

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Выбор статистических моделей надежности для основных методов резервирования технических систем

УДК 681.51-192:519.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т51	Чжан Цинхуэй		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Курганов В.В.	к.т.н, доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Ефремов А.А.	-		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Суханов А.В.	к.х.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Скачкова Л.А.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Е.И.	к.т.н., доцент		
Руководитель ОАР	Леонов С.В.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения.
P2	Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств.
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	5.06.2019
--	-----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
31.05.2019	Основная часть	70
3.06.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
4.06.2019	Социальная ответственность	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Курганов В.В.	к.т.н., доцент		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ОАР	Ефремов А.А.	-		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Громаков Е.И.	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Громаков Е.И.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
158T51	Чжан Цинхуэй

Тема работы:

Выбор статистических моделей надежности для основных методов резервирования технических систем
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№3490/с от 06.05.2019
---	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	5.06.2019
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литература по теории надежности, математической статистики. Статья: A new lifetime model with variable shapes for the hazard rate / A.Z. Afify, G.M. Cordeiro, N. Shafique Butt et al. // Brazilian Journal of Probability and Statistics – 2017. – Vol.31, №3. – P. 516-541.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор схем резервирования, используемых в технических системах. Исследование комбинации комплементарного Вейбулл-геометрического распределения и распределения Кумарасвами, и ее частных случаев. Оценивание параметров распределений методом максимального правдоподобия. Информационные критерии. Разработка процедуры выбора модели надежности. Выбор модели надежности для системы с холодным резервированием.
Перечень графического материала	Презентация в формате *.pptx, содержащая описания схем резервирования, моделей надежности и полученные результаты.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Основная часть	Ефремов А.А.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора И.В.
Социальная ответственность	Скачкова Л.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.04.2019
---	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Курганов В.В.	к.т.н., доцент		
Ст. преподаватель ОАР	Ефремов А.А.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158T51	Чжан Цинхуэй		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
158Т51	Чжан Цинхуэй

Институт	ИСГТ	Кафедра	АиКС
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Должностной оклад научного руководителя – 30000 руб. Должностной оклад инженера – 15000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1,3 районный коэффициент
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Социальные отчисления – 28% от ФЗП
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и их временная оценка
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проект
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Анализ полученных оценки моделей
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т51	Чжан Цинхуэй		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
158Т51	Чжан Цинхуэй

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Автоматизация и робототехника
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Выбор статистических моделей надежности для основных методов резервирования технических систем	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Работа проводилась в помещении №117 на первом этаже в десятом корпусе Национального исследовательского Томского политехнического университета. Технический процесс заключается в использовании компьютера.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: — специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; — организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	1, СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03.64 2, ГН 2.2.6 – 709 – 98. 3, СНиП 21-01-97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений». 4, СНиП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы». 5, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные: 1, уровень шума 2, уровень электромагнитных излучений Опасные: 1, электрический ток;

3. Экологическая безопасность:	Для обеспечения экологической безопасности процесса необходимо обеспечить, чтобы целевая атмосфера, водный поло и литосфера не проводил активные операции с производственной деятельностью. При использовании ПК он может иметь следующие типы негативных воздействий на окружающую среду: 1) Двуокись углерода выбрасывается в атмосферу и выделяет тепло при пожарах; 2) Загрязнение почвы при обращении с старыми ПК. ПК после завершения использования (срока эксплуатации) можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка такого рода отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования: кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Перечень основных нормативных актов, содержащих требования по охране труда.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	СкачковаЛариса Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158T51	Чжан Цинхуэй		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 103 страницы текста, 14 рисунков, 16 таблиц, 2 приложения и 27 источников литературы.

Ключевые слова: выбор модели, надежность, холодное резервирование.

Цель работы: создание процедуры выбора моделей надежности сложных технических систем на примере системы с холодным резервированием.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы исследование моделей надежности, получение и статистический анализ выборок случайных чисел, расчет параметров моделей и показателей качества производились с использованием математического пакета прикладных программ Mathcad 15 и персонального компьютера с ОС Windows 10.

В ходе исследования произведен обзор основных количественных показателей надежности и схем резервирования технических систем, рассмотрены основные статистические модели надежности, метод максимального правдоподобия и информационные критерии, позволяющие сравнить качество моделей. Приведено описание эксперимента, заключающегося в получении выборок времен отказов сложной системы, определении параметров распределений непрерывных случайных величин, соответствующих заданным моделям надежности, и определении показателей качества моделей.

В результате исследования осуществлен выбор модели надежности для исследуемой системы и приведены формулы для расчета показателей надежности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	14
1.1 Основные термины теории надежности	14
1.2 Основные соединения элементов	19
1.3 Статистические модели надежности	25
1.4 Выбор статистической модели надежности	29
1.4.1 Метод максимального правдоподобия	30
1.4.2 Оценка качества статистических моделей	31
1.4.3 Информационные критерии	32
2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	34
2.1 Подготовка выборок с заданными параметрами	35
2.2 Расчет коэффициентов моделей надежности	37
2.3 Анализ результатов	41
2.4 Комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение	43
3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	47
3.1 Анализ конкурентных технических решений	47
3.2 Технология QuaD	49
3.3 SWOT–анализ	50
3.4 Организация и планирование работ	52
3.5 Продолжительность этапов работ	53
3.6 Бюджет затрат на проектирование	57
3.6.1 Основная заработная плата исполнителей проекта	57
3.6.2 Затраты на заработную плату	58
3.6.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	60

3.6.4 Накладные расходы	60
3.6.5 Формирование затрат на проектирование	61
3.7 Определение ресурсов, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	61
4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	65
4.1 Правовые нормы трудового законодательства	65
4.2 Производственная безопасность	66
4.3 Уровень шума	67
4.4 Уровень электромагнитных излучений	69
4.5 Электрический ток	70
4.6 Экологическая безопасность	71
4.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	72
4.8 Организационные мероприятия по обеспечению безопасности	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
CONCLUSION	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	77
ПРИЛОЖЕНИЕ А Параметры моделей-кандидатов	80
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты выбора моделей для выборок	100

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие техники и увеличивающаяся степень повсеместной автоматизации приводит к тому, что жизнь человека все больше зависит от правильной работы разнообразных технических систем. В связи с этим, их надежность является важнейшей характеристикой, которую необходимо учитывать при проектировании, производстве и эксплуатации.

Последствия отказов технических систем могут варьироваться от незначительных финансовых потерь до катастрофических, влекущих за собой как огромные денежные затраты, так и большое количество человеческих жертв, и негативное влияние на экологию планеты.

В качестве примеров таких катастроф можно указать аварии на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.) и АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.), взрыв нефтяной платформы Deepwater Horizon (США, 2010 г.) и утечку химикатов на заводе Union Carbide (Индия, 1984 г.).

Также, в связи с нарастающими исследованиями космоса следует упомянуть и надежность космических аппаратов, поскольку их природа исключает возможность проведения профилактических и ремонтных работ в случае отказа.

Все это приводит к повышенному вниманию, обращенному на вопросы надежности, особенно на этапе проектирования технических систем и оборудования. В значительной мере задача определения надежности объектов и систем сводится к выбору адекватной математической (вероятностной) модели надежности, т.е. закона распределения времени до отказа.

Адекватная модель надежности позволяет спрогнозировать возникновение отказов и спланировать комплекс профилактических мероприятий, а значит свести к минимуму риск аварии.

Распределение времен отказов сложных систем определяется законами распределения ее компонентов, а также используемыми в ней схемами резервирования. В случаях, когда система состоит из большого числа разнообразных компонентов, использование хорошо известных законов распределения, таких как экспоненциальный и Вейбулла, в качестве моделей надежности не всегда дает удовлетворительный результат.

Целью настоящей работы является создание процедуры выбора модели надежности сложной системы из заранее заданного списка моделей-кандидатов, используя доступную информацию о способе резервирования и законах распределения времени отказов элементов, составляющих систему.

В качестве предмета исследования выбрана модель системы с ненагруженным резервированием, состоящей из двух статистически идентичных компонентов, время отказа которых является случайной величиной, распределенной по закону Вейбулла. Данный выбор обусловлен сложностями, возникающими при попытках рассчитать показатели надежности такой системы аналитически. Разработанная в ходе выполнения настоящей бакалаврской работы процедура выбора модели надежности может быть использована и для более сложных технических систем.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Основные термины теории надежности

Решение задач в теории надежности связано, как правило, с определением характеристик надежности объектов (систем), используя имеющуюся информацию либо о законах распределения случайных величин (времен отказов) и структуре резервирования системы, либо о выборочных характеристиках результатов наблюдения за работоспособностью систем. В первом случае естественным математическим аппаратом является теория вероятностей, во втором – математическая статистика. Поэтому, представляется полезным привести основные определения, используемые в теории надежности, выраженные с использованием понятий этих дисциплин.

Под *надежностью* понимают свойство объекта или системы сохранять во времени в заранее установленных пределах параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации [1].

Одним из самых важных свойств надежности является *безотказность*, определяемая как способность объектов или систем сохранять работоспособное состояние в течении некоторого времени (наработки) [2]. При этом *работоспособное состояние* характеризуется как состояние, при котором значения всех параметров объекта (системы), определяющих способность выполнять требуемые функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации [3].

Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния, называется *отказом* [2]. В теории надежности обычно не рассматривают физические причины отказов; отказ считается случайным

событием, а время от начала работы системы до ее отказа – случайной величиной с некоторым законом распределения.

В данной работе рассматриваются модели надежности систем до их первого отказа, т.е. подразумевается, что система является *невосстанавливаемой*. Также, в рамках настоящей работы широко используется понятие *наработки до отказа*, определяемой как время от начала эксплуатации объекта (системы) до ее первого отказа [2]. Будем считать, что наработка до отказа (наработка) является непрерывной случайной величиной.

Каждая непрерывная случайная величина X однозначно определяется своей *функцией распределения* $F_X(x)$, определяемой как вероятность того, что случайная величина примет значение меньше x [4]:

$$F_X(x) = \Pr\{X < x\}. \quad (1)$$

В теории надежности эту функцию часто называют *функцией вероятности отказа*, поскольку, если случайная величина X представляет собой случайное время отказа системы, то выражение (1) определяет вероятность того, что отказ произошел в промежутке $(0; x)$.

Функция вероятности отказа является монотонно возрастающей функцией наработки (времени) и обладает следующими свойствами:

- $0 \leq F_X(x) \leq 1$;
- $F_X(0) = 0$;
- $\lim_{x \rightarrow \infty} F_X(x) = 1$.

В настоящей работе под *статистической моделью надежности* объекта (системы) будет пониматься закон распределения случайного времени отказа.

Выражение (1) представляет собой интегральный закон распределения. В теории вероятностей для того, чтобы охарактеризовать случайную величину X , также используется и дифференциальный закон – *плотность распределения* $f_X(x)$, определяемая как

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x). \quad (2)$$

Функция плотности распределения является важной характеристикой как в теории вероятностей, так и в теории надежности, поскольку позволяет визуально исследовать распределение случайной величины, определить некоторые ее свойства, и, иногда, приблизительно указать, к какому семейству принадлежит распределение.

Одним из самых известных показателей надежности является функция $P_X(x)$ *вероятности безотказной работы* (ВБР), определяемая как вероятность того, что отказ объекта (системы) не возникнет в пределах заданной наработки [2]. Это событие является комплементарным к событию отказа, поэтому можно записать

$$P_X(x) = \Pr\{X \geq x\} = 1 - F_X(x). \quad (3)$$

Изменение надежности системы во времени удобно характеризовать при помощи функции *интенсивности отказов*, определяемой как условная плотность вероятности отказа в момент времени x , при условии, что к этому моменту отказ еще не произошел [5]. Функцию $h(x)$ интенсивности отказов объекта (системы) удобно находить с использованием выражений (2) и (3) следующим образом:

$$h(x) = \frac{f_X(x)}{P_X(x)}. \quad (4)$$

Характерная кривая интенсивности отказов представляет собой U-образную кривую, приведенную на рисунке 1.

Рисунок 1 наглядно дает представление о трех этапах жизненного цикла технической системы: *период приработки*, *период нормальной эксплуатации* и *период износа и старения системы*. Для первого характерны отказы, возникающие по вине проектировщиков, конструкторов и изготовителей [2]. В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов минимальна; отказы оборудования происходят внезапно, зачастую по внешним причинам. Период износа (старения)

характеризуется ростом интенсивности отказов в результате необратимых физико-химических процессов, протекающих в материалах, которые приводят к ухудшению качества системы в целом [3]. Дальнейшая эксплуатация системы является нецелесообразной.



Рисунок 1 – Характерная форма кривой интенсивности отказов

Интегральная функция распределения и функция плотности в полной мере характеризуют случайную величину. Однако, для решения многих задач достаточно определить только несколько моментов случайной величины. В теории надежности чаще всего используются первый начальный момент (математическое ожидание) и дисперсия [2].

Математическое ожидание случайного времени отказа T_{cp} (*среднее время до отказа, средняя наработка до отказа*) может быть определено с использованием выражений (2) или (3) следующим образом:

$$T_{cp} = M[X] = \int_0^{\infty} x f_X(x) dx = \int_0^{\infty} P_X(x) dx, \quad (5)$$

где $M[X]$ – математическое ожидание случайной величины X ;
 $f_X(x)$ – функция плотности распределения;
 $P_X(x)$ – функция ВБР.

Дисперсию $D[X]$ случайной величины X – времени отказов – можно определить с помощью хорошо известных формул теории вероятностей как центральный момент второго порядка [6]:

$$D[X] = \int_0^{\infty} (x - M[X])^2 f_X(x) dx, \quad (6)$$

либо используя соотношение:

$$D[X] = \int_0^{\infty} x^2 f_X(x) dx - (M[X])^2, \quad (7)$$

где $M[X]$ – математическое ожидание случайной величины X ;

$f_X(x)$ – функция плотности распределения.

Начальные и центральные моменты третьего и более высших порядков используются в задачах теории надежности значительно реже.

Поскольку основная часть настоящей работы посвящена анализу выборок случайных значений, необходимо, также, привести выражения для расчета выборочных оценок среднего времени до отказа (математического ожидания) и дисперсии.

Пусть имеется выборка $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ из N значений случайной величины X . В случае, если v_i представляет собой время отказа i -го объекта, выборочная оценка среднего времени до отказа $\hat{T}_{cp}$ будет определяться как выборочное среднее [7]:

$$\hat{T}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i, \quad (8)$$

а выборочная несмещенная дисперсия S^2 будет равна:

$$S^1 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \hat{T}_{cp})^2. \quad (9)$$

1.2 Основные соединения элементов

Анализ надежности сложных систем предполагает, что исследователю известны модели надежности (распределения времен до отказа) всех компонентов, входящих в систему, а также схема резервирования. Наиболее простой конфигурацией в смысле надежности является последовательное соединение компонентов системы (рисунок 2), то есть такое, при котором отказ любого компонента означает отказ системы в целом [3].

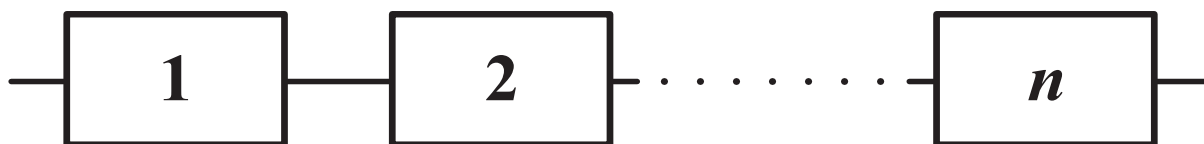


Рисунок 2 – Блок-схема надежности последовательной системы

Таким образом, резервирование в такой системе отсутствует. Считая отказы компонентов независимыми случайными событиями, можно определить функцию $P_S(t)$ ВБР последовательной системы как

$$P_S(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (10)$$

где n – число компонентов;

$P_i(t)$ – функция ВБР i -го компонента.

Используя формулы (2)-(7), можно получить остальные показатели надежности. Однако, при большом количестве элементов системы и различных законах распределения времен отказов выполнение расчетов может быть затруднено. В таких случаях целесообразно проводить аппроксимацию функции ВБР системы какой-нибудь другой моделью надежности с небольшим количеством параметров.

При параллельном (в смысле надежности) соединении элементов отказ системы наступает при отказе последнего работающего элемента [2]. При этом различают нагруженное («горячее») и ненагруженное («холодное») резервирование. В случае параллельного «горячего» резервирования (рисунок 3) все элементы системы находятся в рабочем режиме одновременно, в одинаковых условиях функционирования [5].

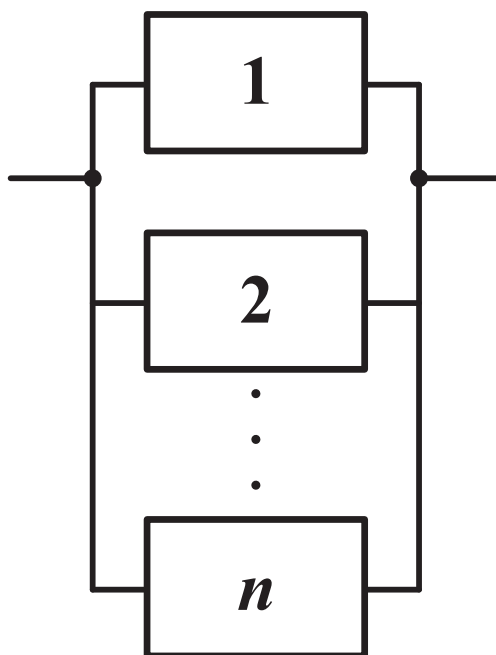


Рисунок 3 – Блок-схема надежности параллельной системы с нагруженным резервом

Считая отказы компонентов независимыми случайными событиями, можно определить функцию $F_S(t)$ вероятности отказа параллельной системы с «горячим» резервированием как

$$F_S(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t), \quad (11)$$

где n – число компонентов;

$F_i(t)$ – функция вероятности отказа i -го компонента.

На практике система с параллельным резервированием редко содержит больше трех элементов, что связано со значительным увеличением стоимости реализации системы. Однако, если элементом такой системы является некая подсистема, состоящая из большого количества компонентов, аналитические выражения показателей надежности системы могут быть достаточно громоздкими, а их вычисления – затруднительными.

Параллельное «холодное» резервирование (рисунок 4) является одним из самых выигрышных в смысле надежности способов резервирования, благодаря тому факту, что резервные элементы не отказывают, находясь в состоянии резерва [5]. Однако, аналитические расчеты показателей надежности для этой конфигурации резервирования представляют сложную математическую проблему.

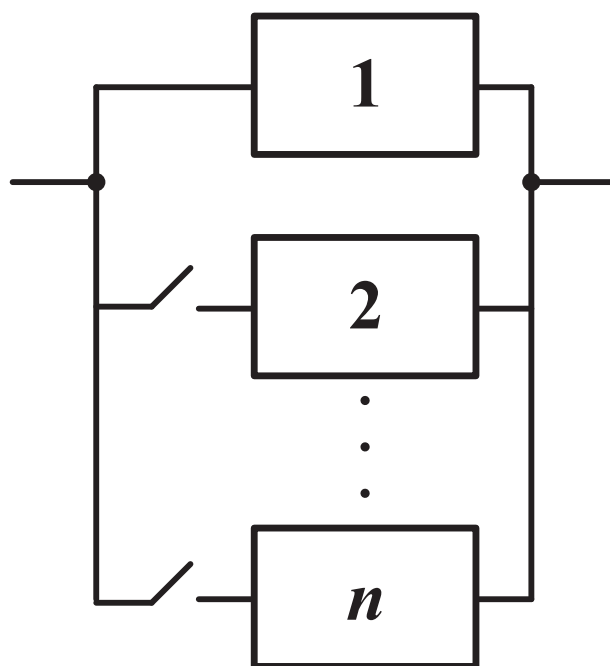


Рисунок 4 – Блок-схема надежности параллельной системы с ненагруженным резервом

В самом простом случае, когда основной элемент и все резервные представляют собой статистически идентичные устройства, времена отказов которых подчиняются экспоненциальному распределению, аналитическое выражение для функции ВБР может быть получено с использованием математического аппарата цепей Маркова [7]. Так, если система состоит из одного основного и m резервных компонентов, времена отказов которых распределены экспоненциально с параметром λ , функция ВБР системы $P_S(t)$ будет определяться выражением

$$P_S(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в формулы (2)-(7), можно получить аналитические выражения для остальных показателей надежности такой системы.

Однако, если компоненты в составе резервной группы не являются статистически идентичными или их времена отказов подчиняются распределениям, отличным от экспоненциального, расчеты значительно усложняются. В работе [8] приведено выражение для функции ВБР системы $P_S(t)$, состоящей из одного основного и одного резервного элемента в «холодном» резерве с произвольными законами распределения времен отказов:

$$P_S(t) = P_1(t) + \int_0^t f_1(x) P_2(t-x) dx, \quad (13)$$

где $P_1(x)$ – функция ВБР основного элемента;

$P_2(x)$ – функция ВБР резервного элемента;

$f_1(x)$ – плотность распределения времени отказов основного элемента.

В случае, когда времена отказов основного и резервного элементов подчиняются распределению Вейбулла с одинаковыми параметрами η и β , выражение (13) примет вид

$$P_S(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} + \frac{\beta}{\eta} \int_0^t \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} e^{-\left(\frac{t-x}{\eta}\right)^\beta} dx. \quad (14)$$

Проведение расчетов с использованием такой функции может представлять значительные трудности даже с использованием специализированного математического ПО. При этом среднее время безотказной работы систем с «холодным» резервированием и дисперсия времени до отказа системы могут быть определены сравнительно просто. Действительно, поскольку в подобных системах компоненты подключаются в рабочий режим по очереди, то среднее время до отказа системы $T_{cp\ S}$ будет равно сумме средних времен до отказа, входящих в нее компонентов:

$$T_{cp\ S} = \sum_{i=1}^n T_{cp\ i}, \quad (15)$$

где n – количество элементов в составе системы;

$T_{cp\ i}$ – среднее время до отказа i -го элемента.

