

Управление функциональной надежностью радиолокационных систем в условиях воздействия дестабилизирующих факторов

М.Ю. Прокофьев¹

¹ Военно-космическая академия имени Александра Федоровича Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13
E-mail: vka@mil.ru

Рассмотрена роль управления функциональной надежностью радиолокационных систем в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Проведен краткий анализ основных способов поддержания функциональной надежности радиолокационных комплексов на требуемом уровне: периодического и непрерывного контроля параметров функционирования, применения прогностических алгоритмов и интеграции рекомендательных механизмов поддержки принятия решений. Рассмотрены их основные достоинства и недостатки. Определены основные требования к используемым данным и вычислительным ресурсам при реализации различных подходов. Приведены графические примеры функционирования систем, использующих различные подходы к управлению функциональной надежностью, для наглядного сравнения. Определены ключевые критерии для выбора конкретного способа поддержания функциональной надежности радиолокационных систем на требуемом уровне. Предложен показатель оценки соответствия способа управления функциональной надежностью конкретным условиям эксплуатации радиолокационной системы, а также приведен пример его расчета.

Ключевые слова: функциональная надежность, радиолокационная система, помехи, сложная техническая система, дестабилизирующие факторы

Control of functional reliability of radar systems under destabilizing factors

M.Yu. Prokofiev¹

¹ A.F. Mozhaisky Military Space Academy.

The paper considers functional reliability control of radar systems under destabilizing factors. The approaches to maintaining the required functional reliability level of complex radar systems are analyzed, including periodic and continuous monitoring, predictive algorithms and recommendation-based decision support. A conformity assessment indicator for selecting a reliability control method under specific operational conditions is proposed. A calculation example for a stationary radar operating under electronic countermeasures is presented.

Keywords: functional reliability, radar system, interference, complex technical systems, destabilizing factors

Введение

Радиолокационные системы (РС) являются важнейшими элементами систем управления, связи и навигации. Они обеспечивают обнаружение, измерение координат, сопровождение и классификацию объектов, определение радиолокационной обстановки и передачу информации в контур управления.

В виду широкого разнообразия РС также разнообразны и условия их эксплуатации. Очень часто РС подвергаются воздействию дестабилизирующих факторов, таких как ошибки в действиях эксплуатирующего персонала, сложная помеховая обстановка и др. [1] Эти факторы имеют деструктивное влияние на функциональную надежность РС. В целях недопущения функциональных отказов в процессе эксплуатации РС необходимо

обеспечить эффективное управление процессом поддержания их функциональной надежности на требуемом уровне.

Под функциональной надежностью понимается способность системы правильно выполнять предусмотренные функциональные задачи с приемлемым уровнем безошибочности в реальных условиях эксплуатации при взаимодействии с внешними объектами [2].

Проведено множество научных исследований, рассматривающих вопросы обеспечение надежности сложных технических систем [3, 4], каковыми являются РС. Однако основным направлением поддержания надежности РС, как правило, избирается обеспечение структурной надежности [5]. При этом зачастую функциональная надежность [2] РС либо упоминается вскользь, либо не упоминается вовсе [6]. Такой подход следует считать несправедливым по причине того, что высокие показатели структурной надежности не гарантируют качественного выполнения функциональных задач, стоящих перед РС. Даже при непрерывной работе аппаратных компонентов РС есть вероятность невыполнения заданных целевых функций по причине, например, помехового воздействия, либо ошибки в действиях эксплуатирующего персонала.

Цель данной работы заключается в определении основных путей управления функциональной надежностью РС и универсального способа оценки соответствия выбранного пути эксплуатационным условиям.

Таким образом, поиск эффективных способов управления функциональной надежностью РС в условиях воздействия дестабилизирующих факторов является важной и актуальной задачей.

Анализ путей поддержания функциональной надежности РС на требуемом уровне

Одним из возможных способов поддержания функциональной надежности РС на требуемом уровне является периодический контроль качества реализации целевых функций РС и принятие мер по парированию возникающих функциональных отказов при обнаружении несоответствия результатов функционирования предъявляемым к ним требованиям.

Для того, чтобы реализовать данный подход необходимо определить, вычислить или выбрать следующие данные:

- требования к объему и качеству результатов, получаемых в ходе решения функциональных задач, стоящих перед рассматриваемым РС;
- контролируемые параметры, по которым можно достоверно определить качество выполнения РС своих функций;
- критерии функционального отказа, однозначно определяющие факт наличия отказа;
- периодичность проведения контроля параметров, обеспечивающая выявление отказов с допустимой задержкой.

