

УДК 51.001.57:621(075.8)

Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности

Васильков Ю.В.^{1*}, Тимошенко А.В.^{2}, Советов В.А.^{3***}, Кирмель А.С.^{4****}**

¹*Ярославский государственный технический университет, Московский проспект, 88, Ярославль, 150023, Россия*

²*Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», ул. 8 марта, 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия*

³*Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Московский проспект, 28, Ярославль, 150001, Россия,*

⁴*Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета», ул. Профессора Попова, 5, лит О, Санкт-Петербург, 197376, Россия*

**e-mail: myvas@gapm.ru*

***e-mail: atimosenko@rti-mints.ru*

****e-mail: sovetov@list.ru*

*****e-mail: kirmell@mail.ru*

Статья поступила 16.10.2019

Аннотация

В статье рассматриваются особенности моделирования и оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности. Рассматриваются вопросы оценки адекватности математических моделей систем, в том числе различные подходы к оценке адекватности. Представлены подходы для более раннего определения вероятности появления опасного события, которые базируются на выделении трендов как в

случаях не зашумлённых оценок, так и в случае сильно зашумленных. В последнем случае выделяются начало, конец и угол наклона трендов, которые используются при моделировании систем радиомониторинга со случайными составляющими.

Рассмотрены особенности идентификации характеристик интенсивности потока отказов элементов системы при организации имитационного математического моделирования для анализа влияния интенсивности потока отказов на результаты моделирования и даны рекомендации для случаев, когда заранее интенсивность потока отказов неизвестна.

Рассмотрены особенности организации имитационного математического моделирования для случаев, когда интенсивность потока отказов заранее не известна, а также проведен анализ влияния потока отказов на результаты моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, случайная величина, адекватность модели, опасное событие, вероятность, интенсивность отказов.

Цель исследования и постановка задачи

Одной из основных задач, решаемых системами радиомониторинга (далее по тексту системы) при проведении летных экспериментов, является получение радиолокационных сигнальных и траекторных характеристик космических объектов в условиях реальной помеховой и ракетно-космической обстановки. Учитывая значимость и стоимость проводимых экспериментов, к системам предъявляются

повышенные требования по надежности и технической готовности к применению по назначению. Поэтому непосредственно перед работой система и ее составные части подвергаются техническому диагностированию для определения технического состояния. В то же время выполненные мероприятия лишь формируют диагностический портрет системы на момент диагностирования, а не обеспечивают ее функциональные характеристики и, следовательно, прогнозирование тенденции их изменения, в силу отсутствия статистических данных о надежности функционирования.

С учетом изложенного возникает и требует разрешения следующее противоречие: система и ее составные части по результатам технического диагностирования – исправны, а функциональные характеристики, в то же время, могут быть снижены, что неизбежно приведет к негативным последствиям (пропуск объекта, ошибки измерения сигнальных и траекторных характеристик и т.п.).

Выход из сложившейся ситуации видится в реализации исследований надежности систем при различных параметрах и условиях функционирования с применением имитационного моделирования, что позволит выявить влияние параметров потоков отказов на достижение возможного наименьшего уровня вероятности реализации опасностей и на стратегию реагирования на возможные отказы.

Основными проблемами в моделировании надёжности и функционирования систем являются высокая размерность традиционных статических моделей, которые описывают взаимоотношения отдельных частей, как в области функционирования,

так и в области оценки надёжности, вследствие большого количества связей между элементами, определяющих функциональные и надёжностные характеристики всей системы в определённые моменты времени, а также высокие требования к качеству функционирования (т.е. решение поставленных задач в том числе и по точности получаемых результатов). Однако процесс моделирования принципиально не может быть доведён до точных результатов в силу присутствия неопределённости, обусловленной техногенными составляющими, участием персонала с его индивидуальными психо-физическими особенностями, влиянием окружающей среды и рядом других факторов. Неопределённость порождает случайные составляющие в деятельности любой системы, а также в оценках её функционирования проектировщиками, эксплуатационниками и управляющим персоналом. Строить «достаточно точные» модели, от которых нередко требуется точность результатов заметно выше, чем точность поддержания режимов и условий её работы, принципиально бесперспективно. Всё это касается как математических моделей, так и физических (технических) моделей (имитаторов).

