

На правах рукописи

МОИСЕЕВ Сергей Александрович

МЕТОД ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ  
С АДАПТАЦИЕЙ МЕЖКОНТРОЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА

05.11.13 – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел, 2013 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Подмастерьев Константин Валентинович
- Официальные оппоненты: Кузичкин Олег Рудольфович, доктор технических наук, профессор, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО ВлГУ, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах»  
Збиняков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГКОУ ВПО «Академия ФСО России», доцент кафедры № 23
- Ведущая организация: ОАО «Концерн «Системпром» (г. Москва)

Защита состоится «19» марта 2013 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, Россия, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Госуниверситета – УНПК.

Автореферат разослан 15 февраля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук \_\_\_\_\_ В. Н. Волков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** Высокие требования к качеству функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) ответственного назначения, определяют необходимость развития методов контроля, позволяющих предотвращать ее отказы в процессе эксплуатации. Доминирующим видом отказов РЭА (до 90 % от общего числа) являются постепенные (параметрические) отказы, возникающие в результате деградиационных процессов в радиоэлементах и характеризующиеся постепенным изменением с выходом за допустимые границы значений одного или нескольких параметров объекта. В отличие от внезапных отказов, проявляющиеся скачкообразным изменением параметров и являющихся, как правило, явными, постепенные отказы по внешним проявлениям скрытые, что затрудняет их своевременное обнаружение. С учетом сказанного проблема контроля РЭА с целью предотвращения ее постепенных отказов является весьма актуальной.

Анализ состояния вопроса показывает, что наиболее распространенным и регламентированным в нормативно-технической документации (НТД) в настоящее время является контроль РЭА, проводимый через определенные фиксированные в НТД интервалы времени (межконтрольные интервалы), значения которых назначаются на этапе проектирования РЭА для однотипных объектов по априорной информации об их эксплуатационной надежности. Такой режим контроля не учитывают реальное техническое состояние объекта, поэтому его эффективность ограничена.

В направлении совершенствования методов определения периодичности технического обслуживания и эксплуатационного контроля РЭА активно работает ряд ученых, среди которых Дружинин Г.В., Кудрицкий В.Д., Гаскаров Д.В., Чуев Ю.В., Абрамов О.В., Тихонов Б.Н., Лутченко С.С. и др. Существенный вклад в решение проблемы управления надежностью внесли зарубежные ученые Барлоу, Маршалл, Дж. Бендат, С.М. Шендон, С. Маки и др.

Важнейшим направлением работ является определение наиболее рациональных межконтрольных интервалов, обеспечивающих повышение эффективности эксплуатации РЭА, поскольку при завышенном межконтрольном интервале возрастает вероятность возникновения постепенных отказов, что может привести к срыву выполнения целевых задач и дополнительным затратам на ремонт, а при необоснованно сокращенном межконтрольном интервале увеличивается время отрыва РЭА от выполнения целевых задач и возрастают затраты на ее эксплуатацию.

Один из путей решения этой задачи заключается в реализации вероятностного подхода к анализу надежностных характеристик ансамбля однотипных объектов, получаемых в процессе их эксплуатации (функций распределения времени безотказной работы и их параметров). Учет статистики уже произошедших отказов для РЭА ответственного назначения, имеющей высокую цену отказа, однако, не всегда приемлем.

Более перспективным является подход, при котором в качестве основы для определения рациональных значений межконтрольных интервалов рассматривают прогнозирующий контроль, базирующийся на индивидуальном прогнозировании технического состояния РЭА экстраполяцией. При этом из возможных вариантов вероятностного и аналитического прогнозирования для целей прогнозирующего контроля в реальных условиях эксплуатации РЭА наиболее эффективным представляется аналитическое прогнозирование с использованием комплекса трендовых моделей, требующее меньшего объема статистических данных об изменении значений параметров при обеспечении равной достоверности прогноза.

Однако с учетом повышения требований к точности измерения и прогнозирования значений параметров современной РЭА применение последнего варианта на существующем уровне его разработки не обеспечивает требуемой эффективности эксплуатации РЭА,

поскольку остается ряд ограничений, не позволяющих в полной мере реализовать вышеуказанные преимущества: не формализована процедура выбора вида модели; аппроксимация случайного процесса возможна только линейными функциями при условии неизменной дисперсии случайного процесса дрейфа во времени; не учитываются погрешности контроля при съеме информации и погрешности при определении модели тренда.

**Объект исследования** Прогнозирующий контроль РЭА в процессе эксплуатации.

**Предмет исследования** Модели и алгоритмы для обоснования значений межконтрольных интервалов в процессе эксплуатации РЭА.

**Целью работы** является повышение эффективности эксплуатации РЭА по критериям надежности и стоимости за счет адаптации межконтрольного интервала к состоянию объекта при прогнозирующем контроле.

**В работе решаются следующие основные задачи:**

1 Анализ факторов, оказывающих влияние на эффективность контроля технического состояния РЭА.

2 Экспериментальное исследование закономерностей дрейфа определяющих параметров РЭА.

3 Анализ процесса образования суммарной погрешности прогнозирования с учетом воздействия основных дестабилизирующих факторов.

4 Разработка имитационно-статистической модели прогнозирования технического состояния РЭА.

5 Разработка алгоритма контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности.

6 Синтез метода прогнозирующего контроля РЭА с адаптацией межконтрольного интервала.

7 Исследование влияния дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования технического состояния РЭА.

8 Экспериментальная апробация и обоснование эффективности метода прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала.

**Методы исследования** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории вероятностей, математической статистики, вычислительной математики, имитационного и компьютерного моделирования.

**Научная новизна**

1. На основе экспериментального исследования закономерностей дрейфа определяющих параметров четырех различных типов РЭА установлено, что изменения указанных параметров во времени являются аддитивными непрерывными монотонными нормальными случайными процессами, нестационарными как по математическому ожиданию, так и по дисперсии, и могут быть представлены в виде суммы двух составляющих: детерминированной функции времени, описывающей протекание необратимых физических процессов и стационарного случайного процесса, описывающего обратимые флуктуации внешних и внутренних условий, а также погрешности измерений.