Также, поскольку отказы элементов системы предполагаются независимыми, дисперсия $D[T_S]$ времени до отказа системы представляет собой сумму дисперсий времен до отказа, входящих в нее элементов:

$$D[T_S] = D\left[\sum_{i=1}^n T_i\right] = \sum_{i=1}^n D[T_i], \quad (16)$$

где $D[T_i]$ – дисперсия времени до отказа i -го элемента.

В технических системах, таких как системы управления, телекоммуникации широкое применение нашли системы с резервированием по принципу « K из N », то есть такие, в которых для работы системы достаточно, чтобы из N одновременно работающих компонентов работало хотя бы K компонентов (рисунок 5). Как правило, все компоненты при таком способе резервирования являются статистически идентичными, а их отказы рассматриваются как независимые случайные события [3].

В этом случае функцию ВБР системы $P_S(t)$ можно найти по следующей формуле [2]:

$$P_S(t) = \sum_{i=K}^N C_N^i P(t)^i [1 - P(t)]^{N-i}, \quad (17)$$

где $P(t)$ – функция ВБР отдельного компонента системы;

$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$ – число сочетаний из N по i (биномиальный коэффициент).

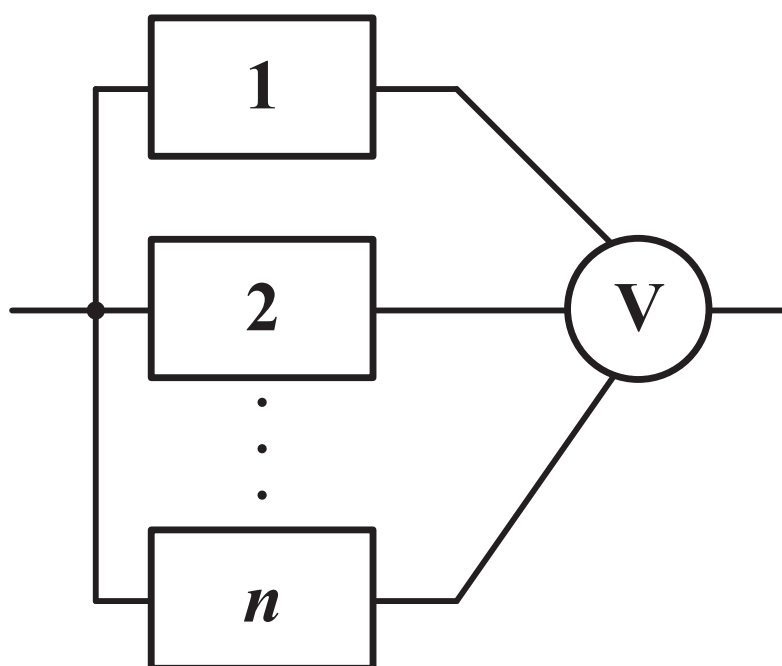


Рисунок 5 – Блок-схема надежности системы с резервированием по принципу K из N

Чаще всего из этого типа резервирования встречаются так называемые системы с мажоритарным резервированием «2 из 3». В этом случае функция ВБР системы $P_S(t)$ в соответствии с (17) примет вид:

$$P_S(t) = 3P(t)^2 - 2P(t)^3. \quad (18)$$

Другие показатели надежности могут легко быть получены из выражений (17) и (18) при помощи формул (2)-(7).

Независимо от способа резервирования, выражения для ВБР системы могут содержать большое число разнообразных параметров различных моделей надежности. При этом, работа с такими выражениями может представлять сложность даже с использованием математических программных пакетов. Таким образом, поиск более простых, но адекватных статистических моделей надежности является важной практической задачей.

1.3 Статистические модели надежности

Наиболее простой и широко изученной моделью надежности является экспоненциальная модель, подразумевающая, что время до отказа объекта (системы) является непрерывной случайной величиной, распределенной экспоненциально [2]. В этом случае функция распределения случайной величины X равна

$$F_{EXP}(x) = 1 - e^{-\lambda t}, x \geq 0, \quad (19)$$

где $\lambda > 0$ – параметр

Подставляя выражение (19) в формулы (2)-(7), можно получить остальные показатели надежности:

$$f_{EXP}(x) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (20)$$

$$P_{EXP}(x) = e^{-\lambda t}, \quad (21)$$

$$h_{EXP}(x) = \lambda, \quad (22)$$

$$M[X] = \lambda^{-1}, \quad (23)$$

$$D[X] = \lambda^{-2}. \quad (24)$$

Несомненным достоинством экспоненциальной модели надежности является ее простота. Это обусловило использование данной модели при обучении и решении задач первичной оценки надежности. Широко известным фактом является равенство (22), что, с одной стороны, позволяет применять для решения некоторых задач аппарат цепей Маркова [7], но, с другой стороны, является чрезмерным упрощением, поскольку не

принимает в расчет периоды приработки и износа (рисунок 1) в жизненном цикле объекта (системы).

Другой широко известной моделью надежности является модель Вейбулла [2], подразумевающая, что время до отказа объекта (системы) распределено в соответствии с распределением Вейбулла, для которого функция распределения $F_W(x)$ определяется следующим выражением:

$$F_W(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, x \geq 0, \quad (25)$$

где $\eta > 0$ – параметр масштаба;

$\beta > 0$ – параметр формы.

Для модели Вейбулла с параметрами η и β функцию плотности $f_W(x)$, функцию ВБР $P_W(x)$, интенсивность отказов $h_W(x)$, среднее время до отказа $M[X]$ и дисперсию $D[X]$ можно определить, подставив выражение (25) в формулы (2)-(7):

$$f_W(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, \quad (26)$$

$$P_{EXP}(x) = e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, \quad (27)$$

$$h_{EXP}(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad (28)$$

$$M[X] = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \quad (29)$$

$$D[X] = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right)^2 \right], \quad (30)$$

где $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$ – гамма-функция.

Анализируя выражение (28), можно видеть, что при значениях $\beta < 1$ функция интенсивности отказов является монотонно убывающей, при $\beta > 1$ – монотонно возрастающей, а при $\beta = 1$ интенсивность отказов постоянна (рисунок 6).

Постоянство функции интенсивности отказов при $\beta = 1$ означает, что экспоненциальная модель надежности является частным случаем (подмоделью) модели Вейбулла.

Разнообразие функциональных форм интенсивности отказов, обеспечиваемое моделью надежности Вейбулла, делает ее пригодной для моделирования отказов, присущих любому этапу жизненного цикла изделия (рисунок XX). Немаловажно то, что эта модель имеет всего два параметра, то есть является относительно простой. Указанные достоинства обеспечили модели надежности Вейбулла роль фактического стандарта в области теории надежности [9].

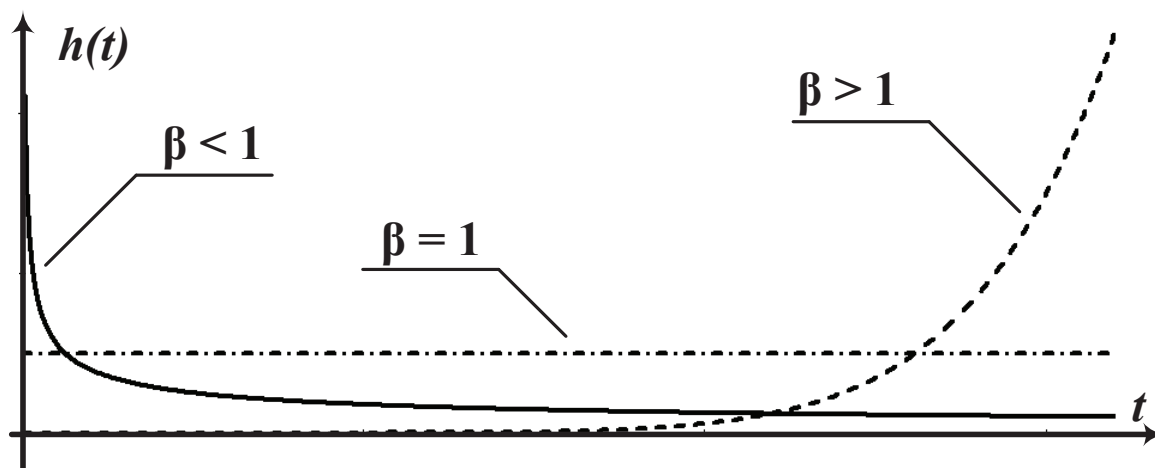


Рисунок 6 – Интенсивность отказов в модели надежности Вейбулла

Несмотря на достоинства модели надежности Вейбулла, значительное количество практических задач теории надежности требует применения статистических моделей, предлагающих высокую степень настраиваемости. Обычно, повышение «гибкости» модели связано с увеличением количества ее параметров.

На протяжении нескольких последних десятилетий в научных работах вводятся и исследуются различные многопараметрические распределения случайных величин, являющиеся результатом комбинации

нескольких простых распределений. Одним из таких распределений является комбинация комплементарного Вейбулл-геометрического распределения и распределения Кумарасвами (Kw-CWG), введенное в работе [10]. Пятипараметрическое распределение Kw-CWG определяется функцией распределения $F_{KwCWG}(x)$

$$F_{KwCWG}(x) = 1 - \left\{ \frac{1 - \alpha^a \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\gamma} \right)^\beta \right] \right)^a}{\left(\alpha + (1 - \alpha) \exp \left[- \left(\frac{x}{\gamma} \right)^\beta \right] \right)^a} \right\}^b, x \geq 0, \quad (31)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, a, b > 0$ – параметры распределения.

Данная модель включает в себя более десятка подмоделей, которые можно получить, приравнявая параметры α, β, a, b в выражении (31) к единице. В настоящей работе используются частные случаи (подмодели) распределения Kw-CWG, содержащие два и три параметра (таблица 1). Такое ограничение числа параметров объясняется желанием автора выбрать как можно более простую модель надежности.

Параметр γ в распределении Kw-CWG является параметром масштаба, поэтому его изменение не приводит к появлению новой подмодели.

Таблица 1 – Некоторые частные случаи распределения Kw-CWG

Распределение	Сокращение	Параметры				
		α	β	γ	a	b
Комплементарное экспоненциально-геометрическое распределение	CEG	α	1	γ	1	1
Распределение Вейбулла	W	1	β	γ	1	1
Показательное экспоненциальное распределение	EE	1	1	γ	a	1
Обобщенное экспоненциальное распределение	GE	1	1	γ	1	b
Комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение	CWG	α	β	γ	1	1

Продолжение таблицы 1 – Некоторые частные случаи распределения Kw-CWG

Распределение	Сокращение	Параметры				
		α	β	γ	a	b
Показательное комплементарное экспоненциально-геометрическое распределение	ECEG	α	1	γ	a	1
Обобщенное комплементарное экспоненциально-геометрическое распределение	GCEG	α	1	γ	1	b
Показательное распределение Вейбулла	EW	1	β	γ	a	1
Обобщенное распределение Вейбулла	GW	1	β	γ	1	b
Кумарасвами-экспоненциальное распределение	Kw-E	1	1	γ	a	b

Следует отметить, что одним из частных случаев распределения Kw-CWG является распределение Вейбулла (W), а, следовательно, и однопараметрическое экспоненциальное распределение, которое не рассматривается в данной работе.

1.4 Выбор статистической модели надежности

Задача выбора статистической модели по результатам наблюдений или эксперимента предполагает следующие три этапа [7]:

- определение закона распределения;
- определение параметров распределения;
- проверка статистической гипотезы о соответствии выборки предполагаемой модели [11].

Иногда закон распределения случайной величины может быть известен априори; обычно это случается, когда известны физические законы, порождающие случайные события или процессы. Так, широко известным фактом является экспоненциальное распределение времени распада ядер радиоактивных элементов. Однако, в ситуациях, когда

случайное событие возникает в результате воздействия большого количества различных факторов или в результате последовательности нескольких сложных случайных процессов, законы распределения которых могут быть неизвестны, определить с уверенностью истинный закон распределения исследуемой случайной величины не представляется возможным. В таких случаях приемлемым вариантом может быть аппроксимация неизвестного закона распределения каким-нибудь иным по результатам наблюдения случайной величины или реализаций случайного процесса.

1.4.1 Метод максимального правдоподобия

Определить параметры модели можно с использованием методов индуктивной статистики [11]. При этом, обычно получают точечные либо интервальные оценки параметров распределений. Для решения подобных задач часто используют:

- метод моментов [11];
- метод наименьших квадратов [12];
- метод максимального правдоподобия (ММП) [12].

Последний чрезвычайно широко применяется в статистике для получения точечных оценок параметров модели. ММП заключается в определении оценки неизвестных параметров путем максимизации функции правдоподобия [13].

Пусть имеется выборка $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ из N наблюдаемых значений случайной величины X . Предположим, что случайная величина описывается распределением $F_X(x, \Theta)$, где $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}$ – вектор из K неизвестных параметров ($K < N$). Определим функцию правдоподобия $L(\Theta)$ следующим образом:

$$L(\Theta) = \prod_{i=1}^N f_X(v_i, \Theta), \quad (32)$$

где $f_X(x, \Theta) = \frac{dF_X(x, \Theta)}{dx}$ – функция плотности распределения.

На практике гораздо удобнее производить вычисления не функции (32), а ее логарифма. В этом случае будем говорить о логарифмической функции правдоподобия:

$$\Lambda(\Theta) = \sum_{i=1}^N \ln(f_X(v_i, \Theta)). \quad (33)$$

Вектор $\hat{\Theta}$ точечных оценок значений параметров состоит из таких значений $\hat{\theta}_i$, которые максимизируют выражение (33). Эти значения можно найти, решив систему уравнений:

$$\frac{d\Lambda(\Theta)}{d\theta_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, K. \quad (34)$$

Проверка гипотезы о соответствии выборки $\mathbf{V}$ модели $F_X(x, \hat{\Theta})$ производится с использованием статистических критериев согласия [12], например, критерия Колмогорова, Пирсона и т.д. В рамках данной работы мы не проводим такую проверку, поскольку задача стоит лишь в выборе наилучшей модели из списка предложенных моделей-кандидатов.

1.4.2 Оценка качества статистических моделей

По результатам проверки статистических гипотез о соответствии выборки исследуемым моделям, можно выбрать несколько моделей-кандидатов. Далее будем предполагать, что ни одна из моделей не была отвергнута.

Пусть имеется M моделей-кандидатов, задаваемых своими функциями распределения $F_X^{(j)}(x, \hat{\Theta}^{(j)}), j = 1, 2, \dots, M$, где $\hat{\Theta}^{(j)}$ – вектор точечных оценок для j -й модели. Наилучшей моделью следует признать ту, для которой наибольшим будет значение $\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$ соответствующей логарифмической функции правдоподобия. Поскольку значения логарифмической функции правдоподобия обычно отрицательны, на

практике предпочитается определять значения $-2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$ [10]. Тогда, наилучшей моделью будет та, у которой это значение будет минимальным.

Само по себе значение $-2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$ не означает, что гипотеза о соответствии выборки j -й модели не отвергается; оно всего лишь указывает на относительное качество j -й модели по сравнению с другими моделями-кандидатами.

1.4.3 Информационные критерии

При выборе статистической модели необходимо не только обращать внимание на значения функций правдоподобия, но также стараться выбрать наиболее простую модель, т.е. модель с наименьшим числом параметров. Одним из способов обеспечения баланса между точностью и сложностью модели является использование информационных критериев.

Информационный критерий – это мера относительного качества статистических моделей, применяемая при решении задачи выбора модели. В работе [14] был предложен информационный критерий Акаике.

Пусть имеется M моделей-кандидатов, для которых определены точечные оценки параметров $\hat{\Theta}^{(j)}$ и максимальные значения функций правдоподобия $\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$. Также, пусть p_j означает число параметров j -й модели. Тогда значение информационного критерия Акаике AIC_j для j -й модели будет определяться как

$$AIC_j = 2p_j - 2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)}). \quad (35)$$

Видно, что значение $-2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$ увеличивается на $2p_j$. Можно представить величину $2p_j$ как «штраф» за количество параметров j -й модели. Среди всех моделей-кандидатов наилучшей следует признать ту, для которой значение информационного критерия Акаике будет минимальным.

Различные исследователи предложили модификации критерия Акаике, изменяя значение штрафной функции. Так, Байесовский информационный критерий BIC_j для j -й модели равен

$$BIC_j = p_j \ln(N) - 2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)}), \quad (36)$$

где N – объем выборки, для которой определялось значение правдоподобия [15].

Видно, что для $N \geq 8$ величина «штрафа» за количество параметров для критерия BIC_j больше, чем для критерия AIC_j .

Критерий Ханнана-Куинна [16] HQ_j для j -й модели равен

$$HQ_j = 2p_j \ln(\ln(N)) - 2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)}). \quad (37)$$

Можно показать, что для $N \geq 16$ величина «штрафа» за количество параметров для критерия HQ_j больше, чем для критерия AIC_j .

Также, как и для критерия Акаике, меньшие значения BIC_j и HQ_j соответствуют лучшим моделям. Очевидно, что использование разных информационных критериев может привести к тому, что наилучшими будут признаны разные модели-кандидаты. Поскольку ни один из данных критериев не является доказано предпочтительным, зачастую информационные критерии используют совместно, считая, что одновременные минимальные значения критериев явно будут указывать на предпочтительную модель.

2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задачи определения показателей надежности сложной системы, в частности функции ВБР, необходимо знать модели надежности всех составляющих системы, а также ее схему резервирования. В тех случаях, когда система содержит большое число компонентов, число параметров, влияющих на ВБР системы, также становится значительным, а вычисление показателей надежности системы – громоздким.

В предыдущем разделе были приведены формулы для расчета ВБР систем с разными схемами резервирования. Для большинства из этих схем определение ВБР сложной системы сводится к алгебраическим действиям сложения, вычитания, умножения и возведения в степень. Однако, для ненагруженного («холодного») резервирования в общем случае это не так: выражение (17) содержит интеграл, который в общем случае может быть неберущимся.

Следует также отметить, что некоторую сложность представляет и использование распределения Вейбулла в качестве модели надежности элементов сложной системы. Особенно это справедливо для случая «холодного» резервирования.

В настоящей работе приводится пример выбора модели надежности для системы, состоящей из двух статистически идентичных элементов, один из которых находится в состоянии ненагруженного резерва. При этом, времена отказов элементов являются случайными величинами, распределенными по закону Вейбулла. Данная система была выбрана в качестве объекта исследования, поскольку представляет собой пример, содержащий обе упомянутых сложности.

2.1 Подготовка выборок с заданными параметрами

Функция ВБР рассматриваемой системы определяется выражением (14) и содержит два параметра: параметр масштаба $\eta > 0$ и параметр формы $\beta > 0$. Поскольку проведение расчетов с функцией, содержащей неберущийся интеграл, затруднительно, в настоящей работе было принято решение использовать в качестве исходных данных выборки большого объема случайных чисел, представляющих собой времена отказа системы. Получить такие выборки довольно просто: необходимо сгенерировать выборки времен отказов элементов системы в соответствии с распределением Вейбулла с заданными параметрами η и β . В соответствии с формулой (15) время отказа системы будет равно сумме времен отказов ее элементов.

Для повышения точности аппроксимации исходного распределения к получаемым выборкам времен отказов системы было предъявлено дополнительное требование: сумма относительных погрешностей математического ожидания и среднеквадратического отклонения для получаемых выборок не должна превышать 0,05%.

Для получения выборок с указанным дополнительным условием в математическом пакете Mathcad 15 была написана пользовательская функция *GenerateSample* (рисунок 7).

Входными данными для функции являются N – объем получаемой выборки, η и β – параметры модели надежности Вейбулла отдельного компонента, Q – вектор, содержащий значения математического ожидания (Q_0) и среднеквадратического отклонения (Q_1) времени отказов системы, определяемые по формулам (15) и (16), ε – задаваемая погрешность в процентах.

```

GenerateSample(N,η,β,Q,ε) :=
| Δ ← 2ε
| while Δ > ε
|   | V1 ← η·rweibull(N,β)
|   | V2 ← η·rweibull(N,β)
|   | for i ∈ 0..N - 1
|   |   Vi ← V1i + V2i
|   | Δ ← ⌊ ( |mean(V) - Q0| + |Stdev(V) - Q1| ) / ( Q0 + Q1 ) ⌋ · 100
| V

```

Рисунок 7 – Получение выборки с заданными параметрами
в пакете Mathcad 15

Внутри пользовательской функции используются следующие встроенные функции Mathcad:

- **rweibull**(N, β) – получение выборки N случайных чисел, распределенных по закону Вейбулла с параметром β ;
- **mean**(V) – выборочное среднее выборки V ;
- **Stdev**(V) – несмещенное среднеквадратическое отклонение выборки V .

Для проведения исследования для каждой пары параметров η и β были сгенерированы пять выборок. Задаваемые значения параметра η : 100, 200, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 и 5000 ч; значения параметра β : 0,5, 0,8, 1, 1,1, 1,25, 1,5, 1,75 и 2. Таким образом, рассматривались 80 комбинаций параметров, для которых было сгенерировано 400 выборок, каждая из которых содержит 1000 случайных чисел, представляющих собой времена отказа исследуемой системы.

Все выборки были отсортированы по возрастанию с помощью встроенной функции Mathcad **sort**() и записаны в файлы Excel.