Широко распространены такие традиционные взгляды на точность математических моделей, как качественная адекватность модели и количественная адекватность. Каждая играет свою роль в оценке качества системы. Первая характеризует непротиворечивость ожидаемого поведения системы от теоретически возможного. Если в заданном диапазоне изменения параметров системы будет выявлена качественная неадекватность (даже при приемлемой количественной близости результатов), то такая модель не может быть использована для управления

функционированием (или для оптимизации) сложной системы. Вторая – характеризует количественную меру близости как правило расчётных и экспериментальных значений выходных сигналов. Тут для сравнения могут быть использованы не только содержательные физические выходные величины (напряжения, токи, промежуточные и выходные числовые значения и т.п.), но и расчётные (показатели качества функционирования системы в целом и её отдельных функциональных блоков, показатели качества надёжности, коэффициенты готовности и т.п.), которые характеризуют близость некоторых планируемых и реально достигаемых функциональных характеристик системы.

Следует обратить внимание на причины количественной неадекватности, играющие важную роль при оценке функционирования систем, особенно динамических. Первый источник, уже указанный выше, это наличие непрогнозируемых случайных составляющих в параметрах состояния любой системы. Вторым источником – это принципиальное несовпадение реального объекта и его описания. Если бы описание (модель) системы полностью точно совпадало с реальной системой, то это была бы не модель, а реальная система и мы не получили бы эффекта упрощения исследования с использованием модели. Хотя не следует забывать и вторую сторону оценки адекватности модели реальному объекту: если модель совершенно не отражает в нужной мере свойства реального объекта, то это не модель, она не принесёт никакой пользы. Модель всегда описывает свойства любой системы с определённой точностью (или погрешностью) (как правило, заданной), обусловленной необходимостью требований решения поставленной

задачи. Учёт этих различных причин неадекватности модели исследуемому процессу требует обоснования путей совершенствования (т.е. повышения качества) моделей сложных систем.

Основные требования к модели оценки функциональных характеристик систем

Анализ любой сложной системы в том числе и рассматриваемой системы радиомониторинга, должен проводиться по модели, «которая устраивает» разработчика и эксплуатационника системы. Это не формализованное требование вызвано тем, что критерии качества модели включают в себя субъективно задаваемые требования к качеству системы (например: «среднее квадратичное отклонение расчётных при проектировании и экспериментальных значений не должно превышать 1% от экспериментальных», или: «вычисленный по экспериментальным данным критерий Фишера [1 - 3] при оценке адекватности стохастической модели должен быть менее теоретического при вероятности не ниже 0,975, т.е. при уровне значимости 0,025», или другие, обеспечивающие более высокие требования к качеству совпадения планируемых (расчётных) значений и экспериментальных), следовательно, результат оценки «адекватности модели» в целом является субъективным.

В любом случае нельзя требовать точности предсказания характеристик объекта по модели выше, чем погрешность измерения параметров состояния реальной системы. Особенно это касается стохастических моделей, которые

учитывают случайные внутренние и внешние воздействия. При этом следует помнить, что предсказать точное появление воздействия, способного вызвать резкое ухудшение функционирования системы или даже привести к полному отказу в принципе невозможно. Получить «надёжное предсказание» можно только «в среднем», т.е. при многократном появлении опасного события. Хотя есть некоторые подходы, позволяющие повысить вероятность предсказания появления неблагоприятного события. Следовательно, не всегда целесообразно строить «абсолютно точные» детерминированные модели, использование которых трудоёмко при создании и затратно с позиции времени их применения.

Предложенная методика основывается на моделировании основного процесса изменения вероятности появления опасного события в математической модели системы, которое может осуществляться системой дифференциальных уравнений первого порядка для каждой выполняемой системой функции или некоторых основных из них. Эта функция может реализоваться одним или несколькими условными блоками (техническими, алгоритмическими, организационными и пр.), каждый из которых при снижении надёжности их функционирования может потерять полностью или часть своей работоспособности.

