

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

УДК 629.78: 047.36

*А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, М. Ю. Михеев,
М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина*

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ СТАРТОВЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

A. G. Dmitrienko, A. V. Nikolaev, M. Y. Mikheev, M. V. Tyurin, I. Y. Semochkina

**TECHNIQUE JUSTIFICATION FOR TECHNICAL CONDITION
FORECASTING OF SPACE-LAUNCH AND TECHNICAL
FACILITIES SYSTEMS BASED ON MONITORING DATA**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены методы прогнозирования остаточного времени безопасной эксплуатации на основе случайных процессов. Целью работы является выбор наиболее перспективного метода прогнозирования технического состояния стартовых и технических комплексов космодрома. *Материалы и методы.* Проведен развернутый анализ методов прогнозирования технического состояния объектов. *Результаты.* Показано, что наиболее перспективным методом прогнозирования технического состояния стартовых и технических комплексов космодрома является апостериорный метод оценки остаточного времени безотказной эксплуатации на основе использования многофункциональных интеллектуальных систем мониторинга и контроля. *Выводы.* Выбранный метод прогнозирования технического состояния объектов мониторинга позволяет получить наиболее достоверную оценку неизрасходованного времени безопасной эксплуатации объекта.

A b s t r a c t. *Background.* Forecasting techniques for remaining safe operation limit on the basis of stochastic processes have been described. The work is aimed to choose the most advanced technique of technical condition forecasting for space-launch and technical facilities. *Materials and methods.* Expanded analysis of techniques for technical condition forecasting has been carried out. *Results.* It has been demonstrated that the most advanced technique of technical condition forecasting for space-launch and technical facilities is the aposterior technique of remaining safe operation limit evaluation using multifunction smart monitoring and control systems. *Conclusions.* The selected technique of technical condition forecasting for the monitoring objects provides the most reliable evaluation of the remaining safe operation limit of the facility.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогнозирование технического состояния, стартовые и технические комплексы космодрома, система мониторинга и контроля, сети Петри, Марковский анализ, интенсивность отказов, дерево событий.

К e y w o r d s: technical condition forecasting technique, space-launch and technical facilities, monitoring and control systems, Petri nets, Markovian analysis, failure rate, event tree.

Конечной целью мониторинга и контроля любого сложного объекта является прогнозирование остаточного времени безотказной эксплуатации.

В настоящее время известно множество методов прогнозирования технического состояния объектов – от прогнозирования интенсивности отказов, анализа деревьев неисправностей и событий – до сети Петри и Марковских процессов. Особенности, достоинства и недостатки этих методов представлены в табл. 1 [1]. Из них для получения априорных вероятностных оценок эффективно используются методы прогнозирования интенсивности отказов и анализ блок-схем безотказности. Однако ни один из предложенных методов прогнозирования не обеспечивает оценок остаточного времени безотказной работы объекта мониторинга по наблюдениям за характеристиками случайного процесса, статистически связанного с характеристиками объекта.

Техническое состояние сложного объекта характеризуется совокупностями эксплуатационно-технических характеристик, образующих комплекс случайных функций. При решении прикладных задач, к числу которых относятся задачи прогнозирования состояния реальных объектов, случайные функции представляются в виде конечномерного случайного вектора $X_{(n)} = \{x_1, \dots, x_n\}$ [2].

В этом случае проблема прогнозирования представляет собой проблему экстраполяции случайного векторного процесса $X_{(n)}(t)$. Ее основными понятиями являются «наблюдаемый» случайный процесс $Z_{(n)}(t)$, $t \in T$, и «ненаблюдаемый» случайный процесс $X_{(n)}(t)$, $1 \in T$, статистически связанный с $Z_{(n)}(t)$.

Примером статистически связанных случайных процессов являются наблюдаемые массивы измерительной информации о физических параметрах объекта мониторинга, получаемые системами мониторинга и контроля, с ненаблюдаемыми эксплуатационно-техническими характеристиками (ЭТХ) объекта. При этом периодическое наблюдение за сохранением ЭТХ может носить оценочный характер, основанный на подтверждении стабильности массива измерительной информации.