Реализация рассмотренного подхода обладает относительно высокой простотой реализации и при этом позволяет с высокой вероятностью реагировать на возникающие в РС функциональные отказы, что способствует повышению скорости их устранения и восстановления средств для функционирования в штатном режиме.

Недостатками такого подхода являются:

- вероятность возникновения функционального отказа сразу после очередной итерации контрольных мероприятий, что отодвинет момент его обнаружения во времени на величину периода контроля;
- невозможность прямого влияния на частоту возникновения функциональных отказов, а, следовательно, и на время безотказной работы;

– отсутствие необходимых сведений для заблаговременного планирования мероприятий по парированию угроз.

Альтернативным способом поддержания функциональной надежности на требуемом уровне следует считать непрерывный контроль функционирования РС для выявления и устранения отказа в режиме реального времени. Подобный подход не обременен таким недостатком как вероятность выхода за допустимые рамки времени обнаружения отклонений в контролируемых параметрах, являющихся признаками отказов. Но в то же время реализация этого подхода несколько более сложная в техническом плане, что отражается в повышении нагрузки на вычислительные мощности системы, обеспечивающей его осуществление.

Наиболее ресурсоемким и сложным в реализации является подход к поддержанию функциональной надежности на требуемом уровне, связанный с интеграцией прогностических алгоритмов. Прогнозирование возможных функциональных отказов в данном случае обеспечивается за счет использования исторических данных о функционировании аналогичных РС, а также опыта эксплуатации рассматриваемого РС в качестве статистических данных для проведения анализа. Целью такого анализа является выявления повторяющихся паттернов в изменениях контролируемых параметров, которые предшествуют возникновению функциональных отказов. Данный способ позволит заблаговременно выявлять негативные тенденции в наборе контролируемых параметров и устранять предпосылки возникновения отказов на ранних этапах их проявления.

Внедрение элемента прогнозирования расширяет перечень необходимых данных для реализации подхода, добавляя к нему статистические данные функционирования рассматриваемого изделия и его аналогов. Недостаточное количество исторических данных может привести к снижению эффективности прогностической составляющей и неверным прогнозам, что в конечном итоге негативно скажется на результатах функционирования РС.

В дополнение к рассмотренным способам поддержания функциональной надежности на требуемом уровне достоин отдельного рассмотрения вариант использования рекомендательной системы в целях повышения эффективности профилактических и восстановительных мероприятий, проводимых на РС. Такого рода системы способны на основе данных о функционировании РС и опыта эксплуатации рассматриваемого и аналогичных РС формировать рекомендации для эксплуатирующего персонала. Подобные рекомендации могут содержать сведения о необходимых технических и организационных мероприятиях, проведение которых в отношении РС с высокой долей вероятности позволит избежать возникновения и своевременно устранить функциональные отказы, а также последствия их влияния на функционирование РС.

Для создания рекомендательной системы требуется большой объем опытных знаний экспертов, эксплуатирующих РС или его аналоги за достаточно длительный промежуток времени. Это позволит учесть большое количество различных ситуаций функционирования и на основе этого выдавать более качественные рекомендации. Система может рекомендовать выполнить технические манипуляции: перестройку рабочей частоты, изменение структуры зондирующего импульса, адаптивную настройку диаграммы направленности, изменение порогов обнаружения сигнала, активацию помехозащитных алгоритмов, переход на резервное оборудование или резервные режимы обработки и т.д. [1] Также возможна выдача рекомендаций организационного толка: перенос очередного технического обслуживания, изменение состава или порядка выполнения мероприятий в него входящих и т.п.

В зависимости от особенностей конкретного РС, условий его применения и специфики самих формируемых рекомендаций возможна их реализация как в ручном режиме силами эксплуатирующего персонала, так и в автоматизированном или даже автоматическом. Такой подход позволит оперативно принимать решения и выполнять необходимые операции, обеспечивающие поддержание функциональной надежности РС на требуемом уровне, посредством проведения технических или организационных мероприятий, частично или полностью нейтрализуя при этом влияние человеческого фактора на конечный результат.

Внедрение рекомендательной системы при организации периодического контроля представляется нецелесообразным, когда особенности РС не позволяют реализовать более сложный подход к обеспечению функциональной надежности и важным критерием выбора является наличие пониженных требований к вычислительной мощности системы. Поэтому в данном случае интеграция системы рекомендаций приведет лишь к усложнению, сводя на нет требуемую простоту периодического контроля параметров. Такой подход актуален и в случае с внедрением прогностических алгоритмов.