Система уравнений должна описывать тенденцию повышения вероятности появления отказа (т.е. снижения работоспособности системы) для каждого такого блока и в целом для всей исследуемой функции системы. Такая модель может быть представлена следующим образом:

$$T_{iner_l}(t) \frac{dp_l(t)}{dt} + p_l(t) = 1 - X_l(t - \tau_k) - (1 - X_l(t - \tau_k)) \cdot \sum_{i=1}^{k_l} \beta_{\Omega li} Y_{li}(t) + \varepsilon_l(t), \quad l = \overline{1, m} \quad (1)$$

где p_l – вероятность появления возможного отказа для l -й функции в текущий момент времени t ;

m – количество моделируемых функций системы;

$T_{iner_l}(t)$ – коэффициент инерционности, характеризующий скорость изменения вероятности появления неблагоприятной ситуации (отказа) для l -й функции системы при постоянном воздействии (является функцией срока службы блока, реализующего l -ю функцию);

$X_l(t - \tau_k)$ – состояние моделируемого блока, отвечающего за l -ю функцию системы: $X=0$ если блок работает и $X=1$, если блок в состоянии отказа, $(t - \tau_k)$ – время с запаздывающим аргументом, обусловленным началом работы заменённого блока, в этот момент времени реализуются начальные нулевые условия решения системы диффузов для вновь введённого блока;

$Y_{li}(t)$ – функция потерь, т.е. значение отклонения i -го параметра l -й функции, в качестве которого рассматривается «плавный уход» соответствующего i -го параметра от центра диапазона его допустимых значений, предпочтительно использовать квадратичную функцию потерь;

$\beta_{\Omega lj}$ – весовой коэффициент, характеризующий влияние значения функции Y на вероятность появления опасного события, а также учитывающий условную вероятность появления отклонения в анализируемом блоке при появлении отказа в множестве Ω блоков других функций, взаимодействующих с данным lj -м блоком;

$\varepsilon_l(t)$ – случайная составляющая в процессе изменения вероятности; это некоторая обобщённая функция, учитывающая, в совокупности, возможные

случайные составляющие параметров модели, а также случайные события, отражающие влияние внутренних и внешних явлений, являющихся следствием неопределённости элементов технического состояния моделируемого блока, параметров состояния внешней среды и пр.

Определение момента выхода блока из строя во многом определяется интенсивностью потока отказов, которая задаётся исследователем при моделировании или из реальной (или имитационной) системы. Особенности применения интенсивностей потоков отказов для различных случаев их задания (расчета) рассмотрена по тексту ниже.

В целом модель (1) описывает изменение вероятности появления неблагоприятного события для l -й функции системы в зависимости от состояния отвечающего за работоспособность этой функции блока X (работает блок или находится в состоянии отказа) и от уровня отклонения отдельных режимов функционирования Y или свойств блока внутри допустимого диапазона изменения.

Другими словами, многократный «прогон» модели позволит получить статистические данные о вероятности появления (в среднем) неблагоприятного события, которые можно будет использовать при оценке функциональных характеристик системы и предсказать их изменение непосредственно перед проводкой космических объектов. Тем более появляется возможность обосновать необходимое и достаточное количество попутных проводок, например, космических аппаратов, для накопления реальной статистической информации и в последующем

(при работе по космическим объектам) свести вероятность появления неблагоприятного события к минимуму.

На следующем этапе методики необходимо учесть существенные отклонения поведения системы от запланированных траекторий функционирования. Такие опасные события и их последствия являются случайными как вследствие неточности модели, так и вследствие непредсказуемого изменения «окружающей среды», т.е. внешних воздействий. Они фактически характеризуют потенциальные потери в функционировании системы и предпочтительно должны быть учтены при её моделировании. Для этого можно использовать методологию выявления трендов на фоне реакции на случайные воздействия.

Точно предвидеть возможность появления случайного события невозможно, однако можно воспользоваться концепцией индикаторов [4], которая позволяет снизить неопределённость оценки ситуации, т.е. повысить вероятность выявления приближения опасного события.

Индикатором называют некоторый параметр [4], аномальная тенденция изменения величины которого может характеризовать приближение опасного события при сохранении неизменности функционирования всей исследуемой или управляемой системы. Например, попадание в третью зону кривой надёжности («ванны») приводит к существенному ускорению частоты отказов, что может быть принято в качестве индикатора. Главное требование к индикатору – способность быть измеряемым и своей тенденцией изменения характеризовать приближение критического состояния (реализации опасности). Аппроксимируя тенденцию

изменения показателя-индикатора (линейной или нелинейной функцией) можно найти время до достижения критического состояния системы. Чем ближе это время, тем выше возможность оценки близости приближения опасности и это время принять за показатель близости реализации опасности [5].

