии критериев и применением парных сравнений для выявления важности показателей. Благодаря простоте метод хорошо подходит для решения задач многокритериального выбора.



К основным процедурам метода анализа иерархий относятся:

- 1 – генерация множества альтернативных вариантов;
- 2 – формирование множества критериев для оценки альтернативных вариантов;
- 3 – выявление предпочтений экспертов на множестве альтернатив по различным критериям;
- 4 – установление относительной важности влияния показателей на цель;
- 5 – получение ранжированных наборов показателей.

Иерархическая структура критериев и целей является моделью знаний конкретной предметной области, которая изменяется и уточняется с течением времени.

Основной способ измерения предпочтений экспертов, используемый в методе анализа иерархий, - парные сравнения. По результатам формируется матрица парных сравнений. Рассчитывается собственный вектор и собственное значение матрицы. Собственный вектор интерпретируется как вектор приоритетов сравниваемых показателей.

Для сравнения показателей по каждому критерию предлагается шкала (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношение качественных и количественных оценок

Степень превосходства	Балл
Отсутствие предпочтительности	1
Слабая предпочтительность	3
Умеренная предпочтительность	5
Сильная предпочтительность	7
Абсолютная предпочтительность	9

Баллами 2, 4, 6, 8 могут отмечаться промежуточные суждения эксперта. Обоснование выбора именно такой вербальной шкалы приводится в [1]. Применение аппарата парных сравнений для определения весов критериев в данном методе связано с ограниченными возможностями человека по переработке информации $7(\pm 2)$ объектов [1].

Элементы полученного вектора выражают веса влияния соответствующих показателей.

Точность полученных весов критериев зависит от того, насколько последовательными были суждения эксперта при проведении парных сравнений.

Метод анализа иерархий предлагает процедуру для определения меры последовательности высказываний эксперта.

Чем ближе максимальное собственное значение матрицы парных сравнений L_{max} к N (размерности матрицы), тем результат более достоверен и суждения эксперта более последовательны.

Степень последовательности в теории метода анализа иерархий представляется отношением $(L_{max}-N)/(N-1)$, которое называется индексом согласованности.

Индекс согласованности случайным образом генерированных матриц с весами от 1 до 9 называют в теории метода анализа иерархий случайным индексом. По идее, чем больше N , тем больше случайный индекс. Средние значения случайного индекса для $N=1, 2, \dots, 15$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные значения случайного индекса

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СИ	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Отношение индекса согласованности к среднему случайному индексу для матрицы соответствующей размерности называют отношением согласованности. Хорошим считается отношение согласованности ≤ 0.10 [3].

Таким образом, метод позволяет получить ранжированный набор показателей и установить вес показателя в соответствии с выбранной целью.



Рассматриваемые показатели, обуславливающие выбор системы технического обслуживания, могут иметь от 2 до 5 внутренних свойств и составлять несколько тысяч ситуаций, что существенно затрудняет выполнение практической задачи. Поэтому выбор системы технического обслуживания должен осуществляться по правилу наибольшего количества уровней рассматриваемых показателей для каждой из систем технического обслуживания.

Пусть $S_l, l = 1, 2, 3$ – возможные системы технического обслуживания (техническое обслуживание по наработке, техническое обслуживание с контролем параметров и техническое обслуживание с контролем уровня надежности), F_i – показатель, w_i – вес показателя, $f_{i,j}$ – уровень показателя, по которому определяется его принадлежность к S_l .

Для оценки эффективности выбора системы технического обслуживания предложен алгоритм, который состоит из следующих шагов:

Шаг 1: оценка $S_{l,i,j}$ принадлежности уровня показателя $f_{i,j}$ системы технического обслуживания S_l :

$$S_{l,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } f_{i,j} \text{ соответствует } S_l \\ 0, & \text{если } f_{i,j} \text{ не соответствует } S_l \end{cases}, \quad (5)$$

Шаг 2: определение количества уровней $S_{l,i}$ с учетом w_i :

$$S_{l,i} = w_i \sum_{j=1}^{J_i} S_{l,i,j}, \quad (6)$$

Шаг 3: определение общего количества уровней S_l :

$$S_l = \sum_{i=1}^n S_{l,i}, \quad (7)$$

Шаг 4: оценка эффективности выбора S_l :

$$m_l = \frac{S_l}{M}, \quad \text{где } M = \sum_{i=1}^n J_i, \quad (8)$$

S_{l_3} – эффективен $\Leftrightarrow l_3 = \arg \max_l m_l$.

