

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Ивановой Ники Михайловны «Исследование вероятностно-временных характеристик моделей  $k$ -из- $n$  с приложением к анализу надёжности привязного мультироторного летательного модуля», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Российского университета дружбы народов на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

### Актуальность темы диссертационной работы

Системы типа  $k$ -из- $n$  стали рассматриваться в теории надёжности практически с момента её зарождения в середине XX века. Казалось бы, за это время они должны были быть досконально изучены. Однако в большинстве ранее выполненных исследований предполагалось, что распределения наработки до отказа и времени восстановления элементов системы имеют экспоненциальные (показательные) распределения. Кроме того, технический прогресс ведёт к появлению новых приложений для подобных моделей, которые привносят свою специфику. В частности, в настоящее время получают распространение привязные высотные телекоммуникационные платформы на базе мультироторных беспилотных летательных аппаратов, преимуществом которых является возможность длительного функционирования за счёт питания высотного модуля от наземной станции. Одним из ключевых вопросов при проектировании и эксплуатации таких платформ является обеспечение высокой надёжности летательного аппарата.

Для анализа надёжности таких аппаратов эффективно используются математические модели систем типа  $k$ -из- $n$ . Актуальность диссертационной работы Ивановой Н.М. заключается в исследовании новых математических моделей  $k$ -из- $n$  для двух сценариев восстановления системы после полного отказа с произвольно распределённым временем ремонта как компонентов, так и всей системы в целом. В работе разработаны аналитические и имитационные методы, которые позволяют оценить характеристики надёжности для таких моделей и использовать полученные результаты для анализа реальных систем.

Ещё одной важной задачей, решаемой в диссертационной работе, является анализ чувствительности характеристик надёжности моделей  $k$ -из- $n$  к виду исходной информации. Под этим понимается влияние изменения исходных характеристик системы на результирующие показатели

надёжности. Эта проблема также весьма важна для практики, поскольку в реальности функции распределения наработки до отказа и времени ремонта компонентов системы точно не известны. Как правило, они могут быть оценены на основе статистических данных лишь с точностью до двух моментов.

Направления выполненных в диссертационной работе исследований соответствуют пунктам 9, 12 и 26 паспорта специальности 1.2.3 Теоретическая информатика, кибернетика.

Ввиду вышеизложенного, считаю, что тема диссертационного исследования Ивановой Ники Михайловны «Исследование вероятностно-временных характеристик моделей  $k$ -из- $n$  с приложением к анализу надёжности привязного мультироторного летательного модуля», является актуальной и соответствует специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

### **Характеристики содержания диссертационной работы**

Диссертация Ивановой Н.М. включает в себя введение, три главы, заключение, списки сокращений и условных обозначений, терминов, литературы, рисунков, таблиц, а также приложение, содержащее свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Во **введении** приведена общая характеристика работы, представлен обзор научной литературы по исследуемой проблеме, сформулированы цель и задачи исследования, указаны основные результаты, их актуальность, новизна.

**Глава 1** посвящена аналитическому исследованию математической модели системы  $k$ -из- $n$  с показательным распределением наработки до отказа компонентов и произвольным распределением времени их ремонта. Исследованы два сценария восстановления системы после отказа, для которых получены стационарные и нестационарные вероятностно-временные характеристики надёжности.

**Глава 2** содержит численное исследование вычисленных в первой главе характеристик на примере частных случаев модели  $k$ -из- $6$ , которая представляет собой математическую модель гексакоптера. Приводится анализ надёжности модели и чувствительности её характеристик к виду функции распределения и значению коэффициента вариации времени ремонта.

В **главе 3** для анализа чувствительности характеристик надёжности модели  $k$ -из- $n$  с произвольными исходными распределениями использовано



имитационное статистическое моделирование. Описана процедура моделирования, приведена апробация разработанной модели путём сравнения с результатами, полученными в главе 2 численно. Проведён анализ чувствительности вероятности безотказной работы и коэффициента готовности к виду распределения и значению коэффициента вариации наработки до отказа компонентов системы.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

### **Достоверность и новизна результатов диссертации**

Достоверность полученных в диссертационном исследовании результатов подтверждается использованием строгих математических методов теории вероятностей и теории случайных процессов, доказательством всех приведенных теорем и следствий, а также численными экспериментами и результатами имитационного моделирования.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- Построены математические модели систем  $k$ -из- $n$  с произвольным распределением времени ремонта компонентов и всей системы для двух сценариев восстановления системы, аналитически найдены вероятностно-временные характеристики надёжности этих систем.

- Предложен и исследован двухмерный марковский процесс с дискретно-непрерывным множеством состояний, описывающий поведение рассматриваемой системы, для которого выведены дифференциальные уравнения Колмогорова в частных производных и получено их аналитическое решение в терминах преобразования Лапласа.

