

На правах рукописи

ПОЛЕССКИЙ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИХ  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Жаднов Валерий Владимирович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент  
Кожевников Анатолий Михайлович

кандидат технических наук, доцент  
Зайко Юрий Григорьевич

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт точных приборов», г. Москва

Защита состоится «15» января 2009 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 Московского государственного института электроники и математики (технического университета) по адресу:  
109028 Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭМ

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200   г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, кандидат технических наук,  
профессор

Н.Н. Грачев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Наземно-космическая радиотехническая система (НКРТС) представляет собой систему управления космическими аппаратами (КА), включающую в себя бортовой комплекс управления (бортовой сегмент) – БКУ (БС) и наземный комплекс управления (наземный сегмент) – НКУ (НС). НКРТС осуществляет обмен информацией между сегментами, при этом процесс управления КА осуществляется по радиоканалу, при необходимости по радиоканалам телеметрической системы или целевой радиолинии. Примерами подобных систем являются российские системы «Компарус», «Клен», «Калина»; американские «*Iridium*», «*Arts*» и др. Современная тенденция развития НКРТС характеризуется увеличением числа выполняемых функций, что ведет к усложнению их схем и конструкций.

Основными требованиями, предъявляемыми при проектировании НКРТС, являются: баллистическое обеспечение, относительная стоимость объекта-сеанса управления, повышение пропускной способности, обеспечение радиообмена при значительном превышении уровня помехи над сигналом, снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления, повышение оперативности управления КА и надежности управления.

Большой вклад в создание и развитие автоматизированных систем управления КА внесли Ю.М. Галантерник, А.Ф. Калинин, А.Е. Зелинский, Л.Я. Кантор и др. Вопросы расчета надежности изделий при проектировании сложных радиотехнических систем рассматривались в работах И.А. Ушакова, Б.А. Козлова, Г.В. Дружинина, А.М. Половко, М.Р. Шура-Бура, А.Я. Резиновского, О.В. Абрамова, В.А. Каштанова, А.И. Медведева, Г.Н. Черкесова, В.В. Липаева, Ю.Н. Кофанова и др. В работах выше упомянутых авторов освещены принципы построения НКРТС, вопросы прохождения радиосигналов в пространстве и влияния на них различных потерь, общие вопросы оценки надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем, включая взаимосвязь свойств безотказности и ремонтпригодности (оценки запасов в комплектах ЗИП), а также вопросы оценки надежности программного обеспечения.

Однако, существующие методы исследования надежности НКРТС позволяют проводить только анализ каждого из сегментов в отдельности (т.е. без учета влияния сегментов друг на друга). Кроме того, использование аналитических методов для оценки надежности приводит к получению «нижних» оценок характеристик надежности компонентов НКРТС, т.е. в итоге к «ухудшению» показателей всей системы. При этом неизвестно, насколько сильно отличается «нижняя» оценка от истинного значения показателя надежности сегмента. Такой подход приводит к существенному занижению показателей, что в свою очередь влечет удорожание системы, увеличение сроков и снижение норм качества проектирования.

Поэтому актуальной задачей является разработка метода оценки надежности НКРТС, позволяющего получить количественную оценку среднего значения

показателя надежности на основе структурно-функциональных моделей НКРТС, учитывающих невозстанавливаемые и восстанавливаемые сегменты и отражающие их логику работы и условия эксплуатации, которая будет сопоставима с данными реальной эксплуатации объекта.

**Цель и задачи работы:** Целью диссертационной работы является повышения технико-экономических показателей НКРТС и эффективности их проектирования за счет внедрения новых автоматизированных методов исследования надежности, адекватно описывающих процесс функционирования систем.

Для достижения заданной в диссертации цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов расчета надежности, применяемых при проектировании НКРТС.
2. Обоснование выбора показателя надежности, отражающего условия функционирования НКРТС.
3. Разработка единой комплексной модели и математических моделей надежности для «типовых» схем построения НКРТС.
4. Разработка метода расчета надежности НКРТС при проектировании, включающего в себя:
  - метод расчета характеристик надежности радиолинии «земля-борт» и (или) «борт-земля»;
  - метод расчета характеристик надежности наземного сегмента с учетом влияния «вспомогательных» элементов;
  - метод расчета характеристик надежности компонентов вычислительной техники наземного сегмента.
5. Разработка комплекса инженерных методик для обеспечения надежности НКРТС при проектировании, в том числе:
  - инженерной методики исследования надежности радиолинии «земля-борт» и (или) «борт-земля»;
  - инженерной методики исследования надежности наземного сегмента с учетом влияния «вспомогательных» элементов;
  - инженерной методики исследования надежности компонентов вычислительной техники наземного сегмента.
6. Экспериментальная проверка результатов работы и их внедрение на промышленных предприятиях и в вузах.

**Методы исследования.** В процессе решения поставленных задач использовались принципы системного подхода, теория математического моделирования, общая теория систем, теория надёжности, теория вероятностей и математической статистики, теория однородных марковских процессов, теоретические основы проектирования радиоэлектронных средств, теория структурного анализа, теория математического анализа, методы вычислительной математики, теоретические основы радиоэлектроники и связи, экспериментальные методы исследований.

**Научная новизна.** При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие научные результаты:

1. Предложен показатель надежности НКРТС, характеризующий вероятность готовности системы к управлению, который, в отличие от известных, оценивает количественно надежность системы, обладающей разнородными свойствами с точки зрения надежности.
2. Разработана комплексная модель надежности НКРТС, у которой параметры зависят от структурно-функциональных свойств сегментов НКРТС, наличия «вспомогательных» элементов, учета сбоев в работе программных средств и в радиолинии, что позволяет получить более точную и полную оценку характеристик и определить «уязвимые места».
3. Разработан метод оценки надежности НКРТС при проектировании, который, в отличие от известных, позволяет получить количественную оценку вероятности готовности системы к управлению БС на заданном промежутке времени.
4. В рамках разработанного подхода предложен метод расчета вероятности бесбойной работы радиолинии, отличающийся от известных возможностью учета влияния метеорологических параметров в месте установки наземного сегмента.
5. Разработан комплекс инженерных методик обеспечения надежности НКРТС при проектировании, основанный на разработанных моделях и методах. Комплекс включает в себя ряд методик, в совокупности позволяющих провести всестороннее исследование надежности НКРТС, выявить и устранить «слабые места» и, тем самым, обеспечить требуемый уровень надежности управления.

**Практическая полезность работы** состоит в том, что разработанные в работе модели и методы легли в основу создания математического ядра программного комплекса «АСОНИКА-К», а методическое обеспечение позволяет реализовать технологию надежно-ориентированного проектирования при разработке образцов НКРТС, обеспечивающую высокие показатели качества и их конкурентоспособность.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные в диссертационной работе модели, методы и методическое обеспечение использовались при выполнении научно-исследовательских работ на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» Московского государственного института электроники и математики.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования на ФГУП «Научно-исследовательский институт точных приборов» (г. Москва), ФГУП «Научно-исследовательский институт «Аргон» (г. Москва), ЗАО «Всесоюзный институт волоконно-оптических систем связи и обработки информации» (г. Москва), ОАО «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь» (г. Каменск-Уральский), ОАО «Концерн радиостроения «Вега» (г. Москва), ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца» (г. Москва), а также в учебный процесс Московского государственного института электроники и математики (технического университета), Астраханского государственного университета и Пензенского государственного университета.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на *LXI* научной сессии, посвященной Дню Радио (Москва, 2006), Международном симпозиуме «Надежность и качество» (Пенза, 2006), III международном симпозиуме «Качество, инновации, образование и *CALS*-технологии» (Египет, г. Хургада, 2007), Международной конференции и Российской научной школе «Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий» – ИННОВАТИКА (Сочи, 2005-2007), *XIV* международной студенческой школе-семинаре «Новые информационные технологии» (Судак, 2006-2008), Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2005), II Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия» (г. Каменск-Уральский, 2007), Конференции–выставке «Достижения и перспективы военной информатизации» - Модуль (Москва, 2006), Научно-практической конференции «Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества» - КБД-ИНФО (Сочи, 2005-2008), IX научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах» (Москва, 2006), Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ (Москва, 2005-2008).