Для большей наглядности сравнения представленных способов предлагается рассмотреть график для каждого предложенного варианта (вертикальная ось) во времени (горизонтальная ось) (рис. 1), отражающий динамику изменения такого показателя функциональной надежности как вероятность безошибочного выполнения процесса (2) [2].

$$P_i = \prod_{j=0}^{m_i-1} P_{\pi j}, i = 1, 2, \dots, n; m_i \in M, \quad (2)$$

где m_i – количество уровней иерархии при выполнении i -го процесса;

$P_{\pi j}$ – вероятность безошибочного выполнения процесса j -го уровня иерархии в составе данного процесса;

n – количество процессов, выполняемых в текущий момент времени.

В качестве нормального значения этого показателя принято решение считать значение 0,99. Динамика изменений рассматривается применительно к ситуациям возникновения признаков возможного функционального отказа, полного функционального отказа или реагирования на возможность его возникновения, выполнения профилактических или восстановительных мероприятий.

Графическое представление динамики изменения показателя (2) наглядно демонстрирует, что его интеграл по времени при реализации подхода с непрерывным контролем параметров с прогнозированием и формированием рекомендаций приобретает наибольшее значение, с периодическим контролем параметров – наименьшее, остальные – промежуточное.

Таким образом, рассмотренные пути поддержания функциональной надежности РС на требуемом уровне предлагают различные варианты наборов компонентов для решения данной задачи. В краткой форме описаны алгоритмы от самых простых, реагирующих лишь на возникающие угрозы снижения показателей функциональной надежности в заданные промежутки времени и борющихся с их последствиями, до более сложных, прогнозирующих возможные отклонения от требуемых характеристик функционирования РС и предлагающих решения для предотвращения и парирования функциональных отказов в режиме реального времени. Проведен краткий анализ графического представления влияния рассмотренных способов на динамику изменения значений вероятности безошибочного выполнения процесса при различных ситуациях функционирования РС. Кроме того, со сложностью применяемых алгоритмов прямо

пропорционально растут требования к объему, полноте и достоверности эксплуатационных данных, используемых в их реализации.

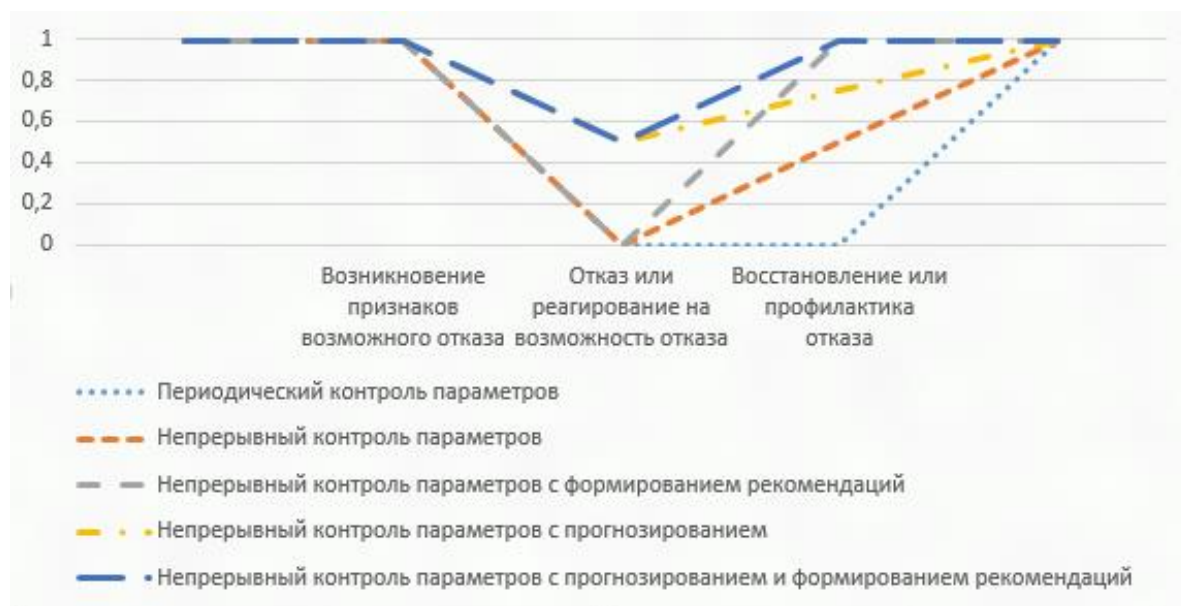


Рис. 1. Графическое представление влияния рассмотренных способов управления функциональной надежностью на динамику изменения показателя вероятности безошибочного выполнения процесса при различных ситуациях функционирования РС

Расчет показателя оценки соответствия способов управления функциональной надежностью для конкретного РС

Конечный выбор применяемого алгоритма зависит как от особенностей самого РС, чью функциональную надежность стоит цель поддерживать, так и от внешних условий его эксплуатации, а также важности конкретного комплекса в масштабе всех РС, выполняющих общую задачу.