2. На основе проведенного метрологического анализ процесса прогнозирования технического состояния РЭА выделены дестабилизирующие факторы, оказывающие основное влияние на точность прогноза и разработана обобщенная модель последовательного образования суммарной погрешности прогноза, учитывающая их взаимосвязь на всех этапах прогнозирования.

3. Разработана имитационно-статистическая модель прогнозирования технического состояния РЭА, основанная на прогнозировании экстраполяцией и отличающаяся возможностью учета основных источников погрешности прогноза.

4. Разработан алгоритм контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного

прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности, отличающийся адаптацией межконтрольного интервала к техническому состоянию объекта контроля.

### **Практическая ценность**

1. Разработан метод прогнозирующего контроля с адаптацией межконтрольного интервала и рекомендации по его применению, обеспечивающие повышение эффективности эксплуатации РЭА.

2. Разработано программное средство обеспечения поддержки принятия решений по определению рациональных значений межконтрольных интервалов для должностных лиц органов планирования эксплуатации РЭА.

**Реализация работы** Разработанный методический и математический аппарат использовался при выполнении 2 научно-исследовательских работ в Академии ФСО России, при разработке учебно-методических комплексов по учебным дисциплинам кафедры № 11 Академии ФСО России, при разработке эксплуатационной документации вновь разрабатываемых изделий в Пензенском производственном объединении «Электроприбор» и ОАО «Концерн «Автоматика» (г. Москва), при выполнении научно-исследовательской работы «Команда МС» в Санкт-Петербургском научно-производственном центре «Компакт».

**Апробация работы** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на III, IV, VIII Межведомственных конференциях "Научно-техническое и информационное обеспечение деятельности спецслужб" (Москва, 1999, 2002, 2010 гг.); IX Международной научной конференции "Информатизация правоохранительных систем" (Москва, 2000 г.); IV Всероссийской научной конференции "Проблемы совершенствования и развития специальной связи и информации, предоставляемых государственным органам" (Орел, 2005 г.); V Всероссийской научной конференции "Информационная безопасность телекоммуникационных и информационных систем специального назначения" (Орёл, 2007 г.); XXXIII Всероссийской научно-технической конференции "Сети, системы связи и телекоммуникации. Деятельность ВУЗа при переходе на ФГОС 3-го поколения" (Рязань, 2008 г.);

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, включая четыре работы в изданиях из перечня ВАК.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Экспериментально установленный характер дрейфа определяющих параметров четырех различных типов РЭА.

2. Метод прогнозирующего контроля РЭА с адаптацией межконтрольного интервала, включающий в себя:

– имитационно-статистическую модель прогнозирования технического состояния РЭА;

– алгоритм контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности.

**Структура работы.** Диссертационная работа изложена на 198 страницах машинописного текста, содержит 37 иллюстраций и 6 таблиц. Она состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 116 наименований, 9 приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, определены научная новизна, практическая ценность результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

**В первой главе** на основе анализа существующей системы контроля обоснована необходимость внедрения методов определения рациональных моментов контроля, основанных на наблюдении за параметрами технического состояния РЭА. В их основу должна быть заложена процедура индивидуального прогнозирования состояния каждого экземпляра РЭА экстраполяцией на основе изучения закономерностей постепенного изменения параметров этого экземпляра в процессе его работы.

Обоснована необходимость экспериментального исследования закономерностей изменения во времени параметров РЭА для подтверждения возможности практической реализации методов индивидуального прогнозирования экстраполяцией.

Произведен выбор показателей и критериев эффективности прогнозирующего контроля РЭА. В качестве частного показателя эффективности по критерию надежности используется коэффициент простоя  $K_n$ , численно равный  $K_n = 1 - K_{mi}$ , где  $K_{mi}$  – коэффициент технического использования:

$$K_{mi} = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}_0 + \bar{T}_{mo} + \bar{T}_e}, \quad (1)$$

где  $\bar{T}_0$  – математическое ожидание наработки РЭА на отказ;  $\bar{T}_e$  – математическое ожидание времени пребывания РЭА в состоянии отказа;  $\bar{T}_{mo}$  – математическое ожидание времени простоев РЭА, обусловленных поддержанием ее работоспособности.

Экономический эффект прогнозирующего контроля оценивается сокращением стоимости контроля  $C$  одного изделия за рассматриваемый период эксплуатации:

$$C = C_k + \sum_{i=0}^n C_i \cdot T_i, \quad (2)$$

где  $C_k$  – часть капитальных вложений, приходящаяся на рассматриваемый период эксплуатации;  $C_i$  – текущие затраты в единицу времени пребывания объекта в состоянии  $i$ -го контроля;  $T_i$  – время, которое объект провел в состоянии  $i$ -го контроля.

Сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментального исследования закономерностей дрейфа определяющих параметров РЭА. Рассматриваются результаты сбора и обработки экспериментальных данных дрейфа следующих определяющих параметров РЭА: мощность сигнала радиопередающего устройства (объем выборки 61); шумовой параметр радиоприемного устройства (объем выборки 58); уровень сигнала контрольной частоты на линейном выходе аналоговой системы передачи (объем выборки 53); уровень сигнала на выходе генератора шума (объем выборки 63).

Задачей анализа являлось определение характеристик нестационарности процессов дрейфа параметров, а также законов распределения в сечениях процессов, соответствующих моментам контроля. На основании критерия  $\chi^2$  Пирсона с достоверностью 0,95 получены положительные результаты проверки гипотезы о нормальном законе распределения в сечениях случайных процессов изменения исследуемых параметров. Для определения характеристик нестационарности процессов дрейфа параметров использовались оценки математического ожидания  $m_y^*$ , дисперсии  $D_y^*$  и автокорреляционной функции  $r_y^*$ . Закономерность дрейфа характеристик рассматриваемых случайных процессов определялась путем сглаживания их статистических оценок по всем сечениям процессов методом наименьших квадратов. В качестве иллюстрации на рисунке 1 представлены характерные графики изменения во времени ука-

занных статистических оценок и их доверительные границы ( $\beta = 0,9$ ) для уровня сигнала на выходе генератора шума.