**Публикации по работе.** По теме диссертационной работы опубликовано 26 научных трудов, в том числе 2 монографии, 12 статей, из них 2 в журнале, рекомендованном в списке ВАК, 12 тезисов докладов и получено 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, четыре главы с выводами, заключение, список литературы и приложения, включающие в себя акты внедрения и результаты расчетов.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту.**

1. Комплексная модель НКРТС, в состав которой входят как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые сегменты, характеризующая вероятность готовности системы к управлению и выполнению всех основных функций на заданном промежутке времени.
2. Математическая модель вероятности бессбойной работы радиолинии, отличающаяся от известных возможностью учета влияния метеорологических параметров в месте установки наземного сегмента.
3. Метод оценки надежности наземно-космических радиотехнических систем при проектировании, представляющий собой комбинацию аналитических и численных методов.
4. Комплекс инженерных методик обеспечения надежности НКРТС при проектировании, позволяющий создавать НКРТС с требуемым уровнем надежности при одновременном сокращении сроков проектирования, снижении его трудоемкости и стоимости.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы и определена практическая направленность результатов и логическая связь глав диссертационной работы.

**В первой главе** проведен анализ НКРТС, как объекта исследования надежности. Показано, что системы такого класса обеспечивают контроль движения и состояния КА, обмен информацией КА с землей и с другими КА, передачу на борт КА команд управления. Исходя из основных функций, выполняемых НКРТС, при построении таких систем используются четыре схемы автоматизированного управления КА: 1. Многопунктная, территориально-разнесенная; 2. Однопунктная, с управлением через спутник-ретранслятор на геостационарной орбите; 3. Однопунктная, с непосредственным управлением; 4. Сетевая, с динамически изменяемой топологией.

На рис. 1, в качестве примера приведен один из вариантов построения однопунктной системы с непосредственным управлением типа «Компарус». Как видно из рис. 1. в состав НКУ входят наземный комплекс высокочастотный (НКВ), наземный комплекс низкочастотный (НКН) и центр управления полетами (ЦУП). С точки зрения надежности группировка КА представляет собой группу «скользящего нагруженного резервирования» из  $N$  основных и  $M$  резервных элементов, «последовательно» соединенную с радиолинией и НКУ, представляющего собой группу «последовательного соединения» (НКВ, НКН и ЦУП). На рис. 2 приведена схема расчета надежности (СРН) такой системы.

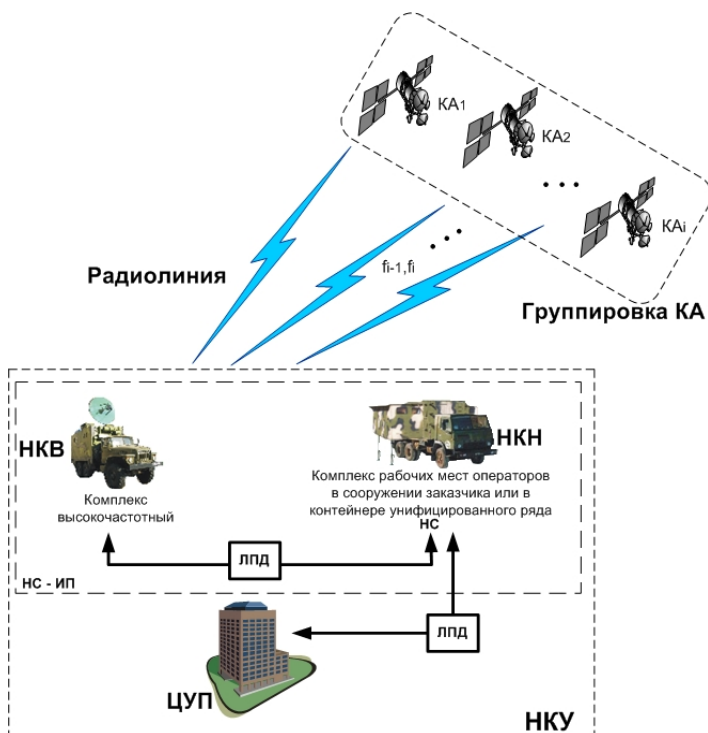


Рис. 1. Состав НКРТС «Компарус»

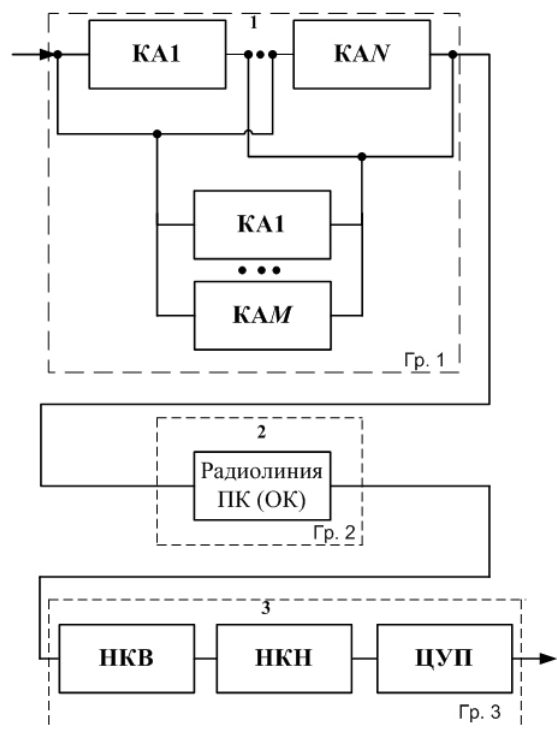


Рис. 2. Схема расчета надежности НКРТС «Компарус»

Основной особенностью СРН, приведенной на рис. 2, является то, что Гр. 1 - характеризуется вероятностью безотказной работы за заданное время эксплуатации, Гр. 2 - вероятностью сбоя (или бессбойной работы), а Гр. 3 - коэффициентом оперативной готовности. Другими словами, сегменты НКРТС и радиолиния не являются, исходя из их свойств надежности, однородными.

Кроме того, особенностью НКВ и НКН является то, что в их состав входят «вспомогательные» элементы (например, кондиционеры, отопительное оборудование, технические средства «климат-системы» и др.), предназначенные для поддержания режима эксплуатации. Особенностью радиолинии является то, что на вероятность бессбойной работы (ВБСР) влияет не только отношение сигнала к шуму, но и метеорологические параметры в месте установки наземного сегмента. Для более сложных типов НКРТС НКУ представляет собой уже резервированную группу. Это, в свою очередь, приводит к тому, что и радиолиния превращается также в резервированную группу.

Для расчета надежности НКРТС в настоящее время применяются аналитические методы, среди которых наибольшее распространение получили методы теории однородных марковских процессов, метод прямого перебора, метод производящих функций, метод разложения структуры относительно «ключевых» элементов, методы минимальных путей (сечений) и логико-вероятностный метод.

Для расчета группировки КА обычно применяют методы анализа надежности технических систем, основанные на теории однородных марковских процессов или логико-вероятностные методы. Для расчета НКУ применяют методы, также основанные на теории однородных марковских процессов. Что касается ВБСР (или вероятности сбоя) радиолинии, то для ее оценки используют методы теории цифровой и аналоговой радиосвязи, а также теории вероятности и математической статистики.

Однако, несмотря на то, что отдельно для обоих сегментов НКРТС возможно применение одного и того же метода, основанного на теории однородных марковских процессов, но невозможно построить единый граф состояний и переходов системы, содержащий восстанавливаемые и невосстанавливаемые сегменты. В этом случае на схеме переходов (графе) должны одновременно присутствовать состояния отказа как поглощающие (группировка КА), так и не поглощающие (НКУ). Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующие методы позволяют рассчитать лишь характеристики надежности для каждого из сегментов в отдельности, а не для НКРТС в целом.

Анализ методик обеспечения надежности сложных космических радиотехнических систем при проектировании показал, что в основу обеспечения надежности положены принципы «Положения РК-98» для бортового сегмента и КГВС «Мороз-6» для наземного. Общая методология обеспечения надежности приведена в ГОСТ РВ 20.39.302, а методы надежно-ориентированного проектирования - в РД В 319.01.10. Однако, в инженерной практике применяются

методики, позволяющие решать лишь отдельные задачи, предусмотренные в ГОСТ РВ 20.39.302, а именно:

- расчет интенсивностей отказов электрорадиоизделий (ЭРИ) - методика Справочника «Надежность ЭРИ» 22 ЦНИИИ МО РФ;

- расчет надежности электронных модулей 1-го уровня (PM1) - методика ОСТ 4Г 0.012.242;

- расчет показателей надежности изделий по структурным схемам - методика ОСТ 4Г 0.012.242;

- расчетов запасов в комплектах ЗИП - методика РД В 319.01.19.