На рис. 1 приведены несколько последних (в данном примере – три) значений индикатора с течением времени. Можно с помощью аппроксимации значений подходящей зависимостью (которая выбирается исходя из анализа имеющихся данных, в приведенных примерах это может быть линейная или квадратичная функция) оценить время снижения конкретного индикатора до достижения критического значения – $t_{ДКЗ}$, которое соответствует реализации опасности.

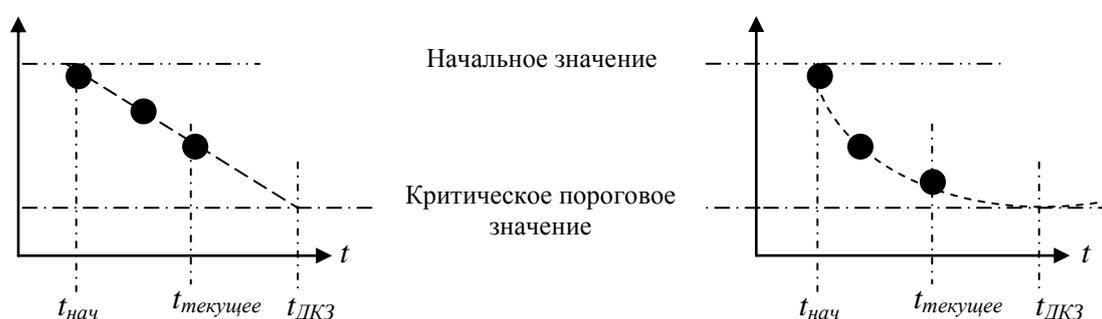


Рис. 1. Примеры тенденций изменения значений индикаторов
(вертикальная ось – значение выбранного индикатора)

Тогда «оценкой вероятности» реализации опасности может быть величина отношения

$$p = \frac{t_{\text{текущее}} - t_{\text{нач}}}{t_{\text{ДКЗ}} - t_{\text{нач}}}.$$

Эта оценка изменяется в диапазоне от 0 до 1. При этом единица соответствует достижению критического порогового значения, т.е. фактически наступлению опасного события, т.е. опасность становится свершившейся (или с учётом случайной составляющей близка к единице). Чем меньше величина p , тем меньше вероятность наступления опасности.

На левом рисунке показан пример применения линейной функции. На правом рисунке показан пример нелинейной аппроксимирующей зависимости – квадратичной.

Из сравнения рисунков видно, что в общем случае нельзя принимать в качестве «оценки» вероятности реализации опасности близость значения индикатора к критическому пороговому значению, например, в виде аналогичного по структуре соотношения

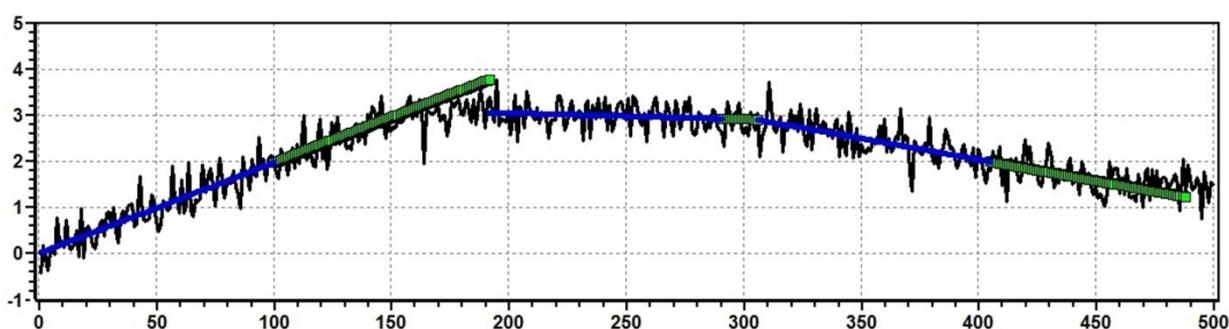
$$p = \frac{I_{\text{текущее}} - I_{\text{нач}}}{I_{\text{крит.пор.}} - I_{\text{нач}}}$$

Во втором случае по значениям индикатора оценка близости к критическому значению существенно больше (т.к. значение числителя соотношения существенно ближе к значению знаменателя), чем в первом (т.е. опасность достижения критического значения кажется выше), а время достижения критического уровня – то же самое. Возможна и выпуклая функция изменения характеристик индикатора. В этом случае развитие опасной ситуации при приближении к критическому состоянию будет происходить более быстрыми темпами.