Данный алгоритм реализован в табличном процессоре Microsoft Exell и представлен на рисунке 1.

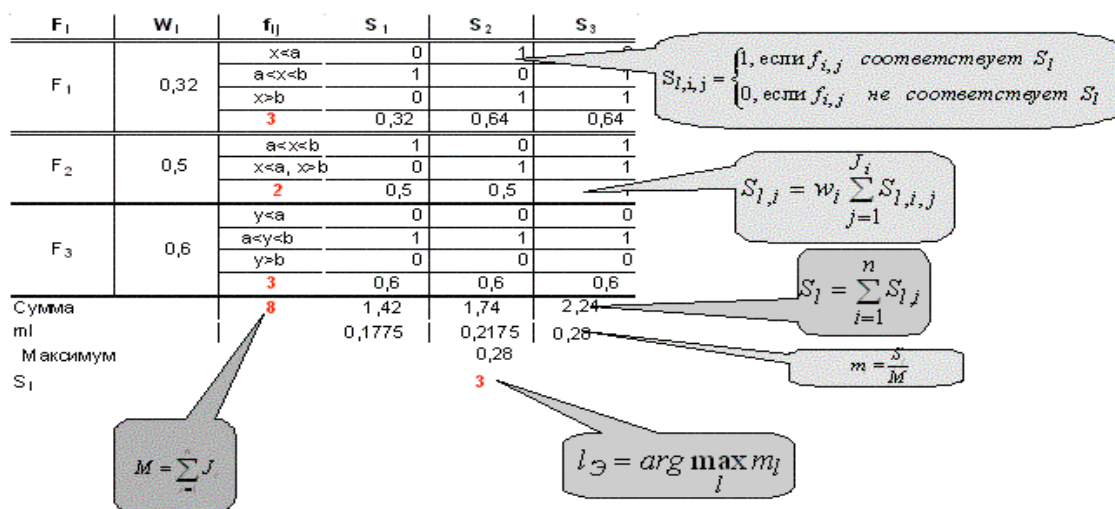


Рисунок 1 – Алгоритм оценки эффективности выбора системы технического обслуживания



Таким образом, данный алгоритм позволяет выбрать рациональную систему технического обслуживания для сложных технических систем и позволяет для каждой системы применить эффективный метод прогнозирования технического состояния для проведения профилактических работ при техническом обслуживании. В результате анализа методов прогнозирования для системы технического обслуживания с контролем уровня надежности предлагается использовать статистическое прогнозирование, а для системы технического обслуживания с контролем параметров – инструментальное прогнозирование, сущность, достоинства и недостатки которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Методы статистического и инструментального прогнозирования

Методы	Инструментальные	Статистические
Особенности применения	1. Известен определяющий параметр 2. Известен способ измерения параметра	1. Отсутствие прогнозирующего параметра 2. Отсутствует способ измерения параметра с необходимой точностью
Достоинства	Возможность индивидуального и достаточно точного предсказания момента отказа	Простота организации: по истечении суммарного времени работы производится регулировка (замена) без каких-либо измерений
Недостатки	Необходимость высокоточных средств измерения и выявление прогнозируемого параметра	Большое количество экспериментальных данных для установления зависимости вероятности безотказной работы от времени

Для стратегии технического обслуживания с контролем уровня надежности возможно применение статистического прогноза. Задачу статистического прогнозирования сформулируем следующим образом. Пусть система состоит из m элементов $S = \{S_1, \dots, S_m\}$. Каждый S_j -й элемент $j \in \{1, \dots, m\}$ обладает интенсивностью отказов λ_j . При техническом обслуживании вида i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) контролю подвергается множество элементов S_i ($S_i \subset S_{i+1}$, $S_n = \{1, 2, \dots, m\}$) с соответствующими затратами r_i . Задано время эксплуатации T .

Требуется определить оптимальный набор периодов технического обслуживания элементов: $E^* = \{\tau_i^*, i = 1, \dots, n\} \subset E$, при котором $\sum R(E) \leq R_0$ и выполняются условия:

$$P^*(E^*) = \max_E \min_t \prod_{i=1}^n P_i(\tau_i), \tag{9}$$

где $t \in [0, T]$, $P_i(\tau_i) = e^{-\sum_{j \in A_i} \lambda_j \tau_i}$ – вероятность безотказной работы системы, $A_i = S_i \setminus S_{i-1}$ – множество элементов системы, которые не проверялись к моменту τ_i ($\bigcup_{i=1}^n A_i = \{1, 2, \dots, m\}$).