Следует отметить, что проектирование сегментов НКРТС, как правило, проводится параллельно и независимо друг от друга, при этом ВБСР радиолинии при проектировании как БС, так и НС не учитывается (принимается равной 1). Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что единой методики (комплекса методик) обеспечения надежности НКРТС при проектировании к настоящему времени не создано. Таким образом, была обоснована необходимость создания комплекса инженерных методик и его проверки на предприятиях-разработчиках НКРТС.

На основе проведенных исследований в выводах по главе 1 была сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** проведено обоснование выбора показателя надежности НКРТС. Как и любой показатель надежности, показатель надежности НКРТС должен обладать следующими характеристиками: научностью; полнотой оценки надежности технического объекта; вычисляемостью; наглядностью; непротиворечивостью к иным критериям качества объекта; возможностью использования для оценки надежности других, более общих показателей технического объекта (например, эффективность, безопасность, живучесть, риск).

Исходя из этих требований, был предложен показатель надежности НКРТС - вероятность готовности системы к управлению и выполнению всех основных задач на заданном промежутке времени  $t \in [0, t_3]$ , и была разработана обобщенная математическая модель, этого показателя:

$$R_n = F_n \left\{ R_{BC}; R_{НС}; \left[ R_{КМП} : n = 1 \right]; R_{ССПД}; R_{СПО} \right\}, \quad (1)$$

где:  $F_n$  - функционал (набор операторов), определяющий структуру модели на основании СРН системы;  $n$  - тип НКРТС;  $R_{BC}$  - надежность БС, определяется как средняя наработка до отказа (или вероятность безотказной работы за время эксплуатации);  $R_{НС}$  - надежность НС, определяется набором показателей: средняя наработка на отказ (или ВБР за время эксплуатации), среднее время восстановления НС (или коэффициент оперативной готовности НС);  $R_{КМП}$  - надежность командно-измерительного пункта КА, определяется аналогично  $R_{НС}$ ;  $R_{НСС}$  - надежность наземной спутниковой станции КА, определяется аналогично  $R_{НС}$ ;  $R_{ССПД}$  - надежность системы связи и передачи данных (ССПД), определяется набором показателей: средняя наработка на отказ (или ВБР за время эксплуатации), среднее время восстановления (или коэффициент опера-

тивной готовности), а также ВБСР в зависимости от отношения  $(S/N)_{P(T3)}$  и погодных условий месяца года  $M$ ;  $R_{СПО}$  - надежность специального программного обеспечения как НС, так и БС, определяется как вероятность бесбойной работы СПО БС (НС) за время эксплуатации (или коэффициент оперативной готовности СПО НС).

На основе (1) могут быть получены модели для каждого из четырех типов НКРТС. Например, для рассмотренной выше системы «Компарус», модель (1) принимает следующий вид:

$$R_{НКРТС}[0, t_3] = R_{БС}(t_3) \cdot R_{РЛ} \left[ \frac{SN_P}{SN_{TP}}, ПУ \right] \cdot R_{НС}(0, t_3), \quad (2)$$

где:  $R_{БС}(t_3)$  - вероятность безотказной работы (ВБР) БС за время  $t_3$  (Гр. 1, на рис. 2);  $R_{РЛ} \left[ \frac{SN_P}{SN_{TP}}, ПУ \right]$  - ВБСР радиолинии, (Гр. 2, на рис. 2);  $R_{НС}(0, t_3)$  - вероятность готовности НС выполнять заданные функции на интервале времени  $[0, t_3]$  (Гр. 3, на рис. 2);  $t_3$  - заданный срок эксплуатации.

Из выражений (1) и (2) следует, что надежность управления напрямую зависит от ВБСР радиолиний. Однако, на практике, обычно ограничиваются лишь расчетом требуемого энергетического потенциала радиолинии, зависящего от условий распространения, диапазона частот, вида модуляции и др. При этом, если обеспечивается требуемый уровень энергетического потенциала, то ВБСР принимается равной 1 (т.е. надежность радиолинии не учитывается в расчете НКРТС). Однако это является довольно грубым допущением.

Поэтому, на основе теоремы о полной вероятности в предположении о независимости отказов по двум каналам (прямому и обратному), в диссертации была получена следующая математическая модель надежности радиолинии:

$$R_{РЛ} = R_{РЛ-ПК} \cdot R_{РЛ-ОК} \cdot R_{ПУ}, \quad (3)$$

где:  $R_{РЛ-ПК(РЛ-ОК)}$  – ВБСР прямого канала (обратного канала), зависящая от технических характеристик радиоканала;  $R_{ПУ}$  - ВБСР, зависящая от влияния метеорологических параметров в месте установки НС.

Как известно вероятность превышения расчетного отношения сигнал/шум  $(SN_P)$  к требуемому  $(SN_{TP})$ , как для прямого, так и для обратного каналов, определяется по следующей модели:

$$R_{РЛ-ПК(РЛ-ОК)} = \begin{cases} \min \left[ \frac{1,3 - 0,8}{\left[ 1 + ((SN_P - SN_{TP}) / D_l SN_P) \right]} \vee 1 \right], & \text{для } SN_P \geq SN_{TP} \\ \max \left[ \left( \frac{0,8}{\left[ 1 + ((SN_{TP} - SN_P) / D_u SN_P) \right]} - 0,3 \right) \vee 0 \right], & \text{для } SN_P < SN_{TP} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $D_l SN_P$  и  $D_u SN_P$  - среднемесячное верхнее и нижнее отклонения от среднего значения отношения сигнал/шум, [дБ].

Расчет коэффициентов и расчетное отношение сигнал/шум модели (4) проводится по известным математическим моделям, приведенным в *Recommend-*

dition ITU-R P.842-2. На рис. 3 приведена зависимость  $R_{ПЛ-ПК}$  от изменения  $SN_P$  при различных значениях  $SN_{TP}$ .

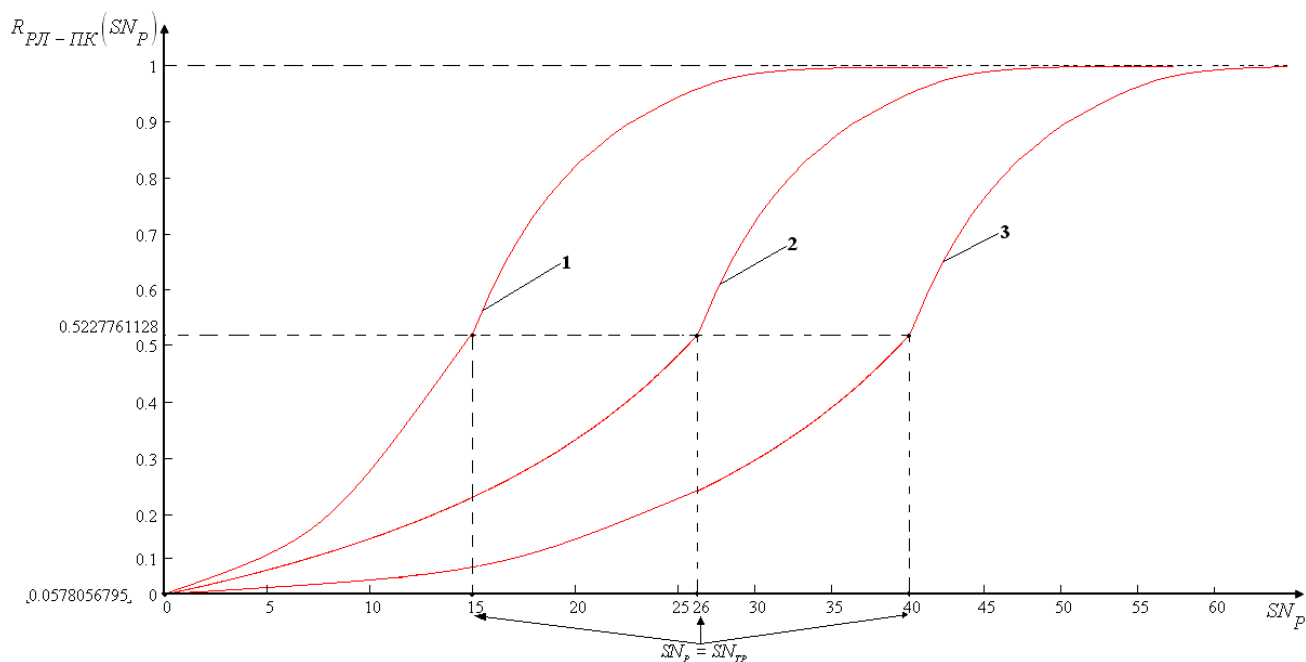


Рис. 3. График зависимости  $R_{ПЛ-ПК}$  от изменения  $SN_P$  при различных значениях  $SN_{TP}$  (1 -  $SN_{TP}=15$  [дБ]; 2 -  $SN_{TP}=26$  [дБ]; 3 -  $SN_{TP}=40$  [дБ])

Значение  $R_{ПВ}$  может быть получено по следующей модели:

$$R_{ПВ} = K_{ПВ}(i) \cdot R^*, \quad (5)$$

где:  $K_{ПВ}(i)$  - поправочный коэффициент, определяется как  $K_{ПВ}(i) = R_i / R^*$ ;  $R_i$  - ВБРС в  $i$ -ый месяц,  $R^*$  - максимальное значение ВБРС, определяется как  $R^* = \max_{i=1, I} (R_i)$ ;  $i$  - номер месяца.