Анализ результатов экспериментального исследования процессов изменения параметров РЭА показывает, что дрейф параметров представляет собой случайный процесс, нестационарный как по математическому ожиданию, так и по дисперсии. Скорость изменения дисперсии рассматриваемых процессов значительно меньше скорости изменения математического ожидания. Дисперсия процессов с течением времени имеет тенденцию к увеличению.

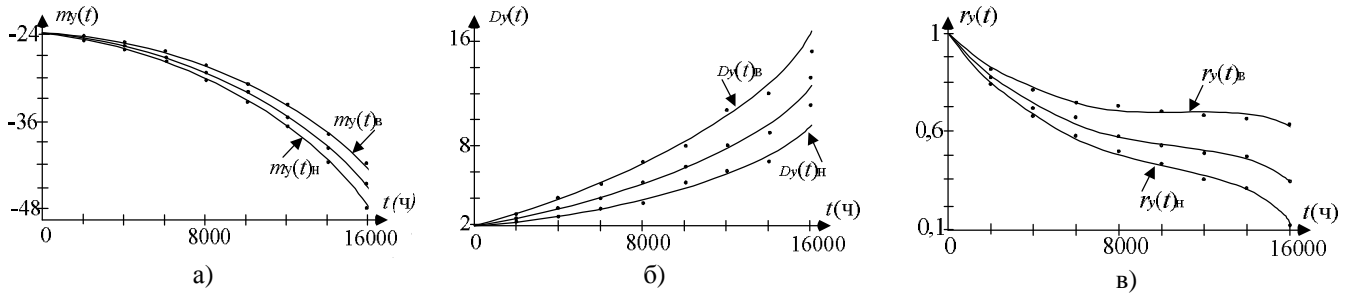


Рисунок 1 – Кривые, аппроксимирующие математическое ожидание (а), дисперсию (б) и корреляционную функцию (в) изменения уровня сигнала на выходе генератора шума

Для всех исследуемых процессов нормированная автокорреляционная функция  $r_y$  имеет два качественно различных участка (рисунок 1в), изменение  $r_y$  на каждом из участков различно, что позволяет сделать вывод о том, что случайные процессы, описывающие изменения параметров РЭА во времени, являются аддитивными нестационарными процессами, имеющими детерминированную и случайную составляющие и могут быть представлены обобщенной моделью вида

$$y(t) = \tilde{y}(t) + e(t), \quad (3)$$

где  $\tilde{y}(t)$  – детерминированная функция времени, описывающая протекание необратимых физических процессов;  $e(t)$  – случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций внешних и внутренних условий.

Выявлено, что при идентификации обобщенной модели (3) наиболее распространенными моделями ее детерминированной составляющей являются функции: линейная

$\Pi(t) = a_0 - a_1 t$ ; экспоненциальная  $\Pi(t) = \Pi_0 \cdot e^{\frac{-\lambda t}{\Pi_0}}$ ; логарифмическая

$\Pi(t) = \Pi_0 - \Pi_0 \cdot \ln(1 - \frac{\Pi t}{\Pi_0})$ ; степенная  $\Pi(t) = a_0 \pm a_1 t \pm a_2 t^2$ .

Для выбранных функций найдены аналитические зависимости, связывающие между собой время достижения параметром предельного состояния  $T_{np}$ , текущее время  $t$ , значение параметра в текущий момент времени  $\Pi(t)$ , а также предельно допустимое значение параметра  $\Pi_{np}$ . Указанные зависимости представляет собой уравнения отказа по определяющему параметру. Для вывода уравнений отказа использована обобщенная модель расхода ресурса вида

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = -kF(\Pi), \quad (4)$$

где  $\Pi$  – определяющий параметр РЭА;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости протекания процесса износа или старения;  $F(\Pi)$  – функция, определяемая принятой гипотезой о характере процессов износа или старения рассматриваемой РЭА.

Уравнения отказа для параметров в виде линейной, экспоненциальной, логарифмической и степенной моделей дрейфа, соответственно, получены в виде:

$$П(t) = П_{np} - a_1(t - T_{np}); \quad (5)$$

$$П(t) = П_{np} \cdot e^{-v(t - T_{np})/П_0}; \quad (6)$$

$$П(t) = П_{np} - П_0 \cdot \ln\left(1 - \frac{v(t - T_{np})}{П_0}\right); \quad (7)$$

$$П(t) = П_{np} \pm 2\sqrt{a_2} \cdot \sqrt{П_{np} - a_0 + \frac{a_1'^2}{4a_2} \cdot (t - T_{np}) \pm a_2(t - T_{np})^2}. \quad (8)$$

Данные уравнения позволяют определить время достижения параметром предельного состояния  $T_{np}$ , что соответствует моменту отказа РЭА.

**В третьей главе** с целью повышения точности определения момента очередного контроля произведен анализ процесса образования погрешности прогнозирования  $\Delta_\Sigma$  и выделено четыре группы дестабилизирующих факторов: несоответствие выбранной модели дрейфа параметра (оператора прогнозирования – ОП) реальной форме детерминированной составляющей прогнозируемого процесса; влияние флуктуационной составляющей  $\Delta_{фл}$  процесса дрейфа параметров – быстротекущих во времени, но незначительных по величине обратимых изменений параметра, вызванных воздействием различных случайных факторов, а также погрешностей измерения значений параметра в моменты контроля; погрешности аппроксимации результатов измерений, возникающие при использовании конкретных методов сглаживания (МС); условия прогнозирования: время наблюдения  $t_n$ ; число отсчетов  $k$  на интервале наблюдения; интервал времени между отсчетами  $\Delta t_i$ ; интервал экстраполяции  $t_\varepsilon = t_{np} - t_k$ .

Указанные источники погрешности прогнозирования взаимосвязаны и вносят вклад на различных этапах решения задачи прогнозирующего контроля. Обобщенная модель последовательного образования суммарной погрешности прогнозирования представлена на рисунке 2.