Для определения степени соответствия того или иного подхода к управлению функциональной надежностью из рассмотренных ранее, используется формула (3):

$$S = \sum_{i=1}^k w_i * f_i(x), \quad (3)$$

где S – оценка соответствия способа управления функциональной надежностью конкретной ситуации;

w_i – весовой коэффициент i -го параметра;

k – количество учитываемых параметров;

x – рассматриваемый способ;

$f_i(x)$ – функция, оценивающая соответствие способах по i -му параметру.

Предложенная формула (3) является универсальным инструментом, в основе которого лежат два набора данных:

- весовые коэффициенты w_i , отражающие важность каждого из рассматриваемых критериев для конкретного РС и условий его применения;
- функции оценки $f_i(x)$, определяющие степень соответствия использования того или иного из оцениваемых способов конкретной ситуации по каждому критерию.

В реальных условиях оба набора данных должны определяться методом формализованного экспертного опроса. В рамках данной статьи для демонстрации примера применения предложенного показателя приведен гипотетический расчет с использованием условных значений оценок и весов, на основе моделирования возможного мнения гипотетической группы экспертов. Это позволяет наглядно

представить алгоритм принятия решения по выбору способа управления функциональной надежностью РС.

В качестве примера РС, для которой будет производиться расчет соответствия выбран стационарная радиолокационная станция кругового обзора метрового диапазона, входящая в состав системы управления воздушным транспортом. Данная РС эксплуатируется в следующих условиях: высокая вероятность применения активных помех, использование имитационных помех, переменные метеоусловия, ограниченное время подготовки операторов, высокая приоритетность формируемой информации и высокий вычислительный потенциал станции.

Для сравнения рассматриваемых способов выбраны следующие критерии: возможность применения на мобильных средствах, вычислительная сложность, учет уровня подготовки персонала, устойчивость к воздействию средств технической разведки, устойчивость к воздействию средств радиоэлектронного подавления.

Функция оценки для каждого параметра в зависимости от степени его проявления будет иметь следующие значения:

- 1) адаптивность к изменению помеховой обстановки: высокое – 1, среднее – 0,5, низкое – 0
- 2) вычислительная сложность: высокая – 1, средняя – 0,5, низкая – 0;
- 3) требования к квалификации персонала: высокий – 1, средний – 0,5, низкий – 0;
- 4) устойчивость к активным помехам: высокая – 1, средняя – 0,5, низкая – 0;
- 5) устойчивость к имитационным помехам: высокая – 1, средняя – 0,5, низкая – 0;
- 6) учет влияния распространения радиоволн: высокая – 1, средняя – 0,5, низкая – 0.

Исходя из заданных характеристик радиолокационного комплекса определена приоритетность перечисленных параметров для конкретной ситуации. Условно экспертным путем на основе приоритетов для конкретного комплекса определены их весовые коэффициенты:

- 1) адаптивность к изменению помеховой обстановки: 0,2
- 2) вычислительная сложность: 0,15
- 3) требования к квалификации персонала: 0,1
- 4) устойчивость к активным помехам: 0,2
- 5) устойчивость к имитационным помехам: 0,15
- 6) учет влияния распространения радиоволн: 0,15.

На основе анализа путей поддержания функциональной надежности радиолокационной станции на требуемом уровне составлена таблица с числовыми интерпретациями дискретно-лингвистических оценок выбранных параметров в диапазоне от 0 до 1 для каждого из рассматриваемых способов и их комбинаций в соответствии с заявленными значениями функции оценки (табл. 1). Интерпретируемые оценки получены методом нормализации характеристик рассматриваемых способов относительно наилучшего значения по каждому критерию.

На основании экспертных данных (табл. 1) и формулы (3) проведены вычисления, результатом которых стали следующие оценки соответствия рассматриваемых способов управления функциональной надежностью для реализации на РС в заданной конкретной ситуации:

- 1) Периодический контроль параметров – 0,25;
- 2) Непрерывный контроль параметров – 0,43;
- 3) Непрерывный контроль параметров с формированием рекомендаций – 0,725;
- 4) Непрерывный контроль параметров с прогнозированием – 0,75;
- 5) Непрерывный контроль параметров с прогнозированием и формированием рекомендаций – 0,8.