Значение  $R_{ПВ}$  может быть получено на основе статистики сбоев радиолинии. На рис. 4 приведена зависимость поправочного коэффициента  $K_{ПВ}(i)$  от месяца года, полученная по результатам подконтрольной эксплуатации НКРТС «Компарус» за 10 лет для региона «Москва - Московская область». Аналогично получают зависимости и для других климатических зон.

Другой особенностью модели (1) является то, что  $R_{НС}$  (надежность НС) зависит от «вспомогательных» элементов (технических средств «климат-системы»), т.к. отказ «вспомогательных» элементов (ВЭ) в момент времени  $\tau$  приводит к отказу НС, состоящей из основных элементов (ОЭ) и ВЭ. На рис. 5 приведена блок-схема формирования моделей надежности НС с учетом ВЭ, полученная с использованием теоремы о полной вероятности.

**В третьей главе** представлена разработка метода исследования показателей надежности НКРТС, обладающих смешанными свойствами надежности. Метод позволяет рассчитать комплексный показатель - вероятность готовности

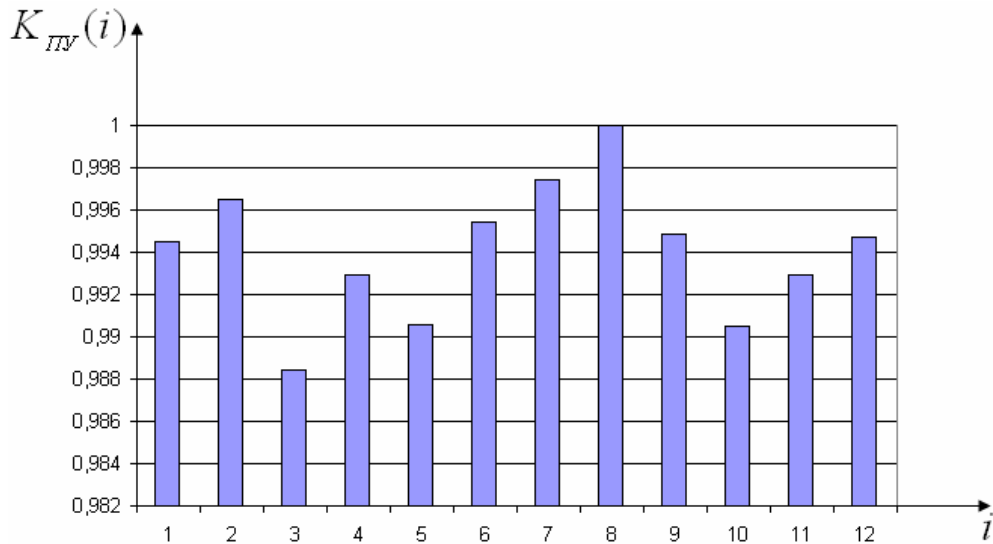


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента  $K_{IV}(i)$  от месяца года

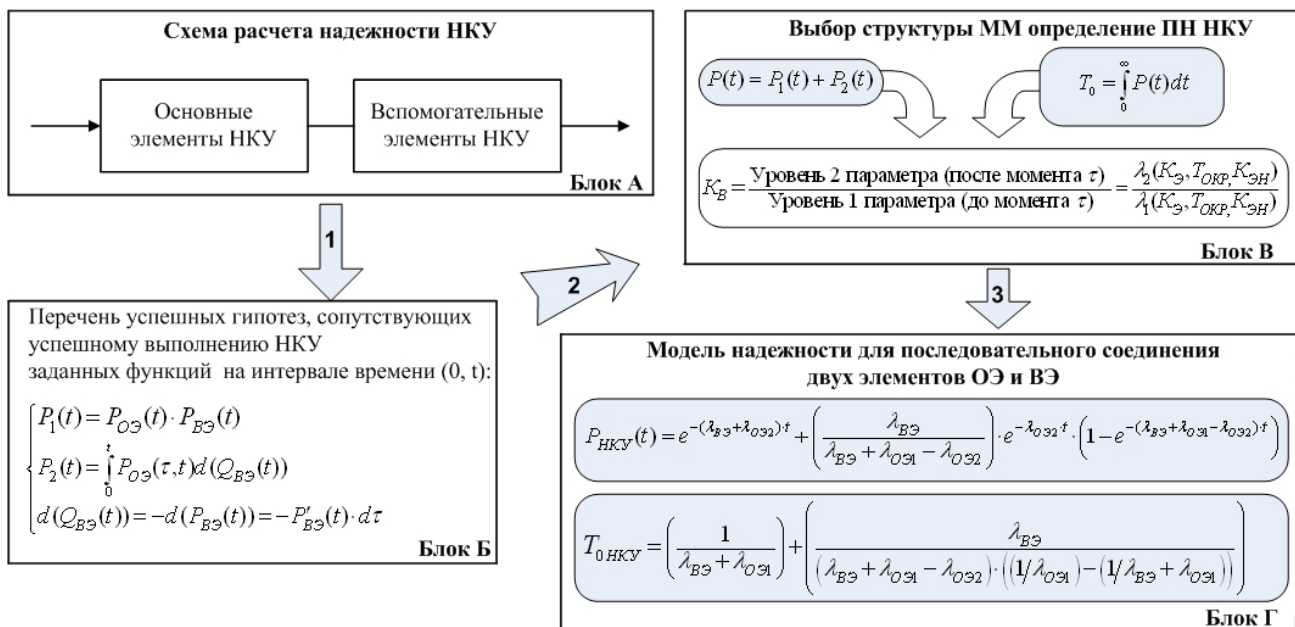


Рис. 5. Блок-схема формирования моделей надежности НС с учетом ВЭ

системы к управлению и выполнению всех основных задач. Метод включает в себя расчет характеристик надежности радиолиний на промежутке времени  $t \in [0, t_s]$ . Кроме того, при расчете показателей надежности сегментов НКРТС учитывается надежность специального программного обеспечения, а для НКУ учитывается влияние ВЭ, и также определяются характеристики надежности компонентов ЭВС, применительно к условиям эксплуатации.

Метод включает следующее основные этапы:

1. Формируются исходные данные: структурно-функциональная схема, критерии отказа, состав бортовых и наземных сегментов, определяются технические характеристики радиоканалов, позволяющие оценить отношение сигнал/шум радиолинии (например, диапазон рабочих частот, вид модуляции, скорость пе-

редачи данных и др.), задаются требуемые значения показателей надежности и интервал времени, на котором проводится расчет.

2. На основании заданной структурно-функциональной схемы и критериев отказа составляется схема расчета надежности.

3. Определяются интенсивности отказов компонентов (электронных модулей первого уровня - ЭМ1). В зависимости от сложности возможно использование как численного метода, так и одного из аналитических. При этом под компонентом понимаются как аппаратные, так и программные средства.

4. По полученным характеристикам надежности элементов СРН, являющимися исходными данными для моделирования, для каждой  $i$ -ой реализации проводится формирование временных диаграмм состояния (ВДС) группировки КА (см. рис. 6). На рис. 6  $N$  - число основных элементов группировки КА,  $M$  - число резервных элементов,  $T_{ЗАД}$  - заданный срок эксплуатации.

