

## 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

Создание и развитие математических методов анализа и повышения надёжности технических систем насчитывает более чем девятистолетнюю историю благодаря работам А.Я. Хинчина, Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьёва, И. Герцбаха, И. Ушакова, К. Пальма, Р. Барлоу, Ф. Прошана и др. И хотя идея создания резерва, запаса, стара как сама цивилизация, но именно развитие новых направлений математики, таких как теория вероятностей и математическая статистика, позволили разработать методы рационального проектирования, планирования и обслуживания сложных многокомпонентных комплексов. Можно быть уверенным, что появление новых видов техники в настоящем и будущем будет неиссякаемым источником постоянной актуальности математической теории надёжности. В частности, в настоящее время мы наблюдаем рост и развитие автоматических (беспилотных) и дистанционно управляемых транспортных средств. Данная диссертационная работа фокусирует своё внимание на вопросах эксплуатации летающих мобильных платформ обеспечения беспроводной передачи данных.

Хотя системы типа  $k$ -из- $n$  довольно давно встречаются в литературе по надёжности, отметим рост интереса к динамике функционирования таких систем. Именно в последние десятилетия стали появляться работы, в которых исправность либо неисправность блоков системы устанавливается не как итоговый факт, а как переменное состояние, которое может изменяться во времени благодаря ремонтам. Как подтверждение отметим, что все указанные в списке литературы работы, посвященные системам типа  $k$ -из- $n$ , опубликованы после 2000 года. Таким образом, интерес исследовательского сообщества к теме диссертации Ивановой Н.М. положительно установлен. Кроме того, рассмотрение возможности ремонта, восстановления системы позволяет привлечь понятия и аппарат теории исследования операций и

теории массового обслуживания.

Специалисты знают, что обычно класс моделей обслуживания и резервирования проходит через несколько стадий: построение и анализ модели в простейших предположениях (как правило, в предположении об экспоненциальном законе распределения интервалов между наступлениями основных событий); уточнение либо обобщение модели на случай неэкспоненциального распределения; получение асимптотических формул, не зависящих от конкретных распределений, в критических областях параметров, либо установление нечувствительности некоторых характеристик работы системы к конкретному виду распределения. В этом отношении обсуждаемая диссертационная работа принадлежит ко второй и третьей стадиям разработки моделей систем типа  $k$ -из- $n$ . В настоящее время проблема исследования чувствительности к входным распределениям имеет высокую практическую значимость, поскольку в результате может упроститься математическая модель, а также исследователь может определить набор рекомендаций для повышения надёжности системы.

Ввиду вышесказанного, 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 обозначений, терминов, рисунков, таблиц, а также библиографию.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, приведён обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цели и задачи.

В **первой главе** представлена общая постановка задачи, описана модель системы  $k$ -из- $n$  с показательно распределённым временем безотказной работы компонентов и произвольным распределением времени их ремонта. Эта модель имеет вид марковского процесса с одной дискретной и одной непрерывной компонентой, для которого найдены система дифференциальных уравнений в частных производных для плотностей распределения состояний процесса и краевые условия. Приведено общее решение этих дифференциальных уравнений, что позволяет аналитически исследовать

основные вероятностно-временные характеристики надёжности модели  $k$ -из- $n$ .

**Вторая глава** посвящена качественному и численному исследованию частных случаев модели  $k$ -из- $n$  с приложением к анализу надёжности гексакоптера, остановка функционирования которого происходит ввиду отказа его двух или трех двигателей. Представлен анализ чувствительности функции надёжности и коэффициента готовности моделей  $k$ -из-6 к виду функции распределения времени ремонта. Получены оценка скорости сходимости функции надёжности при быстром восстановлении её компонентов, а также асимптотические выражения стационарных вероятностей при редких отказах компонентов.

**В третьей главе** представлен анализ чувствительности вероятностных характеристик надёжности моделей  $k$ -из-6 при непоказательных исходных распределениях времени безотказной работы и ремонта компонентов. Исследование проводится с помощью имитационного моделирования. Сформулированы выводы о влиянии вида функции распределения и коэффициента вариации исходных данных на функцию надёжности и коэффициент готовности моделей  $k$ -из-6. Достоверность полученных выводов проверяется сравнением результатов моделирования с аналитическими формулами из второй главы там, где это возможно.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

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

Достоверность теоретических результатов, полученных в главах 1, 2 диссертационного исследования, обоснована приведёнными доказательствами. Достоверность численных расчетов подтверждается при анализе частных случаев исследованных моделей и методов, для которых решения уже известны. Кроме того, численные эксперименты, приведённые в главе 2, сопоставимы с результатами имитационного моделирования, продемонстрированными в главе 3.