2.2 Расчет коэффициентов моделей надежности

На следующем этапе выполнения работы для каждой выборки необходимо определить параметры для всех моделей надежности из списка моделей-кандидатов, приведенных в таблице 1.

Точечные оценки параметров каждой модели надежности определялись методом максимального правдоподобия (ММП). Для этого в файле Mathcad записывалось выражение для функции вероятности отказов согласно (31) с учетом значений параметров из таблицы 1, а также выражение для функции плотности отказов по формуле (2).

После этого в соответствии с (33) определяется логарифмическая функция правдоподобия для модели. Определение точечных оценок параметров заключается в решении системы уравнений (34), т.е. в нахождении таких значений параметров, при которых функция правдоподобия будет максимальна. Данную задачу можно решить с использованием встроенной функции Mathcad *Maximize()*. На рисунке 8 приведен пример расчета точечных оценок параметров $\hat{\Theta}^{(j)}$ для показательного распределения Вейбулла (EW).

После определения параметров модели по формулам (5)-(7) были также рассчитаны значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения и их относительные погрешности в сравнении с аналогичными параметрами исходного распределения.

В целях определения относительного качества моделей-кандидатов для каждой j -й модели были вычислены значения $-2\Lambda^{(j)}(\hat{\Theta}^{(j)})$, а также значения информационных критериев AIC_j и BIC_j в соответствии с формулами (35) и (36). Значения критерия Ханнана-Куинна не рассчитывались, поскольку для фиксированного объема выборки $N = 1000$ выполняется соотношение $AIC_j < HQ_j < BIC_j$.

$$F_{EW}(x, \gamma, a, b) := \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^a} \right]^b$$

функция
распределения EW

$$f_{EW}(x, \gamma, a, b) := \frac{a \cdot b}{\gamma} \cdot \left(\frac{x}{\gamma}\right)^{a-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^a} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^a} \right]^{b-1}$$

плотность
распределения EW

$$\Lambda_{EW}(\gamma, a, b) := \sum_{i=0}^{999} \ln(f_{EW}(X_i, \gamma, a, b))$$

логарифмическая функция
правдоподобия

$$g1 := 10000$$

$$g2 := 1$$

$$g3 := 1$$

начальные значения
для алгоритма ММП

$$C_{EW} := \text{Maximize}(\Lambda_{EW}, g1, g2, g3) \quad C_{EW} = \begin{pmatrix} 1337.74695 \\ 1.43638 \\ 2.39019 \end{pmatrix}$$

результат

Рисунок 8 – Пример расчета параметров модели EW

Поскольку для каждой пары параметров η и β были сгенерированы пять различных выборок, значения точечных оценок параметров моделей надежности были усреднены. В таблице 2 приведен пример результата расчетов оценок параметров (после усреднения) для заданной пары параметров η и β . Полностью с результатами расчета можно ознакомиться в Приложении А.

Так как все модели-кандидаты задаются функциями распределения, являющимися частными случаями распределения (31), их параметры являются наборами по два и по три из упорядоченной пятерки $\{\alpha, \beta, \gamma, a, b\}$, причем параметр γ присутствует в каждой модели. В таблицах 2 и А.1 приняты следующие обозначения: $p1$ всегда соответствует параметру γ , а параметры $p2$ и $p3$ (при наличии) соответствуют параметрам из

упорядоченного набора $\{\alpha, \beta, a, b\}$, не равным единице, как указано в таблице 1.

Таблица 2 – Пример результата вычисления оценок параметров моделей

$\eta = 1500 \quad \beta = 1,5$								
Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2 Δ	AIC	BIC	ΔM , %	$\Delta \sigma$, %
W	3062.1	2.21	-	17074.51	17078.51	17088.33	0.16	0.24
CEG	805.6	0.04	-	17108.07	17112.07	17121.89	1.47	0.02
EE	1196.1	4.98	-	17087.33	17091.33	17101.15	0.73	11.30
GE	1752.2	0.65	-	17807.63	17811.63	17821.45	0.01	108.29
CWG	4115.9	3.45	2.78	17057.32	17063.32	17078.05	0.01	0.10
EW	2609.1	1.85	1.45	17061.24	17067.24	17081.97	0.02	2.04
ECEG	1043.9	0.37	2.87	17065.46	17071.46	17086.19	0.36	4.06
GW	4196.0	2.21	2.01	17074.51	17080.51	17095.24	0.16	0.24
GCEG	492.6	0.03	0.43	17083.19	17089.19	17103.91	0.12	5.72
Kw-E	3524.8	3.12	5.23	17059.04	17065.04	17079.76	0.10	0.71

Простейшим подходом к выбору наилучшей модели из множества моделей кандидатов является визуальный подход, предполагающий сравнение графиков функций вероятности отказов моделей с эмпирической функции распределения (ЭФР), полученной по выборке. В работе [9] рекомендуется получать значения $\hat{F}_i$ вероятности отказа с помощью аппроксимации Филлибена [19]:

$$\hat{F}_i = \begin{cases} 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{N}}, i = 1; \\ \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{N}}, i = N; \\ \frac{i - 0,3175}{N + 0,365}, 1 < i < N, \end{cases} \quad (38)$$

где N – объем выборки.

На рисунках 9-11 приведены примеры построения графиков функций вероятностей отказа (интегральных функций распределения), соответствующих моделям надежности из таблицы 2, и их сравнения с ЭФР, полученной по выборке.

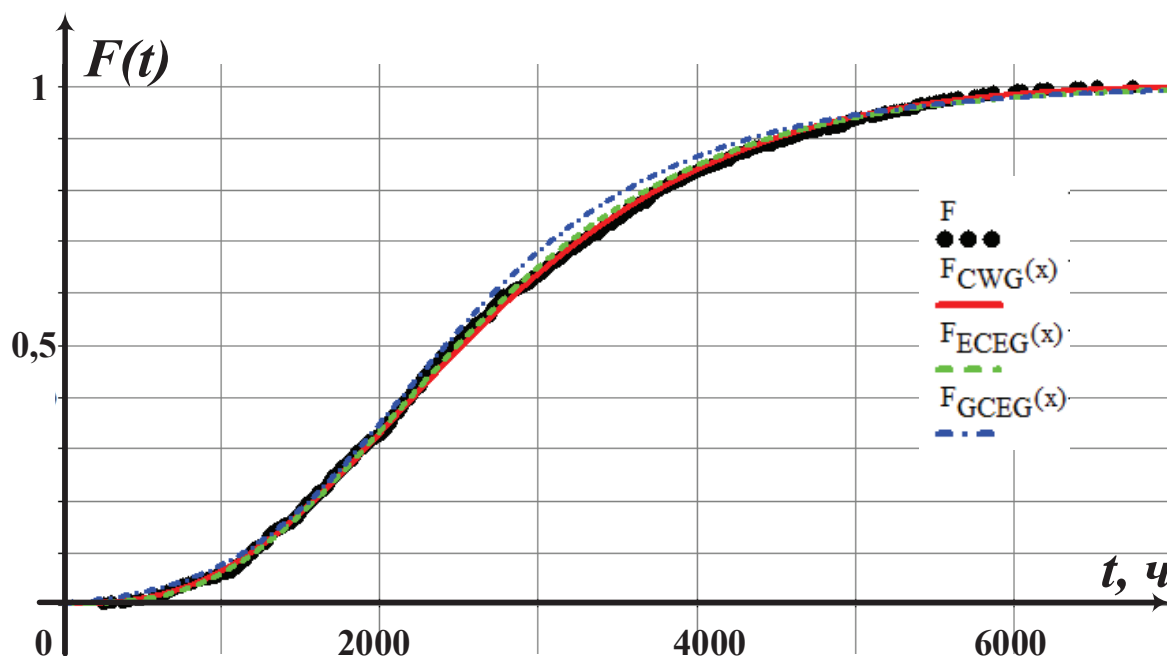


Рисунок 9 – Вероятности отказов, соответствующие моделям CWG, ECEG, GCEG, в сравнении с ЭФР

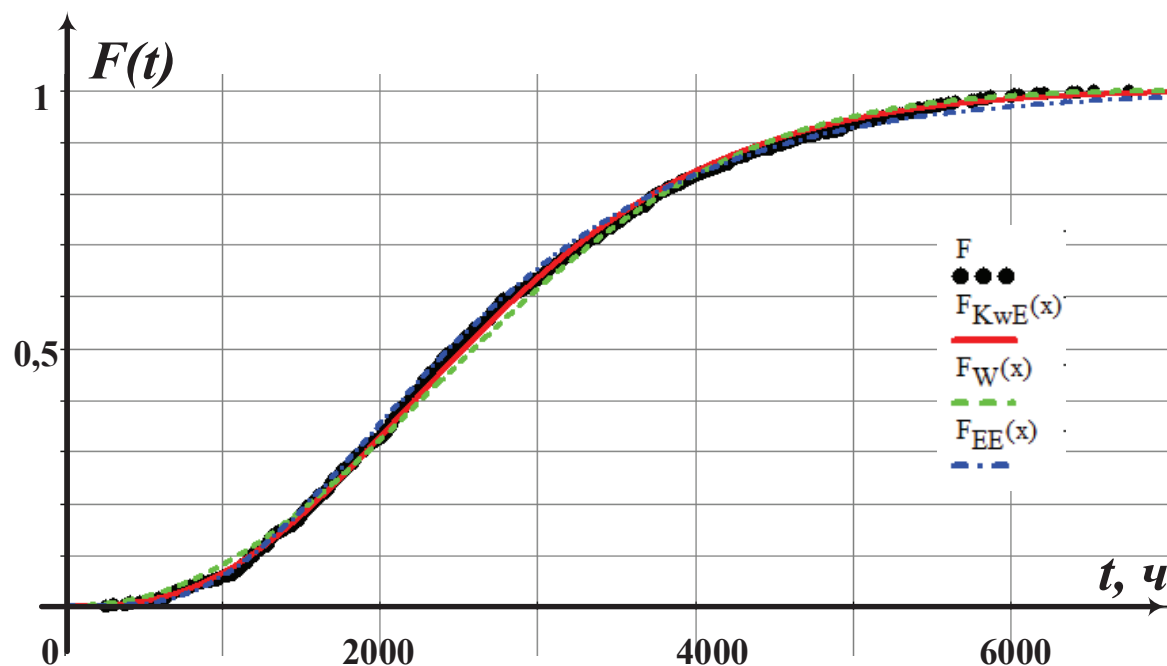


Рисунок 10 – Вероятности отказов, соответствующие моделям Kw-E, W, EE, в сравнении с ЭФР

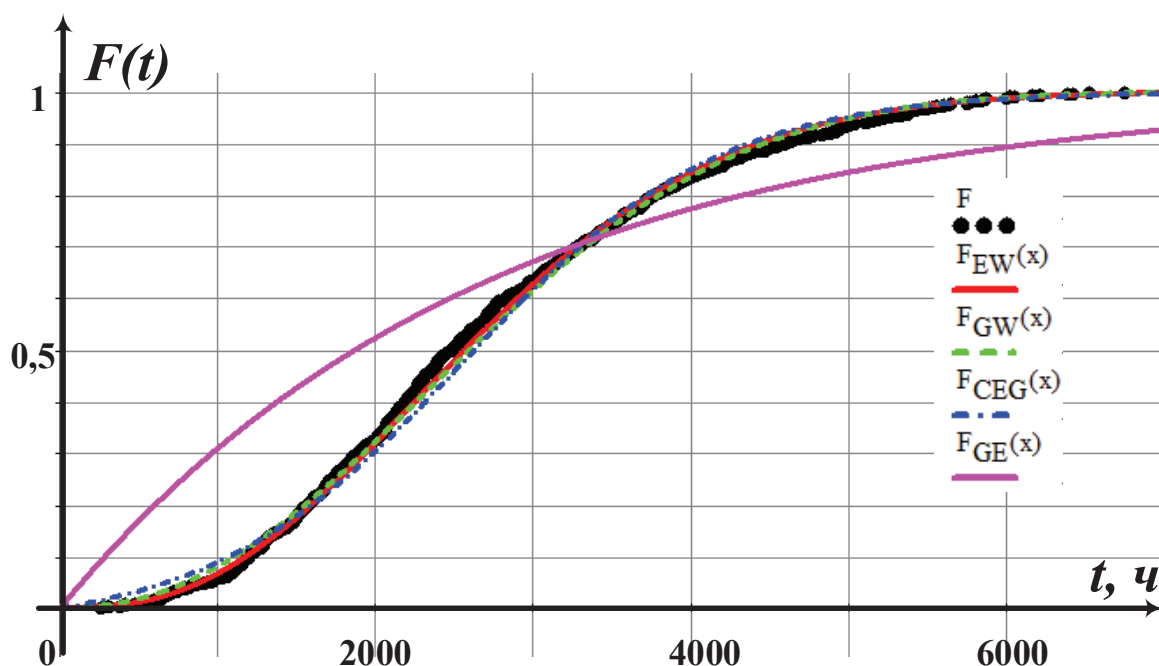


Рисунок 11 – Вероятности отказов, соответствующие моделям EW, GW, CEG, GE, в сравнении с ЭФР

2.3 Анализ результатов

Очевидно, что выбрать наилучшую модель визуально может быть затруднительно. Следовательно, для решения этой задачи необходимо использовать подход, базирующийся на сравнении неких численных показателей качества моделей.

В таблицах 2 и А.1 через ΔM и $\Delta \sigma$ обозначены относительные погрешности математических ожиданий и среднеквадратических отклонений, рассчитанных в соответствии с моделями, относительно истинных значений, определенных по формулам (15) и (16).

При выборе наилучшей модели, описывающей конкретную выборку, необходимо отмечать те модели-кандидаты, для которых будут минимальными значения, находящиеся в графах -2Δ , AIC и BIC, и при этом обе погрешности ΔM и $\Delta \sigma$ будут невелики. Так, анализируя таблицу 2, можно увидеть, что тремя лучшими моделями надежности в

соответствии с критериями качества будут модели CWG, Kw-E и EW, при этом даже в худшем случае погрешность лишь немного превышает 2%.

Поскольку для каждой пары параметров η и β исходного распределения Вейбулла лучшими признаются разные модели-кандидаты, предлагается выбрать в качестве модели надежности ту, которая чаще выходит на первое место для всех выборок. Для этого предлагается выбрать три наилучшие модели для каждой пары η и β из рассматриваемых 80 комбинаций параметров. Результаты приведены в Приложении Б.

Итогом анализа результатов из Приложения Б является общее число появлений моделей-кандидатов в тройке лучших моделей для выборок, и частоты их появлений на первом, втором и третьем местах (таблица 3).

Таблица 3 – Частоты появления моделей-кандидатов

Модель	Встречается всего	на первом месте	на втором месте	на третьем месте
CWG	76	33	34	9
EW	62	31	24	7
Kw-E	31	3	5	23
ECEG	23	5	6	12
W	14	4	2	8
GW	13	0	4	9
GCEG	11	3	0	8
CEG	9	1	5	3
EE	1	0	0	1

Из таблицы 3 видно, что лучшей моделью следует признать модель надежности CWG, согласно которой время до отказа системы распределено в соответствии с комплементарным Вейбулл-геометрическим распределением.

2.4 Комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение

Комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение (complementary Weibull geometric, CWG) впервые было введено и исследовано в работе [17]. Говорят, что непрерывная случайная величина X распределена в соответствии с распределением CWG с параметрами $\alpha, \beta, \gamma > 0$, если ее функция распределения представляет собой следующее выражение:

$$F_{CWG}(x) = \frac{\alpha \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \right]}{\alpha + (1 - \alpha)e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta}}. \quad (39)$$

Тогда, в соответствии с (2) функция плотности распределения CWG будет равна

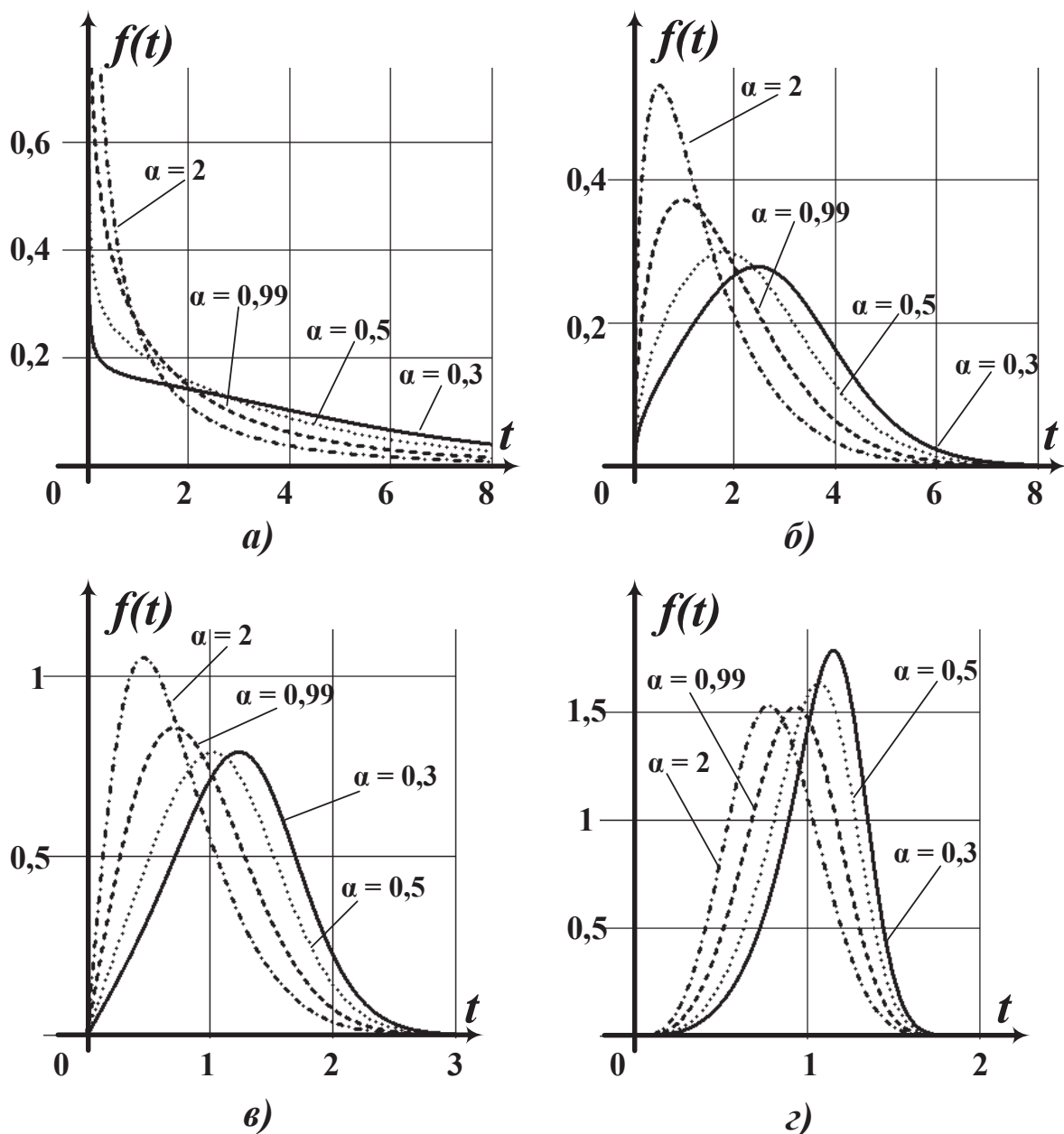
$$f_{CWG}(x) = \frac{\alpha\beta}{x} \left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \left(\alpha + (1 - \alpha)e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \right)^{-2}. \quad (40)$$

В работе [17] параметр α определяется как «параметр концентрации»; при $\alpha = 1$ комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение обращается в распределение Вейбулла, а при $\alpha \rightarrow 0^+$ в вырожденное распределение в точке 0. Параметры β и γ представляют собой параметры формы и масштаба, соответственно. На рисунке 12 приведены примеры функции плотности распределения CWG для различных значений параметров α и β .