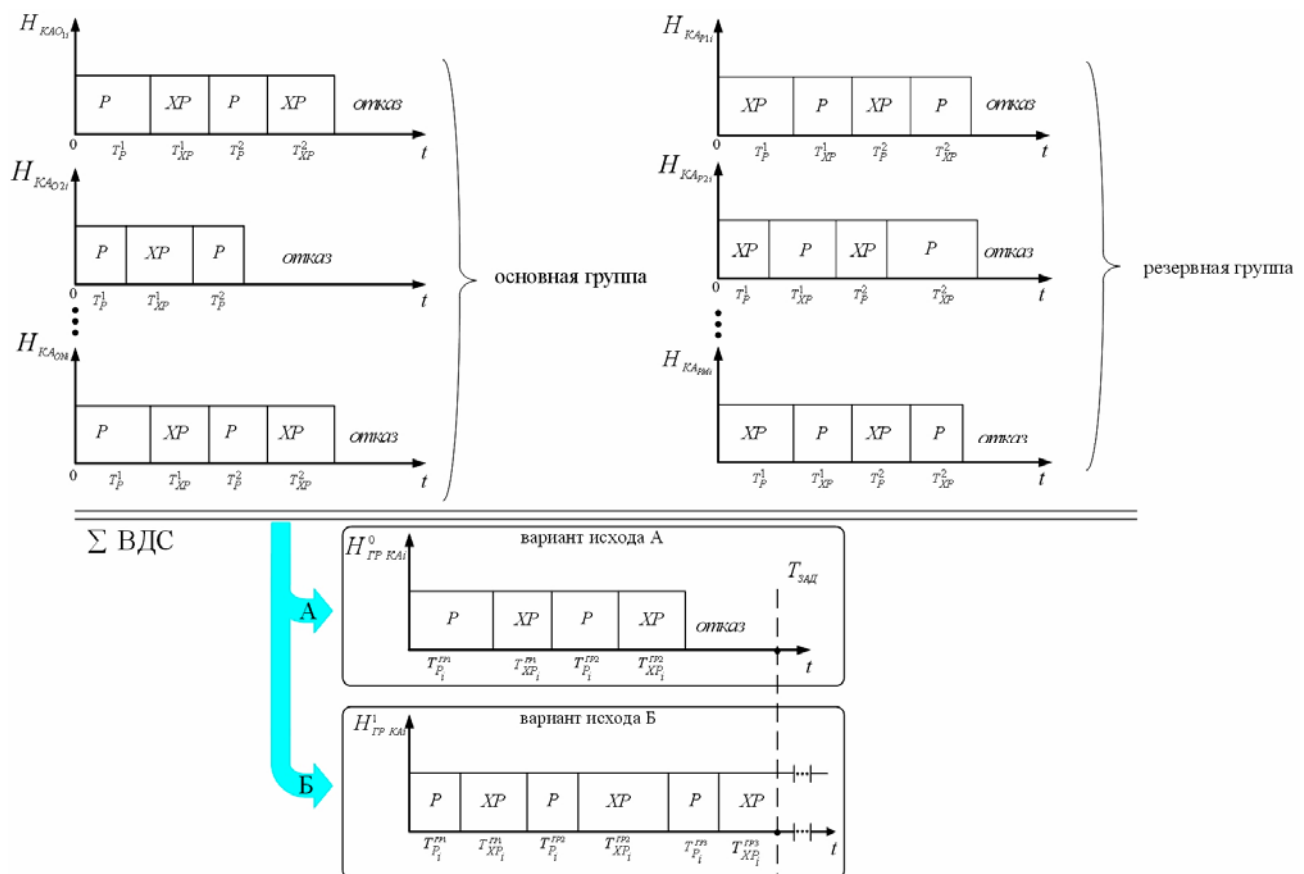


Рис. 6. Иллюстрация алгоритма формирования ВДС группировки КА

5. На основании СРН группировки КА формируется алгоритм объединения (для резервированного соединения) или пересечения (для последовательного соединения) ВДС (пример см. на рис. 6). Для «простых» СРН вычисляется значение  $R_{ГРКА}(0, T_{ЗАД})$  по следующей модели:

$$R_{ГРКА}(0, T_{ЗАД}) = \left[ \frac{p}{m} : p = p_{i-1} + i \Rightarrow T_{ГРКАi} > T_{ЗАД} \right], \quad (6)$$

где:  $p$  – число успешных реализаций, при котором выполнялось условие  $[T_{ij}] \geq T_{3AD}$  (см. вариант Б на рис. 6);  $m$  – общее число испытаний,  $(m-p)$  – значение отрицательных реализаций (см. вариант А на рис. 6);  $T_{ГР\text{ }КАi}$  – суммарная наработка с учетом режима работы, которая определяется по следующему выражению:

$$T_{ГР\text{ }КАi} = \min [T_{p_{ij}}; T_{xp_{ij}}] = \min \left\{ \begin{array}{l} \max \left[ T_{p_{ij}}^l : \bigcup_S T_{p_{ij}}^S > T_{p_{ij}}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, (N+M)} \right] \\ \max \left[ T_{xp_{ij}}^l : \bigcup_S T_{xp_{ij}}^S > T_{xp_{ij}}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, (N+M)} \right] \end{array} \right\},$$

где:  $T_{p_{ij}}^l$  и  $T_{xp_{ij}}^l$  – массивы наработок для  $l$ -го числа КА в режиме работы и хранения;  $l$  – минимальный состав КА из числа  $(N+M)$ ;  $s$  – число запланированных сеансов связи в НКРТС за заданный срок эксплуатации  $T_{3AD}$ .

6. Формируется вектор наработок для компонентов НС (аналогично п. 4). Основным отличием является наличие трех режимов: работа, ожидание (хранение) и восстановление после отказа. После формирования ВДС для каждой  $i$ -ой реализации определяется вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии на интервале времени  $(0, T_{3AD})$  по следующему выражению:

$$R_{HKY}(0, T_{3AD}) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K T_{ki}}{m \cdot T_{3AD}}, \quad (7)$$

где:  $T_{km}$  – наработка НКУ  $k$ -ом интервале  $i$ -ой реализации;  $m$  – общее число испытаний;  $T_{3AD}$  – заданный срок эксплуатации.

7. Для «простых» СРН вычисление показателей надежности радиолинии, учитывающих наличие прямого и обратного каналов и метеорологические параметры в месте установки компонентов НС проводится по выражению (3).

Для расчета «сложных» СРН необходимо построить ВДС радиолинии. Для построения ВДС (см. рис. 7) используется следующее правило:

$$H_{PЛ} \left( \frac{t}{v} \right) = \begin{cases} 1 : T_{Pi}(M) = t_M(M) \cdot (R_{PЛ-ПК} \cdot R_{PЛ-ОК} \cdot R_{PЛ-ПВ}(M)), t \in [0, T_{3AD}] \\ 0 : T_{CБи}(M) = t_M(M) \cdot (1 - [R_{PЛ-ПК} \cdot R_{PЛ-ОК} \cdot R_{PЛ-ПВ}(M)]), t \in [0, T_{3AD}] \end{cases}, \quad (8)$$

где:  $T_{Pi}(M)$  – время работы радиолинии за один месяц  $i$ -го интервала;  $T_{CБи}(M)$  – время, в котором радиолиния находится в сбойном состоянии за один месяц  $i$ -го интервала;  $v = T_{3AD} / (1 \cdot M)$  – число периодов работы радиолинии (см. рис. 7);  $R_{PЛ-ПК}$ ,  $R_{PЛ-ОК}$  и  $R_{PЛ-ПВ}$  – ВБСР, которые рассчитываются по моделям (3-5);  $t_M(M)$  – количество часов в  $m$ -том месяце;  $T_{3AD}$  – заданный срок эксплуатации.