Для определения суммарных затрат $R(E)$ заметим, что техническое обслуживание вида i на интервале $[0, \tau_{i+1}]$ проводится $\tau_{i+1}/\tau_i - 1$ раз, поэтому:

$$R(E) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{T}{\tau_{i+1}} \left(\frac{\tau_{i+1}}{\tau_i} - 1 \right) r_i, \tag{10}$$

где $\tau_{n+1} = T$.

Таким образом, приходим к задаче отыскания набора $E^* = \{\tau_i^*, i = 1, 2, \dots, n\}$, при котором:

$$P^*(E^*) = \max_E P(E), R(E) \leq R_0. \tag{11}$$

Данная задача решается методом динамического программирования.

Введем переменные x_i ($x_i = \tau_{i+1}/\tau_i = 1, 2, \dots, x_n = T/\tau_n = 1, 2, \dots$), и выразим τ_i через x_i :



$$\tau_i = T / \prod_{y=i}^n x_y \quad (12)$$

и запишем (11) с учетом (9), (10) в следующем виде. Найти набор $X^* = (x_i^*, i = 1, 2, \dots, n)$, при котором:

$$-\ln P^*(X^*) = \min_{x_i} \sum_{i=1}^n a_i / \prod_{y=i}^n x_y; \quad (13)$$

$$a_i = T \sum_{j \in A_i} \lambda_j; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - 1) r_i \prod_{y=i+1}^n x_y \leq R_0. \quad (15)$$

Решение задачи (13)-(15) найдем в виде n -шагового процесса вычислений. На каждом этапе вычислений будем искать функцию $f_i(R_i)$ – \min суммарной интенсивности отказов при проведении проверок, решение о проведении которых были приняты на этапах $1, 2, \dots, i-1$ при заданном состоянии затрат R_i с помощью рекуррентного уравнения вида:

$$f_i(R_i) = \min_{x_i} \left[a_i - f_{i-1} \left(\frac{R_i - (x_i - 1)r_i}{x_i} \right) \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) получено из формул (13)-(15) путем применения принципа оптимальности Беллмана.

Вычисляя последовательно $f_i(R_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), на шаге n определим $f_n(R_0) = -\ln P^*(X^*)$.

Для решения (16) на каждом шаге i предварительным перебором найдем множество значений вспомогательной функции:

$$\{L_i(F_i)\} = \{L_{i,h}, F_{i,h}, X_{i,h} \mid L_{i,h} = \frac{f_{i-1,s} + a_i}{x_i}, F_{i,h} = x_i R_{i-1,s} + (x_i - 1)r_i; X_{i,h} = X_{i-1,s} \cup \{x_i\}; \quad (17)$$

$$0 \leq F_{i,h} \leq R_0; s = 1, l_{i-1}; x_i = 1, 2, \dots\}.$$

Тогда $\{f_i(R_i)\} \subseteq \{L_i(R_i)\}$ определим в виде мажорирующей последовательности, потребовав для каждого члена $s\{f_i(R_i)\}$ выполнения условия:

$$f_{i,s} = \min_{h \in C_{i,s}} L_{i,h}, \quad (18)$$

$$C_{i,s} = \{k \mid F_{i,k} = R_{i,s} = \min_h F_{i,h}, L_{i,h} < f_{i,s-1}\}. \quad (19)$$

Данный алгоритм реализован в виде программного продукта на языке DELPHI 4.0 и позволяет определить оптимальные периоды технического обслуживания с контролем уровня надежности сложных технических систем при переходе к эксплуатации по техническому состоянию.



Основой метода инструментального прогнозирования является построение модели изменения определяющего параметра z от времени по его измеренным значениям и прогнозирование момента проведения регулировочных работ [4].

Задача состояла в том, чтобы по наименьшему количеству измерений получить адекватную модель прогноза, позволяющую оценить момент времени проведения последующей профилактики. Поэтому было предложено ввести структурные $\{S^1\} = \{S_1^1, S_2^1, \dots, S_M^1\}$ и параметрические $\{O^1\} = \{O_1^1, O_2^1, \dots, O_K^1\}$ ограничения на синтез модели.

Введение данных ограничений заключалось в невозможности получения достаточно объемной выборки контролируемых параметров объекта и принятия обоснованного решения о проведении технического обслуживания.

