

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине

**«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»**

для студентов направления подготовки
11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль: «Интеллектуальные программируемые системы
и устройства»)

**Ставрополь
2026**

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Северо-Кавказского федерального
университета

УДК
ББК

Рецензент:

Настоящие методические рекомендации предназначены для организации самостоятельной работы по дисциплине «Автоматизированные системы обеспечения надежности и качества электронных средств» для студентов очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических рекомендациях приведён план график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, представлены вопросы для обсуждения, а также задания и вопросы для формирования и контроля владения компетенциями и список основной литературы, рекомендуемой для самостоятельной работы. Представленный список дополнительной литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов Автоматизированные системы обеспечения надежности и качества электронных средств составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль Интеллектуальные программируемые системы и устройства, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Автоматизированные системы обеспечения надежности и качества электронных средств».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ».....	5
1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов.....	5
1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля.....	9
2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС.....	11
3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ.....	11
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА.....	12
4.1 Работа с литературой.....	12
4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего контроля.....	19
6 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	21
6.1 Основная литература.....	21

Введение

Современные стандарты подготовки специалистов предусматривают значительный объем внеаудиторной работы. Освоение программы курса предполагает получение как теоретических знаний по проблемам моделирования, так и формирование навыков практической работы. Поэтому самостоятельная работа в рамках курса ориентирована как на теоретический, так и на практический аспект.

Самостоятельная работа студентов - это выполнение теоретических и практических заданий студентами по усвоению изучаемой дисциплины «Автоматизированные системы обеспечения надежности и качества электронных средств».

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов

Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний, полученных студентами на лекциях, подготовке к текущим лабораторным и практическим занятиям, промежуточным формам контроля знаний и к итоговому контролю.

Дидактические цели самостоятельных занятий:

- формирование профессиональных умений;
- формирование умений и навыков самостоятельного умственного труда;
- мотивирование регулярной целенаправленной работы по освоению специальности;
- развитие самостоятельности мышления;
- формирование убежденности, волевых черт характера, способности к самоорганизации;
- овладение технологическим учебным инструментом.

Задача самостоятельной работы студентов - систематическое изучение дисциплин в течение семестра, закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовка к предстоящим занятиям, а также формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений, и, в том числе, формирование компетенций.

Основная тенденция инноваций в области образования определяется как переход от «научения к изучению»

Именно систематическое изучение учебной дисциплины позволяет студенту достигнуть уровня требований федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) к профессиональной подготовленности, которые сформулированы следующим образом: знать, уметь, владеть.

В современной науке существует несколько классификаций самостоятельной работы студентов. Один из вариантов такой классификации представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Виды самостоятельной работы студентов

Виды	Содержание
Репродуктивная	Повторение учебного материала, самостоятельный просмотр, прочтение, конспектирование учебной литературы; прослушивание, запоминание, заучивание и пересказ магнитофонных записей лекций, Интернет-ресурсы и др.
Познавательного-поисковая	Написание курсовых, контрольных работ и рефератов. Разработка сообщений, эссе, докладов, докладов с презентациями. Подготовка выступлений на практических и семинарских занятиях, проработка литературы по дисциплинарным проблемам, и др.
Творческая	Подготовка дипломной работы (дипломного проекта), научных статей, рефератов, участие в научно-исследовательской работе, в студенческих и научно-практических конференциях.

Студенты в ходе выполнения самостоятельной работы должны руководствоваться ориентировочной основой деятельности на каждом этапе:

- 1 этап - определить цели самостоятельной работы;
- 2 этап - конкретизировать познавательные (практические или проблемные) задачи;
- 3 этап - оценить собственную готовность к самостоятельной работе по решению познавательных задач;
- 4 этап - выбрать оптимальный способ действий (технологии, методы и средства), ведущий к достижению поставленной цели через решение конкретных задач;
- 5 этап - спланировать (самостоятельно или с помощью преподавателя) программу самостоятельной работы;

6 этап - реализовать программу самостоятельной работы.

Планирование и контроль преподавателем самостоятельной работы студентов необходим для успешного ее выполнения. Преподаватель заранее планирует систему самостоятельной работы, учитывает все ее цели, формы, отбирает учебную и научную информацию и методические средства коммуникаций, продумывает свое участие и роль студента в этом процессе.

Вопросы для самостоятельной работы студентов, указанные в рабочей программе дисциплины, предлагаются преподавателями в начале изучения дисциплины. Студенты имеют право выбирать дополнительно интересующие их темы для самостоятельной работы.

Содержание деятельности преподавателя и студента при выполнении самостоятельной работы представлено в табл. 2.

Таблица 2

Содержание деятельности при выполнении самостоятельной работы

Основные характеристики	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов
Цель выполнения СР	• объяснить смысл и цель самостоятельной работы; • дать подробный инструктаж о требованиях, предъявляемых к самостоятельной работе и методах ее выполнения; • продемонстрировать образец самостоятельной работы	• понять и принять цель самостоятельной работы как лично-значимую; • познакомиться с требованиями и образцами самостоятельной работы
Мотивация	• раскрыть теоретическую и практическую значимость выполнения самостоятельной работы, • сформировать познавательную потребность студента и готовность к выполнению самостоятельной работы; • мотивировать студента на достижение цели	• сформировать у себя познавательную потребность в выполнении самостоятельной работы; • сформировать целевую установку и принять решение о выполнении самостоятельной работы
Управление	• осуществлять управление через воздействие на каждом этапе процесса выполнения самостоятельной работы; • дать оптимальные технологии выполнения самостоятельной работы	самому осуществлять управление самостоятельной работой (проектировать, планировать, рационально распределять время и т.д.) на основе предложенных технологий