- Проведён анализ чувствительности вероятностных характеристик надёжности системы  $k$ -из- $n$  к виду исходной информации при непоказательных распределениях наработки до отказа и времени ремонта компонентов системы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается приведёнными математическими доказательствами с использованием методов теории вероятностей и теории случайных процессов, а также численными экспериментами.

## **Ценность для науки и практики результатов работы**

Научная ценность диссертации заключается в полученных математических моделях и методах их исследования для систем  $k$ -из- $n$  на основе методов теории вероятностей, теории случайных процессов, теории надёжности, а также численных методов решения дифференциальных уравнений. Практическая ценность полученных в диссертации результатов заключается в возможности использования построенных моделей и методов вычисления их вероятностно-временных характеристик для анализа надёжности привязного мультироторного летательного модуля. Кроме того, разработанные модели и методы могут быть применены и к другим техническим системам, использующим нагруженное резервирование.

Результаты работы были использованы при выполнении трёх научно-исследовательских работ, выполненных по грантам Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда и РУДН, и внедрены в учебный процесс РУДН.

### **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ, 6 из которых входят в международные базы данных Scopus и Web of Science. Зарегистрирована одна программа для ЭВМ. Результаты исследований вошли в монографию, докладывались на 5 всероссийских и международных конференциях, семинарах, а также включены в отчеты по научно-исследовательским работам, проводимым по проектам Российского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда.

### **Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат даёт ясное представление о диссертационной работе, его содержание полностью соответствует её основным положениям.

### **Замечания по диссертационной работе**

По работе имеются следующие замечания:

1. В начале главы 1 при формулировке постановки задачи исследования стоило бы привести более детальное и точное описание принципов функционирования рассматриваемой системы. В частности, пояснить, что происходит при отказе системы с не отказавшими компонентами: продолжают ли они функционировать в прежнем режиме или



же выключаются и пребывают в нерабочем состоянии вплоть до момента окончания восстановления системы.

2. В главе 3 недостаточное внимание уделено выбору общего времени моделирования, определяющего точность получаемых результатов. В частности, следовало бы обосновать, что выбранное время обеспечивает получение стационарных характеристик.

3. В качестве результатов моделирования в главе 3 приводятся только точечные оценки показателей надёжности, для них отсутствуют доверительные интервалы.

4. Имеются терминологические погрешности. В некоторых случаях используемые термины не соответствуют принятой и стандартизированной в теории надёжности терминологии. Именно, вместо термина «готовность» использован термин «доступность» (с. 5), облегченный и нагруженный резерв названы соответственно «тёплым» (с. 5) и «горячим» (с. 7 и 12), некорректно использован термин «сбой» (с. 78), для вероятности безотказной работы используется термин «функция надёжности». Словосочетание «время безотказной работы» сокращается как в.б.р., что затрудняет восприятие текста, поскольку обычно такое сокращение используется для вероятности безотказной работы. Из двух синонимических названий распределения «экспоненциальное» и «показательное» следовало бы выбрать какое-либо одно и использовать его во всей работе.

5. Во введении (с. 11) ошибочно написано, что диссертация содержит 4 главы и 2 приложения, на самом деле в ней только 3 главы и 1 приложение. Между тем, действительно стоило бы дать второе приложение, приведя в нём акты об использовании результатов диссертации.

Однако указанные недостатки не снижают ценности результатов, полученных в диссертационной работе, и не препятствуют её общей положительной оценке.

### **Заключение**

Диссертационное исследование Ивановой Н.М. на тему «Исследование вероятностно-временных характеристик моделей  $k$ -из- $n$  с приложением к анализу надёжности привязного мультироторного летательного модуля» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи по исследованию вероятностных характеристик надёжности восстанавливаемых резервированных систем с непоказательным распределением времени ремонта, в частности, беспилотных летательных аппаратов мультикоптеров.

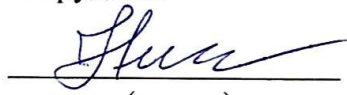
Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, согласно п. 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН протокол №12 от 23.09.2019 г., а её автор, Иванова Ника Михайловна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

«30» августа 2023 г.

Официальный оппонент

Нетес Виктор Александрович

д.т.н. (05.13.01 – Управление в технических системах), старший научный сотрудник



В.А. Нетес

(подпись)

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»  
профессор кафедры «Сети связи и системы коммутации»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а  
+7 (495) 673 52 92  
v.a.netes@mtuci.ru

Подпись Нетеса В.А. заверяю

Учёный секретарь Учёного совета МТУСИ



Т.В. Зотова

(печать организации, подпись)

«30» августа 2023 г.