Предлагалось рассмотреть полиномиальные модели вида:

$$G_0(z, t, O_k) \equiv z(t) = b_0^0, \quad (20)$$

где $b_0^0 = \sum_{i=1}^4 z_i / 4$;

$$G_1 = (z, t, O_k) \equiv z(t) = b_0^1 + b_1^1 t; \quad G_2 = (z, t, O_k) \equiv z(t) = b_0^2 + b_1^2 t + b_2^2 t^2, \quad (21)$$

$$b_0^1 = \frac{\sum_{i=1}^4 z_i \sum_{i=1}^4 t_i - \sum_{i=1}^4 z_i t_i \sum_{i=1}^4 t_i}{4 \sum_{i=1}^4 t_i^2 - (\sum_{i=1}^4 t_i)^2}, \quad b_1^1 = \frac{\sum_{i=1}^4 z_i t_i - \sum_{i=1}^4 z_i \sum_{i=1}^4 t_i}{4 \sum_{i=1}^4 t_i^2 - (\sum_{i=1}^4 t_i)^2};$$

$$b_0^2 = \Delta_A / \Delta, \quad b_1^2 = \Delta_B / \Delta, \quad b_2^2 = \Delta_C / \Delta,$$

$$\Delta = 4(\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i^4) + 2(\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i^3) - (\sum_{i=1}^4 t_i^2)^3 - (\sum_{i=1}^4 t_i)^2(\sum_{i=1}^4 t_i^4) - 4(\sum_{i=1}^4 t_i^3)^2,$$

$$\Delta_A = (\sum_{i=1}^4 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i^4) + (\sum_{i=1}^4 t_i z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i^3) + (\sum_{i=1}^4 t_i^2 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^3) -$$

$$- (\sum_{i=1}^4 t_i^2 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^4 t_i z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^4) - (\sum_{i=1}^4 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^3)^2, \quad (22)$$

$$\Delta_B = 4(\sum_{i=1}^4 t_i z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^4) + (\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2) + (\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i^3)(\sum_{i=1}^4 z_i) -$$

$$- (\sum_{i=1}^4 t_i z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^4) - 4(\sum_{i=1}^4 t_i^3)(\sum_{i=1}^4 t_i^2 z_i),$$

$$\Delta_C = 4(\sum_{i=1}^4 t_i^2 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2) + (\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^3) + (\sum_{i=1}^4 t_i^2)(\sum_{i=1}^4 t_i)(\sum_{i=1}^4 t_i z_i) -$$

$$- (\sum_{i=1}^4 z_i)(\sum_{i=1}^4 t_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^4 t_i)^2(\sum_{i=1}^4 z_i t_i^2) - 4(\sum_{i=1}^4 t_i^3)(\sum_{i=1}^4 t_i z_i).$$

Эти модели позволяют ограничиться выборкой исходных данных из четырех точек. Адекватность оценивалась по остаточной дисперсии σ_i^2 , где:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^8 (b_0 - z_i)^2 / 8;$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=1}^8 (b_0 + b_1 t_i - z_i)^2 / 8;$$

$$\sigma_2^2 = \sum_{i=1}^8 (b_0 + b_1 t_i + b_2 t_i^2 - z_i)^2 / 8. \quad (23)$$

При этом должно выполняться соотношение $\sigma_0 > \sigma_1 > \sigma_2$.



При проведении эксперимента было выявлено, что наименьшее СКО имеет квадратичная модель [5]. Но, используя для оценки адекватности апостериорные данные в соответствии с (22) и анализируя полученные результаты, представленные на рисунках 2–4, делаем вывод о неприменимости данного подхода для получения адекватных моделей прогнозирования (оценивание по области O_k). На оси абсцисс отложено время в днях, а по оси ординат – значение измеряемого параметра.