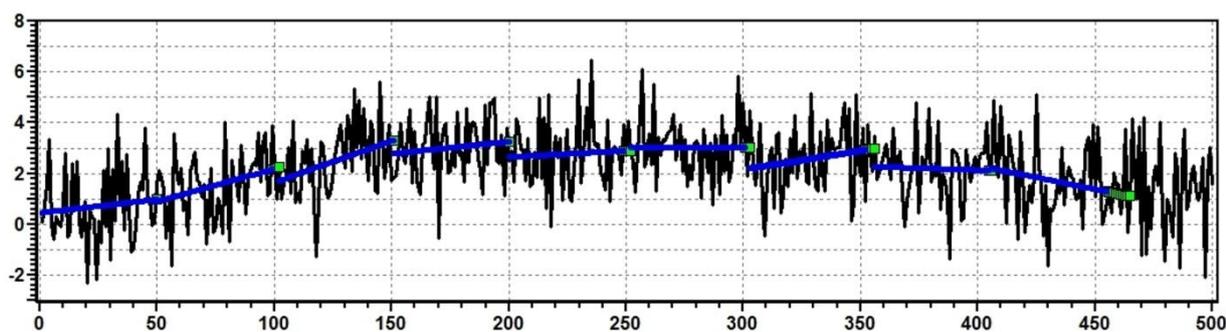
Для более надёжного применения индикаторов следует всегда использовать последние их значения как более актуальные и надёжные. Однако не следует

абсолютизировать такой подход (хотя в качестве его достоинства можно указать высокую оперативность и быстроту получения оценки), он полезен только при существенном превышении изменения индикатора имеющегося уровня случайной составляющей.

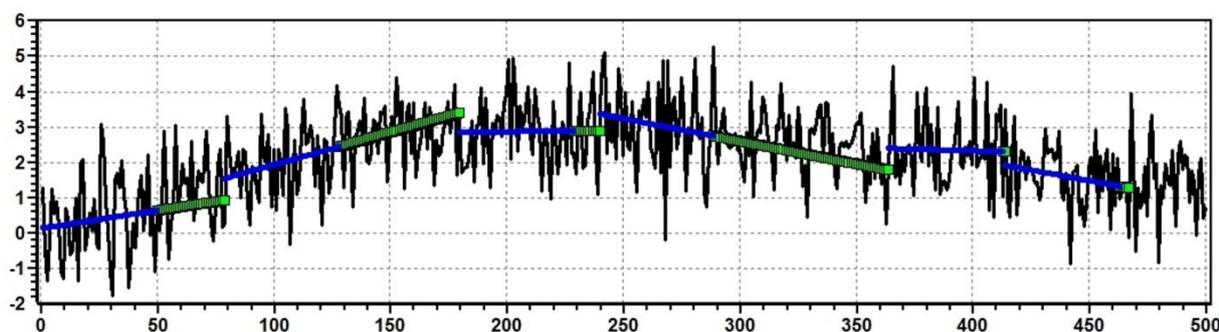
При значительном уровне случайной составляющей использование трёх (и даже 5) данных может оказаться явно недостаточно для надёжного выделения тренда. Нужно применять более затратные алгоритмы, использующие большее количество данных и малочувствительные к случайным составляющим. Одним из таких возможных алгоритмов является аппроксимирующий алгоритм выделения линейных трендов [7 - 9]. Примеры выделения заданных трендов при различных соотношениях случайной составляющей и изменения тренда приведены на рис. 2. Такой алгоритм позволяет не только выделять линейный тренд на заданном интервале аргумента (например, времени), но и определять начало, конец и угол наклона любого участка линейного тренда, что позволяет надёжнее предсказывать появления опасного события.



а)



b)



с)

Рис. 2. Выделение линейного тренда при различном уровне «зашумленности»
(а, b, с) полезной информации

Приведённые примеры применения алгоритма [7, 10] позволяют точнее за большой период аргумента (например, времени) предсказать потенциальное появление опасности отказа системы или приближение к значительному отклонению функциональных характеристик системы от нормы. При этом это делается на фоне случайных составляющих, в ряде случаев довольно существенных. Поэтому рассмотренные алгоритмы являются составной частью методики и учтены при моделировании систем.