Используя формулы (3) и (4), мы можем получить выражения для функций ВБР, $P_{CWG}(x)$, и интенсивности отказов, $h_{CWG}(x)$:

$$P_{CWG}(x) = e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \left(\alpha + (1 - \alpha)e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \right)^{-1}. \quad (41)$$

$$h_{CWG}(x) = \frac{\alpha\beta}{x} \left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta \left(\alpha + (1 - \alpha)e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta} \right)^{-1}. \quad (42)$$

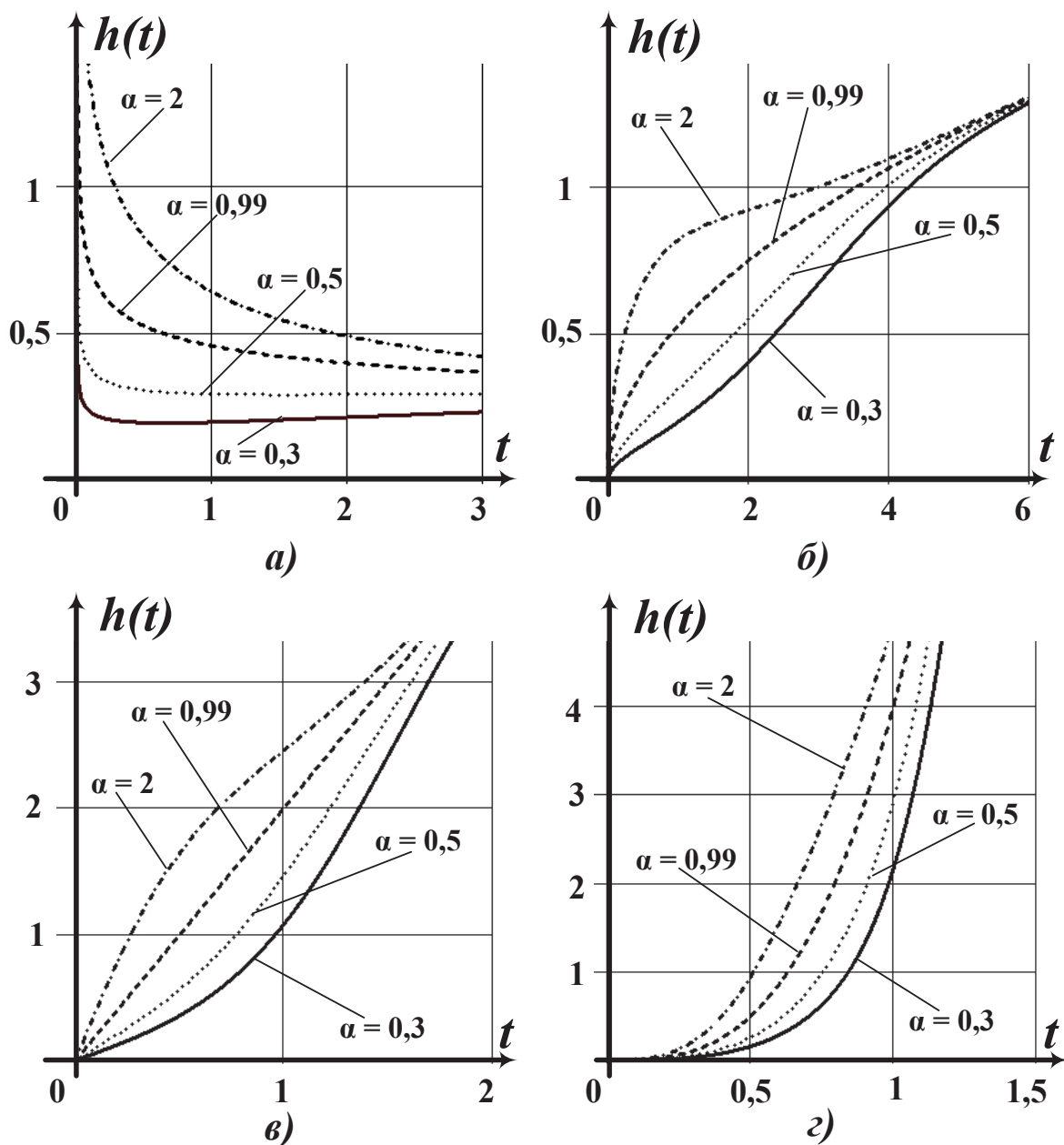


а) $\beta = 0,8, \gamma = 2$; б) $\beta = 1,5, \gamma = 2$; в) $\beta = 2, \gamma = 1$; г) $\beta = 4, \gamma = 1$

Рисунок 12 – Функция плотности распределения CWG

Внешний вид функции интенсивности отказов для модели CWG определяется значениями параметров α и β .

Примеры функций интенсивности для различных значений параметров приведены на рисунке 13. Анализируя графики на этих рисунках, можно убедиться, что распределение CWG является более гибким, по сравнению с экспоненциальным распределением или распределением Вейбулла.



а) $\beta = 0,8, \gamma = 2$; б) $\beta = 1,5, \gamma = 2$; в) $\beta = 2, \gamma = 1$; г) $\beta = 4, \gamma = 1$

Рисунок 13 – Интенсивность отказов модели CWG

Среднее время безотказной работы в соответствии с моделью CWG равно математическому ожиданию случайной величины X [17]:

$$M[X] = \frac{\gamma}{\alpha} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Phi\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}, \frac{1}{\beta}, 1\right), \quad (43)$$

где $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$ – гамма-функция;

$\Phi(z, s, a) = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} \frac{t^{s-1} e^{-at}}{1 - ze^{-t}} dt$ – трансцендентная функция Лерха [18].

Также, в [17] приведена формула для расчета начальных моментов порядка k , $k \in \mathbb{N}$:

$$M[X^k] = \frac{\gamma^k}{\alpha} \Gamma\left(1 + \frac{k}{\beta}\right) \Phi\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}, \frac{k}{\beta}, 1\right). \quad (44)$$

Несмотря на то, что выражения (43) и (44) содержат функции, не являющиеся алгебраическими, они легко вычисляются с использованием математических программных пакетов. Дисперсию случайной величины, распределенной в соответствии с комплементарным Вейбулл-геометрическим распределением, можно получить, подставив (43) и (44) в (7).

3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСО- ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

3.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. В таблице 4 приведена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Таблица 4 – Оценочная карта

Критерии оценки	Баллы				Конкурентоспособность		
	Вес критерия	Проект АСУ ТП	Существующая система управления	Разработка АСУ ТП сторонней компанией	Проект АСУ ТП	Существующая система управления	Разработка АСУ ТП сторонней компанией
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности	0,04	5	1	4	0,2	0,04	0,16
Удобство в эксплуатации	0,05	3	2	4	0,15	0,1	0,2
Помехоустойчивость	0,06	2	3	2	0,12	0,18	0,12
Энергоэкономичность	0,08	3	4	2	0,24	0,32	0,16
Надежность	0,12	5	2	5	0,6	0,24	0,6
Уровень шума	0,04	2	2	2	0,08	0,08	0,08
Безопасность	0,12	5	3	5	0,6	0,36	0,6
Потребность в ресурсах памяти	0,04	2	5	3	0,08	0,2	0,12
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,02	2	2	1	0,04	0,04	0,02
Простота эксплуатации	0,06	5	3	4	0,3	0,18	0,24
Качество интеллектуального интерфейса	0,06	4	0	4	0,24	0	0,24
Возможность подключения	0,03	5	0	5	0,15	0	0,15

Согласно оценочной карте можно выделить следующие конкурентные преимущества разработки: повышение производительности, повышение надежности и безопасности, простота эксплуатации.

3.2 Технология QuaD

Для упрощения процедуры проведения QuaD проведем в табличной форме (таблица 5).

Таблица 5 – Оценочная карта QuaD

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Повышение производительности	0,04	75	100	0,75	3
Удобство в эксплуатации	0,05	85	100	0,85	4,25
Помехоустойчивость	0,06	45	100	0,45	2,7
Энергоэкономичность	0,08	35	100	0,35	2,8
Надежность	0,12	95	100	0,95	11,4
Уровень шума	0,04	50	100	0,5	2
Безопасность	0,12	95	100	0,95	11,4
Потребность в ресурсах памяти	0,04	60	100	0,6	2,4
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,02	35	100	0,35	0,7
Простота эксплуатации	0,06	80	100	0,8	4,8
Качество интеллектуального интерфейса	0,06	80	100	0,8	4,8
Ремонтопригодность	0,03	75	100	0,75	2,25
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,02	65	100	0,65	1,3
Уровень проникновения на рынок	0,02	25	100	0,25	0,5
Цена	0,05	80	100	0,8	4
Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	75	100	0,75	3,75

Продолжение таблицы 5 – Оценочная карта QuaD

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Послепродажное обслуживание	0,06	75	100	0,75	4,5
Финансирование научной разработки	0,02	60	100	0,6	1,2
Срок выхода на рынок	0,03	40	100	0,4	1,2
Наличие сертификации разработки	0,03	15	100	0,15	0,45
Итого:	1				69,4

Средневзвешенное значение позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Средневзвешенное значение получилось равным 69,4, что говорит о том, что перспективность разработки выше среднего.

3.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 6 – SWOT анализ

		Сильные стороны					Слабые стороны				
		С1. Простота настройки и эксплуатации системы	С2. Экологичность технологии	С3. Не требует уникального оборудования	С4. Наличие бюджетного финансирования	С5. Высококвалифицированный научный труд	Сл1. Отсутствие прототипа проекта	Сл2. Применение только для нефтяной промышленности	Сл3. Мало инжиниринговых компаний, способной построить производство под ключ	Сл4. Отсутствие необходимого оборудования	Сл5. Большой срок поставок используемого оборудования
Возможности	В1. Использование инфраструктуры ТПУ для распространения	0	+	+	+	+	-	-	-	-	-
	В2. Использование существующего программного обеспечения	+	0	-	0	+	-	-	-	-	-
	В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт	+	+	-	0	+	-	-	-	-	-
	В4. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследований	0	-	+	+	-	-	-	-	-	-
	В5. Получение финансирования для дальнейшего более глубокого исследования.	+	-	+	+	0	-	-	-	-	-
Угрозы	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+
	У2. Развитая конкуренция технологий производства	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
	У3. Ограничения на экспорт технологии	-	-	-	-	-	-	-	+	0	0
	У4. Захват внутреннего рынка иностранными компаниями.	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+
	У5. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	-	-	-	-	-	+	-	-	0	+

3.4 Организация и планирование работ

Зная конечную цель исследований, а также изучив опыт ученых, решавших задачи, подобные решенным в данной работе, определим полный перечень и очередность работ. Для каждого из выделенных этапов определим его исполнителей и долю участия каждого из исполнителей в его выполнении. Полученные результаты сведем в таблицу 7.

Таблица 7 – Перечень выполняемых работ и доля участия исполнителей

Этап работы	Исполнители и их участие в работе
Получение исходных данных	—
Построение математических моделей движения подводного робота	И=100%
Построение математической модели движительно-рулевого комплекса необитаемого подводного робота	И=100%
Моделирование в MATCHCAD	НР=20% И=80%
Подведение итогов	НР=40% И=60%

Кратко опишем течение и результаты каждого этапа работы. Первый этап начинается с постановки в общих формулировках научным руководителем цели исследования. После тщательного изучения нюансов решения связанных с достижением поставленной цели задач инженер предлагает максимально детальный план работ, который утверждается научным руководителем при достаточной глубине проработки.

Результатом выполнения второго этапа является комплекс математических инструментов, позволяющих решить широкий спектр задач моделирования и синтеза систем автоматического управления с интервальными параметрами, в том числе и задачи, утвержденные руководителем в техническом задании.

Третий этап, помимо решения реальной задачи, даст информацию о применимости разработанных методик к процессу проектирования контуров системы управления движением ПР и позволит оценить результаты проектирования с помощью общепринятых показателей качества.

Результаты четвертого этапа очевидно. На пятом этапе предполагается представление полученных инженером результатов на оценку руководителю.

Зная состав и очередность работ, а также распределение нагрузки между руководителем и инженером для каждой из них, спланируем трудозатраты на выполнение работ.

3.5 Продолжительность этапов работ

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{kal}$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 k_{kal} – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{kal} = \frac{T_{kal}}{T_{kal} - T_{вых} - T_{пр}}$$

где T_{kal} – календарные дни ($T_{kal} = 365$);
 $T_{вых}$ – выходные дни ($T_{вых} = 52$);
 $T_{пр}$ – праздничные дни ($T_{пр} = 12$).

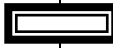
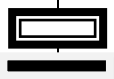
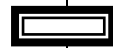
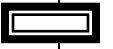
Воспользовавшись данными из таблицы 8 и приведенными выше формулами, рассчитаем продолжительность выполнения работ

руководителем и инженером в календарных днях. Результаты расчетов сведем в таблицу 8.

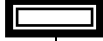
Таблица 8 – Трудозатраты на выполнение проекта

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя	Продолжительность, дни
Разработка и выдача технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	1
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	10
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер	1
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	1
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Исследование функции и свойств основных моделей	Инженер	15
	6	Построение моделей в пакете Mathcad на основе эксплуатационных данных	Инженер	25
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка полученных баллов моделей при помощи методов ранжирования	Руководитель, инженер	2
	8	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель, инженер	2
Разработка технической документации и проектирование	9	Разработка пакета Mathcad в компьютера для выполнения проекта	Инженер	2
	10	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3
	11	Разработка правил безопасности при использовании компьютера	Руководитель, инженер	1
Изготовление и испытание макета	12	Конструирование и изготовление макета	Инженер	5
	13	Лабораторные испытания макета	Инженер	5
Оформление комплекта документации по ВКР	14	Составление пояснительной записки	Инженер	25
	15	Проверка пояснительной записки	Руководитель, инженер	2

Таблица 9 – Линейный график работы

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ									
				Январь		Февраль				Март			
				30	31	10	11	12	27	24	26	28	30
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	1										
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	10										
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	1										
4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	1										
5	Исследование функции и свойств основных моделей	Инженер	15										
6	Построение моделей в пакете Mathcad на основе эксплуатационных данных	Инженер	25										
7	Оценка полученных баллов моделей при помощи методов ранжирования	Научный руководитель, инженер	2										
8	Определение целесообразности проведения ВКР	Научный руководитель, инженер	2										
9	Разработка пакета Mathcad в компьютера для выполнения проекта	Инженер	2										

Продолжение таблицы 9 – Линейный график работы

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ						
				Март	Апрель				Май	
				30	2	3	8	13	8	10
10	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3							
11	Разработка правил безопасности при использовании компьютера	Научный руководитель, инженер	1		 					
12	Конструирование и изготовление макета	Инженер	5							
13	Лабораторные испытания макета	Инженер	5							
14	Составление пояснительной записки	Инженер	25							
15	Проверка пояснительной записки	Научный руководитель, инженер	2						 	

Научный руководитель - 

Инженер 

Таким образом, был оценен объем необходимых работ, составлен календарный план их проведения и распределены обязанности участников проекта: участниками являются 2 человека - научный руководитель и инженер. Научный руководитель участвует в работе в течении 10 дней, инженер - 100 дней.

3.6 Бюджет затрат на проектирование

При планировании бюджета проекта необходимо учесть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. Для формирования бюджета проекта используется следующая группа затрат

- материальные затраты проекта;
- основная заработная плата исполнителей проекта;
- дополнительная заработная плата исполнителей проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Материальные затраты принимаем в размере 5000 рублей на канцелярские товары.

3.6.1 Основная заработная плата исполнителей проекта

Статья включает в себя основную заработную плату и $Z_{\text{осн}}$ дополнительную заработную плату $Z_{\text{доп}}$

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

Дополнительная заработная плата составляет 12-20 % от $Z_{\text{осн}}$.

Основная заработная плата руководителя (инженера)

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых исполнителем проекта, раб.дн. (табл. 9);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 28 раб.дней $M=11$ месяцев, 5-дневная неделя;

при отпуске в 56 раб.дней $M=10$ месяцев, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей проекта, раб.дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от тс Z);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, принимаем 0,2;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

3.6.2 Затраты на заработную плату

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,135). Оклады взяты в соответствии с занимаемыми должностями ТПУ.

Расчет заработной платы руководителя (шестидневная рабочая неделя)

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 30000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 58500 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{58500 \cdot 10}{365 - 66 - 56} = 2407,4 \text{ руб}$$

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 2407,4 \cdot 16,8 = 40444,4 \text{ руб}$$

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,135 \cdot 40444,4 = 5460 \text{ руб}$$

Расчет заработной платы инженера (пятидневная рабочая неделя)

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 15000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 29250 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{29250 \cdot 10}{365 - 66 - 56} = 1203,7 \text{ руб}$$

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 1203,7 \cdot 83,2 = 100147,8 \text{ руб}$$

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,135 \cdot 100147,8 = 13519,9 \text{ руб}$$

Результаты расчета по заработной плате всех исполнителей проекта приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель проекта	$З_{\text{тс}}$, руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, руб	$З_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{р}}$ <i>раб. дн.</i>	$З_{\text{осн}}$ <i>руб.</i>	доп k	$З_{\text{доп}}$ <i>руб.</i>	Итого, <i>руб.</i>
Руководитель	30000	0,3	0,2	1,3	58500	2407,4	16,8	40444	0,135	5460	136811
Инженер	15000				29250	1203,7	83,2	100147		135120	280721

В результате данных расчетов посчитана основная заработная плата у исполнителей проекта. Из таблицы 10 видно, что ставка руководителя наибольшая, но итоговая основная заработная плата получилась наибольшей у инженера, так как основная заработная плата зависит от длительности работы проекта.

3.6.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды включают в себя установленные законодательством Российской Федерации нормы органов государственного социального страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ) и медицинское страхование (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 28 %.

В таблице 11 представлены результаты по расчету отчислений во внебюджетные фонды всех исполнителей.

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель проекта	Основная заработная плата, <i>руб.</i>	Дополнительная заработная плата, <i>руб.</i>
Руководитель проекта	40444,4	5460
Инженер	100147,8	135120
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,28	
Итого		
Руководитель проекта	12853,12	
Инженер	65874,76	

3.6.4 Накладные расходы

Накладные расходы включают прочие затраты организации, которые не учтены в предыдущих статьях расходов: оплата услуг связи, электроэнергии, интернета и т.д. Накладные расходы

$$З_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей} 1 \div 4)$$

где $k_{\text{нр}}$ коэффициент, учитывающий накладные расходы, принимаем в размере 16 %.

$$З_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (З_{\text{мт}} + З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}})$$

$$З_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (5000 + 140591 + 140580 + 78727) = 58383.68 \text{ руб.}$$

3.6.5 Формирование затрат на проектирование

Определение бюджета затрат на проект приведено в таблице 12.

Таблица 12 – Бюджет затрат на проектирование тепловой сети

Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
1. Материальные затраты проекта	5000	1,2
2. Затраты по основной заработной плате	140591	33,2
3. Затраты по дополнительной заработной плате	140580	33,2
4. Отчисления во внебюджетные фонды	78727	18,6
5. Накладные расходы	58383	13,8
Бюджет затрат на проектирование	423281	100

3.7 Определение ресурсов, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший

интегральный показатель реализации технической задач принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{150000}{700000} = 0,214$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 13).

Таблица 13 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Бальная оценка разработки
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4
3. Помехоустойчивость	0,15	5
4. Энергосбережение	0,20	4
5. Надежность	0,25	4
6. Материалоемкость	0,15	4
ИТОГО	1	4,33

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 4,25$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 14).

Таблица 14 - Сравнительная оценка эффективности проекта

Показатели	Исп.1
Интегральный финансовый показатель разработки	0,214
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,33
Интегральный показатель эффективности	4,25

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данная выпускная квалификационная работа представлена научно-исследовательской работой, во время выполнения которой осуществлялась обработка результатов анализов, построение карт и набор текста на персональном компьютере, поэтому в разделе «Производственная безопасность при проведении геоэкологических исследований» рассматривается «Производственная безопасность при работе на персональных компьютерах».

Цель данного раздела: проанализировать опасные и вредные факторы при данном виде производственной деятельности и решить вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативно-технических документов.

Работа проводилась в Отделении автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального Исследовательского Томского Политехнического Университета. Для выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Выбор модели надёжности технических систем в пакете Mathcad на основе эксплуатационных данных» проводилось исследование на компьютере.

4.1 Правовые нормы трудового законодательства

Законодательством РФ регулируются отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, социальных отношений, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и др.

Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников,

работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов [21].

Возможно установление неполного рабочего дня для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени. Ограничений продолжительности ежегодного основного оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других трудовых прав при этом не имеется.

При работе в ночное время, продолжительность рабочей смены должна составлять на один час меньше. К работе в ночные смены не допускаются беременные женщины; работники, не достигшие возраста 18 лет; женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, инвалиды, работники, имеющие детей-инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, матери и отцы одиночки детей до пяти лет.

Организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск.

Работнику в течение рабочего дня должен предоставляться, перерыв не более 2 часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с посменного согласия работника.

4.2 Производственная безопасность

Работы на электронно-вычислительных машинах проводятся в помещении, соответствующем требованиям Санитарных правил и норм [22].

Рабочее место расположено в аудитории на первом этаже здания, имеет естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место с ПЭВМ составляет не менее 6 м², а объем – не менее 20 м³. В рабочей аудитории расположены два персональных компьютера. Помещение оборудовано системами отопления, эффективной приточновытяжной вентиляцией. Система отопления обеспечивает постоянное и равномерное нагревание воздуха в помещении в холодный период года. Система вентиляции обеспечивает постоянный приток свежего воздуха. Минимальный расход воздуха составляет 50-60 м³/ч на одного работающего, воздухообмен за 1 час двух-трёхкратный (СНиП 2.04.05-91). Для выявления факторов опасности при работе на компьютере производится анализ классификации факторов опасности по [23] (таблица 15).

Таблица 15 – Основные элементы производственного процесса камеральных работ, формирующие опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ) [22]	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработк а	Изготовле ние	Эксплуата ция	
1. уровень шума;		+	+	1. ГОСТ 12.1.019-79 [24] 2. ГОСТ 12.1.038-82 [25] 3. ГОСТ 12.1.004-91 [26] 4. ГОСТ 12.1.003-83 [27]
2. уровень электромагнитных излучений;	+	+	+	
3. электрический ток;	+	+	+	

4.3 Уровень шума

Важным фактором, влияющим на организм человека и на качество выполняемой им работы, является шум. Шум – это беспорядочные колебания различной физической природы.

Шумы уровня 70-90 дБ при длительном воздействии оказывают отрицательное воздействие на нервную систему человека, оказывая психологическое воздействие. Шум может увеличивать содержание гормонов стресса в организме человека: адреналина и кортизола. Длительное присутствие этих гормонов в кровеносной системе приводит к физиологическим проблемам. Шумы уровня 85-90 дБ отрицательно влияют на слух человека. После воздействия таких шумов человек может испытывать недомогание: головную боль, тошноту, головокружение, повышенную раздражительность [27].

Шумы уровня более 100 дБ приводят к снижению слуха и могут стать причиной его частичной или полной потери.

При выполнении работ, описанных выше, специалист может оказаться под шумовым воздействием со стороны оборудования, находящегося в рабочем помещении: персональные компьютеры, печатающие устройства, оборудование поддержки микроклимата (кондиционеры, вентиляция) и прочее.

Работы, выполняемые специалистом, оцениваются как научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, следовательно, согласно [27] эквивалентный уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50дБА.