Таблица 1

Особенности использования преимуществ и ограничения известных методов прогнозирования

Метод	Особенности использования	Преимущества	Ограничения
1	2	3	4
1. Прогнозирование интенсивности отказов	Использование предположения о постоянстве интенсивности отказов	Незначительная трудоемкость, простота адаптации к ручным и компьютеризованным вычислениям	Низкая точность прогнозирования, особенно для изделий, изготавливаемых малыми сериями
2. Анализ дерева неисправностей	Основан на идентификации условий и факторов, влияющих на работоспособность	Относительная простота преобразования логических моделей в соответствующее значение вероятностей	Зависимость достоверности результатов прогнозирования от времени происхождения событий
3. Анализ дерева событий	Использование в качестве дополнения к анализу дерева неисправностей	Возможность оценить последствия события и обеспечить уменьшение вероятного неблагоприятного последствия	Необходимость оценки правильности обработки условных вероятностей и определения независимости событий

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
4. Анализ блок-схемы безотказности	Использование в качестве первого этапа оценки безотказности	Возможность получения количественной оценки безотказности в процессе разработки	Необходимость построения вероятностной модели работоспособности для каждого элемента в схеме и невозможность учета сложных видов ремонта и стратегий обслуживания
5. Марковский анализ	Направленность на оценку безотказности с функционально сложной структурой, сложного ремонта и стратегий обслуживания	Возможность получения гибкой вероятностной модели для анализа поведения системы	Быстрое нарастание числа состояний с увеличением числа компонентов системы, что приводит к громоздкости вычислений
6. Сети Петри	Предназначен для анализа сложных логических взаимодействий, включенных в язык сетей Петри	Возможность представления сложных взаимодействий аппаратных средств вычислительной техники и/или модулей программного обеспечения, которые не могут быть описаны другими методами	
7. Анализ видов и последствий отказов	Предназначен для анализа безотказности на основе изучения отказов материалов, компонентов и составных частей и влияние их последствий на результаты функционирования	Системная идентификация взаимосвязи последствий отказов и их причин и определение мероприятий по смягчению риска	Необходимость получения большого объема исходных данных и неуправляемость при отсутствии прямых отношений между причиной и следствием
8. Исследование опасности и удобства эксплуатации	Предназначен для решения проблемы идентификации опасности и удобства эксплуатации, выполняемым персоналом	Использование различных навыков и знаний 1-й группы экспертов, каждый из которых должен быть знаком с различными аспектами исследований системы	Зависимость от способностей и опыта руководителя и знаний, опыта и взаимодействия членов команды
9. Анализ влияния человеческого фактора на безотказность	Предназначен для оценки и распределения функции, задач и ресурсов между людьми и машинами	Вносит существенный вклад в удобство и безотказность применения изделий	Необходимость глубокого знания характеристик человеческой работоспособности
10. Анализ устойчивости к нагрузкам	Анализ возможности возникновения отказов при воздействии электрических, механических, климатических и других нагрузок	Может обеспечивать точное представление безотказности компонента как функции возможных механизмов отказов, обеспечивает более реалистичное физическое понимание последствий разнообразных нагрузок	Возможность ошибочных выводов при неправильном предположении о распределении одной или более случайных величин

Окончание табл. 1

1	2	3	4
11. Таблица состояний	Метод структурного функционального анализа, направленный на выявление и систематизацию всех возможных комбинаций состояний	Предполагает изучение всех возможных комбинаций взаимодействия работоспособных и неработоспособных состояний компонентов, является весьма эффективным	Трудная применимость для сложных систем, когда число состояний становится очень большим
12. Суммирование наработок	Метод расчета показателей безотказности изделий с резервом или избыточностью	Превосходит возможности метода анализа блок-схемы безотказности, является более простым, применим для любых видов резерва или избыточности	Необходимость предположения о постоянстве распределений случайных слагаемых

Главной проблемой прогнозирования является точечная оценка наблюдаемого случайного процесса $X_{(n)}(t)$ для будущего момента времени S , $S \in (T-t_1)$, по известной реализации $Z_{(n)}(t)$. Чаще всего прогнозируется нахождение процесса в некоторой области. При этом выполнение условия $X_{(n)} \in S_0$ определяет работоспособное состояние объекта, а изменение вектора во времени образует случайный процесс $X_{(n)}(t)$ при $t \geq t_1$ и $t \leq \infty$, описывающий изменение ЭТХ во времени (t_1 – фиксированный момент времени, соответствующий началу наблюдений или эксплуатации).