Диссертация содержит новые научные результаты, изложенные в каждой из трех глав. Построенная в главе 1 модель  $k$ -из- $n$  отличается от известных тем, что рассмотрен случай непоказательного распределения времени ремонта как компонентов, так и всей системы в целом. Кроме того, рассмотрены два сценария восстановления системы после её полного отказа. В главе 2 на примере частных случаев модели  $k$ -из- $n$  исследованы характеристики надёжности мультироторного летательного модуля. Глава 3

содержит анализ чувствительности характеристик надёжности модели  $k$ -из- $n$  к виду исходной информации при непоказательных распределениях как времени безотказной работы компонентов, так и времени их ремонта.

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

Научные положения, вынесенные на защиту, в полной мере обоснованы в тексте диссертации приведенными доказательствами. Представленные выводы оправданы результатами численных экспериментов, проведенных как аналитическими методами, так и с помощью имитационного моделирования.

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

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных математических методах анализа вероятностно-временных характеристик надёжности моделей  $k$ -из- $n$  с произвольным распределением времени ремонта компонентов. Представленные вычислительные алгоритмы позволяют аналитически вычислять нестационарные характеристики надёжности моделей  $k$ -из- $n$  в терминах преобразования Лапласа. Кроме того, в работе в явном виде получено стационарное распределение вероятностей состояний моделей  $k$ -из- $n$ . Созданные на основе полученных теоретических результатов программы численного исследования и имитационного моделирования представляют практическую значимость.

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

По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ, в том числе: в 1 монографии, в 1 издании, рекомендованном ВАК РФ и из списка ДАНК РУДН, в 6 изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Результаты исследований прошли необходимую апробацию и докладывались на всероссийских и международных конференциях.

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

Автореферат полностью соответствует и в достаточной мере отражает основные положения диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

По работе имеются следующие замечания:

1. После прочтения главы 1 возникает вопрос на будущее: насколько это наглядно — использовать понятие «граф интенсивностей переходов» для марковского процесса с непрерывным временем и несчетным множеством состояний, если некоторые компоненты изменяются непрерывно? На рис. 1.1 на стр. 18 автор оставил без указания интенсивностей стрелки из состояния  $(1, 0)$  в  $(1, x)$ , из  $(2, 0)$  в  $(2, x)$  и т. д., как будто интенсивность неизвестна. В то же время, стрелка из  $(1, x)$  в  $(2, x)$  неверна вот в каком смысле: в случае появления отказа на некотором промежутке  $[t, t + \Delta)$ , в начале которого состояние системы есть  $(1, x)$ , в конце состояние будет  $(2, x + \Delta)$ , а не  $(2, x)$ , что правильно учитывается диссертантом при выводе дифференциальных уравнений.

2. При введении процесса  $X(t)$  на стр. 16 не указано, как определяется «прошедшее время ремонта», если в момент  $t$  все компоненты исправны.

3. Разностные уравнения (1.19) записаны в предположении, что  $\Delta > 0$ , хотя это автором не оговаривается. В этом случае, строго говоря, в теореме 1.1 должны стоять производные справа вместо обыкновенных производных, либо должно быть обоснование существования обыкновенных производных и их равенства производным справа.

4. При анализе знаменателя в формуле (2.14) на стр. 61 верно показано наличие двух действительных нулей. Однако, в случае наличия кроме них и комплексных нулей, следовало бы также выявить их влияние.

5. В главе 3 в описании имитационного моделирования не указано, как определялась сходимость распределения вероятностей к стационарному.

6. Имеется небольшое количество опечаток. Например, на стр. 15 в определении случайного момента  $T$  должно быть включение  $J(t) \in \mathbf{E}_1$  вместо  $J(t) = \mathbf{E}_1$ . В правой части в формуле (1.15) на стр. 16 пропал  $dx$ . В определении вероятностей  $\pi_i(t)$  интеграл должен быть до  $t$  вместо  $\infty$ .

Указанные недостатки не снижают научную ценность полученных в диссертационной работе результатов.

### **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 восстанавливаемых резервированных систем с непоказательным распределением времени ремонта.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно п.2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумба», 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.

Официальный оппонент

заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», доктор физико-математических наук (специальность 01.01.05 – теория вероятностей и математическая статистика), доцент по кафедре прикладной теории вероятностей

Зорин Андрей Владимирович

 /А. В. Зорин/

01.09.2023

Контактные данные:

тел.: +7 (920) 045-16-02, e-mail: andrei.zorine@itmm.unn.ru



Адрес места работы: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,

Телефон: (831) 462-30-85, E-mail: unn@unn.ru