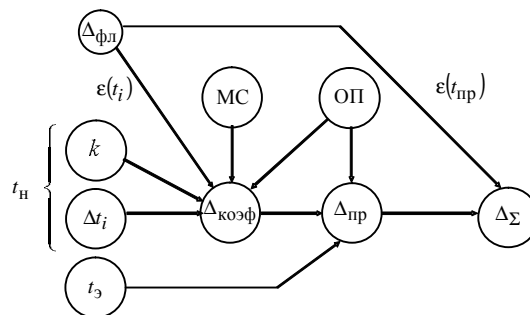


Рисунок 2 – Обобщенная модель последовательного образования суммарной погрешности прогнозирования

Учесть все рассмотренные источники погрешности в единой аналитической модели затруднительно. Поэтому для обоснования выбора оператора прогнозирования при реализации метода контроля РЭА с адаптивными интервалами времени разработана имитационно-статистическая модель прогнозирования технического состояния, которая позволяет учесть перечисленные виды погрешностей прогнозирования.

Структура модели представлена на рисунке 3.



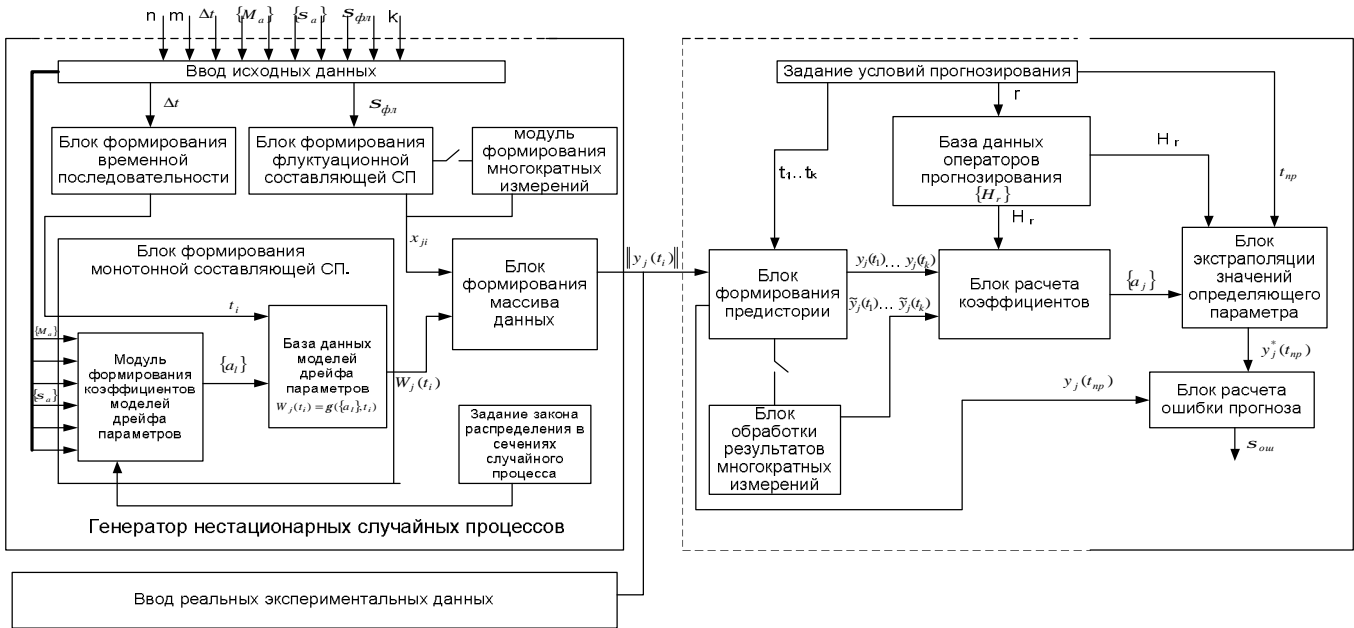


Рисунок 3 – Структура имитационно-статистической модели прогнозирования технического состояния РЭА

Модель включает в себя генератор нестационарных случайных процессов и узел прогнозирования. Процедура получения нестационарного дискретного случайного процесса, соответствующего процессу дрейфа определяющего параметра, осуществляется на основе аддитивной свертки детерминированной и флуктуационной составляющих.

Характер нестационарности можно изменять, задавая необходимые постоянные значения коэффициентов модели (если они детерминированы) или их числовые характеристики (если они случайны). Пример формирования нестационарного случайного процесса дрейфа параметров РЭА представлен на рисунке 4.

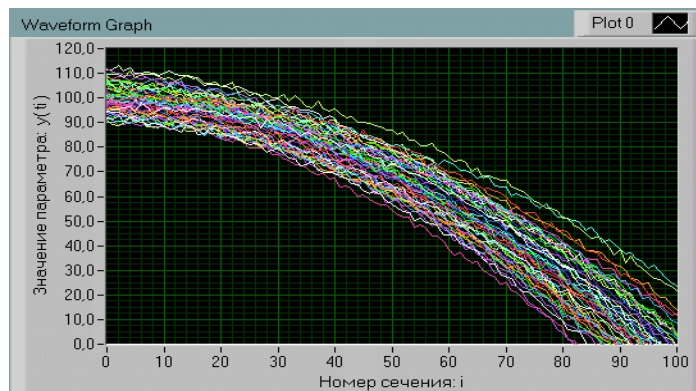


Рисунок 4 – Пример формирования нестационарного случайного процесса дрейфа параметров РЭА имитационно-статистической моделью

Реализуемый моделью алгоритм прогнозирования включает: задание условий прогнозирования, формирование выборки, расчет значений коэффициентов по каждой реализации случайного процесса, экстраполяцию значений параметра в точку прогноза, расчет ошибки прогнозирования. Выбор оператора из базы данных производится пользователем или автоматически, путем прямого перебора.

Для расчета погрешности аппроксимации результатов измерений при использовании метода сглаживания в рассматриваемой модели, получены выражения для СКО коэффициентов:

$$s_{a_0} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k e_i^2 / n - 2 \sqrt{\sum_{i=1}^k t_i^2 / n \sum_{i=1}^k t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k t_i\right)^2}}; s_{a_1} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k e_i^2 / n - 2 \sqrt{n / n \sum_{i=1}^k t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k t_i\right)^2}},$$

где

$$\sum_{i=1}^k e_i^2 = \sum_{i=1}^k y_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^k y_i t_i - a_0 \sum_{i=1}^k y_i.$$

Среднее значение и СКО прогнозируемого параметра в момент прогноза рассчитываются, соответственно, по формулам:

$$\bar{y}^*(t_{np}) = \sum_{j=1}^n y_j^*(t_{np}) / n; s_{y^*(t_{np})} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j^*(t_{np}) - \bar{y}^*(t_{np}))^2},$$

где  $n$  – объем выборки;  $y_j^*(t_{np})$  – прогнозируемое значение параметра  $j$ -го экземпляра.