Наиболее эффективная защита от промышленных шумов находится на этапе архитектурного проектирования с помощью офисных макетов и специальных строительных и строительных решений для рабочего места. В качестве дополнительной меры для предотвращения шума вы можете использовать различные звукоизоляционные корпуса, звуконепроницаемые экраны, звукопоглощающие декоративные материалы.

4.4 Уровень электромагнитных излучений

Персональный компьютер – источник переменных электрических и

магнитных полей, в частности экран монитора компьютера. Электромагнитное поле, создаваемое ПК, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [24].

Таблица 16 – Допустимые уровни напряженности электромагнитных полей при работе с персональными электронно-вычислительными машинами

Параметры воздействия, частота излучения	Допустимые значения
Статическое поле	20 000 В/м
На расстоянии 50 см вокруг	
- диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
- диапазон частот 2 – 400 кГц	2,5 В/м
Переменное поле на расстоянии 50 см вокруг	0,25 А/м
Магнитная индукция не более	250 нТл
- диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 нТл
- диапазон частот 2 – 400 кГц	
Поверхностный электростатический потенциал, не более	500 В

Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может вызвать респираторную, нервную и сердечно-сосудистую систему, головные боли и усталость.

Чтобы защитить людей от электромагнитных полей, рекомендуется установить защитный фильтр на экран монитора. Чтобы защитить соседние рабочие места, между верстаками должны быть установлены защитные экраны с поглощающими низкочастотные электромагнитные излучения.

4.5 Электрический ток

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий, а также средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления приэкранного фильтра.

Методы защиты от воздействия статического электричества:

- влажная уборка, чтобы уменьшить количество пылинок в воздухе и на предметах офиса;
- использование увлажнителей воздуха;
- защитное заземление;
- применение средств индивидуальной защиты, таких как антистатические спреи и браслеты.

Допустимый ток частотой 50 Гц при длительности воздействия более 10 секунд составляет 2 мА, а при длительности 10 секунд и менее – 6 мА. Для переменного тока эта величина соответственно равна 10 и 15 мА [24].

Методы защиты от опасности поражения электрическим током:

- электрическая изоляция токоведущих частей (сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм);
- ограждение токоведущих частей, которые работают под напряжением;
- использование малых напряжений, например, не более 50 В;

- электрическое разделение сетей на отдельные короткие участки;
- защитное заземление и зануление;
- применение средств индивидуальной защиты, таких как плакаты и знаки безопасности, изолирующие подставки, указатели напряжения.

4.6 Экологическая безопасность

Для обеспечения экологической безопасности процесса необходимо обеспечить, чтобы целевая атмосферу, водный поло и литосфера не проводил активные операции с производственной деятельностью.

При использовании ПК он может иметь следующие типы негативных воздействий на окружающую среду [25]:

- Двуокись углерода выбрасывается в атмосферу и выделяет тепло при пожарах;
- Загрязнение почвы при обращении с старыми ПК.

ПК после завершения использования (срока эксплуатации) можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка такого рода отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования: кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы.

Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. ПК может содержать: тяжелые металлы, печатные платы с замедлителями горения, которые при горении могут выделять опасные диоксиды. Для опасных отходов используют теплоту сжигания, то есть специальные печи, такой способ не исключает образования токсичных выбросов.

Отходы, которые не подлежат переработке, утилизации

ивторичному использованию, подлежат захоронению на полигонах или в почве. Большое значение имеют нормативы предельно допустимых концентраций токсичных веществ в почве (ПДКп, мг/кг) в соответствии.

4.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При работе с персональным компьютером может произойти короткое замыкание, т.к. он работает от сети.

Согласно выделяются следующие категории помещений [26]:

- А: повышенная пожароопасность;
- Б : взрывопожароопасность;
- В 1-В4: пожароопасность;
- Г : умеренная пожароопасность;
- Д : пониженная пожароопасность.

Помещения, оборудованные персональными компьютерами, относятся к категории Д: помещения, в которых находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Для предотвращения пожара необходимо:

- Вовремя выявлять и устранять неисправности;
- не использовать открытые обогревательные приборы;
- сотрудники должны пройти инструктаж по технике безопасности.

Вынужденная эвакуация происходит при нарастании опасности от пожара. Чтобы процесс эвакуации происходил быстро и организованно, в здании помещают устройства эвакуационных путей и выходов, число, размеры и конструктивно-планировочные решения которых регламентированы строительными нормами.

Для тушения пожаров в помещении должен быть установлен углекислотный огнетушитель типа ОУ-5. Также помещение и этаж следует оборудовать датчиками задымленности и системой оповещения

возникновения возгорания.

Эвакуацию необходимо проводить в соответствии с планом эвакуации, представленном на рисунке 14.

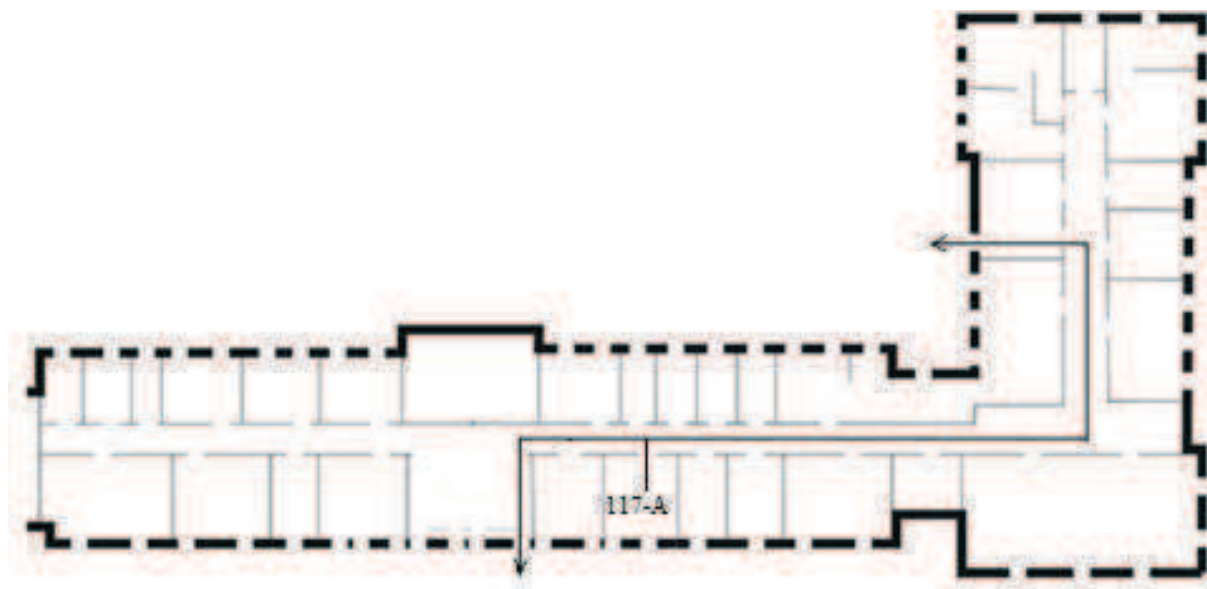


Рисунок 14 — План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса №10, пр.Ленина, 2, 1-й этаж

4.8 Организационные мероприятия по обеспечению безопасности

Рабочие места, оборудованные персональными компьютерами, должны располагаться по отношению к световым проемам таким образом, чтобы естественный свет падал с боковой стороны, преимущественно слева.

Расстояние между боковыми поверхностями мониторов должно составлять не менее 1,2 м, расстояние между экраном монитора и задней частью другого монитора – не менее 2 м.

Рабочий стол может быть любой конструкции, которая отвечает современным требованиям эргономики и позволяет удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. Целесообразно применение столов, имеющих отдельную от основной столешницы специальную рабочую

поверхность для размещения клавиатуры. В случае, когда используется стол с нерегулируемой высотой рабочей поверхности, его высота должна быть в пределах от 680 до 800 мм. Глубина рабочей поверхности стола должна составлять 800 мм, ширина – 1600 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм, на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула или кресла должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы работника и позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины. Рабочий стул или кресло должны быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной поверхности, отделенной от основной столешницы.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен выбор модели надежности для системы, состоящей из двух компонентов, время отказа которых распределено по закону Вейбулла, с использованием схемы холодного резервирования. Данная конфигурация представляет собой пример схемы резервирования, расчет надежности для которой сопряжен с вычислительными трудностями, поэтому поиск адекватной модели надежности для нее является обоснованным.

В ходе выполнения данной бакалаврской работы были изучены двух- и трехпараметрические модели надежности, являющиеся частными случаями пятипараметрической комбинации комплементарного Вейбулл-геометрического распределения и распределения Кумарасвами. Для рассматриваемых моделей были определены параметры с использованием метода максимального правдоподобия. Также, была предложена процедура выбора наилучшей модели надежности из заранее заданного списка моделей-кандидатов с использованием информационных критериев, позволяющих учитывать как степень согласия модели, так и ее сложность.

По результатам анализа значений показателей качества для рассматриваемой системы была выбрана трехпараметрическая модель надежности, основанная на комплементарном Вейбулл-геометрическом распределении, и приведены формулы для расчета основных показателей надежности.

Разработанная процедура может применяться для выбора моделей надежности технических систем с любыми схемами резервирования. Результаты, полученные в ходе выполнения данной бакалаврской работы, могут быть использованы в рамках изучения дисциплин «Диагностика и надежность автоматизированных систем» и «Моделирование систем и процессов».

CONCLUSION

During the completion of the presented graduation thesis there was performed the reliability model selection for a system, composed of two components in cold standby with failure times distributed according to the Weibull distribution. Such configuration is an example of the redundancy architecture with complicated computation process of the reliability measures, hence the selection of an adequate reliability model is justified.

As a part of presented bachelor degree thesis two- and three-parameter reliability models were studied which are the special cases of five-parameter Kumaraswamy complementary Weibull-geometric distribution. The maximum likelihood parameter estimation was performed in order to obtain the parameters for the models under study. Hereafter, a procedure was proposed that selects the best possible model from the predetermined list of model candidates using information criteria, thus allowing us to account for model's goodness of the fit as well as its complexity.

According to the analysis of model quality measures, three-parameter complementary Weibull-geometric distribution was selected as a reliability model for the system under study. Additionally, the formulae for the computation of reliability measures corresponded to the model were presented.

The developed procedure can be applied for reliability model selection of any technical system with various redundancy architectures. The results obtained during the completion of the presented graduation thesis might be incorporated in academic courses of "Diagnostics and Reliability of Automated Systems" and "System and Process Simulation".

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Труханов, В.М. Надежность технических систем / В. М. Труханов. — Москва: Машиностроение-1, 2008. — 585 с.
2. Острейковский, В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В. А. Острейковский. — 2-е изд., испр. — Москва: Высшая школа, 2008. — 463 с.
3. Каштанов, В.А. Теория надежности сложных систем: учебное пособие для вузов / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. — 2-е изд., перераб. — Москва: Физматлит, 2010. — 608 с.
4. Бородин, А. Н. Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики [Электронный ресурс] / Бородин А. Н. — 8-е изд., стер. — Лань, 2011. — 256 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2026, доступ из сети ТПУ (дата обращения: 20.04.2019).
5. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем: учебное пособие / И. А. Ушаков. — Москва: Дрофа, 2008. — 240 с.
6. Андронов, А.М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник / А. М. Андронов, Е. А. Копытов, Л. Я. Гринглаз. — СПб.: Питер, 2004. — 460 с.
7. Теория надежности. Статистические модели: учебное пособие / А. В. Антонов [и др.]. — Москва: Инфра-М, 2015. — 576 с.
8. ReliaSoft's System Analysis Reference [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://reliawiki.org/index.php/System_Analysis_Reference, свободный (дата обращения: 20.04.2019).
9. Reliasoft's Life Data Analysis Reference Book [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://reliawiki.com/index.php/Life_Data_Analysis_Reference, свободный (дата обращения: 20.04.2019).

10. A new lifetime model with variable shapes for the hazard rate / A.Z. Afify, G.M. Cordeiro, N. Shafique Butt et al. // Brazilian Journal of Probability and Statistics – 2017. – Vol.31, №3. – P. 516-541. doi:10.1214/16-BJPS322.

11. Балдин, К. В. Общая теория статистики: учебное пособие [Электронный ресурс] / Балдин К. В., Рукосяев А. В. — 2-е. — Дашков и К, 2017. — 312 с. — Книга из коллекции Дашков и К - Экономика и менеджмент. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/93403>, доступ из сети ТПУ (дата обращения: 20.04.2019).

12. Светлаков, А.А. Традиционное и нетрадиционное оценивание неизвестных величин учебное пособие: в двух частях: / А. А. Светлаков ; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) . — Томск: Изд-во ТУСУР, 2007 – Ч. 1: Простейшие задачи оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений. — 2007. — 550 с.

13. Орлов, А.И. Вероятность и прикладная статистика: основные факты: справочник / А. И. Орлов. — Москва: КноРус, 2016. — 190 с.

14. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control – 1974. – Vol. 19, №6. – P. 716-723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705

15. Schwarz, G. Estimating the Dimension of a Model // Ann. Statist. – 1978. – Vol. 6, №2. – P. 461-464. doi:10.1214/aos/1176344136.

16. Burnham, K.P. Model Selection and Multimodel Inference. A Practical Information-Theoretic Approach / K.P. Burnham, D.R. Anderson. – New York: Springer-Verlag, 2002. – 488 p.

17. Tojeiro, C. The complementary Weibull geometric distribution / C. Tojeiro, F. Louzada, M. Roman, P. Borges // Journal of Statistical Computation and Simulation – 2014. – Vol.84, №6. – P. 1345-1362. doi: 10.1080/00949655.2012.744406.

18. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции Пер. с англ.: В 3 т.: / Г. Бейтмен, А. Эрдейн. — 2-е изд., стер. — М.: Наука, 1973 - Т. 1:

Гипергеометрическая функция. Функции Лежандра. — 1973. — 294 с.

19. Filliben J.J. The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality // Technometrics – 1975. – Vol. 17, №1. – P. 111-117.

20. Видяев, И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев [и др.]. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

21. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 28.12.2013) // Собрание законодательства Российской Федерации. - 07.01.2002. - N 1 (Ч. 1). - Ст. 3.

22. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

23. ГОСТ 12.0.003-74-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

24. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

25. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

26. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

27. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования (01. 07. 92)

Приложение А (обязательное)

Таблица А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 100 β = 0,5								
W	320	-	0.72	13765	13769	1.79	12.22	320
CEG	1091	-	5.86	13745	13749	0.76	0.29	1091
EE	561	-	0.62	13816	13820	1.05	20.26	561
GE	627	-	1.57	13983	13987	0.01	36.47	627
CWG	582	2.21	0.86	13748	13754	1.41	8.85	582
EW	246	1.23	0.65	13754	13760	1.93	9.48	246
ECEG	1043	0.92	4.88	13743	13749	0.07	0.54	1043
GW	1105	2.45	0.72	13765	13771	1.79	12.22	1105
GCEG	740	0.80	5.30	13744	13750	0.17	1.98	740
Kw-E	730	1.23	0.62	13809	13815	2.08	17.91	730
η = 100 β = 0,8								
W	241	-	1.18	12801	12805	12815	0.27	4.68
CEG	170	-	0.55	12817	12821	12831	0.54	3.60
EE	158	-	0.47	13855	13859	13869	59.48	35.41
GE	701	-	3.09	12847	12851	12861	0.01	12.22
CWG	335	2.03	1.37	12789	12795	12810	0.30	2.30
EW	209	1.21	1.09	12793	12799	12814	0.08	5.38
ECEG	176	1.10	0.67	12806	12812	12827	0.33	2.79
GW	515	2.46	1.18	12801	12807	12822	0.27	4.68
GCEG	38	0.18	0.45	12796	12802	12817	3.93	5.33
Kw-E	185	1.01	1.41	12789	12795	12809	0.08	3.32
η = 100 β = 1,0								
W	222	-	1.48	12383	12387	12397	0.29	2.29
CEG	103	-	0.22	12413	12417	12427	1.15	2.23
EE	130	-	2.10	12374	12378	12388	0.14	3.59
GE	146	-	0.73	12597	12601	12610	0.01	41.55
CWG	289	2.01	1.70	12372	12378	12393	0.57	0.47
EW	172	1.45	1.21	12373	12379	12394	1.11	1.36
ECEG	123	1.86	0.77	12373	12379	12394	0.04	1.36
GW	408	2.46	1.48	11238	12389	12404	0.29	2.30
GCEG	36	0.26	0.15	12386	12392	12406	0.77	3.79
Kw-E	149	1.18	2.03	12374	12380	12394	0.06	2.65
η = 100 β = 1,1								
W	3062.1	2.21	-	17074.51	17078.51	17088.33	0.16	0.24
CEG	805.6	0.04	-	17108.07	17112.07	17121.89	1.47	0.02
EE	1196.1	4.98	-	17087.33	17091.33	17101.15	0.73	11.30
GE	1752.2	0.65	-	17807.63	17811.63	17821.45	0.01	108.29
CWG	4115.9	3.45	2.78	17057.32	17063.32	17078.05	0.01	0.10
EW	2609.1	1.85	1.45	17061.24	17067.24	17081.97	0.02	2.04
ECEG	1043.9	0.37	2.87	17065.46	17071.46	17086.19	0.36	4.06
GW	4196.0	2.21	2.01	17074.51	17080.51	17095.24	0.16	0.24
GCEG	492.6	0.03	0.43	17083.19	17089.19	17103.91	0.12	5.72
Kw-E	3524.8	3.12	5.23	17059.04	17065.04	17079.76	0.10	0.71

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 100 β = 1,25								
W	210	-	1.86	11961	11965	11974	0.34	1.65
CEG	68	-	0.09	12000	12004	12014	1.86	2.30
EE	63	-	0.07	19356	19360	19370	96.52	77.35
GE	603	-	3.24	12454	12458	12468	0.00	75.78
CWG	257	1.95	2.14	11943	11949	11963	0.42	1.21
EW	187	1.27	1.65	11946	11952	11967	0.24	2.30
ECEG	54	0.56	0.02	12132	12138	12152	3.62	3.41
GW	339	2.43	1.86	11961	11967	11981	0.34	1.65
GCEG	43	0.48	0.07	11964	11970	11985	1.54	0.60
Kw-E	140	1.72	3.05	11932	11938	11953	0.18	0.91
η = 100 β = 1,5								
W	204	-	2.21	11647	11651	11661	0.21	0.26
CEG	53	-	0.04	11677	11681	11691	1.97	1.40
EE	77	-	5.41	11631	11635	11645	0.53	8.08
GE	133	-	0.73	12392	12396	12406	0.01	108.36
CWG	358	11.9	3.24	11618	11624	11639	0.01	1.70
EW	178	1.39	1.89	11627	11633	11648	0.23	1.89
ECEG	69	3.11	0.39	11618	11624	11638	0.55	2.81
GW	175	0.71	2.21	11647	11653	11668	0.21	0.26
GCEG	34	0.46	0.03	11637	11643	11658	0.63	2.82
Kw-E	91	1.30	4.94	11624	11630	11644	0.49	4.44
η = 100 β = 1,75								
W	201	-	2.56	11395	11399	11409	0.11	0.62
CEG	45	-	0.02	11428	11432	11442	1.41	1.14
EE	68	-	7.49	11403	11407	11417	0.78	12.09
GE	65	-	0.36	12365	12369	12379	0.00	139.63
CWG	246	2.61	2.98	11377	11383	11397	0.50	2.74
EW	167	1.63	2.00	11374	11380	11395	0.08	0.85
ECEG	64	3.29	0.30	11393	11399	11414	5.21	12.99
GW	284	2.43	2.56	11395	11401	11416	0.11	0.62
GCEG	30	0.46	0.01	11405	11411	11426	0.60	6.81
Kw-E	94	1.21	3.76	11504	11510	11525	3.92	29.49
η = 100 β = 2,0								
W	19	-	2.91	11182	11186	11195	0.02	1.03
CEG	39	-	0.01	11194	11198	11208	0.67	1.47
EE	63	-	9.06	11264	11268	11277	1.36	20.01
GE	130	-	0.73	12355	12359	12369	0.00	170.52
CWG	239	2.72	3.53	11174	11180	11195	0.13	0.32
EW	178	1.39	2.44	11174	11180	11194	0.01	0.03
ECEG	51	3.00	0.15	11198	11204	11219	0.87	6.73
GW	270	2.43	2.91	11182	11188	11202	0.02	1.03
GCEG	27	0.46	0.01	11207	11213	11227	1.30	9.36
Kw-E	89	1.80	6.88	11219	11225	11240	0.47	10.50