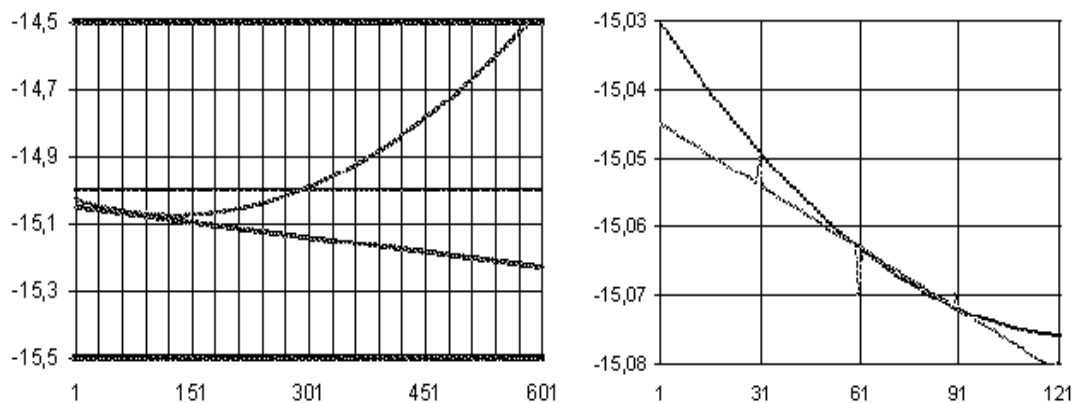


Рисунок 2 – Результаты моделирования изменения параметра Z_1

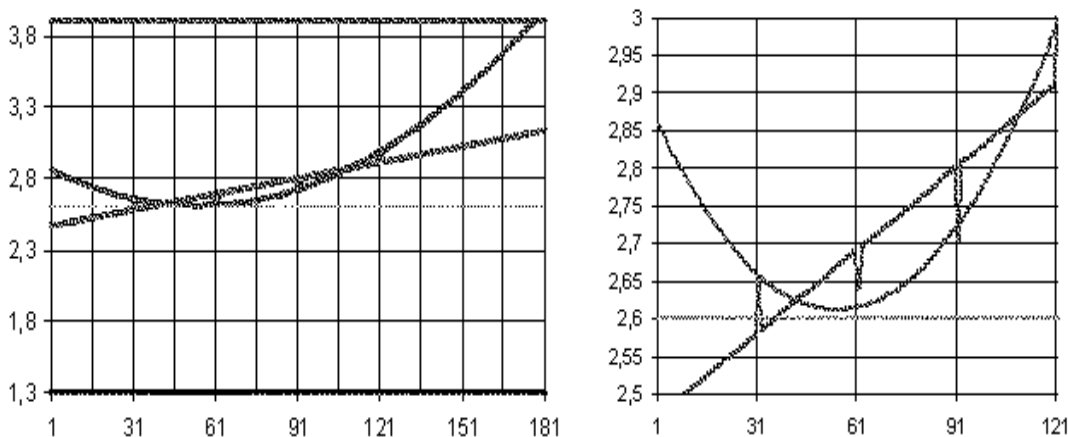


Рисунок 3 – Результаты моделирования изменения параметра Z_2

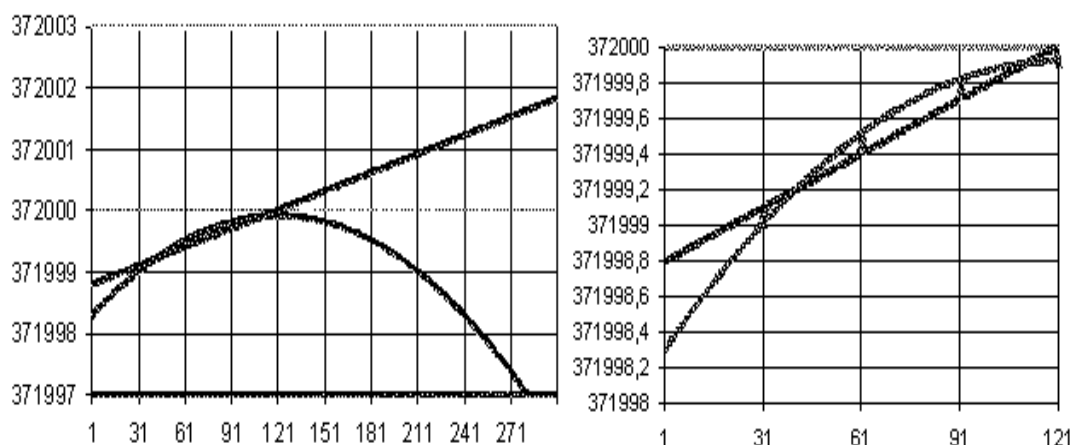


Рисунок 4 – Результаты моделирования изменения параметра Z_3



Таким образом, стандартный подход к синтезу моделей прогнозирования неприменим. Необходимо либо увеличить количество точек контроля, что понижает эффективность моделей, либо разработать эффективные модели для этого же количества точек контроля за счет изменения структуры модели.