Среднеквадратическая оценка ошибки прогнозирования определяется на основе обработки результатов точечного прогноза характеристик  $n$  экземпляров выборки и представлена моментами первого и второго порядка случайной величины  $e(t_{np})$ :

$$M[e(t_{np})] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j(t_{np}); D[e(t_{np})] = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (e_j(t_{np}) - M[e(t_{np})])^2; s_{np} = \sqrt{D[e(t_{np})]}.$$

Значения коэффициентов моделей детерминированной составляющей дрейфа параметра рассчитываются методом Левенберга-Марквардта.

Модель реализована программно и позволяет: учитывать все рассмотренные выше источники погрешности прогнозирования; имитировать процесс многократных измерений; производить оценку точности прогнозирования по показателю СКО ошибки прогноза; осуществлять выбор оператора прогнозирования по критерию минимума ошибки прогноза. Она может быть использована как для исследования влияния различных дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования, так и для решения реальных задач в рамках метода прогнозирующего контроля, если информацию в схему прогнозирования подавать с реальных экземпляров РЭА.

**В четвертой главе** рассмотрен комплекс вопросов, связанных с разработкой метода контроля РЭА с адаптацией межконтрольного интервала. Показано, что для предотвращения постепенных отказов необходимо получение гарантированных оценок прогнозируемого процесса с учетом всех основных факторов, оказывающих влияние на точность прогнозирования и минимаксного подхода к определению очередного момента контроля. Разработан алгоритм контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности, учитывающий указанные особенности. В основу алгоритма заложены уравнения дрейфа параметров и полученные в процессе исследования уравнения отказа.

Основными этапами и операциями алгоритма являются: измерение значений параметра через установленный в нормативно-технической документации интервал контроля  $\Delta t_i$  и регистрации результатов измерений в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_k$  до получения минимального объема статистических данных ( $i \geq 3$ ), позволяющего реализовать процедуру сглаживания; экспериментальное исследование характера дрейфа параметра, определяющее возможность применения индивидуального прогнозирования экстраполяцией; сглаживание результатов измерения значений параметра на интервале наблюдения и прогнозирование значений параметра на интервал экстраполяции, соответствующий периоду контроля; расчет предельной ошибки прогнозирования по каждому из уравнений дрейфа параметров, содержащемуся в базе данных; выбор оператора прогнозирования, обеспечивающего минимум ошибки прогноза на исследуемом интервале; расчет гарантированной оценки значения прогнозируемого параметра к моменту очередного кон-

троля и прогнозирование интервала работоспособности объекта на основе уравнения отказа; расчет достоверности прогноза.

Процедура адаптации алгоритма на основе исходных данных, получаемых в процессе эксплуатации РЭА, реализуется в моменты контроля технического состояния путем определения оптимального объема выборки и выбора оператора прогнозирования, обеспечивающих минимум предельной ошибки прогноза. Полученные результаты используются для определения гарантированного значения очередного межконтрольного интервала, обеспечивающего предотвращение постепенных отказов экземпляра РЭА. Оно вычисляется как верхняя (нижняя) граница доверительного интервала оценки времени достижения параметром предельного состояния  $T_{np}$ , получаемой с использованием аналитических выражений (5)–(8).

С применением разработанных имитационно-статистической модели прогнозирования и алгоритма контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности синтезирован метод прогнозирующего контроля с адаптацией межконтрольного интервала. Основными компонентами метода являются: объект контроля – экземпляр РЭА, значения параметров которого должны измеряться с определенной периодичностью; обслуживающий персонал; штатные средства измерения, а также методики измерений и нормы на значения определяющих параметров РЭА; средства обработки результатов измерений и прогнозирования технического состояния РЭА (разработанные модели и алгоритмы).

Обслуживающему персоналу кроме обычного контроля придаются новые функции по сбору статистической информации. Реализация метода при определении оператора и условий прогнозирования осуществляется с использованием разработанной имитационно-статистической модели, а при оптимизации периода контроля по заданным критериям – в процессе работы алгоритма. Реализация схемы определения значений межконтрольных интервалов заключается в построении правила, связывающего конкретное решение с данными контроля и результатами прогноза. Метод позволяет определить такие моменты контроля параметра, при которых гарантируется его нахождение в области допустимых значений (выполнение условий работоспособности) в течение времени эксплуатации.

Произведено исследование влияния дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования, которая оценивалась показателем нормированного СКО ошибки прогноза:

$$\sigma_n = \sigma_{\text{ош}} / \sigma_{\text{пр}}, \quad (9)$$

где  $s_{\text{ош}}$  – СКО ошибки прогнозирования;  $s_{\text{пр}}$  – СКО прогнозируемого параметра.

Анализ результатов исследования позволил выделить ряд закономерностей, характеризующих диалектическую взаимосвязь между точностью прогнозирования, вероятностной структурой случайного процесса, параметрами ошибок измерений, объемом исходных данных и формой детерминированной составляющей прогнозируемого процесса. На рисунках 5, 6 приведены графики, иллюстрирующие данные зависимости.

При этом введены следующие обозначения:  $S_n$  – нормированное СКО ошибки прогноза;  $s_{\text{фл}}$  – СКО флуктуационной составляющей случайного процесса дрейфа параметра;  $t_3$  – длительность интервала экстраполяции;  $t_n$  – длительность интервала наблюдения;  $k$  – число отсчетов на интервале наблюдения;  $\Delta t_i$  – интервал между отсчетами;  $m$  – количество измерений в момент отсчета; 1 – реальная модель линейная,

гипотетическая – линейная; 2 – реальная модель линейная, гипотетическая – парабола; 3 – реальная модель линейная, гипотетическая – экспонента.