На основании экспертных данных (табл. 1) и формулы (3) проведены вычисления, результатом которых стали следующие оценки соответствия рассматриваемых способов управления функциональной надежностью для реализации на РС в заданной конкретной ситуации:

- 6) Периодический контроль параметров – 0,25;
- 7) Непрерывный контроль параметров – 0,43;
- 8) Непрерывный контроль параметров с формированием рекомендаций – 0,725;
- 9) Непрерывный контроль параметров с прогнозированием – 0,75;
- 10) Непрерывный контроль параметров с прогнозированием и формированием рекомендаций – 0,8.

Таблица 1. Оценка параметров способов управления функциональной надежностью

Способ	Адаптивность к изменению помеховой обстановки	Вычислительная сложность	Требования к квалификации персонала	Устойчивость к активным помехам	Устойчивость к имитационным помехам	Учет влияния распространения радиоволн
Периодический контроль параметров	0	1	1	0	0	0
Непрерывный контроль параметров	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Непрерывный контроль параметров с формированием рекомендаций	1	0,5	1	1	0,5	0,5
Непрерывный контроль параметров с прогнозированием	1	0	0,5	1	1	1
Непрерывный контроль параметров с прогнозированием и формированием рекомендаций	1	0	1	1	1	1

Таким образом, в рассмотренном случае для управления функциональной надежностью радиолокационного комплекса целесообразно будет использовать способ, обеспечивающий непрерывный контроль контролируемых параметров с применением алгоритмов прогнозирования и интегрированной рекомендательной системой. При невозможности реализации этого способа по тем или иным причинам разумно обратить внимание на другие близкие по значению рассчитанной оценки соответствия подходы. Непрерывный контроль с формированием рекомендаций или с прогнозированием также будут демонстрировать сопоставимо высокий эффект, но с некоторыми ограничениями по потенциальной сложности проводимых расчетов, со сниженным информационным

обеспечением эксплуатирующего персонала и большей уязвимостью к воздействию имитационных помех. Способы периодического и непрерывного контроля в данном случае применять не рекомендуется ввиду пониженной эффективности их применения, о чем говорит низкая оценка соответствия выделенным критериям. Такой выбор обусловлен соответствием вычислительной сложности данного способа вычислительному потенциалу комплекса, поддержкой решений, принимаемых эксплуатирующим персоналом, время на подготовку которого строго ограничено, учетом влияния распространения радиоволн и устойчивостью к воздействиям помех за счет оперативного реагирования на различные отклонения во входных данных и выполнения необходимых контрмер, например, частотного маневрирования.

Выводы

В результате проведенной работы по изучению основных путей управления функциональной надежностью РС в условиях воздействия дестабилизирующих факторов была полностью достигнута поставленная цель. В частности это позволило:

- определить основные пути поддержания функциональной надежности РС на требуемом уровне;
- выявить наиболее явные достоинства и недостатки каждого рассмотренного подхода к управлению функциональной надежностью РС;
- представить в упрощенной графической форме особенности рассмотренных способов поддержания функциональной надежности на требуемом уровне;
- предложить показатель для расчета соответствия различных способов управления функциональной надежностью для использования в конкретно заданных ситуациях.

Таким образом, Основными критериями, которыми необходимо руководствоваться при выборе подхода к управлению надежностью РС, подверженному воздействиям дестабилизирующих факторов, являются:

- особенности РС;
- уровень подготовки эксплуатирующего персонала;
- помеховая обстановка;
- значимости роли РС в масштабе всех РС, выполняющих общую задачу.

Перспективы дальнейших исследований связаны со следующими направлениями деятельности:

- экспериментальная проверка сформулированных в рамках данного исследования предложений на реальных РС с целью оценки ее практической эффективности и уточнения экспертных оценок для наборов данных;
- разработка и апробирование математических моделей для количественной оценки выигрыша в функциональной надежности от применения каждого из рассмотренных способов;
- исследование перспектив интеграции предложенного подхода в более комплексные системы для дальнейшего расширения возможностей по повышению функциональной надежности.

Литература

1. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. 416 с.
2. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа – М.: «Журнал Надежность», 2012. 296 с.
3. Калюта А.Н., Мальцев Г.Н., Склемин Д.В. Достоверность технического диагностирования сложных технических систем с использованием диагностических моделей // Труды Военно-космической академии. 2024. № 691. С. 211-219.

4. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Труды Военно-космической академии. 2016. № 4. С. 34-43.
5. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа – М.: «Журнал Надежность», 2012. 216 с.
6. Козин И.А., Гришин А.В., Гришин В.В. Методика оценивания надежности современных радиоэлектронных систем космических комплексов // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2020. Том 75 № 1. С. 233-235.