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 200 β = 0,5								
W	648	-	0.73	15168	15172	15182	1.79	13.45
CEG	2110	-	5.49	15147	15151	15161	0.01	0.70
EE	1106	-	0.63	15218	15222	15232	1.04	21.01
GE	303	-	0.38	15369	15373	15383	0.01	36.46
CWG	1545	3.36	0.94	15147	15153	15168	0.77	7.45
EW	420	1.39	0.61	15152	15158	15173	1.32	7.02
ECEG	1938	0.91	4.30	15146	15152	15167	0.01	3.55
GW	1821	2.13	0.73	15168	15174	15189	1.79	13.45
GCEG	1571	0.88	4.63	15148	15154	15169	0.61	5.89
Kw-E	9465	6.05	0.70	15182	15188	15202	1.26	16.60
η = 200 β = 0,8								
W	480	-	1.17	14196	14200	14210	0.22	3.35
CEG	351	-	0.59	14210	14214	14224	0.33	1.70
EE	375	-	1.36	14187	14191	14201	0.07	1.88
GE	212	-	0.47	14234	14238	14248	0.00	12.29
CWG	686	2.17	1.36	14185	14191	14206	0.49	0.94
EW	465	1.05	1.15	14194	14200	14215	0.28	3.96
ECEG	412	1.58	1.46	14183	14189	14204	0.06	1.78
GW	932	2.17	1.17	14196	14202	14217	0.22	3.36
GCEG	664	2.11	0.57	14215	14221	14236	0.23	1.08
Kw-E	1530	4.58	1.23	14192	14198	14212	0.16	2.90
η = 200 β = 1,0								
W	444	-	1.48	13768	13772	13781	0.31	2.50
CEG	56	-	0.00	17036	17040	17050	20.69	63.94
EE	147	-	0.07	20211	20215	20225	95.82	79.25
GE	331	-	0.83	13985	13989	13998	0.01	41.52
CWG	651	2.89	1.81	13754	13760	13775	0.09	0.14
EW	338	1.52	1.19	13755	13761	13776	0.01	0.78
ECEG	192	0.86	0.15	13824	13830	13845	1.72	3.64
GW	344	0.69	1.48	13768	13774	13788	0.31	2.50
GCEG	112	0.45	0.18	13775	13781	13796	0.77	0.80
Kw-E	437	1.89	1.90	13755	13761	13776	0.01	0.24
η = 200 β = 1,1								
W	432	-	1.62	13604	13608	13618	0.18	1.37
CEG	173	-	0.15	13631	13635	13645	1.13	1.27
EE	233	-	2.44	13610	13614	13624	0.38	7.45
GE	297	-	0.77	13912	13916	13926	0.01	55.39
CWG	594	2.59	1.94	13600	13606	13620	0.04	0.61
EW	386	1.21	1.45	13599	13605	13620	0.02	0.41
ECEG	215	2.29	0.77	13606	13612	13626	0.26	2.50
GW	342	0.69	1.62	13604	13610	13624	0.18	1.37
GCEG	101	0.46	0.13	13615	13621	13636	0.35	2.22
Kw-E	405	2.03	2.13	13601	13607	13622	0.01	3.02

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 200 β = 1,25								
W	420	-	1.84	13373	13377	13386	0.19	0.96
CEG	140	-	0.09	13408	13412	13421	0.94	0.35
EE	292	-	1.52	13578	13582	13592	1.14	48.00
GE	143	-	0.38	13841	13845	13854	0.00	75.55
CWG	556	2.61	2.21	13366	13372	13386	0.06	0.26
EW	380	1.23	1.67	13367	13373	13388	0.23	1.68
ECEG	183	2.37	0.58	13373	13379	13394	0.33	6.13
GW	343	0.69	1.84	13373	13379	13393	0.19	0.96
GCEG	86	0.46	0.07	13391	13397	13412	0.30	4.06
Kw-E	371	2.41	2.63	13370	13376	13390	0.25	2.40
η = 200 β = 1,5								
W	408	-	2.21	13044	13048	13058	0.16	0.21
CEG	60	-	0.01	13669	13673	13683	6.54	38.52
EE	47	-	0.01	39951	39955	39964	100.00	99.38
GE	302	-	0.84	13778	13782	13792	0.01	108.32
CWG	468	1.71	2.47	13034	13040	13054	0.25	0.26
EW	355	1.39	1.87	13031	13037	13051	0.13	1.08
ECEG	127	0.83	0.03	13324	13330	13345	22.89	25.60
GW	344	0.69	2.21	13044	13050	13065	0.16	0.21
GCEG	70	0.47	0.03	13050	13056	13071	0.15	4.32
Kw-E	374	3.65	3.39	13029	13035	13049	0.98	1.96
η = 200 β = 1,75								
W	402	-	2.57	12788	12792	12802	0.09	0.19
CEG	93	-	0.02	12841	12845	12855	5.24	5.95
EE	211	-	2.68	13068	13072	13081	2.72	63.65
GE	274	-	0.77	13753	13757	13767	0.01	140.00
CWG	481	2.32	3.03	12783	12789	12804	0.05	0.08
EW	343	1.52	2.06	12781	12787	12802	0.02	0.13
ECEG	99	1.34	0.05	12804	12810	12825	0.07	2.31
GW	347	0.69	2.57	12788	12794	12809	0.09	0.19
GCEG	62	0.47	0.01	12829	12835	12850	0.88	9.31
Kw-E	424	6.23	3.75	12786	12792	12806	0.45	2.13
η = 200 β = 2,0								
W	398	-	2.93	12564	12568	12578	0.04	0.54
CEG	78	-	0.01	12595	12599	12608	0.60	2.69
EE	126	-	9.19	12645	12649	12659	1.26	19.33
GE	340	-	0.96	13741	13745	13755	0.01	170.40
CWG	444	1.79	3.33	12559	12565	12579	0.19	0.88
EW	338	1.62	2.28	12560	12566	12580	0.05	0.42
ECEG	105	3.28	0.18	12595	12601	12615	0.90	8.32
GW	350	0.69	2.93	12564	12570	12585	0.04	0.52
GCEG	107	2.46	0.01	12627	12633	12648	1.29	4.47
Kw-E	1152	71.9	3.45	12559	12565	12580	0.03	0.13

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 500 β = 0,5								
W	1588	-	0.72	16971	16975	16985	1.86	11.70
CEG	5820	-	6.41	16952	16956	16966	0.06	3.50
EE	3636	-	3.28	23440	23444	23454	247.30	35.68
GE	152	-	0.08	17200	17204	17214	0.01	36.56
CWG	4410	4.07	0.93	16949	16955	16970	0.42	0.03
EW	587	2.00	0.51	16949	16955	16970	0.01	3.89
ECEG	5230	0.90	4.78	16949	16955	16970	0.31	0.17
GW	3605	1.80	0.72	16971	16977	16992	1.85	11.70
GCEG	4024	0.84	5.52	16951	16957	16972	0.66	1.63
Kw-E	38745	8.53	0.69	16982	16988	17002	1.23	14.07
η = 500 β = 0,8								
W	1204	-	1.19	16018	16022	16032	0.25	4.81
CEG	839	-	0.54	16032	16036	16046	0.58	4.21
EE	915	-	1.41	16006	16010	16020	0.08	3.49
GE	2038	-	1.80	16065	16069	16078	0.01	12.23
CWG	1935	2.85	1.45	16007	16013	16028	0.36	0.66
EW	774	1.68	0.90	16005	16011	16025	0.58	0.84
ECEG	981	1.58	1.32	16005	16011	16025	0.01	0.80
GW	774	0.59	1.19	16018	16024	16039	0.25	4.81
GCEG	362	0.40	0.46	16020	16026	16041	1.15	5.27
Kw-E	3661	4.60	1.27	16012	16018	16033	0.36	5.46
η = 500 β = 1,0								
W	1109	-	1.48	15599	15603	15613	0.32	2.47
CEG	485	-	0.19	15633	15637	15647	0.50	5.31
EE	647	-	2.12	15588	15592	15602	0.11	3.03
GE	1806	-	1.81	15814	15818	15828	0.01	41.31
CWG	1614	2.82	1.80	15587	15593	15608	0.10	0.06
EW	806	1.60	1.15	15587	15593	15608	0.32	0.15
ECEG	632	2.00	0.88	15588	15594	15608	0.66	2.28
GW	1676	1.84	1.48	15599	15605	15620	0.32	2.47
GCEG	277	0.44	0.19	15610	15616	15631	0.67	0.22
Kw-E	1017	1.73	1.92	15587	15593	15608	0.01	0.60
η = 500 β = 1,1								
W	1081	-	1.63	15422	15426	15436	0.30	2.01
CEG	415	-	0.14	15459	15463	15472	1.33	3.81
EE	566	-	2.58	15413	15417	15427	0.23	4.90
GE	789	-	0.82	15743	15747	15757	0.01	55.28
CWG	1538	2.94	2.00	15406	15412	15427	0.06	0.32
EW	838	1.54	1.31	15409	15415	15430	0.40	0.81
ECEG	526	2.04	0.64	15409	15415	15430	0.07	1.98
GW	1573	1.84	1.63	15422	15428	15443	0.30	2.01
GCEG	182	0.31	0.10	15422	15428	15443	0.24	4.18
Kw-E	931	1.90	2.25	15409	15415	15429	0.21	0.95

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 500 β = 1,25								
W	1051	-	1.85	15193	15197	15207	0.26	1.31
CEG	347	-	0.09	15230	15234	15244	1.33	1.15
EE	146	-	0.00	37005	37009	37019	99.98	98.82
GE	179	-	0.19	15673	15677	15687	0.01	75.59
CWG	1316	2.09	2.16	15182	15188	15203	0.95	0.50
EW	935	1.27	1.65	15183	15189	15204	0.20	1.75
ECEG	387	1.46	0.20	15194	15200	15214	0.35	0.01
GW	1470	1.86	1.85	15193	15199	15213	0.26	1.31
GCEG	208	0.45	0.07	15207	15213	15228	0.23	3.19
Kw-E	1094	3.07	2.55	15178	15184	15199	0.01	0.99
η = 500 β = 1,5								
W	1021	-	2.20	14877	14881	14891	0.10	0.08
CEG	263	-	0.04	14891	14895	14905	1.38	1.66
EE	723	-	0.45	16767	16771	16781	54.72	36.11
GE	18	-	0.02	15611	15615	15625	0.01	108.19
CWG	1148	1.54	2.39	14871	14877	14892	0.73	1.23
EW	777	1.84	1.62	14856	14862	14877	0.72	0.28
ECEG	361	1.41	0.11	14961	14967	14982	15.39	20.87
GW	840	0.65	2.20	14877	14883	14898	0.10	0.08
GCEG	172	0.46	0.03	14875	14881	14896	0.34	4.27
Kw-E	971	3.87	3.30	14856	14862	14876	0.03	1.35
η = 500 β = 1,75								
W	1004	-	2.54	14614	14618	14628	0.04	1.12
CEG	221	-	0.02	14628	14632	14642	1.18	0.03
EE	338	-	7.50	14620	14624	14633	0.85	12.21
GE	86	-	0.10	15584	15588	15598	0.00	139.79
CWG	1092	1.45	2.73	14607	14613	14628	0.06	1.40
EW	733	2.14	1.74	14585	14591	14606	0.08	0.36
ECEG	284	2.77	0.19	14592	14598	14612	0.41	3.59
GW	848	0.65	2.54	14614	14620	14635	0.04	1.12
GCEG	149	0.46	0.01	14618	14624	14639	0.32	5.93
Kw-E	721	3.50	4.63	14585	14591	14606	0.07	0.43
η = 500 β = 2,0								
W	994	-	2.91	14401	14405	14415	0.02	1.02
CEG	194	-	0.01	14417	14421	14431	0.64	1.84
EE	383	-	0.12	20545	20549	20559	92.36	42.93
GE	18	-	0.02	15575	15579	15589	0.01	170.58
CWG	1054	1.35	3.11	14397	14403	14418	0.02	0.57
EW	863	1.52	2.33	14392	14398	14413	0.02	0.09
ECEG	215	1.42	0.03	14403	14409	14424	0.07	2.39
GW	1226	1.84	2.91	14401	14407	14421	0.02	1.02
GCEG	134	0.47	0.01	14429	14435	14450	1.10	8.68
Kw-E	814	5.65	5.01	14402	14408	14423	0.07	0.95

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 750 β = 0,5								
W	2431	-	0.73	17812	17816	17826	1.54	13.18
CEG	7818	-	5.47	17799	17803	17812	0.88	1.83
EE	2687	-	1.43	18406	18410	18420	11.46	39.39
GE	149	-	0.05	18012	18016	18026	0.01	36.54
CWG	5796	3.34	0.92	17795	17801	17815	0.23	4.04
EW	872	2.06	0.51	17793	17799	17813	0.59	3.27
ECEG	7348	0.91	4.41	17797	17803	17817	0.59	3.51
GW	4412	1.55	0.73	17812	17818	17833	1.54	13.18
GCEG	3723	0.64	4.61	17794	17800	17815	0.06	7.40
Kw-E	101526	14.2	0.72	17818	17824	17839	2.19	16.50
η = 750 β = 0,8								
W	1809	-	1.20	16824	16828	16838	0.29	5.60
CEG	1223	-	0.51	16837	16841	16851	0.82	5.81
EE	1227	-	0.51	17714	17718	17728	54.92	31.29
GE	38	-	0.02	16875	16879	16889	0.01	12.14
CWG	3032	3.18	1.49	16810	16816	16831	0.38	1.32
EW	1084	1.83	0.88	16807	16813	16827	0.23	1.20
ECEG	1207	1.00	0.49	16837	16843	16858	0.83	6.58
GW	3041	1.86	1.20	16824	16830	16845	0.29	5.60
GCEG	547	0.40	0.45	16820	16826	16841	0.32	4.69
Kw-E	1948	1.49	1.39	16811	16817	16832	0.02	5.06
η = 750 β = 1,0								
W	1667	-	1.50	16392	16396	16406	0.37	3.63
CEG	618	-	0.12	16442	16446	16456	0.56	14.38
EE	733	-	0.20	19972	19976	19986	85.94	57.59
GE	120	-	0.08	16626	16630	16640	0.00	41.31
CWG	2298	2.39	1.78	16378	16384	16399	0.72	1.34
EW	1191	1.69	1.15	16371	16377	16391	0.94	1.26
ECEG	603	0.59	0.05	16536	16542	16557	4.32	6.79
GW	2676	2.03	1.50	16392	16398	16413	0.37	3.63
GCEG	367	0.39	0.16	16382	16388	16402	0.81	1.90
Kw-E	1849	2.29	1.93	16370	16376	16391	0.04	2.56
η = 750 β = 1,1								
W	1622	-	1.63	16236	16240	16250	0.33	1.94
CEG	594	-	0.12	16290	16294	16304	0.08	6.26
EE	1304	-	0.61	17084	17088	17098	36.02	24.52
GE	118	-	0.08	16555	16559	16569	0.01	55.31
CWG	1914	1.63	1.80	16226	16232	16246	0.05	1.25
EW	1152	1.73	1.22	16223	16229	16244	0.06	0.92
ECEG	554	0.58	0.04	16411	16417	16432	0.97	2.53
GW	2534	2.07	1.63	16236	16242	16257	0.33	1.94
GCEG	548	0.75	0.17	16271	16277	16292	1.50	0.95
Kw-E	1812	2.63	2.11	16224	16230	16245	0.07	0.55

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 750 β = 1,25								
W	1577	-	1.85	16005	16009	16018	0.23	1.26
CEG	514	-	0.09	16034	16038	16048	1.46	2.05
EE	727	-	3.36	16002	16006	16016	0.47	7.61
GE	67	-	0.05	16485	16489	16498	0.01	75.59
CWG	1781	1.48	2.02	15998	16004	16019	0.44	1.17
EW	1164	1.75	1.38	15989	15995	16010	0.02	0.16
ECEG	614	1.83	0.32	15991	15997	16012	0.39	0.78
GW	2399	2.17	1.85	16005	16011	16025	0.23	1.26
GCEG	304	0.43	0.07	16009	16015	16030	0.42	3.02
Kw-E	1811	3.53	2.49	15989	15995	16009	0.08	0.51
η = 750 β = 1,5								
W	1530	-	2.20	15690	15694	15704	0.13	0.11
CEG	399	-	0.04	15711	15715	15725	1.48	0.85
EE	568	-	0.11	21459	21463	21473	92.70	57.39
GE	115	-	0.08	16421	16425	16435	0.01	108.16
CWG	2000	2.98	2.71	15676	15682	15697	0.31	0.47
EW	1292	1.49	1.77	15675	15681	15696	0.84	1.26
ECEG	348	0.67	0.01	15774	15780	15794	3.07	0.25
GW	2232	2.30	2.20	15690	15696	15710	0.13	0.11
GCEG	251	0.44	0.03	15693	15699	15714	0.35	4.39
Kw-E	1340	3.44	3.42	15675	15681	15696	0.13	1.09
η = 750 β = 1,75								
W	1506	-	2.56	15424	15428	15438	0.10	0.60
CEG	396	-	0.03	15499	15503	15513	6.40	17.03
EE	356	-	0.03	26354	26358	26367	98.84	84.13
GE	114	-	0.09	16395	16399	16409	0.01	140.02
CWG	1837	2.56	3.05	15404	15410	15425	0.01	0.74
EW	1261	1.60	2.03	15405	15411	15425	0.15	1.07
ECEG	321	0.65	0.01	15531	15537	15552	1.00	11.78
GW	1304	0.69	2.56	15424	15430	15444	0.10	0.60
GCEG	220	0.46	0.01	15432	15438	15452	0.45	4.50
Kw-E	1026	2.99	4.58	15407	15413	15428	0.71	4.46
η = 750 β = 2,0								
W	1491	-	2.91	15207	15211	15221	0.03	0.98
CEG	318	-	0.02	15245	15249	15259	1.76	9.64
EE	293	-	0.01	29266	29270	29280	99.58	90.15
GE	114	-	0.09	16385	16389	16399	0.01	170.35
CWG	1695	1.96	3.32	15200	15206	15221	0.05	0.66
EW	1241	1.71	2.21	15195	15201	15215	0.01	0.09
ECEG	239	0.57	0.00	15300	15306	15321	2.27	5.45
GW	2062	2.57	2.91	15207	15213	15228	0.03	0.98
GCEG	389	2.23	0.01	15267	15273	15288	0.39	4.34
Kw-E	1079	4.60	5.38	15202	15208	15223	0.13	0.48

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 1000 β = 0,5								
W	3936	-	0.57	18843	18847	18857	4.47	18.13
CEG	46739	-	25.5	18913	18917	18927	7.28	3.24
EE	12620	-	0.43	18949	18953	18963	3.12	30.08
GE	629	-	0.09	19600	19604	19614	0.01	54.22
CWG	11086	3.00	0.70	18832	18838	18852	0.01	6.70
EW	1559	1.70	0.43	18830	18836	18850	0.69	0.64
ECEG	33938	0.62	8.32	18830	18836	18850	0.62	1.51
GW	1004	0.46	0.57	18843	18849	18864	4.47	18.13
GCEG	10977	0.54	15.2	18885	18891	18905	0.42	11.29
Kw-E	48292	2.94	0.51	18886	18892	18907	5.37	30.60
η = 1000 β = 0,8								
W	2416	-	1.20	17399	17403	17413	0.30	5.80
CEG	1636	-	0.51	17413	17417	17427	0.80	5.68
EE	1794	-	1.46	17383	17387	17397	0.12	4.95
GE	217	-	0.10	17451	17455	17465	0.01	12.15
CWG	4201	3.49	1.51	17384	17390	17405	0.50	0.93
EW	1388	1.92	0.86	17380	17386	17400	0.01	0.92
ECEG	1931	1.64	1.34	17381	17387	17402	0.03	2.08
GW	3726	1.68	1.20	17399	17405	17420	0.30	5.80
GCEG	379	0.20	0.36	17388	17394	17409	0.17	2.61
Kw-E	2609	1.49	1.39	17385	17391	17406	0.02	5.10
η = 1000 β = 1,0								
W	2215	-	1.47	16994	16998	17008	0.21	1.99
CEG	1021	-	0.22	17016	17020	17030	0.98	2.48
EE	1129	-	0.29	19495	19499	19509	77.70	43.74
GE	1117	-	0.56	17202	17206	17216	0.01	41.42
CWG	2780	1.82	1.66	16989	16995	17010	0.22	0.60
EW	1744	1.44	1.21	16987	16993	17008	0.11	0.21
ECEG	1000	0.91	0.18	17030	17036	17051	1.14	2.07
GW	3318	1.81	1.47	16994	17000	17015	0.21	1.99
GCEG	472	0.35	0.18	16999	17005	17020	0.23	3.10
Kw-E	7219	8.31	1.62	16988	16994	17009	0.07	1.17
η = 1000 β = 1,1								
W	2166	-	1.64	16797	16801	16811	0.37	2.52
CEG	847	-	0.15	16836	16840	16849	1.56	2.57
EE	1108	-	2.70	16776	16780	16790	0.16	3.11
GE	3160	-	1.64	17131	17135	17144	0.01	55.46
CWG	3360	3.95	2.11	16777	16783	16798	0.15	0.32
EW	1488	1.84	1.21	16775	16781	16796	0.03	0.99
ECEG	1076	2.52	0.86	16775	16781	16796	0.05	1.69
GW	1466	0.53	1.64	16797	16803	16818	0.37	2.52
GCEG	529	0.52	0.12	16809	16815	16830	1.17	1.88
Kw-E	2449	2.77	2.17	16775	16781	16796	0.10	1.14