Одной из важных характеристик возможных воздействий на систему (или на её отдельный элемент) является интенсивность потока отказов λ , которая определяет среднюю частоту появления опасного события. Поэтому при имитационном моделировании [11] прежде всего нужно выявить влияние λ для каждого события на частоту реализации опасности в интересующем исследователя интервале времени. Это связано с тем, что любое значение λ описывает среднее воздействие на систему на большом интервале времени. И даже если средняя частота появления опасного события равна 1 раз в год, то это не означает, что период этого появления будет величиной постоянной и равен одному году. Этот период появления опасности будет не постоянный.

С использованием закона Пуассона (распределение редких событий)

$$p_{\tau}(k) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau} \quad (2)$$

можно получить вероятность появления события, заключающегося в многократном появлении (k раз) в интересующий нас диапазон времени. Некоторые результаты этих расчётов (2) для интервала в 6 месяцев приведены для семейства интенсивностей λ на рис. 3.

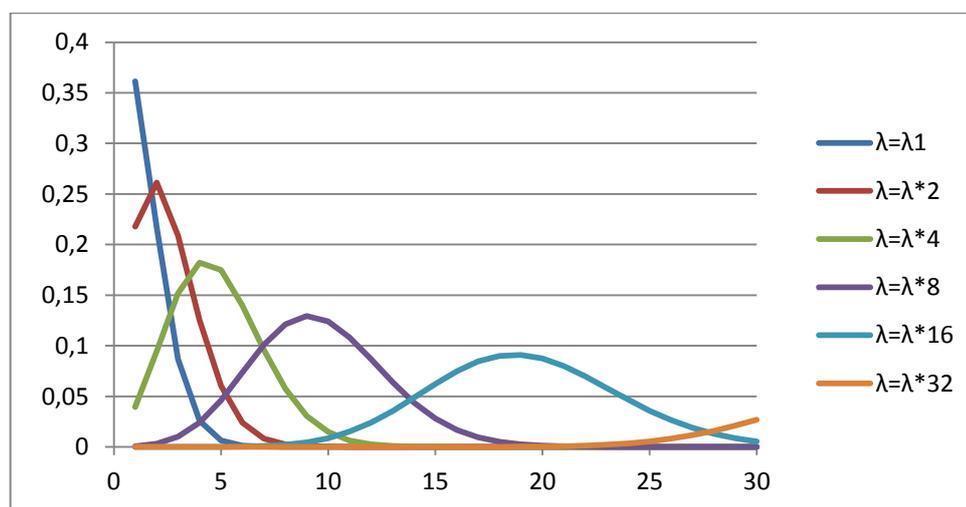


Рис. 3. Зависимость вероятности (вертикальная ось) появления k опасностей от k (горизонтальная ось) для различных интенсивностей потоков отказов:

$$\lambda = \lambda_1 - 0,2 \text{ раза в год, } \lambda = \lambda_1 * 2 = 0,4 \text{ раза в год,}$$

$$\lambda = \lambda_1 * 4 = 0,8 \text{ раз в год, } \dots, \lambda = \lambda_1 * 32 = 6,4 \text{ раза в год}$$

При оценке возможных потерь в заданный интервал времени следует учитывать не два проявления опасного события, например, с $\lambda=4$, а 7 раз, хотя и вероятность такого события также будет около 0,1. Т.е. вероятность этой 7-и кратной реализации будет примерно такая же, как и появление двух событий при том же значении λ . Вероятность появления 4-5 реализаций будет заметно больше – около 0,18.

Очевидно, что рассчитывать появление опасных событий нужно из наихудшего варианта развития опасных событий. При этом наихудшим будет случай с максимальной вероятностью появления одного или группы опасных событий. Как видно из рисунка 3, максимальное значение вероятности появления

группы опасных событий имеет место в точке стационарности функции $P(k)$, т.е. когда производная $dp/dk=0$. Из этого условия можно найти максимальное количество k реализаций опасных событий