На основании полученной ВДС радиолинии (см. рис. 7) значение  $R_{PЛ} [0, T_{3AD}]$  вычисляется по следующей модели:

$$R_{PЛ} [0, T_{3AD}] = \frac{\sum_{i=1}^I T_{Pi}(M)}{T_{3AD}}. \quad (9)$$

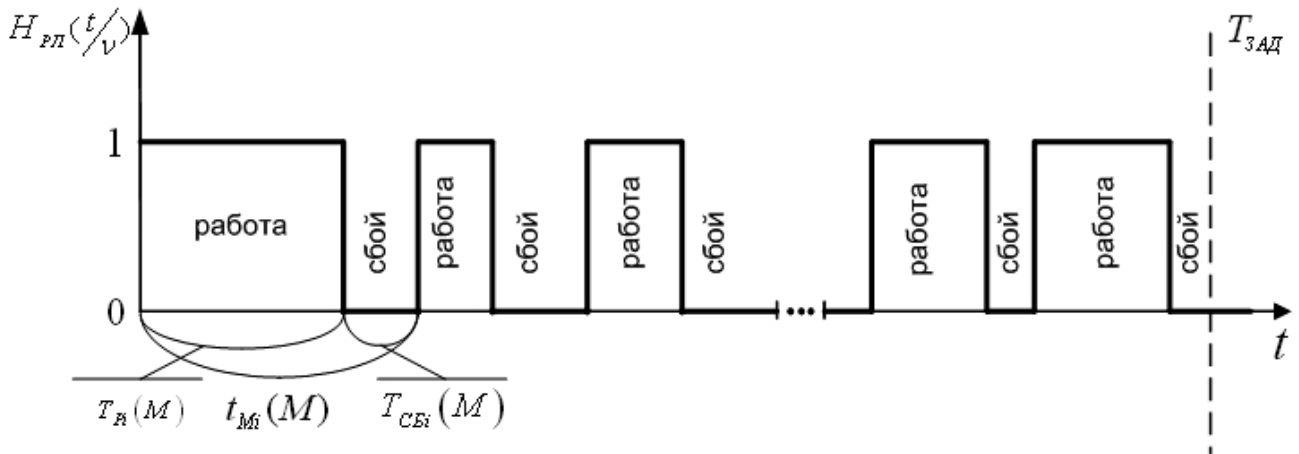


Рис. 7. Вид ВДС радиолинии НКРТС

8. Для «простых» СРН значение  $R_{КРТС} [0, T_{Зад}]$  определяется по модели (2). В общем случае на основе полученных реализаций ВДС сегментов НКРТС и ВДС радиолинии строится ВДС системы с использованием следующего правила:

$$H_{КРТС}(t) = \begin{cases} 1: T_{ji}^k = \bigcap_k [T_{ГР КАji}^k; T_{РЛi}^k; T_{НКУji}^k], \\ 0: \bigcup_k \{ [T_{СБ РЛi}^k \cup T_{В НКУi}^k] : T_{КРТСi}^k < T_{ГР КАi}; T_{ОТki} = \min(T_{ji}^k) \} \end{cases}, \quad (10)$$

где:  $i = \overline{1, m}$  - номер реализации из  $m$  испытаний;  $j = P \vee XP$  - режим функционирования СЧ работа ( $P$ ) или хранение ( $XP$ );  $k$  - номер интервала функционирования СЧ;  $l$  - номер СЧ, приведшей к отказу НКРТС;  $T_{ji}^k$  - наработка  $l$ -ой СЧ в  $j$ -ом режиме функционирования  $i$ -ой реализации. Для восстанавливаемых СЧ отказ фиксируется, когда  $T_{Bi}^k < T_B^{TP}$ ;  $T_{ГР КАji}^k$  - наработка группировки космических аппаратов в  $j$ -ом режиме функционирования  $i$ -ой реализации  $k$ -го интервала (определяется по модели (6));  $T_{РЛi}^k$  - наработка общей радиолинии (РЛ) в  $i$ -ой реализации  $k$ -го интервала (определяется по модели см. (8));  $T_{НКУji}^k$  - наработка наземного комплекса управления в  $j$ -ом режиме функционирования  $i$ -ой реализации  $k$ -го интервала (см. п. 6);  $T_{СБ РЛi}^k$  - время, в котором радиолиния находится в состоянии сбоя в  $i$ -ой реализации  $k$ -го интервала (определяется по модели (8));  $T_{В НКУi}^k$  - время восстановления НКУ в  $i$ -ой реализации  $k$ -го интервала (см. п. 6);  $T_{ГР КАi}$  - суммарная наработка ГР КА в  $i$ -ой реализации при различных режимах функционирования ( $j$ ).

Исходя из полученных реализаций ВДС по правилу (10), вычисление  $R_{КРТС}(t)$ ,  $t \in [0, T_{Зад}]$  осуществляется по следующей модели:

$$R_{КРТС} [0, T_{Зад}] = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_k T_{ji}^k}{m \cdot T_{Зад}}, \quad (11)$$

где:  $m$  - количество испытаний;  $k$  - номер интервала работы НКРТС в  $i$ -ой реализации;  $T_{Зад}$  - заданный срок эксплуатации НКРТС.

В рамках предложенного подхода разработан метод расчета интенсивностей отказов (ИО) для компонентов электронно-вычислительных средств. Особенностью метода является идентификация параметров модели (12) по критерию вида  $\min_{x \in [a,b]} \Phi(x) = \Phi(x^*)$ . Обобщенный вид модели приведен ниже:

$$\lambda_i(T, K_\vartheta) = \begin{cases} \lambda_{БР} \cdot K_T \cdot K_\vartheta : \text{режим эксплуатации} \\ \lambda_{БР} \cdot K_X \cdot K_{ТХ} \cdot K_\vartheta : \text{режим хранения,} \\ \lambda_{БР} = \lambda_{БР} \end{cases} \quad (12)$$

где:  $K_x = \sum_i K_{xi} / i$  - коэффициент хранения, определяется как математическое ожидание от  $K_{xi}$   $i$ -ого ЭРИ СЧ;  $K_{Тм} = \lambda_\vartheta(m, T_j) / \lambda_B \cdot K_\vartheta = f_{Ti}(a_{1m}, a_{2m}, \dots, a_{Nm}, T)$  - температурный коэффициент, показывающий зависимость ИО от температуры;  $N_{im}$  - количество коэффициентов функции  $f_{Ti}$ ;  $f_{Ti}$  - аппроксимирующая функция;  $T$  - температура окружающей среды;  $m$  - номер группы аппаратуры;  $j$  - номер температуры;  $K_{\vartheta l} = \lambda_{\vartheta l} / \lambda_{\vartheta 1.1} (T = 25^\circ)$  - коэффициент эксплуатации, учитывающий жесткость условий эксплуатации.

Укрупненная схема метода приведена на рис. 8.

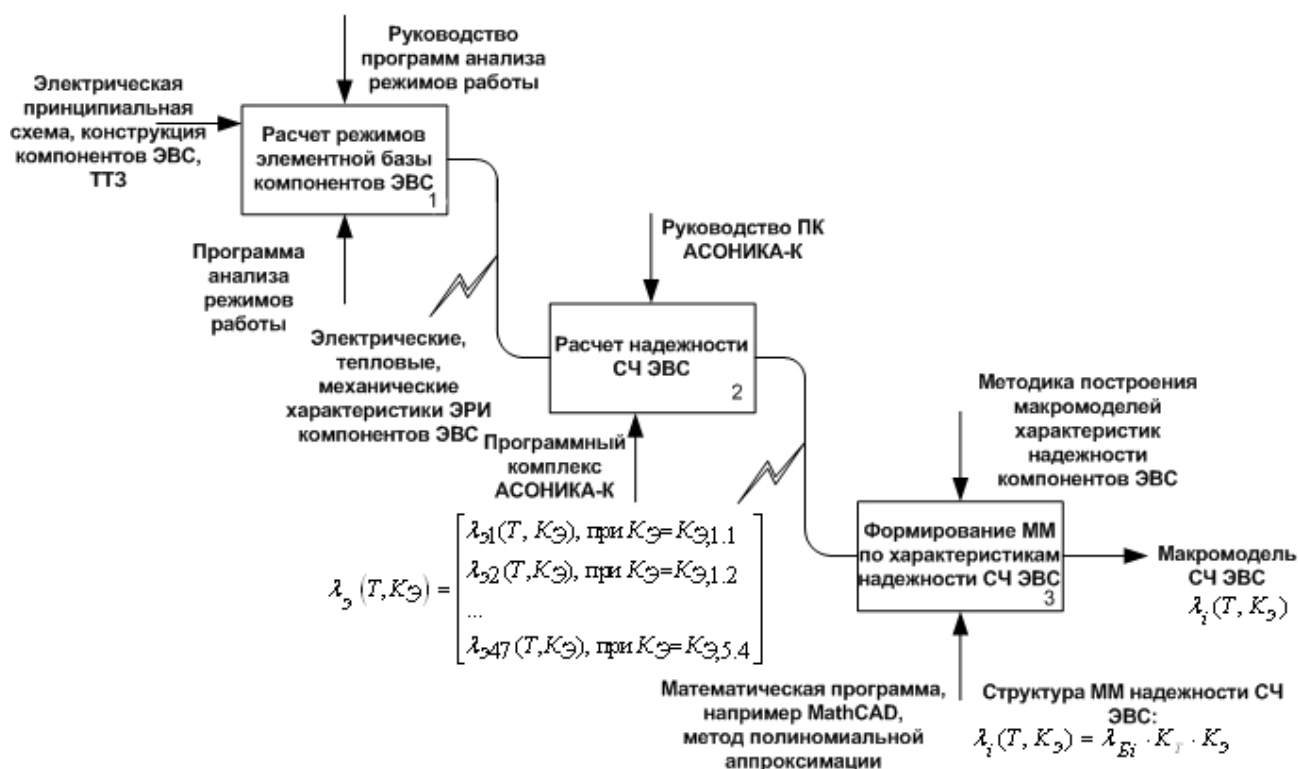


Рис. 8. Укрупненная схема метода создания макромоделей компонентов ЭВС

В качестве метода аппроксимации модели температурного коэффициента по критериям наименьшего значения числа коэффициентов, простоты структуры модели, погрешности метода не более 10%, был выбран метод квадратичной полиномиальной аппроксимации. Полученные макромоделей ИО компонентов ЭВС приведены в диссертационной работе.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки методического обеспечения процесса исследования надежности НКРТС при проектировании, которое создано на основе разработанных в диссертационной работе моделей и методов.