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 1000 β = 1,25								
W	2102	-	1.85	16576	16580	16590	0.25	1.35
CEG	684	-	0.09	16607	16611	16621	1.44	2.17
EE	1011	-	0.29	19561	19565	19575	78.55	32.82
GE	503	-	0.27	17059	17063	17073	0.01	75.51
CWG	2713	2.38	2.19	16565	16571	16586	0.20	0.20
EW	1588	1.69	1.42	16559	16565	16580	0.03	0.77
ECEG	572	0.55	0.01	16746	16752	16767	3.38	3.04
GW	2915	1.83	1.85	16576	16582	16597	0.25	1.35
GCEG	434	0.48	0.07	16584	16590	16605	0.62	1.53
Kw-E	6023	13.1	2.12	16562	16568	16583	0.62	0.22
η = 1000 β = 1,5								
W	2043	-	2.21	16260	16264	16274	0.21	0.44
CEG	540	-	0.04	16303	16307	16317	1.67	0.26
EE	788	-	5.13	16263	16267	16277	0.62	10.05
GE	1300	-	0.72	16997	17001	17011	0.01	108.21
CWG	2812	3.93	2.85	16236	16242	16257	0.23	0.60
EW	1526	1.86	1.59	16242	16248	16262	0.33	0.51
ECEG	702	3.85	0.47	16267	16273	16288	4.20	3.24
GW	1616	0.60	2.21	16260	16266	16281	0.21	0.44
GCEG	344	0.46	0.03	16270	16276	16291	0.64	4.16
Kw-E	2289	5.05	3.16	16242	16248	16263	0.14	0.53
η = 1000 β = 1,75								
W	2009	-	2.56	15998	16002	16011	0.11	0.68
CEG	445	-	0.02	16025	16029	16039	1.35	0.70
EE	673	-	7.57	16003	16007	16017	0.77	11.83
GE	1286	-	0.72	16970	16974	16984	0.01	139.92
CWG	2690	4.21	3.33	15974	15980	15995	0.10	0.02
EW	1430	2.28	1.70	15971	15977	15992	0.12	0.10
ECEG	614	3.37	0.27	15993	15999	16014	5.08	9.34
GW	1666	0.62	2.56	15998	16004	16018	0.11	0.68
GCEG	298	0.46	0.01	16007	16013	16028	0.90	6.87
Kw-E	2260	7.22	3.77	15972	15978	15993	0.26	0.81
η = 1000 β = 2,0								
W	1988	-	2.88	15779	15783	15793	0.02	1.84
CEG	385	-	0.01	15794	15798	15808	1.31	1.28
EE	595	-	10.3	15785	15789	15799	0.89	13.27
GE	1281	-	0.72	16960	16964	16974	0.01	170.41
CWG	2763	6.55	3.97	15747	15753	15768	0.28	0.33
EW	1422	2.45	1.86	15744	15750	15765	0.13	0.32
ECEG	514	3.61	0.19	15756	15762	15776	0.43	5.33
GW	1700	0.64	2.88	15779	15785	15800	0.02	1.84
GCEG	261	0.46	0.01	15776	15782	15797	0.07	6.55
Kw-E	2222	10.2	4.41	15746	15752	15767	0.10	0.38

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 1500 β = 0,5								
W	4780	-	0.72	19174	19178	19188	1.90	12.01
CEG	16606	-	5.98	19151	19155	19165	0.56	0.98
EE	8457	-	0.62	19227	19231	19241	1.14	20.04
GE	7475	-	1.25	19398	19402	19412	0.01	36.52
CWG	13749	4.34	0.94	19149	19155	19170	0.13	0.06
EW	1622	2.11	0.50	19150	19156	19171	0.30	5.40
ECEG	15898	0.92	4.98	19149	19155	19170	0.07	0.18
GW	6913	1.31	0.72	19174	19180	19195	1.90	12.01
GCEG	13517	0.89	5.64	19150	19156	19171	0.07	0.08
Kw-E	302858	18.0	0.71	19179	19185	19200	1.45	13.24
η = 1500 β = 0,8								
W	3613	-	1.19	18216	18220	18230	0.27	4.87
CEG	2537	-	0.55	18231	18235	18245	0.60	3.84
EE	2736	-	1.42	18203	18207	18217	0.10	3.75
GE	4951	-	1.46	18262	18266	18276	0.01	12.21
CWG	6172	3.32	1.49	18200	18206	18221	0.17	0.38
EW	2161	1.83	0.87	18200	18206	18221	0.05	0.05
ECEG	2965	1.62	1.38	18200	18206	18221	0.01	0.65
GW	1774	0.43	1.19	18216	18222	18236	0.27	4.87
GCEG	461	0.15	0.39	18203	18209	18224	0.13	0.84
Kw-E	3827	1.43	1.36	18204	18210	18225	0.07	3.84
η = 1500 β = 1,0								
W	3326	-	1.47	17808	17812	17822	0.26	1.83
CEG	1568	-	0.23	17840	17844	17854	0.57	0.89
EE	1982	-	2.05	17805	17809	17818	0.18	4.74
GE	4479	-	1.49	18014	18018	18028	0.01	41.56
CWG	4339	2.04	1.69	17802	17808	17822	0.11	0.21
EW	2590	1.46	1.20	17801	17807	17822	0.02	0.22
ECEG	1889	1.84	0.79	17804	17810	17824	0.16	2.74
GW	1957	0.46	1.47	17808	17814	17829	0.26	1.83
GCEG	776	0.39	0.21	17829	17835	17850	0.45	3.73
Kw-E	3661	2.11	1.82	17802	17808	17823	0.02	1.44
η = 1500 β = 1,1								
W	3246	-	1.64	17614	17618	17628	0.33	2.29
CEG	1259	-	0.14	17646	17650	17660	1.53	3.24
EE	1598	-	0.29	20354	20358	20368	78.19	39.55
GE	1580	-	0.55	17942	17946	17956	0.01	55.35
CWG	4515	2.65	1.98	17600	17606	17621	1.11	0.14
EW	2171	1.90	1.18	17596	17602	17617	0.10	0.01
ECEG	1355	1.25	0.24	17619	17625	17640	0.80	2.15
GW	2058	0.47	1.64	17614	17620	17635	0.33	2.30
GCEG	658	0.39	0.11	17617	17623	17638	0.27	1.92
Kw-E	2516	1.68	2.35	17596	17602	17617	0.02	0.79

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 1500 β = 1,25								
W	3155	-	1.85	17389	17393	17403	0.30	1.39
CEG	1046	-	0.09	17434	17438	17448	1.60	0.80
EE	1521	-	0.29	20366	20370	20380	78.50	32.62
GE	695	-	0.25	17870	17874	17884	0.01	75.67
CWG	4426	3.31	2.33	17369	17375	17390	0.19	0.56
EW	2240	1.85	1.34	17373	17379	17394	0.14	0.29
ECEG	909	0.66	0.03	17516	17522	17536	3.43	0.85
GW	4412	1.86	1.85	17389	17395	17410	0.30	1.39
GCEG	581	0.41	0.06	17399	17405	17420	0.77	3.08
Kw-E	2429	2.04	2.80	17375	17381	17396	0.05	1.90
η = 1500 β = 1,5								
W	3065	-	2.21	17066	17070	17080	0.19	0.18
CEG	850	-	0.05	17099	17103	17112	2.86	3.55
EE	1442	-	0.29	20420	20424	20434	78.98	21.90
GE	676	-	0.25	17809	17813	17823	0.01	108.25
CWG	4243	3.94	2.86	17035	17041	17056	0.28	0.18
EW	2015	2.38	1.45	17033	17039	17054	0.23	0.21
ECEG	671	0.65	0.01	17174	17180	17195	2.45	1.32
GW	4203	2.01	2.21	17066	17072	17086	0.19	0.18
GCEG	480	0.42	0.02	17055	17061	17076	0.33	3.60
Kw-E	2372	2.94	3.67	17034	17040	17054	0.02	0.26
η = 1500 β = 1,75								
W	3015	-	2.57	16806	16810	16820	0.16	0.45
CEG	769	-	0.03	16877	16881	16891	4.83	14.00
EE	1000	-	7.76	16803	16807	16817	0.68	10.85
GE	1738	-	0.65	17782	17786	17795	0.01	139.88
CWG	4149	4.95	3.42	16774	16780	16795	0.01	0.51
EW	2522	1.59	2.03	16784	16790	16804	0.84	0.81
ECEG	868	3.07	0.23	16787	16793	16808	0.28	4.07
GW	4055	2.14	2.57	16806	16812	16827	0.16	0.45
GCEG	421	0.43	0.01	16812	16818	16833	0.07	6.43
Kw-E	3506	7.57	3.71	16781	16787	16801	0.37	2.91
η = 1500 β = 2,0								
W	2982	-	2.91	16589	16593	16603	0.06	1.11
CEG	583	-	0.01	16617	16621	16631	1.02	2.18
EE	912	-	10.6	16626	16630	16640	1.02	15.64
GE	4066	-	1.53	17771	17775	17785	0.01	170.61
CWG	3759	3.61	3.70	16569	16575	16589	0.05	0.08
EW	2412	1.83	2.14	16570	16576	16591	0.06	0.33
ECEG	753	3.06	0.14	16588	16594	16609	0.59	4.78
GW	3959	2.28	2.91	16589	16595	16609	0.06	1.11
GCEG	387	0.44	0.01	16614	16620	16635	0.58	9.67
Kw-E	3476	11.0	4.32	16571	16577	16592	0.19	0.02

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 2000 β = 0,5								
W	6390	-	0.72	19755	19759	19769	1.95	12.22
CEG	22295	-	6.06	19729	19733	19743	0.84	1.18
EE	11231	-	0.62	19809	19813	19823	1.10	20.22
GE	3079	-	0.38	19975	19979	19989	0.01	36.45
CWG	18315	4.30	0.94	19727	19733	19748	0.53	0.53
EW	2228	2.08	0.50	19726	19732	19747	0.37	3.75
ECEG	21678	0.95	5.42	19728	19734	19749	0.43	0.63
GW	1661	0.38	0.72	19755	19761	19776	1.95	12.22
GCEG	15004	0.80	5.47	19727	19733	19748	0.20	1.07
Kw-E	92329	5.83	0.70	19770	19776	19790	0.08	15.39
η = 2000 β = 0,8								
W	4844	-	1.21	18780	18784	18794	0.35	6.43
CEG	2431	-	0.23	18851	18855	18865	1.67	19.44
EE	3501	-	0.58	19451	19455	19465	47.21	23.94
GE	2447	-	0.54	18838	18842	18852	0.01	12.21
CWG	9442	4.67	1.59	18758	18764	18779	0.90	0.09
EW	2623	2.05	0.85	18756	18762	18777	0.03	1.39
ECEG	3711	1.54	1.14	18759	18765	18780	0.02	3.61
GW	6337	1.38	1.21	18780	18786	18801	0.35	6.43
GCEG	491	0.13	0.24	18758	18764	18779	0.07	2.50
Kw-E	15370	5.03	1.30	18770	18776	18791	0.24	6.70
η = 2000 β = 1,0								
W	4437	-	1.48	18374	18378	18388	0.29	2.36
CEG	2050	-	0.22	18405	18409	18418	1.09	2.25
EE	2604	-	2.10	18366	18370	18379	0.15	3.56
GE	2222	-	0.56	18589	18593	18603	0.01	41.50
CWG	6385	2.72	1.79	18363	18369	18384	0.04	0.03
EW	3176	1.64	1.14	18363	18369	18384	0.05	0.15
ECEG	2519	2.04	0.90	18365	18371	18386	0.06	1.72
GW	5804	1.49	1.48	18374	18380	18395	0.29	2.36
GCEG	970	0.37	0.19	18381	18387	18401	1.06	1.83
Kw-E	5097	2.27	1.84	18364	18370	18384	0.02	0.11
η = 2000 β = 1,1								
W	4329	-	1.64	18180	18184	18194	0.34	2.64
CEG	1648	-	0.14	18206	18210	18220	1.46	4.28
EE	2211	-	2.71	18159	18163	18173	0.21	2.93
GE	368	-	0.10	18516	18520	18530	0.01	55.39
CWG	6038	2.72	1.99	18167	18173	18188	0.73	0.35
EW	2780	2.03	1.16	18156	18162	18177	0.02	0.64
ECEG	2076	2.27	0.70	18156	18162	18177	0.03	0.14
GW	5646	1.55	1.64	18180	18186	18201	0.34	2.64
GCEG	794	0.34	0.10	18180	18186	18201	0.45	3.36
Kw-E	14324	11.9	1.86	18165	18171	18185	0.15	3.01

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 2000 β = 1,25								
W	4205	-	1.85	17967	17971	17981	0.28	1.30
CEG	1398	-	0.09	18011	18015	18025	1.31	0.54
EE	2043	-	0.29	20921	20925	20935	78.33	32.05
GE	2011	-	0.54	18445	18449	18459	0.01	75.73
CWG	5502	2.48	2.22	17954	17960	17975	0.61	0.25
EW	3065	1.78	1.37	17955	17961	17975	0.02	0.18
ECEG	1246	0.71	0.04	18072	18078	18093	2.84	0.58
GW	2675	0.43	1.85	17967	17973	17988	0.28	1.30
GCEG	775	0.40	0.07	17988	17994	18009	0.11	5.61
Kw-E	14029	16.8	2.10	17959	17965	17979	0.16	0.99
η = 2000 β = 1,5								
W	4085	-	2.21	17648	17652	17662	0.20	0.43
CEG	1084	-	0.04	17690	17694	17704	1.52	0.64
EE	1927	-	0.29	20982	20986	20995	78.92	21.65
GE	1951	-	0.54	18383	18387	18397	0.01	108.29
CWG	5237	2.81	2.71	17629	17635	17650	0.05	0.54
EW	3192	1.71	1.66	17633	17639	17654	0.06	0.59
ECEG	970	0.71	0.02	17746	17752	17767	3.62	1.04
GW	5278	1.76	2.21	17648	17654	17669	0.20	0.43
GCEG	642	0.41	0.03	17663	17669	17684	0.31	6.28
Kw-E	13553	31.0	2.54	17638	17644	17659	0.03	0.84
η = 2000 β = 1,75								
W	4016	-	2.55	17386	17390	17400	0.08	0.81
CEG	882	-	0.02	17405	17409	17418	1.33	0.01
EE	1354	-	7.47	17395	17399	17409	0.83	12.36
GE	169	-	0.05	18356	18360	18370	0.00	139.86
CWG	5211	3.51	3.23	17364	17370	17385	0.15	0.49
EW	3036	2.01	1.80	17360	17366	17381	0.26	0.10
ECEG	1184	3.34	0.27	17371	17377	17392	0.36	5.23
GW	5141	1.88	2.55	17386	17392	17407	0.08	0.81
GCEG	563	0.44	0.01	17392	17398	17412	0.21	5.12
Kw-E	11323	40.4	3.05	17368	17374	17389	0.02	0.59
η = 2000 β = 2,0								
W	3980	-	2.92	17162	17166	17176	0.09	0.95
CEG	799	-	0.01	17197	17201	17211	1.17	4.51
EE	1848	-	0.29	21062	21066	21076	79.42	0.61
GE	855	-	0.24	18348	18352	18362	0.01	170.67
CWG	4774	2.74	3.53	17146	17152	17167	0.37	0.05
EW	3072	2.06	2.02	17143	17149	17164	0.01	0.03
ECEG	808	1.11	0.02	17187	17193	17208	0.65	2.56
GW	5035	1.98	2.92	17162	17168	17183	0.09	0.95
GCEG	515	0.43	0.01	17202	17208	17223	0.87	11.12
Kw-E	11501	2.07	3.46	17150	17156	17170	0.10	0.15

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 2500 β = 0,5								
W	8058	-	0.73	20213	20217	20227	1.85	13.26
CEG	26354	-	5.57	20190	20194	20204	0.88	1.33
EE	8122	-	0.58	20541	20545	20555	44.44	54.73
GE	250000	-	0.00	58481	58485	58495	100.00	100.00
CWG	22736	4.30	0.95	20189	20195	20209	0.03	1.23
EW	2327	2.35	0.48	20185	20191	20206	0.63	6.10
ECEG	26423	0.96	5.25	20190	20196	20210	0.14	0.45
GW	9219	.10	0.73	20213	20219	20234	1.85	13.27
GCEG	18220	0.80	5.18	20189	20195	20210	0.27	2.58
Kw-E	26709	1.79	0.66	20248	20254	20269	1.53	20.58
η = 2500 β = 0,8								
W	6023	-	1.19	19238	19242	19252	0.29	4.80
CEG	4247	-	0.55	19255	19259	19268	0.65	3.66
EE	4357	-	0.58	19887	19891	19901	47.44	24.29
GE	51	-	0.01	19285	19289	19298	0.95	8.96
CWG	10704	3.66	1.51	19219	19225	19240	0.18	0.01
EW	3396	1.94	0.85	19220	19226	19241	0.01	0.85
ECEG	5022	1.67	1.48	19220	19226	19241	0.01	0.09
GW	7361	1.27	1.19	19238	19244	19259	0.29	4.93
GCEG	583	0.12	0.29	19226	19232	19247	0.01	0.14
Kw-E	20576	5.17	1.26	19232	19238	19252	0.21	4.76
η = 2500 β = 1,0								
W	5541	-	1.47	18824	18828	18838	0.26	2.21
CEG	2565	-	0.22	18851	18855	18865	0.98	2.27
EE	3277	-	2.07	18818	18822	18832	0.18	4.00
GE	455	-	0.09	19035	19039	19048	0.01	41.32
CWG	7522	2.28	1.73	18817	18823	18838	0.14	0.19
EW	4115	1.56	1.16	18815	18821	18836	0.01	0.07
ECEG	3047	1.78	0.71	18816	18822	18837	0.05	0.89
GW	6834	1.36	1.47	18824	18830	18845	0.26	2.21
GCEG	1181	0.35	0.18	18832	18838	18853	0.22	2.88
Kw-E	5169	1.75	1.89	18816	18822	18837	0.03	1.18
η = 2500 β = 1,1								
W	5399	-	1.62	18647	18651	18661	0.22	1.70
CEG	2118	-	0.15	18672	18676	18686	1.15	2.44
EE	2880	-	2.50	18648	18652	18661	0.36	6.41
GE	1619	-	0.34	18963	18967	18976	0.01	55.43
CWG	7041	2.18	1.89	18642	18648	18662	0.27	0.01
EW	4185	1.53	1.30	18638	18644	18659	0.02	0.21
ECEG	2526	1.80	0.49	18638	18644	18659	0.11	0.74
GW	6622	1.39	1.62	18647	18653	18668	0.22	1.70
GCEG	1086	0.38	0.11	18654	18660	18674	0.05	3.35
Kw-E	5170	2.14	2.17	18639	18645	18660	0.08	1.47

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 2500 β = 1,25								
W	5264	-	1.86	18398	18402	18412	0.32	1.64
CEG	1692	-	0.08	18431	18435	18445	1.80	2.83
EE	2348	-	3.60	18374	18378	18388	0.31	4.93
GE	1615	-	0.35	18893	18897	18907	0.01	75.85
CWG	8205	4.89	2.47	18373	18379	18394	0.41	0.73
EW	3583	2.00	1.30	18370	18376	18390	0.34	0.73
ECEG	2158	2.60	0.56	18370	18376	18391	0.11	1.24
GW	6423	1.45	1.86	18398	18404	18419	0.32	1.64
GCEG	907	0.38	0.06	18395	18401	18416	0.29	3.08
Kw-E	5172	2.99	2.67	18369	18375	18390	0.47	1.51
η = 2500 β = 1,5								
W	5105	-	2.21	18091	18095	18105	0.22	0.45
CEG	1584	-	0.06	18158	18162	18172	3.08	14.07
EE	1963	-	5.16	18092	18096	18105	0.59	9.80
GE	1612	-	0.36	18829	18833	18843	0.01	108.21
CWG	6978	3.75	2.83	18070	18076	18091	0.05	0.20
EW	3779	1.91	1.58	18072	18078	18092	0.08	0.72
ECEG	1726	2.76	0.35	18079	18085	18100	0.29	3.75
GW	6239	1.56	2.21	18091	18097	18112	0.22	0.45
GCEG	837	0.43	0.03	18106	18112	18126	0.28	6.31
Kw-E	5190	4.37	3.27	18072	18078	18093	0.08	0.37
η = 2500 β = 1,75								
W	5011	-	2.56	17833	17837	17846	0.11	0.52
CEG	1112	-	0.02	17859	17863	17873	1.24	0.61
EE	1702	-	7.31	17850	17854	17864	0.84	12.89
GE	1610	-	0.36	18799	18803	18812	0.01	139.29
CWG	6588	3.77	3.26	17813	17819	17834	0.15	0.19
EW	3755	2.04	1.78	17812	17818	17833	0.03	0.02
ECEG	1340	1.94	0.10	17823	17829	17844	0.16	2.92
GW	3496	0.40	2.56	17833	17839	17853	0.11	0.52
GCEG	807	0.53	0.01	17845	17851	17866	0.01	4.55
Kw-E	5208	6.38	3.88	17812	17818	17833	0.07	0.07
η = 2500 β = 2,0								
W	4973	-	2.91	17612	17616	17626	0.04	1.15
CEG	971	-	0.01	17637	17641	17651	1.06	2.17
EE	2308	-	0.29	21508	21512	21522	79.44	0.63
GE	83	-	0.02	18794	18798	18808	0.01	170.79
CWG	5956	2.64	3.53	17594	17600	17614	0.25	0.05
EW	4092	1.76	2.18	17595	17601	17615	0.02	0.25
ECEG	814	0.60	0.01	17706	17712	17726	2.57	5.08
GW	5996	1.72	2.91	17612	17618	17633	0.04	1.15
GCEG	632	0.42	0.01	17633	17639	17654	0.79	9.71
Kw-E	14685	74.3	3.44	17600	17606	17621	0.04	0.20