До появления некоторого другого случайного процесса $X_{(n)}(t)$ в серии наблюдений $Z_{(n)}(t)$ первый из наблюдаемых процессов можно охарактеризовать на основе априорных оценок, зависящих только от его случайного поведения [3].

Априорный анализ надежности предполагает использование известных количественных характеристик надежности отдельных блоков и агрегатов стартовых комплексов (СК) и технических комплексов (ТК) и базируется на априорных вероятностных характеристиках надежности, приближенно отражающих действительные процессы эксплуатации. Априорный анализ надежности проводится с использованием формул:

$$P\{Z \in B\} \approx \sum_{i=1}^n P_i\{Z \in B_i\}, \quad P\{Z \in B\} = \int_B f(xz) dz,$$

где \in – знак включения точек одного множества в другое; $Z \in B_i$ означает попадание случайной точки (Z_1, \dots, Z_n) в область B_i .

Если при наблюдении за процессом $Z_{(n)}(t)$ проведено единичное наблюдение за вектором $X_{(n)}(t)$, по результатам которого стало ясно, что с вероятностью единица его значения находятся в области S_0 , то для определения характеристик ненаблюдаемой случайной величины на будущее время необходимо использовать апостериорный метод анализа. Из физических закономерностей следует, что степень случайности ненаблюдаемого процесса в указанной ситуации значительно уменьшена. Если до проведения единичного наблюдения процесс мог изменяться во сколь угодно широких пределах, то после проведения наблюдений диапазон его изменения значительно уменьшился. После этого нахождение процесса в области S_0 является достоверным событием, а за пределами области – невозможным.

Апостериорный анализ проводится путем статистической обработки результатов наблюдений о сохранении значений ЭТХ СК и ТК в процессе эксплуатации и вычисления условий вероятности возникновения отказа вслед за интервалом безотказной работы. Использование этого свойства случайных функций позволяет определять сохранение значений ЭТХ объекта мониторинга по оценкам случайных изменений измеряемых физических величин,

статистически связанных с ЭТХ. Таким образом, наиболее полное решение задачи прогнозирования остаточного времени безотказной работы можно получить по результатам апостериорного анализа надежности, который относится к фундаментальным методам теории вероятности [4].

Апостериорная функция надежности $P_{\omega}^{PS}(S)$ по результатам наблюдений за случайной функцией $\hat{Z}_{(n)}(t)$, $t_1 < t \leq t_K$, статистически связанной с ненаблюдаемой функцией $\hat{X}_{(n)}(t)$, $t_1 < t \leq t_K$, определяется по формуле

$$P_{\omega}^{PS}(S) = P\{\Delta T_{\omega} > S / Z_{(n)\omega}(t)\}, \quad t_1 \leq t \leq t_K, \quad S \geq t_K, \quad (1)$$

где ΔT_{ω} – остаток времени безотказной работы объекта с номером ω , определяемый по формуле

$$\Delta \tilde{T}_{\omega}^* = \int_{t_k}^{\infty} P_{\omega}^{PS}(S) dS. \quad (2)$$

С учетом монотонности реализации случайного процесса $X_{(n)}(t)$ значение $\Delta \tilde{T}_{\omega}^*$ можно определить по формуле

$$\Delta \tilde{T}_{\omega}^* = \max_{S_0} S \mid \int \varphi_{\xi}(x_{(n)}, s) dx_1, \dots, dx_n, dx \geq P_{\omega}, \quad (3)$$

где $\int \varphi_{\omega}(x_{(n)}, s) dx_1, \dots, dx_n, ds = \int_{S_0}^{\infty} \varphi_{\omega}^{PS}(t) dt$, $\varphi_{\omega}^{PS}(S) = d(1 - P_{\omega}^{PS}(S)) / dS$.

С учетом формулы (3) задачу прогнозирования технического состояния объектов мониторинга на этапе апостериорного оценивания надежности можно сформулировать как задачу прямого и обратного прогнозирования параметрической безотказности. В основе такого прогнозирования лежат процедуры периодического оценивания плотности $\varphi_{\omega}(x_{(n)}, s)$ по результатам мониторинга параметров объекта. В этом случае оценка будущего значения ненаблюдаемого процесса $X_{(n)}(t)$, определяющего надежность объекта мониторинга, состоит в отыскании такого момента времени S , при котором точечная оценка в первый раз выйдет за допусковую область S_0 . Зная допусковую область на возможные изменения ЭТХ СК и ТК, в процессе эксплуатации можно прогнозировать момент их выхода за пределы установленных значений [5].