В главе приведен комплекс инженерных методик, включающий в себя:

- Методику обеспечения надежности на этапах проектирования НКРТС;
- Методику проектного исследования характеристик надежности наземного и бортового сегментов НКРТС;
- Методику определения проектной надежности радиолиний прямого и обратного каналов с учетом технических характеристик и погодных условий;
- Методику оценки проектной надежности специализированных программных средств НКРТС.

Отличительной особенностью комплекса методик обеспечения надежности НКРТС при проектировании является объединение этапов исследования общей надежности всей системы (см. рис. 9, блоки 6-7, 10, 13 и 16). Комплекс методик позволяет определять «слабые места» НКРТС, проводить анализ и определять причины, влияющие на надежность, синтезировать рекомендации, направленные на их устранение и проверять их эффективность. Это позволяет при тесном взаимодействии инженеров в области надежности с разработчиками (системотехниками, конструкторами, схемотехниками и т.д.) формулировать рекомендации по усилению с точки зрения надежности сегментов НКРТС, контролировать процесс введения изменений и проведения ряда повторных работ, что в конечном итоге, позволяет получить заведомо более высокий проектный уровень надежности системы.

Кроме того, при распараллеливании ряда работ, методики позволят сократить время на обеспечение надежности при проектировании (см. рис. 9 блоки 2-5, 8-9, 11-12, 14-15).

Для проверки эффективности внедрения методик обеспечения надежности НКРТС на этапах проектирования необходимо отследить изменение уровня надежности, который можно достичь на каждом из этапов проектирования при условии добавления проверочно-контрольных мероприятий на этих этапах (см. рис. 9).

Оценка эффективности методики определяется по следующей модели:

$$R = R(P_{\text{пр}}), \quad (13)$$

где:  $P_{\text{пр}} = [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{\text{пр}}] \cdot b_{\text{пр}}$  - надежность системы, достигнутая в результате проектирования;  $P_0$  - надежность номинального (исходного) варианта НКРТС без какого-либо резерва или других форм избыточности, или заданная в ТЗ;  $a_{\text{пр}}$  - коэффициент, выражающий эффективность введения избыточности и других дополнительных проектных решений, направленных на обеспечение надежности;  $b_{\text{пр}}$  - коэффициент, выражающий качество (бездефектность) проектно-конструкторской документации.

Для  $b_{\text{пр}} = 1$ ,  $a_{\text{пр}1} = 0,6428$  (при числе контрольных мероприятий (КМ) равным 9) и  $a_{\text{пр}2} = 0,923$  (при числе КМ равным 13) и при условии, что, для качест-

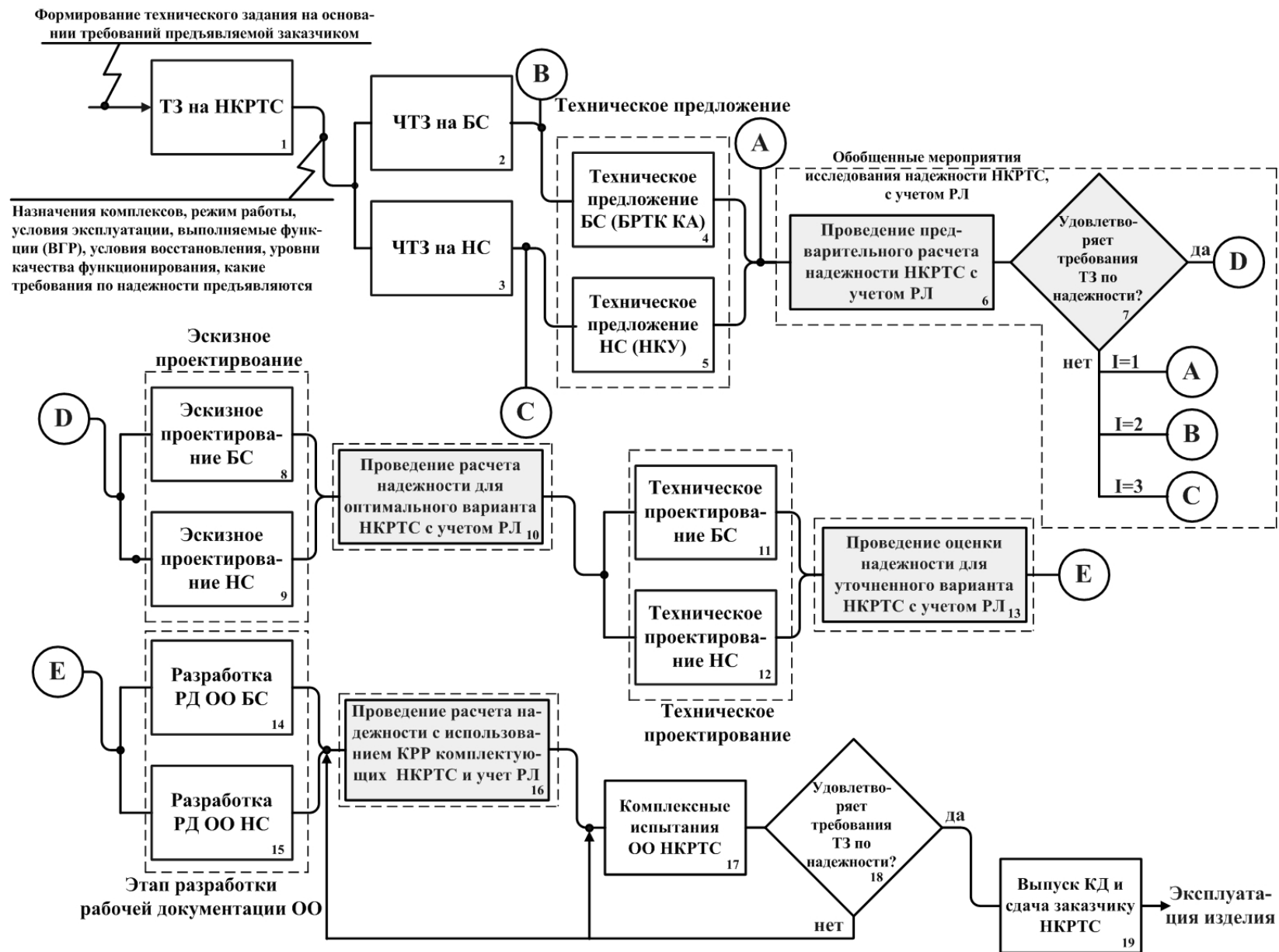


Рис. 9. Укрупненная схема инженерной методики обеспечения надежности НКРТС при проектировании

венной оценки примем  $P_0 = 0,9$ , получаем по модели (13) следующее значение относительной эффективности использования методики, равное  $R_{\text{эф}} = R_2/R_1 = 10,2906\%$ . При этом уровень проектной надежности системы повышается на 11%.

Введение методического, математического, и информационного обеспечения в процесс проектирования сложных НКРТС позволило:

- сократить сроки проводимых работ по обеспечению надежности новых образцов системы, одновременно повышая уровень проектной надежности за счет своевременного выявления потенциально уязвимых узлов НКРТС;
- сократить число этапов по доработке СЧ новых образцов системы за счет использования уточненных СРН и моделей оценки надежности СЧ;
- снизить риск отрицательного результата (не удовлетворения требований технического задания) за счет введения комплексного исследования надежности системы и ее СЧ на всех этапах проектирования.