Выявленные закономерности сводятся к следующему:

1. Точность прогнозирования существенно зависит от соответствия модели дрейфа параметра реальной форме детерминированной составляющей прогнозируемого процесса.

2. С увеличением интервала экстраполяции ошибка прогнозирования возрастает, что обусловлено ослаблением корреляционных связей между отсчетами на интервале наблюдения и прогнозируемым значением параметра.

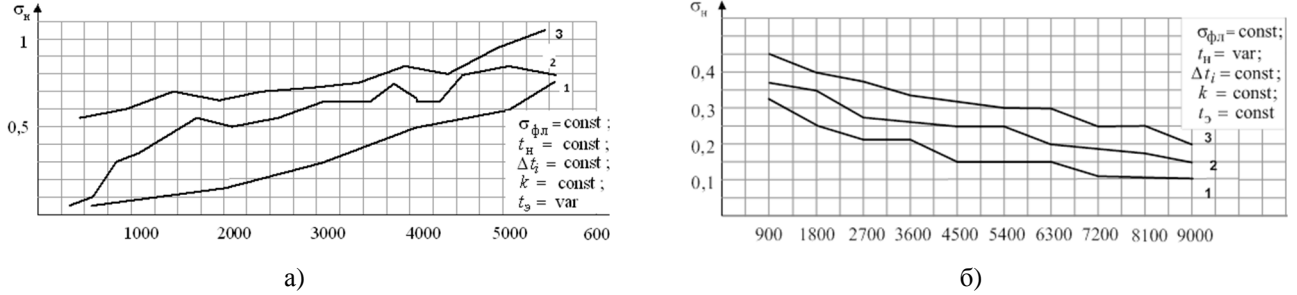


Рисунок 5 – Зависимости СКО результирующей погрешности от интервала экстраполяции (а) и от времени наблюдения (б) при различных комбинациях трендов

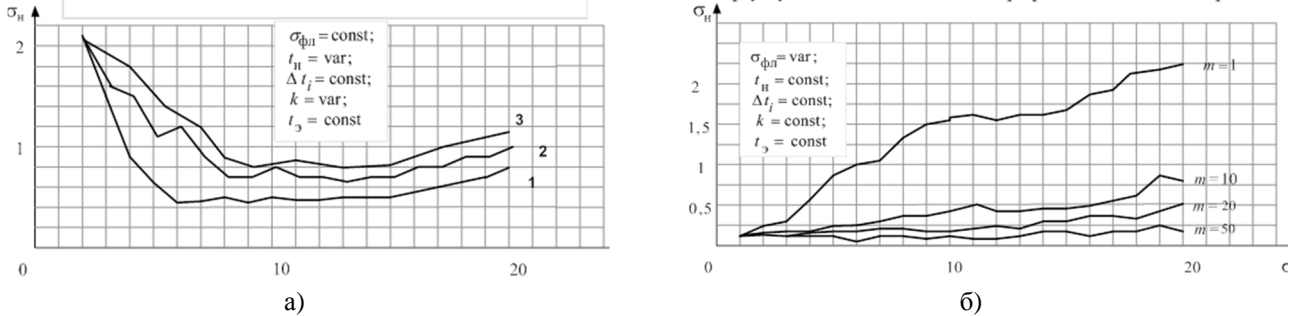


Рисунок 6 – Зависимости СКО результирующей погрешности от числа отсчетов при фиксированном интервале  $\Delta t_i$  (а) и от СКО флуктуационной составляющей при различном числе измерений (б)

3. Увеличение времени наблюдения при фиксированных значениях  $k$  и  $t_3$ , а также числа отсчетов при неизменных  $t_3$  и  $t_H$  приводит к снижению ошибки прогнозирования, т. е. возможны ситуации, когда одинаковую точность прогноза можно обеспечить увеличением как числа отсчетов при фиксированном  $t_H$ , так и времени наблюдения при ограниченном  $k$ .

4. С увеличением числа отсчетов при фиксированном  $\Delta t_i$  погрешность прогнозирования изменяется немонотонно, что обусловлено совместным влиянием детерминированной и флуктуационной составляющих случайного процесса. Очевидно, что существует оптимальное число отсчетов, минимизирующее ошибку прогноза.

5. Увеличение СКО флуктуационной составляющей приводит к снижению точности прогнозирования за счет ослабления корреляционных связей между отсчетами, причем данная зависимость обусловлена как влиянием флуктуаций в точках отсчета в моменты  $t_1, t_2, \dots, t_k$ , так и точностью оценки фактического значения параметра в момент  $t_{\text{пр}}$ .

6. Многократные измерения целесообразно проводить при значительном уровне флуктуаций.

Экспериментальная апробация и оценка эффективности применения метода прогнозирующего контроля с адаптацией межконтрольного интервала осуществлялись на примере частного случая на основе имеющихся статистических данных по уровню напряжения на выходах генератора шума с использованием выражений (1) и (2). Про-

верка адекватности прогностической модели осуществлялась на ретроспективном периоде для конкретной реализации случайного процесса дрейфа параметра. При этом значения показателей (1), (2) при обычном контроле (КР) рассчитывались для периодичности контроля, установленной в регламенте технического обслуживания (ТО) данной РЭА (один раз в квартал в течение четырех лет).

На основе статистических данных построен график (рисунок 7), из которого видно, что отказ (выход за границу области работоспособности  $A = -60$  дБ) произойдет при  $t = 32260$  ч, а очередной контроль параметра в соответствии с регламентом ТО должен производиться при  $t = 32400$  ч. Т. е. в течение 140 ч объект будет находиться в состоянии скрытого отказа, что может привести к срыву выполнения целевых задач и является недопустимым для РЭА ответственного назначения.

Для заданного периода эксплуатации – 4 года (количество операций контроля – 16),  $T_g = 140$  ч,  $C_k = 8000$  руб.,  $C_i = 125$  руб., трудозатраты на контроль (указаны в регламенте ТО) – 1 ч, для КР получено:  $K_n^{KP} = 0,0045$ ;  $C^{KP} = 10000$  руб.