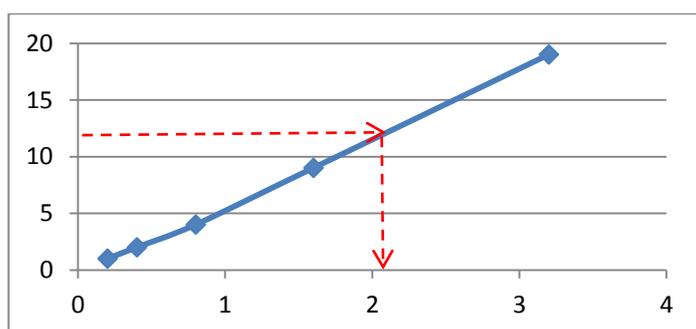
$$\frac{d}{dk} \left[\frac{(\lambda\tau)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda\tau} \right] = \frac{e^{-\lambda\tau} \cdot \ln(\lambda\tau) (\lambda\tau)^k}{k!} - \frac{\frac{d}{dk} \text{fact}(k) \cdot e^{-\lambda\tau} \cdot (\lambda\tau)^k}{(k!)^2} = 0. \quad (3)$$

Преобразование условий (3) приводит к следующему уравнению:

$$\frac{e^{-\lambda\tau} \cdot \ln(\lambda\tau) (\lambda\tau)^k}{k!} = \frac{\frac{d}{dk} \text{fact}(k) \cdot e^{-\lambda\tau} \cdot (\lambda\tau)^k}{(k!)^2}. \quad (4)$$

Очевидно, что решение этого нелинейного уравнения (4) относительно k крайне проблематично, хотя и возможно. Стоящая в правой части производная может быть раскрыта через Гамма-функцию и формулу Стирлинга [12 - 17].

Поэтому предпочтительно воспользоваться графическим методом. Для этого сделаем некоторые общие предварительные построения (см. рис. 4).



λ	N
0,2	1
0,4	2
0,8	4
1,6	9
3,2	19

Рис. 4. Зависимость количества раз N повторения опасных событий (вертикальная ось) от интенсивности потока отказов λ (горизонтальная ось)

Приведённый на рис. 4 график образован точками, соответствующими максимальному значению вероятности группы повторяющихся опасных событий в диапазоне времени в 6 месяцев для различных значений интенсивности потоков отказов. По данным, приведённым в таблице, можно построить аналитическое выражение, связывающее интенсивность потока отказов с количеством раз повторений в среднем отказов в потоке исходных данных.

Эту зависимость можно применить для оценки интенсивности потоков отказов при проведении имитационного моделирования с помощью математической модели надёжности системы эвристическим способом [18 - 20]. Этот процесс может быть проведён следующим образом.

Последовательно задавая повторяющиеся потоки при имитационном моделировании (математическом или с помощью физически реализованного имитатора) с заданными средними интенсивностями отказов, но случайно реализованных во времени сериями, многократно превышающими исследуемый интервал времени моделирования, получаем набор случайных реализаций серий отказов с различным числом отказов. Проводя указанные стрелками на графике построения по максимальному числу повторов опасных событий получаем оценку интенсивности потоков отказов. Полученные значения могут быть использованы для оценки интенсивности потоков в реальных системах при наблюдении за их функционированием.

Рассмотрим несколько вариантов развития событий.

Первый вариант. Реализация опасности не останавливает работоспособность системы и новое проявление этой же опасности может случиться в любой заранее неизвестный (случайный) момент времени. Такая опасность, как правило, приводит к появлению отдельной ошибки функционирования системы. В этом случае не принимаются меры по исключению повторного проявления опасности, а просто происходит замена соответствующего функционального блока. Поэтому вероятность повторного (и последующих) появления опасности остаётся неизменной.

Второй вариант. Реализация опасности приводит к остановке функционирования системы. В этом случае, как правило, удаётся выявить причину появления опасности и принять меры к её ликвидации или уменьшению влияния на последующие проявления опасности, что обычно связано с заменой вышедшего из строя блока новым модернизированным. Соответственно с новыми характеристиками в том числе и интенсивностью потока отказов. Это может привести как к изменению вероятности следующего появления опасности, так и к снижению суммарной тяжести последствий, что необходимо учитывать.

Третий вариант. Возникающие опасности не являются статистически независимыми, т.е. значимыми могут быть условные вероятности появления другой опасности при возникновении одной. Это приводит к реализации сразу не одной, а нескольких опасностей, причём связь между ними не детерминированная, а стохастическая. Другими словами, проявление в данный момент времени зависимой

опасности является случайным событием и эту вероятность нужно предварительно оценивать.

Значение λ может быть известно из предварительных данных производства для каждого блока или из эксплуатации аналогичных изделий примерно в аналогичных условиях.