В главе 4 также приведено описание экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе. В качестве статистических данных были взяты данные по отказам и сбоям НКРТС «Компарус» за 10 лет эксплуатации, предоставленные ФГУП «НИИ ТП». Для обработки статистических данных применялся расчетно-экспериментальный метод, рекомендованный РД В 319.01.16, с помощью которого были получены точечные оценки характеристик надежности (для доверительной вероятности 0,9). Результаты статистической обработки данных, расчета по «традиционному» методу и предложенному в диссертационной работе сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнения статистических данных реальной эксплуатации НКРТС «Компарус» и расчетов проектной надежности

№ п/п	Наименование СЧ НКРТС	Оценка по результатам эксплуатации		Традиционный метод расчета проектной надежности		Предложенный метод исследования надежности НКРТС	
		$T_0$	$R(0,t)$	$T_0$	$R^{***}$	$T_0$	$R(0,t)$
1	БС НКРТС (БРТК КА)	<b>5240</b>	<b>0,9990469</b>	3200	0,990115	4800	0,9989589
2	НС НКРТС (наземная станции управления КА)	<b>6970</b>	<b>0,99787</b>	<b>4875</b> 5850	<b>0,99107</b> 0,99241	6470	0,99519
3	Общая радиолиния (канал «Земля-Борт» и «Борт-Земля»)	-*	<b>0,99153</b>	-*	-**	-*	0,99029083 6
4	НКРТС «Компарус»	-*	<b>0,988</b>	-*	-*	-*	0,98450150 4

Примечание: \* - показатель надежности из-за свойств СЧ не может быть определен; \*\* - по традиционным методам в расчетах надежности НКРТС радиолиния не учитывалась; А/В – А – без учета ВЭ и ММ ЭВС; В – с учетом ВЭ и ММ ЭВС; \*\*\* - для БС – это вероятность безотказной работы; для НС – это коэффициент оперативной готовности.

Как видно из табл. 1, результаты расчета надежности сегментов НКРТС «Компарус» с использованием «традиционного» метода имеют заниженные значения по сравнению с оценкой надежности по статистическим данным, а значения, полученные с помощью разработанного метода, имеют более близкие значения к эксплуатационным данным. Погрешность расчета по предложенному методу составила не более 12% для всей системы, а по традиционному методу - 30% (при расчете БС).

На основе разработанных в диссертационной работе моделей и методов исследования надежности компонентов НКРТС были созданы методические указания к лабораторному практикуму и курсовому проектированию по дисциплинам «Управление качеством ЭС» и «Надежность ЭС», а также выпускной работе по программе повышения квалификации «Основы обеспечения надежности РЭС при проектировании».

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

**В приложениях** к диссертационной работе приведены акты внедрения результатов диссертационной работы и результаты расчетов составных частей НКРТС.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В процессе решения поставленных в диссертационной работе задач получены следующие основные результаты:

1. Предложен показатель надежности НКРТС, который отвечает всем основным требованиям, предъявляемым к НКРТС, учитывает свойства его составных частей, модель эксплуатации и позволяет количественно оценить надежность управления.
2. Предложен вид комплексной математической модели надежности НКРТС, зависящей от структурно-физических свойств изделия, бессбойности радиолинии и характеристик сегментов. Это приводит к получению более точной и полной картины работы современных НКРТС и определению «уязвимых» узлов.
3. Разработан метод оценки надежности НКРТС при проектировании, основанный на аналитико-статистическом моделировании, что, в отличие от известных методов, позволяет количественно оценить надежность системы в целом.
4. В рамках разработанного метода предложен метод расчета надежности «космических» радиолиний НКРТС, отличительной особенностью которого является учет статистики сеансов связи в зависимости от метеорологических параметров и влияния структуры распространения от «источника» к «получателю».
5. Для разработанного метода был создан метод определения интенсивностей отказов компонентов электронно-вычислительных средств наземного сегмента, отличающийся от известных учетом влияния модели эксплуатации на надежность ЭВС.

6. Разработано методическое обеспечение для исследования надежности на этапах проектирования, основанное на комплексном подходе к обеспечению надежности НКРТС. В отличие от традиционных, методики позволяют сократить сроки проектирования и число доводочных этапов, одновременно уменьшая финансовые затраты за счет введения контрольных мероприятий в каждой стадии и проверки совместимости СЧ с точки зрения надежности.

7. Выполнена экспериментальная проверка разработанных моделей, метода и методического обеспечения и подтверждена эффективность их применения при проектировании НКРТС.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования НКРТС на промышленных предприятиях и в учебный процесс ВУЗов.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Жаднов И.В., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности. // Надежность: Научно-технический журнал. № 2 (21)/ - М.: ИД «Технологии», 2007- с. 34-44.**

**2. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Якубов С.Э. Оценка качества компонентов компьютерной техники. // Надежность: Научно-технический журнал. № 3 (26)/ - М.: ИД «Технологии», 2008- с. 26-35.**

3. Полесский С.Н. Исследование надежности командных радиотехнических систем на ранних этапах проектирования. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2008- с. 118-119.

4. Жаднов В.В., Полесский С.Н. Разработка метода обеспечения надежности командных радиотехнических систем. // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2007)./ Материалы международной конференции и Российской научной школы. Часть 1 - М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 2007. - с. 20-22.

5. Полесский С.Н. Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание// Жаднов В.В., Кофанов Ю.Н., Мажулин Н.В., Власов Е.П., Жаднов И.В., Замараев С.П., Измайлов А.С, Марченков К.В., Полесский С.Н. и др. – М.: Изд-во «Радио и связь», 2003. – 156 с.

6. Полесский С.Н. Расчёт надёжности компьютерных систем: Учебное издание // Власов Е.П., Жаднов В.В., Жаднов И.В., Корнейчук В.И., Олейник М.В., Полесский С.Н. - К.: Изд-во «Корнійчук», 2003. – 187 с.

7. Жаднов В. В., Маркин А. В., Бешлагич М. И., Полесский С. Н. Современные принципы обеспечения надежности НКРТС КА. // Инновации в условиях развития информационно-телекоммуникационных технологий: М-лы научно-практической конференции. / Под ред. В. Г. Домрачева, С. У. Увайсова. Отв. за вып. А. В. Долматов, И. А. Иванов, Р. И. Увайсов. - М.: МИЭМ, 2008. - с. 247-249.

8. Жаднов В.В. , Полесский С.Н. Определение показателей надежности систем, обладающих вспомогательными элементами. // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: Сб. научных трудов. / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ – 2006. – с. 151-158.
9. Полесский С.Н.. Один из подходов к расчету и оценки показателей достаточности запасов в комплексах ЗИП для РЭС/ Науч. рук. Жаднов В.В. // Сб. тр. I Всероссийской научно-технической конференции. / Под ред. Иофина А.А., Пономарева Л.И.- Екатеринбург: Изд-во "АМБ", 2004.–с. 89-92.
10. М.А. Карапузов, Полесский С.Н. Построение макромоделей оценки показателей надежности составных частей ЭС. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2007- с. 469-470.
11. Полесский С.Н., Жаднов В.В. Математическое обеспечение программного комплекса АСОНИКА-К. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - с. 519-521.
12. Полесский С.Н., Жаднов В.В. Показатели надежности программных средств. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - с. 530-533.
13. Жаднов В.В., Львов Ю.Р., Полесский С.Н. Применение численных методов для расчета характеристик систем ЗИП РЭЖ.// Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: Сб. научных трудов / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2005. - с. 75-83.
14. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Якубов С.Э.. Оценка качества компонентов компьютерной техники. // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: Материалы научно-практической конференции/ Под ред. В.Г. Домрачева, С.У. Увайсова; Отв. за вып. А.В. Долматов, И.А. Иванов, Р.И. Увайсов. – М.: МИЭМ, 2007. – с. 229-232.
15. Жаднов В.В., Строгонов А.В., Полесский С.Н. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем. // Компоненты и технологии: Научно-технический журнал. № 5, 2007. – с. 42-48.
16. Полесский С. Н. Разработка информационно-справочной базы по характеристикам качества комплектующих электронных средств. / В. В. Жаднов, С. Н. Полесский, С. Э. Якубов, Е. М. Гамилова. // Инновации в условиях развития информационно-телекоммуникационных технологий: М-лы научно-практической конференции. / Под ред. В. Г. Домрачева, С. У. Увайсова. Отв. за вып. А. В. Долматов, И. А. Иванов, Р. И. Увайсов. - М.: МИЭМ, 2008. - с. 111-113.
17. Жаднов В.В., Полесский С.Н. Создание комплексной модели надежности восстанавливаемых изделий. //Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – с. 248-252.
18. Полесский С.Н. Исследование надежности мобильно-бортовых радиотехнических систем. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2006- с. 208-209.