При сравнительном анализе задача прогнозирующего контроля (ПК) для того же комплекта генератора шума решалась на основе вышеуказанных исходных данных, но с интервалом контроля один год и с применением программной реализации разработанной имитационно-статистической модели прогнозирования технического состояния РЭА. При выборе оператора прогнозирования точность прогнозирования по каждому оператору оценивалась по показателю (9). В качестве модели детерминированной составляющей дрейфа параметра принята параболическая модель, дающая наименьшую ошибку при обработке статистических данных. На основе данной модели произведено прогнозирование значения рассматриваемого параметра при следующих условиях: интервал наблюдения  $t_n = 25920$  ч; интервал между отсчетами  $\Delta t_i = 8640$  ч; число отсчетов на интервале наблюдения  $k = 4$ ; интервал экстраполяции  $t_3 = 8640$  ч. Графическое решение задачи ПК представлено на рисунке 8.

Из рисунка 8 видно, что при действительном значении времени отказа  $t = 33500$  ч его прогнозное значение составит  $t = 31120$  ч, и в момент проведения прогнозирующего контроля  $t = 25920$  ч имеется возможность произвести коррекцию параметра, т.е. отказ РЭА на очередном межконтрольном интервале будет предупрежден. Кроме того, количество операций контроля сокращается в 4 раза.

Расчет значений показателей качества функционирования РЭА при прогнозирующем контроле произведен с учетом предотвращения скрытого отказа и сокращения количества проведенных операций контроля до  $k = 4$ .

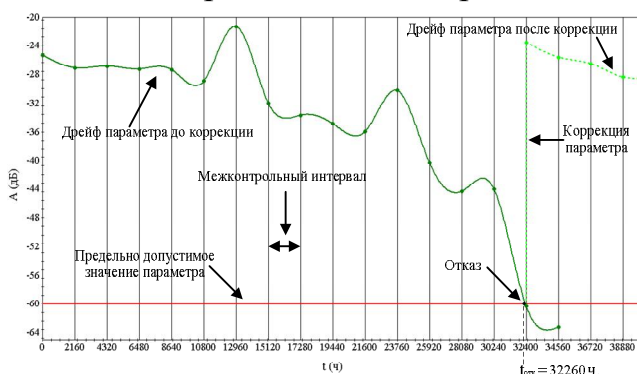


Рисунок 7 – Изменение уровня шумового напряжения на выходе генератора шума по результатам контроля работоспособности

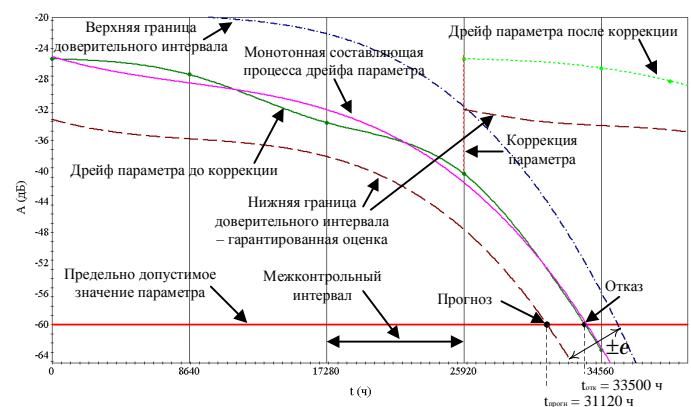


Рисунок 8 – Графическое решение задачи прогнозирующего контроля при  $k = 4$

При этом учитывалось, что операции контроля выполнялись с применением тех же штатных средств измерений, а трудозатраты на контроль увеличились на 30 % за счет введения новых функций по сбору и обработке статистической информации с применением разработанных модели и алгоритма. Тогда:  $K_n^{ПК} = 0,0001$ ;  $C^{ПК} = 8650$  руб.

Таким образом, применение прогнозирующего контроля приводит к снижению коэффициента простоя для конкретного экземпляра РЭА с 0,0045 до 0,0001 и к экономическому выигрышу в 13,5 % от стоимости контроля работоспособности того же экземпляра РЭА в условиях жесткой стратегии эксплуатации.

Внедрение результатов исследования в практику эксплуатации РЭА обеспечивается путем оснащения рабочих мест должностных лиц органов контроля разработанными средствами поддержки принятия решений, реализованными программно.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Анализ факторов, оказывающих влияние на эффективность контроля технического состояния РЭА в процессе эксплуатации показал, что одной из центральных научных задач является разработка и усовершенствование методов прогнозирующего контроля, позволяющих предотвратить постепенный отказ конкретного экземпляра РЭА при ее эксплуатации. Применение указанных методов невозможно без учета погрешностей контроля и погрешностей при определении оператора прогнозирования т. к. допуски на определяющие параметры современной РЭА соизмеримы с погрешностями средств измерения этих параметров.

2. На основании экспериментальных исследований закономерностей дрейфа определяющих параметров РЭА на примере мощности сигнала радиопередающего устройства, шумового параметра радиоприемного устройства, уровня сигнала контрольной частоты на линейном выходе аналоговой системы передачи и уровня сигнала на выходе генератора шума установлено, что дрейф параметров представляет собой случайный процесс, нестационарный как по математическому ожиданию, так и по дисперсии. Выявлены наиболее распространенные модели детерминированной составляющей дрейфа параметров РЭА, для которых получены уравнения отказа по определяющему параметру.

3. Проведенный метрологический анализ процесса прогнозирования технического состояния РЭА позволил выделить четыре группы дестабилизирующих факторов, оказывающих основное влияние на точность прогноза: несоответствие выбранной модели дрейфа параметра реальной форме детерминированной составляющей прогнозируемого процесса; флуктуационная составляющая процесса дрейфа параметров, погрешности аппроксимации результатов измерений и условия прогнозирования, рассмотрена их взаимосвязь на всех этапах прогнозирования.

4. Разработана имитационно-статистическая модель прогнозирования технического состояния РЭА, позволяющая учесть основные виды погрешностей прогноза, имитировать процесс многократных измерений, производить оценку точности прогнозирования, осуществлять выбор оператора прогнозирования. Модель может быть использована как для исследования влияния дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования, так и для решения реальных прогнозных задач в рамках метода прогнозирующего контроля. Выполнена программная реализация данной модели.