Для выполнения условия, связанного с ограничениями на количество измерений, предлагается ввести такую точку отсчета (t_0, z_0) – назовем ее нулевой, расположенную слева по оси времени от экспериментальных данных, которая является экстремумом аппроксимирующей функции. Полученные таким образом множества моделей позволяют с заданной вероятностью оценить гарантированное время работоспособного состояния.

Точку (t_0, z_0) предлагается взять из области Парето Π , которая определена как область между прямыми $G_0(t)$ и $G_1(t)$, для $t_{\text{фик}} < t < t_1$, то есть:

$$\Pi = \{(t_0, z_0) : t_{\text{фик}} < t_0 < t_1, (t - G_0(t)) \times (t - G_1(t)) < 0\}, \quad (24)$$

и вычислить дисперсию $D=D(t_{\text{пр}})$ и математическое ожидание $M=M(t_{\text{пр}})$ в соответствии с рекуррентной процедурой:

$$\begin{aligned} M_i &= M_{i-1} \times (i-1)/i + t_{\text{от}}^i / i, \\ D_i &= \{D_{i-1} + (M_{i-1} - t_{\text{от}}^i)^2 / i\} \times (i-1)/i. \end{aligned} \quad (25)$$

Так, в результате моделирования, в соответствии с формулами (21)...(24) было получено, что прогнозируемое время очередного контроля составляет 5 месяцев с вероятностью ошибки 0,003:

$$\begin{aligned} Z1: \quad M(t_{\text{от}}) &= 43.15, & D(t_{\text{от}}) &= 13, \\ Z2: \quad M(t_{\text{от}}) &= 8.3, & D(t_{\text{от}}) &= 0.7, \\ Z3: \quad M(t_{\text{от}}) &= 14.6, & D(t_{\text{от}}) &= 10.3. \end{aligned} \quad (26)$$

Для получения гарантированного прогноза предложено взять наихудшую из допустимых моделей.

Выводы. Таким образом, предложенные методы декомпозиции объекта по конструктивно-эксплуатационным показателям и алгоритмы статистического и инструментального прогнозирования могут быть использованы с целью разработки методики эксплуатации сложных технических систем, основанной на смешенной стратегии технического обслуживания. Полнота и достоверность средств эксплуатационного контроля, с учётом особенностей практического применения и условий эксплуатации оборудования, а также подготовленности обслуживающего персонала позволит разработать систему технического обслуживания, которая обеспечит заданную эффективность практического применения сложных технических систем в целом при фиксированных затратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. М.: «Радио и связь», 1993. 305 с.
2. Буравлев А.И., Доценко Б.И., Казаков И.Е. Управление техническим состоянием динамических систем / Под общ. ред. Казакова Е.М.: Машиностроение, 1995. 222 с.
3. Пантелев А.В., Бортакровский А.С. Теория управления в примерах и задачах. М.: «Высшая школа», 2003. 583 с.
4. Кондраков Н.И. Логический словарь-справочник. М.: Изд. «Наука». 1975. 720 с.
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А., Моделирование систем. М.: «Высшая школа», 2005. 343 с.



REFERENCES

1. Saati T. Metod analiza ierarhij: Per. s angl. M.: «Radio i svyaz'», 1993. 305 p.
2. Buravlev A.I., Docenko B.I., Kazakov I.E. Upravlenie tehničeskim sostoyaniem dinamičeskikh sistem / Pod obsch. red. Kazakova E.M.: Mashinostroenie, 1995. 222 p.
3. Pantelev A.V., Bortakovskij A.S. Teoriya upravleniya v primerah i zadachah. M.: «Vysshaya shkola», 2003. 583 p.
4. Kondrakov N.I. Logičeskij slovar'-spravochnik. M.: Izd. «Nauka». 1975. 720 p.
5. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A., Modelirovanie sistem. M.: «Vysshaya shkola», 2005. 343 p.

© Григоров С.Ю., Лебедев В.В., Казьменко А.В., Митрофанова С.В., 2018

Григоров Сергей Юрьевич, заместитель начальника 34 отдела научно-исследовательского 3 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Лебедев Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры специального вооружения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А. Казьменко Анатолий Валентинович, научный сотрудник 34 отдела научно-исследовательского 3 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Kazmenko_A@mail.ru.

Митрофанова Светлана Викторовна, младший научный сотрудник 34 отдела научно-исследовательского 3 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mitrofanovas85@mail.ru.