Таким образом, на основе решения перечисленных задач можно получить оценку неизрасходованного времени безопасной эксплуатации объекта.

Для реализации метода прогнозирования случайных событий на основе совокупности априорного и апостериорного анализа безотказности необходимо выполнение трех основных этапов:

- получение чистого прогноза по всему известному прошлому о реализации «наблюдаемого» процесса $Z_{(n)}(t)$, который является результатом преобразования без помех интересующего нас процесса $X_{(n)}(t)$ некоторым оператором $Z_{(n)}(t) = AX_{(n)}(t)$, где A – коэффициент статистической взаимосвязи между двумя случайными процессами;

- получение чистого прогноза по частично известному прошлому о реализации «наблюдаемого» процесса $Z_{(n)}(t)$, который не искажен помехами, а «наблюдаемая» реализация представлена из-за недостаточной глубины контроля не всеми своими составляющими;

- получение прогноза по частично известному прошлому о «наблюдаемом» процессе $Z_{(n)}(t)$, который является результатом преобразования $X_{(n)}(t)$ при наличии помех некоторым оператором A (например, в случае аддитивной помехи $n(t)$, $Z_{(n)}(t) = A\{X_{(n)}(t) + n(t)\}$).

Отсюда следует, что для получения совокупности указанных прогнозов необходима априорная информация о наблюдаемом процессе и о помехах для будущих моментов времени. В действительности же может быть известно только поведение аналогичных объектов с точ-

ностью до степени влияния ошибок измерений и глубины контроля на ЭТХ объекта мониторинга.

Усреднение результатов индивидуального прогноза по ансамблю аналогичных объектов позволяет получать необходимые априорные оценки, повышение достоверности которых путем пополнения банка данных о поведении объектов мониторинга представляет собой одну из основных задач, решаемых системой мониторинга и контроля (СМиК) при оценке технического состояния СК и ТК космодрома [6].

Таким образом, для обеспечения заданной достоверности метода прогнозирования технического состояния объектов мониторинга в технических требованиях на разработку СМиК должны задаваться и подтверждаться обязательные требования по оценке априорной и апостериорной вероятностей до начала эксплуатации. Кроме этого, целесообразно пополнение банков данных объектов мониторинга информацией о статистическом поведении объекта с момента ввода в эксплуатацию до начала эксплуатации СМиК.

На основе анализа известных методов прогнозирования случайных процессов установлено, что наиболее перспективным методом прогнозирования технического состояния СК и ТК космодрома является использование апостериорного метода оценки остаточного времени безотказной эксплуатации на основе использования многофункциональных интеллектуальных СМиК.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.301–2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. ИЕС 60300-3.1:2003 (NEQ). – М. : Стандартинформ, 2013.
2. Васильев, Б. В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств / Б. В. Васильев. – М. : Советское радио, 1970. – 336 с.
3. Тюрин, М. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.
4. Дмитриенко, А. Г. Математическое моделирование состояния технически сложных объектов наземной инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 3–9.
5. Дмитриенко, А. Г. Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2013. – 164 с.
6. Ломтев, Е. А. Совершенствование алгоритмов сжатия-восстановления сигналов для систем телеизмерений / Е. А. Ломтев, М. Г. Мясникова, Н. В. Мясникова, Б. В. Цыпин // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 11–15.

Дмитриенко Алексей Геннадиевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Dmitrienko Aleksey Gennadievich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of rocket-space
and airtation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николаев Андрей Валерьевич

и.о. генерального директора,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Nikolaev Andrey Valer'evich

acting director general,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Михеев Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Семочкина Ирина Юрьевна

кандидат технических наук,
начальник Учебно-методического управления
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Mikheev Mihail Yur'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Semochkina Irina Yur'evna

candidate of technical sciences,
head of Educational-methodical management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

УДК 629.78: 047.36

Обоснование метода прогнозирования технического состояния систем стартовых и технических комплексов космодрома с использованием мониторинговой информации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 6–12.