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 3000 β = 0,5								
W	11123	-	0.72	20860	20864	20874	1.49	10.83
CEG	37979	-	5.80	20858	20862	20872	0.62	0.13
EE	19979	-	0.61	20905	20909	20919	1.04	19.39
GE	1000	-	0.01	56648	56652	56662	100.00	100.00
CWG	24319	2.83	0.87	20849	20855	20870	0.38	2.56
EW	5539	1.65	0.55	20849	20855	20869	0.23	0.42
ECEG	34529	0.83	3.93	20849	20855	20869	0.56	1.71
GW	10564	0.96	0.72	20860	20866	20881	1.49	10.83
GCEG	26888	0.82	5.31	20857	20863	20877	0.15	1.87
Kw-E	129363	4.67	0.69	20878	20884	20898	5.80	11.16
η = 3000 β = 0,8								
W	241	-	1.18	12801	12805	12815	0.27	4.68
CEG	170	-	0.55	12817	12821	12831	0.54	3.60
EE	158	-	0.47	13855	13859	13869	59.48	35.41
GE	701	-	3.09	12847	12851	12861	0.01	12.22
CWG	335	2.03	1.37	12789	12795	12810	0.30	2.30
EW	209	1.21	1.09	12793	12799	12814	0.08	5.38
ECEG	176	1.10	0.67	12806	12812	12827	0.33	2.79
GW	515	2.46	1.18	12801	12807	12822	0.27	4.68
GCEG	38	0.18	0.45	12796	12802	12817	3.93	5.33
Kw-E	185	1.01	1.41	12789	12795	12809	0.08	3.32
η = 3000 β = 1,0								
W	7759	-	1.48	19495	19499	19509	0.26	2.31
CEG	3558	-	0.22	19520	19524	19534	1.14	2.86
EE	4574	-	2.09	19488	19492	19502	0.17	3.78
GE	250	-	0.04	19707	19711	19721	0.01	41.35
CWG	10854	2.48	1.76	19487	19493	19507	0.25	0.01
EW	5742	1.58	1.16	19485	19491	19506	0.17	0.07
ECEG	4242	1.77	0.69	19486	19492	19506	0.03	0.60
GW	8641	1.17	1.48	19495	19501	19516	0.26	2.31
GCEG	1531	0.32	0.17	19499	19505	19520	0.05	2.90
Kw-E	26600	8.98	1.62	19488	19494	19509	0.12	1.66
η = 3000 β = 1,1								
W	7556	-	1.63	19316	19320	19329	0.23	1.90
CEG	2929	-	0.14	19337	19341	19351	1.45	3.36
EE	3734	-	0.29	22033	22037	22047	78.15	39.46
GE	250	-	0.04	19635	19639	19648	0.01	55.29
CWG	10379	2.58	1.94	19308	19314	19328	0.19	0.36
EW	5653	1.62	1.27	19304	19310	19325	0.00	0.41
ECEG	3149	1.29	0.24	19312	19318	19333	0.73	2.82
GW	8458	1.20	1.63	19316	19322	19336	0.23	1.90
GCEG	1495	0.38	0.11	19312	19318	19333	0.05	2.12
Kw-E	20564	8.56	1.85	19305	19311	19326	0.26	0.84

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 3000 β = 1,25								
W	7368	-	1.85	19088	19092	19101	0.28	1.31
CEG	2446	-	0.09	19132	19136	19145	1.36	0.56
EE	3550	-	0.29	22062	22066	22076	78.51	32.57
GE	250	-	0.04	19567	19571	19581	0.01	75.85
CWG	10285	3.23	2.31	19073	19079	19094	0.16	0.14
EW	5379	1.78	1.38	19075	19081	19095	0.03	0.11
ECEG	2545	1.14	0.12	19115	19121	19136	0.84	0.27
GW	8219	1.22	1.85	19088	19094	19108	0.28	1.31
GCEG	1268	0.36	0.06	19106	19112	19127	0.13	6.14
Kw-E	20564	12.9	2.14	19078	19084	19099	0.15	0.86
η = 3000 β = 1,5								
W	7147	-	2.21	18784	18788	18798	0.09	0.22
CEG	1903	-	0.04	18815	18819	18829	0.66	1.12
EE	3393	-	0.29	22080	22084	22094	78.81	21.17
GE	250	-	0.04	19504	19508	19518	0.01	108.49
CWG	7973	1.53	2.41	18782	18788	18803	0.05	0.02
EW	6416	1.29	1.92	18781	18787	18802	0.09	0.01
ECEG	1964	1.11	0.05	18807	18813	18828	0.39	1.28
GW	8064	1.31	2.21	18784	18790	18805	0.09	0.22
GCEG	1527	0.65	0.04	18813	18819	18833	0.00	3.68
Kw-E	20477	23.4	2.58	18781	18787	18802	0.01	0.14
η = 3000 β = 1,75								
W	7024	-	2.56	18508	18512	18522	0.09	0.63
CEG	1562	-	0.02	18534	18538	18547	1.23	0.91
EE	2397	-	7.22	18530	18534	18544	0.90	13.51
GE	250	-	0.04	19474	19478	19488	0.01	139.62
CWG	9139	3.56	3.23	18491	18497	18511	0.13	0.43
EW	5338	1.98	1.81	18488	18494	18509	0.00	0.00
ECEG	1853	1.97	0.10	18498	18504	18518	0.03	1.64
GW	4362	0.30	2.56	18508	18514	18529	0.09	0.63
GCEG	974	0.41	0.01	18525	18531	18546	0.64	8.74
Kw-E	20166	40.6	3.02	18494	18500	18514	0.09	0.06
η = 3000 β = 2,0								
W	6954	-	2.90	18287	18291	18300	0.02	1.23
CEG	1353	-	0.01	18306	18310	18320	0.93	1.69
EE	2146	-	9.92	18331	18335	18345	1.09	16.44
GE	46	-	0.01	19465	19469	19478	2.60	152.37
CWG	8041	2.09	3.36	18273	18279	18294	0.58	1.23
EW	5690	1.78	2.16	18269	18275	18290	0.00	0.11
ECEG	1827	3.49	0.19	18291	18297	18311	0.84	7.01
GW	4551	0.29	2.90	18287	18293	18307	0.02	1.23
GCEG	886	0.42	0.01	18312	18318	18332	1.59	10.95
Kw-E	19207	64.2	3.48	18274	18280	18294	0.18	0.05

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 5000 β = 0,5								
W	15981	-	0.72	21584	21588	21598	1.63	11.89
CEG	1000	-	0.01	53075	53079	53089	100.00	100.00
EE	28203	-	0.61	21632	21636	21645	1.04	20.08
GE	2500	-	0.00	58481	58485	58495	100.00	100.00
CWG	38593	3.30	0.90	21569	21575	21590	0.53	2.09
EW	9079	1.53	0.58	21569	21575	21590	0.55	3.71
ECEG	50253	0.87	4.27	21569	21575	21590	0.54	1.42
GW	2521	0.26	0.72	21584	21590	21604	1.63	11.89
GCEG	40306	0.85	5.24	21573	21579	21594	0.08	2.22
Kw-E	52238	1.73	0.65	21616	21622	21637	1.52	19.94
η = 5000 β = 0,8								
W	12094	-	1.20	20615	20619	20629	0.34	6.16
CEG	8080	-	0.50	20632	20636	20645	0.93	6.37
EE	8874	-	1.49	20596	20600	20610	0.16	5.73
GE	1824	-	0.16	20670	20674	20684	0.01	12.13
CWG	23592	4.68	1.59	20591	20597	20612	0.69	0.01
EW	6446	2.08	0.84	20591	20597	20612	0.03	0.81
ECEG	9709	1.72	1.43	20592	20598	20613	0.07	40.30
GW	3437	0.22	1.20	20615	20621	20635	0.34	6.16
GCEG	1400	0.14	0.27	20595	20601	20616	0.01	2.68
Kw-E	37440	4.91	1.30	20605	20611	20626	0.11	7.09
η = 5000 β = 1,0								
W	11094	-	1.48	20204	20208	20218	0.31	2.56
CEG	5122	-	0.22	20236	20240	20250	1.05	2.34
EE	5614	-	0.29	22738	22742	22752	77.83	44.06
GE	250	-	0.03	20421	20425	20435	0.01	41.38
CWG	15767	2.63	1.78	20194	20200	20214	0.09	0.26
EW	7621	1.74	1.11	20192	20198	20213	0.02	0.30
ECEG	5960	1.64	0.61	20195	20201	20216	0.00	0.39
GW	10715	0.95	1.48	20204	20210	20225	0.31	2.56
GCEG	1840	0.26	0.15	20211	20217	20232	0.04	4.68
Kw-E	26490	5.62	1.67	20195	20201	20215	0.31	0.86
η = 5000 β = 1,1								
W	10818	-	1.63	20027	20031	20041	0.34	2.09
CEG	4325	-	0.16	20070	20074	20084	1.28	1.30
EE	5638	-	2.61	20015	20019	20029	0.19	4.47
GE	98	-	0.01	20349	20353	20363	0.47	52.95
CWG	15825	3.25	2.03	20010	20016	20031	0.23	0.21
EW	7231	1.90	1.17	20012	20018	20032	0.09	0.65
ECEG	5402	2.30	0.78	20014	20020	20034	0.11	2.62
GW	10641	0.97	1.63	20027	20033	20048	0.34	2.10
GCEG	1328	0.21	0.07	20030	20036	20051	0.05	8.93
Kw-E	32289	9.80	1.83	20017	20023	20038	0.43	1.55

Продолжение таблицы А.1 – Параметры моделей-кандидатов

Модель	Параметры			Параметры качества модели			Погрешность	
	p1	p2	p3	-2Λ	AIC	BIC	ΔM, %	Δσ, %
η = 5000 β = 1,25								
W	10518	-	1.85	19801	19805	19815	0.23	1.19
CEG	3440	-	0.09	19832	19836	19846	1.25	1.59
EE	4874	-	3.32	19803	19807	19817	0.49	8.21
GE	96	-	0.01	20280	20284	20294	0.38	73.49
CWG	14022	2.66	2.23	19793	19799	19813	0.35	0.22
EW	7890	1.70	1.40	19789	19795	19810	0.01	0.01
ECEG	4271	2.22	0.45	19792	19798	19813	0.24	1.97
GW	10548	1.01	1.85	19801	19807	19822	0.23	1.19
GCEG	2130	0.46	0.07	19815	19821	19836	0.11	3.34
Kw-E	35155	16.9	2.10	19792	19798	19812	0.12	0.98
η = 5000 β = 1,5								
W	10212	-	2.21	19480	19484	19494	0.17	0.26
CEG	2674	-	0.04	19513	19517	19527	1.58	0.29
EE	2500000	-	0.01	70007	70011	70021	100.00	100.00
GE	250	-	0.03	20216	20220	20230	0.01	108.47
CWG	13986	3.78	2.83	19459	19465	19480	0.03	0.04
EW	7578	1.91	1.59	19462	19468	19483	0.02	0.05
ECEG	2237	0.59	0.01	19612	19618	19632	3.69	1.66
GW	4371	0.15	2.21	19480	19486	19501	0.17	0.26
GCEG	1628	0.42	0.03	19485	19491	19506	0.13	5.37
Kw-E	34098	31.3	2.54	19468	19474	19489	0.17	0.62
η = 5000 β = 1,75								
W	10021	-	2.55	19216	19220	19230	0.13	0.57
CEG	2230	-	0.02	19246	19250	19260	1.33	0.80
EE	3373	-	7.30	19220	19224	19234	0.09	11.84
GE	94	-	0.01	20184	20188	20198	0.33	136.34
CWG	13451	4.20	3.31	19192	19198	19213	0.10	0.44
EW	7267	2.20	1.74	19190	19196	19211	0.08	0.60
ECEG	2887	2.94	0.22	19201	19207	19221	0.37	4.21
GW	10333	1.08	2.55	19216	19222	19237	0.13	0.57
GCEG	1549	0.50	0.01	19228	19234	19249	0.00	5.29
Kw-E	33709	35.6	2.62	19224	19230	19244	0.50	10.30
η = 5000 β = 2,0								
W	9942	-	2.91	19000	19004	19014	0.03	1.02
CEG	1943	-	0.01	19025	19029	19039	0.80	2.18
EE	2500000	-	0.01	70071	70075	70085	100.00	100.00
GE	250	-	0.03	20180	20184	20193	0.01	170.57
CWG	11968	2.68	3.53	18988	18994	19008	0.39	0.34
EW	8312	1.69	2.23	18987	18993	19007	0.05	0.33
ECEG	1539	0.53	0.00	19109	19115	19129	2.76	5.74
GW	10295	1.11	2.91	19000	19006	19021	0.03	1.02
GCEG	1571	0.62	0.01	19021	19027	19042	0.13	5.49
Kw-E	33017	74.1	3.17	18997	19003	19018	0.96	4.92

Приложение Б (обязательное)

Таблица Б.1 – Результаты выбора моделей для выборок

η	$\beta = 0.5$				$\beta = 0.8$			
100	GCEG:	740	0.80	5.30	CWG:	335	2.03	1.37
	CEG:	1091	-	5.86	ECEG:	176	1.10	0.67
	ECEG:	1043	0.92	4.88	KwE:	185	1.01	1.41
200	ECEG:	1938	0.91	4.30	ECEG:	412	1.58	1.46
	CEG:	2110	-	5.49	CWG:	686	2.17	1.36
	CWG:	1545	3.36	0.94	GCEG:	664	2.11	0.57
500	ECEG:	5035	4.46	0.89	ECEG:	974	1.19	1.45
	CWG:	4496	0.93	4.20	EW:	763	0.89	1.71
	GCEG:	4023	5.52	0.83	CWG:	1838	1.42	2.53
750	CEG:	7818	-	5.47	EW:	1084	0.88	1.83
	ECEG:	7572	4.26	0.86	CWG:	3032	1.49	3.18
	CWG:	5756	0.89	3.29	EE:	1389	-	0.56
1000	EW:	1558	0.43	1.70	EW:	1924	1.00	1.30
	CEG:	1052	-	5.42	CWG:	3769	1.42	2.69
	ECEG:	33937	15.40	0.54	ECEG:	2012	2.34	1.24
1500	GCEG:	1356	5.64	0.89	EW:	2163	0.87	1.83
	CWG:	1371	0.94	4.34	CWG:	6175	1.49	3.32
	CEG:	16241	-	5.73	GCEG:	294	0.20	0.09
2000	CWG:	1831	0.94	4.30	CWG:	9441	1.59	4.67
	ECEG:	20249	4.25	0.85	EW:	2893	0.88	1.83
	CEG:	21978	-	6.01	GCEG:	5	0.24	0.13
2500	EW:	3541	2.03	0.78	CWG:	10704	1.51	3.66
	CWG:	22735	0.95	4.30	ECEG:	5022	1.48	1.67
	CEG:	25241	-	2.07	GCEG:	583	0.29	0.12
3000	GCEG:	3831	3.56	1.22	EW:	5211	3.64	0.36
	CEG:	1657	3.66	5.11	CWG:	10310	1.37	0.99
	EW:	5546	0.55	1.65	ECEG:	33937	15.40	0.54
5000	ECEG:	50314	5.44	9.11	CWG:	18770	1.41	2.63
	CWG:	38649	0.90	3.30	EW:	91	0.98	2.05
	GCEG:	40231	5.41	0.86	GCEG:	1902	0.42	0.19

Продолжение таблицы Б.1 - Результаты выбора моделей для выборок

η	$\beta = 1$				$\beta = 1.1$			
100	CWG:	306	1.75	2.39	CWG:	286	1.91	2.32
	ECEG:	120	0.65	1.71	Weibull:	218	-	1.63
	EW:	212	1.41	1.07	GCEG:	47	0.11	0.44
200	CWG:	618	1.75	2.45	EW:	345	1.33	1.49
	EW:	374	1.28	1.31	CWG:	562	1.90	2.19
	KwE:	437	1.90	1.89	KwE:	359	2.33	1.86
500	CWG:	1494	1.73	2.29	CWG:	1398	1.89	2.21
	KwE:	966	1.96	1.64	KwE:	1246	2.12	2.77
	EW:	806	1.15	1.60	EW:	839	1.31	1.54
750	CWG:	2643	1.89	3.69	CWG:	2653	2.17	4.75
	EW:	1201	1.15	1.64	EW:	1152	1.22	1.73
	KwE:	14	1.97	2.08	KwE:	1811	2.11	2.63
1000	CWG:	3263	1.81	2.90	CWG:	3494	2.11	4.09
	EW:	1743	1.21	1.44	EW:	1369	1.14	2.05
	KwE:	2537	1.85	2.27	KwE:	6147	0.78	4.77
1500	EW:	2593	1.19	1.46	EW:	2171	1.18	1.89
	CEG:	4105	1.63	1.75	CWG:	4544	1.98	2.79
	CWG:	4105	1.62	1.75	KwE:	3621	2.13	2.66
2000	CWG:	6134	1.74	2.43	CWG:	6413	2.05	3.35
	EW:	3183	2.64	1.22	EW:	2782	0.08	1.31
	KwE:	14528	1.61	8.31	ECEG:	2083	0.70	2.27
2500	EW:	3928	1.13	2.03	CWG:	7042	1.89	2.18
	CWG:	7521	1.72	2.28	EW:	3064	1.07	3.21
	ECEG:	3052	0.75	1.77	ECEG:	2534	0.49	1.80
3000	EW:	5875	1.17	1.52	EW:	5565	1.27	1.62
	CWG:	10901	1.76	2.48	CWG:	11714	2.10	3.93
	ECEG:	4243	0.69	1.77	KwE:	20564	1.85	8.56
5000	CWG:	15767	1.78	2.63	CWG:	15346	1.99	2.89
	ECEG:	5959	0.61	1.64	EW:	7507	1.10	1.80
	EW:	6726	1.03	2.05	ECEG:	5271	0.79	2.45

Продолжение таблицы Б.1 - Результаты выбора моделей для выборок

η	$\beta = 1.25$				$\beta = 1.5$			
100	CWG:	266	2.17	2.25	CWG:	280	2.76	5.30
	EW:	183	1.60	1.31	EW:	176	1.84	1.40
	KwE:	140	3.05	1.72	GW:	175	2.21	0.71
200	CWG:	518	2.12	2.04	Weibull:	408	-	2.21
	GW:	343	1.84	0.69	CWG:	471	2.48	1.74
	Weibull:	428	-	1.81	GW:	344	2.21	0.69
500	CWG:	1291	2.12	1.97	Weibull:	1021	-	2.20
	KwE:	1247	2.48	3.70	GW:	840	2.21	0.65
	ECEG:	387	0.21	1.46	CWG:	1242	2.58	2.20
750	CWG:	2240	2.32	3.42	Weibull:	1530	-	2.20
	EW:	13	1.48	1.54	CWG:	2013	2.74	3.09
	ECEG:	6	0.32	1.83	GW:	1266	2.21	0.65
1000	CWG:	2763	2.21	2.53	Weibull:	2040	-	2.21
	EW:	1616	1.43	1.63	GW:	1616	2.21	0.60
	KwE:	6023	2.12	13.17	CWG:	2221	2.35	1.38
1500	EW:	2239	1.34	1.85	CWG:	4126.9	2.78	3.45
	CWG:	4426	2.33	3.31	EW:	2609.1	1.85	1.45
	KwE:	3573	2.56	3.56	GW:	4196.0	2.21	2.01
2000	EW:	3152	1.33	0.21	CWG:	5236	2.71	2.81
	CWG:	5321	2.16	2.22	EW:	5277	2.21	1.03
	KwE:	1416	-	0.09	Weibull:	4084	-	2.21
2500	CWG:	7132	2.26	2.87	CWG:	5929	2.48	1.81
	EW:	3871	1.38	1.75	GW:	3349	2.11	0.89
	ECEG:	2164	0.56	2.56	EW:	3985	1.66	1.72
3000	EW:	5379	1.38	1.78	EW:	5123	1.55	2.04
	CWG:	10285	2.31	3.23	CWG:	6415	1.92	1.53
	KwE:	20634	2.13	12.81	GW:	8061	2.19	1.30
5000	EW:	7	2.51	1.34	CWG:	13985	2.83	3.78
	CWG:	14301	2.26	2.89	Weibull:	10210	-	2.21
	KwE:	35146	2.09	16.89	KwE:	342	2.54	3.17

Продолжение таблицы Б.1 - Результаты выбора моделей для выборок

η	$\beta = 1.75$				$\beta = 2$			
100	EW:	165	1.97	1.67	EW:	171	2.31	1.58
	CWG:	240	3.03	2.37	CWG:	239	3.51	2.72
	Weibull	201	2.56	1.33	Weibull:	199	-	2.91
200	EW:	343	2.06	1.52	KwE:	464	1.74	2.71
	CWG:	463	2.93	1.96	EW:	336	2.26	1.64
	GW:	347	2.56	0.69	CWG:	444	3.33	1.79
500	EW:	7	1.74	2.14	EW:	863	2.33	1.52
	KwE:	721	4.63	3.50	CWG:	11054	3.11	1.35
	CWG:	1085	2.77	1.43	Weibull:	10	-	2.91
750	CWG:	1863	3.13	2.77	EW:	1241	2.21	1.71
	EW:	1206	1.91	1.75	CWG:	1695	3.32	1.96
	GW:	2120	2.56	2.40	Weibull:	15	-	2.91
1000	EW:	1431	1.70	2.28	KwE:	2236	4.38	10.15
	CWG:	2693	3.33	4.21	CWG:	2765	3.97	6.55
	KwE:	5632	3.03	38.90	EW:	1550	2.04	2.01
1500	CWG:	4151	3.42	4.95	EW:	2788	2.62	1.23
	EW:	2430	1.93	1.73	CWG:	3561	3.70	3.61
	GW:	4055	2.57	2.14	KwE:	35	4.32	11.00
2000	EW:	4	2.11	2.03	EW:	3071	2.02	1.37
	CWG:	5149	3.19	3.31	CWG:	4774	3.52	2.74
	KwE:	128	2.98	50.19	KwE:	11539	3.44	71.10
2500	EW:	3751	1.78	2.04	EW:	408	2.01	1.31
	CWG:	6591	3.26	3.77	CWG:	5955	3.53	2.64
	KwE:	5213	3.88	6.38	KwE:	4534	1.90	1.49
3000	EW:	5342	1.81	1.98	KwE:	19234	3.48	64.20
	KwE:	20210	3.04	2.11	EW:	5694	2.16	1.78
	CWG:	9147	3.23	3.26	Weibull:	2981	-	2.93
5000	CWG:	13561	3.31	4.20	EW:	8270	2.21	1.71
	EW:	8639	2.08	1.47	CWG:	11967	3.53	2.62
	GW:	10326	2.56	1.08	Weibull:	2981	-	2.93