5. Предложен алгоритм контроля технического состояния РЭА на основе адаптивного прогнозирования интервалов гарантированного сохранения работоспособности, основными преимуществами которого по сравнению с существующими являются

следующие: позволяет прогнозировать как интервал работоспособности, так и значения параметров РЭА; производить уточнение получаемых при прогнозировании величин в процессе эксплуатации объекта по мере накопления априорной информации о прогнозируемом процессе; выбирать оператор прогнозирования и оценивать погрешность прогноза на основе обработки априорной информации как о конкретном экземпляре РЭА, так и по ансамблю однотипных средств; определять гарантированное значение момента очередного контроля с учетом основных факторов, оказывающих влияние на точность прогноза.

6. На базе разработанных имитационно-статистической модели прогнозирования и алгоритма контроля технического состояния РЭА синтезирован метод прогнозирующего контроля РЭА с адаптацией межконтрольного интервала.

7. Проведено исследование влияния дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования технического состояния РЭА с применением программной реализации разработанной имитационно-статистической модели.

8. Экспериментальная апробация и оценка эффективности применения метода прогнозирующего контроля с адаптацией межконтрольного интервала на примере одного комплекта генератора шума показали, что в результате применения прогнозирующего контроля для конкретного экземпляра РЭА его отказ на очередном межконтрольном интервале предотвращен, значение коэффициента простоя снизилось с 0,0045 до 0,0001, а себестоимость контроля рассматриваемого объекта уменьшилась на 13,5 %.

9. Разработаны рекомендации по практическому применению метода прогнозирующего контроля РЭА с адаптацией межконтрольного интервала, заключающиеся в обеспечении автоматизированных рабочих мест должностных лиц органов планирования эксплуатации РЭА предложенными в данной работе средствами определения значений межконтрольных интервалов, реализованными программно. Результаты прогнозирующего контроля РЭА в процессе эксплуатации целесообразно также использовать на стадиях ее проектирования и производства с целью корректировки указанных в нормативно-технической документации сроков контроля определяющих параметров.

### **Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих опубликованных работах:**

*Журналы из перечня изданий, рекомендованных ВАК*

1 Моисеев, С.А. Модель управления техническим состоянием радиоэлектронной аппаратуры в процессе эксплуатации [Текст] / С.А. Моисеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012. – № 1 (291). – С. 95-100.

2 Моисеев, С.А. Анализ процесса образования суммарной погрешности прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий [Текст] / С.А. Моисеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012. – № 2 (292). – С. 169-175.

3 Подмастерьев, К.В. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени. Часть 1. Теоретические основы и модели, характеристики дрейфа параметров [Текст] / К.В. Подмастерьев, С.А. Моисеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012. – № 3-2 (293). – С. 135-144. (Личное участие 50 %)

4 Подмастерьев, К.В. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени. Часть 2. Алгоритм контроля, анализ точности [Текст] / К.В. Подмастерьев, С.А. Моисеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012. – № 3-3 (293). – С. 139-144. (Личное участие 50 %)

*Прочие издания*

5 Управление состоянием сложных радиоэлектронных изделий, находящихся в эксплуатации: монография [Текст] / Б.Н. Тихонов, С.А. Моисеев, И.А. Ходжаев и др.; под ред. Б.Н. Тихонова. – Орел: Академия ФСО России, 2010. – 207 с. (Личное участие 30 %)

6 Моисеев, С.А. Управление техническим состоянием радиоэлектронных изделий телекоммуникационных систем в процессе эксплуатации [Текст] / С.А. Моисеев, Б.Н. Тихонов // Сборник трудов IX международной научной конференции "Информатизация правоохранительных систем" – М.: Академия управления МВД РФ, 2000. – С. 397-400. (Личное участие 50 %)

7 Моисеев, С.А. Модель для определения периода управляющего воздействия при управлении техническим состоянием средств связи в процессе эксплуатации [Текст] / С.А. Моисеев, Б.Н. Тихонов // Сборник научных трудов Академии ФАПСи. – Орел: Академия ФАПСи, 2001. – № 12. – С. 29-34. (Личное участие 50 %)

8 Королев, М.В. Определение показателей безотказности сложных радиоэлектронных изделий по определяющему параметру [Текст] / М.В. Королев, С.А. Моисеев, Б.Н. Тихонов // Сборник научных трудов Академии ФАПСи. – Орел: Академия ФАПСи, 2002. – № 13. – С. 108-112. (Личное участие 30 %)

9 Королев, М.В. Особенности определения показателей безотказности сложных радиоэлектронных изделий при параболическом дрейфе определяющего параметра [Текст] / М.В. Королев, С.А. Моисеев, И.А. Ходжаев // Сборник научных трудов Четвертой Всероссийской научной конференции "Проблемы совершенствования и развития специальной связи и информации, предоставляемых государственным органам". – Орел: Академия ФСО России, 2005, часть 2, с. 136-137. (Личное участие 30 %)

10 Моисеев, С.А. Модель надежности комплекса «аппаратура связи – система блокирования» [Текст] / С.А. Моисеев, Д.Б. Букаев, // Сборник материалов 33-ей Всероссийской научно-технической конференции "Сети, системы связи и телекоммуникации. Деятельность ВУЗа при переходе на ФГОС 3-го поколения" – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи, 2008. – С. 271-272. (Личное участие 50 %)

11 Моисеев, С.А. Модель управления техническим состоянием средств связи, используемых эпизодически [Текст] / С.А. Моисеев, М.В. Фокин // Сборник материалов 33-ей Всероссийской научно-технической конференции "Сети, системы связи и телекоммуникации. Деятельность ВУЗа при переходе на ФГОС 3-го поколения" – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи, 2008. – С. 275-276. (Личное участие 50 %)

#### *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*

12 Программа для оценки точности результатов прогнозирующего контроля технического состояния радиоэлектронной аппаратуры / К.В. Подмастерьев, С.А. Моисеев. – № 2013610843 – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2013. (Личное участие 50 %)

Подписано к печати 12.02.2013 г. Формат 60x84 1/16.

Объем 1,0 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1649

---

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.