Если интенсивность потока отказов заранее не известна, то её можно оценить путём математического имитационного моделирования в ожидаемом диапазоне значения λ . И при опробовании модели на реальном техническом имитаторе или на реальном объекте подобрать приемлемое значение интенсивности потока отказов с последующим использованием при оценке функциональных характеристик систем.

Заключение

В работе представлена методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности, а также проанализированы особенности математического моделирования в условиях неопределенности. Отмечено наличие сложностей при моделировании, к которым отнесены наличие случайных составляющих в действующих моделируемых процессах, что вызывает определённые трудности при оценке адекватности моделей.

Приведены подходы для обеспечения более ранней оценки вероятности появления опасности, которые базируются на выделении трендов как в случаях не зашумлённых оценок, так и в случае сильно зашумленных. Выделенные тренды

используются в модели для оценки приближения индикаторов к своим критическим значениям.

Рассмотрены особенности идентификации характеристик интенсивности потока отказов элементов системы при организации имитационного математического моделирования для анализа влияния интенсивности потока отказов на результаты моделирования и даны рекомендации для случаев, когда заранее интенсивность потока отказов неизвестна.

Библиографический список

1. Васильков Ю.В., Иняц Н. Статистические методы управления предприятием. - М.: РИА Стандарты и качество, 2008. - 280 с.
2. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. - М.: Мир, 1973. - 958 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. - М.: Мир, 1989. – 540 с.
4. Eckehard Bauer, MSc, Dr. Roland F. Erben, Mag. Peter Reichert. Risk Manager. Training course, Quality Austria, Trainings-, Zertifizierungs- und Begutachtungs GmbH, 2009, 110 p.
5. Васильков Ю.В., Гущина Л.С. Оценка вероятности появления опасности при анализе управленческих рисков // Материалы международного е-симпозиума ES-Э-2013-016 «Математические и инструментальные методы экономики: теория,

методология, практика" (Москва, 28 - 31 октября 2013) - Киров: МЦНИП, 2013. С. 24 – 36.

6. Vasilkov Y., Gushchina L. Management of internal risks and opportunities of enterprises // International Journal for Quality Research, 2015, no. 9 (3), pp. 455 - 466.

7. Васильков Ю.В. и др. Определение тренда параметра потока отказов радиоэлектронной аппаратуры // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2018. № 2. С. 82 - 95.

8. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67501>

9. Линкевичиус А.П. Метод оптимизации комплекса контроля и управления техническим состоянием адаптивных фазированных антенных решёток РЛС // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81098>

10. Гипич Г.Н. и др. Риски и безопасность авиационных систем. – М.: ГосНИИ ГА, 2013. - 225 с.

11. Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем. Математические основы. - Минск: БГУ, 2009. Ч. 1. - 263 с.

12. Артин Э. Введение в теорию гамма-функций – М.:URSS, 2009. - 37 с.

13. Ильин В.А. и др. Математический анализ. – М.:Изд-во МГУ, 1987. – 358 с.

14. Запорожцев А.В. Моделирование технических систем // Фундаментальные исследования. 2014. № 8. Ч.6. С. 1288 – 1294.

15. Лапина В.Л., Попова В.М., Пучкова В.А., Томакова В.И., Фалеева М.И. Надежность технических систем и техногенный риск. – М.: Деловой экспресс, 2002.
URL: https://www.docme.ru/doc/1699002/akimov-v.a.--lapin-v.l.-nadezhnost._-tehnicheskikh-sistem-i-t...
16. Hillson D. The Risk Management Handbook: A practical guide to managing the multiple dimensions of risk. Kogan Page, London, 2016, available at: https://play.google.com/store/books/details/The_Risk_Management_Handbook_A_Practical_Guide_to?id=QohGDAAAQBAJ&hl=ru
17. Akimov V.A., Lapin V.L., Popov V.M., Puchkova V.A., Tomakova V.I., & Faleeva M.I. (2008). Probability of danger (Reliability of technical systems and technological hazards). Electronic textbook. Retrieved from: <http://www.obzh.ru/nad/7-1.html>
18. Авакян А.А., Курганов А.В. Физическая модель и закон распределения отказов элементов и систем электроники // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47075>
19. Басманов В.Г., Закалата А.А., Холманских В.М. Математическая модель надежности элементов электроснабжения в период приработки // Фундаментальные исследования. 2015. № 5-2. С. 247 - 251.
20. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=22873>