Продолжение таблицы 2

Основные характеристики	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов
Контроль и коррекция выполнения	• осуществлять входной контроль, предполагающий выявление начального уровня готовности студента к выполнению самостоятельной работы; • намечать дальнейшие пути выполнения самостоятельной работы; • осуществлять итоговый контроль конечного результата выполнения самостоятельной работы	• осуществлять текущий и итоговый операционный самоконтроль за ходом выполнения самостоятельной работы; • самоанализ и исправление допущенных ошибок и внесение корректив в работу; • ведение поиска оптимальных способов выполнения самостоятельной работы; • осуществлять рефлексию к собственной деятельности
Оценка	• давать оценку самостоятельной работе на основе сличения результата с образцом; • давать методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы выявлять затруднения и типичные ошибки; подчеркивать положительные и отрицательные стороны; • устанавливать уровень и определять уровень продвижения студента и тем самым сформировать у него мотивацию достижения успеха в учебной деятельности	дать оценку собственной работе, своим познавательным возможностям и способностям сопоставляя достигнутый результат с целью самостоятельной работы

Самостоятельная работа включает те разделы курса, которые не получили достаточного освещения на лекциях по причине ограниченности лекционного времени и большого объема изучаемого материала.

Методическое обеспечение самостоятельной работы состоит из:

- 1) Определения учебных вопросов, которые студенты должны изучить самостоятельно;
- 2) Подбора необходимой учебной литературы, обязательной для проработки и изучения;
- 3) Поиска дополнительной научной литературы, к которой студенты могут обращаться по желанию, если у них возникает интерес в данной теме;
- 4) Определения контрольных вопросов, позволяющих студентам самостоятельно проверить качество полученных знаний;

5) Организации консультаций преподавателя со студентами для разъяснения вопросов, вызвавших у обучающихся затруднения при самостоятельном освоении учебного материала.

1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля

Тематика СРС соответствует рабочей программе дисциплины «Автоматизированные системы обеспечения надежности и качества электронных средств» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника», профиль «Промышленная электроника». Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы даны в таблице 3.

Таблица 3 – Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Форма контроля	Зачетные единицы (часы)
2 семестр			
	Подготовка к лекционным занятиям	Выборочный опрос	0,148 (1,20)
	Подготовка к практическим занятиям	Опрос в рамках допуска к работе	0,089 (2,4)
1	Основы теории надежности		0,287 (7,75)
	Самостоятельное изучение темы «Программирование в MathCad».	Выборочный опрос	0,287 (7,75)
2	Методы расчета надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов		0,6481 (17,5)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Модели пассивных компонентов».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Модели биполярных транзисторов».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельное изучение дополнительной темы «Модели МОП-транзисторов».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельное изучение дополнительной темы «Макромодели».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Источники сигналов и питания».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)

	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Директивы управления заданием».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Моделирование цифро-аналоговых устройств в систем PSpice».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
3	Прогнозирование показателей качества и надежности компонентов радиоэлектронных средств		0,3704 (10,0)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Типы данных языка VHDL».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Синтаксис языка VHDL».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Описание VHDL-объекта».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной изучение дополнительное темы «Описание цифровых микросхем на языке VHDL».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
4	Оценка надежности и качества РЭС.		0,3019 (8,15)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Моделирование цифровых и цифро-аналоговых схем в ANALOG OR MIXED-SIGNAL CIRCUIT.».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Моделирование цифровых схем в проекте PC BOARD и PROGRAMMABLE LOGIC».	Выборочный опрос	0,1167 (3,15)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Проектирование печатных плат в модуле LAYOUT PLUS».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
5	Расчет надежности в подсистеме «Автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры» (АСОНИКА)		0,3704 (10,0)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Интерфейс программы MultiSim».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Виртуальные приборы MultiSim».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Виртуальные компоненты MultiSim».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Самостоятельной дополнительное изучение темы «Виды анализа в MultiSim».	Выборочный опрос	0,0923 (2,5)
	Выполнение расчетно-графической работы	опрос	0,555(15)
	Итого		2,67 (72,0)

2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС

Подготовка к лекциям и практическим занятиям осуществляется непосредственно перед каждым занятием. План-график выполнения самостоятельной работы

Таблица 4 - План-график выполнения самостоятельной работы

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объём часов
2 семестр				
ПК-1 ПК-5	Подготовка к лекционным занятиям	конспект	собеседование	1,2
ПК-1 ПК-5	Подготовка к практическим занятиям	конспект	собеседование	2,4
ПК-1 ПК-5	Самостоятельное изучение источников и литературы по разделу №№1-5	конспект	собеседование	53,95
ПК-1 ПК-5	Выполнение реферат	реферат	собеседование	15
Итого:				72,00

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ

приведен в таблице 4.

Контроль знаний студентов включает формы текущего и итогового контроля. Текущий контроль осуществляется в процессе изучения курса и включает в себя оценку работы студентов на лабораторных занятиях, а также защиту контрольной работы. Рейтинговая оценка знаний студентов в рамках текущего контроля приведена в таблице 5.

Таблица 5 - Рейтинговая оценка знаний студентов.

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
2 семестр			
1.	Зачетное занятие по практическим занятиям № 1–6 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий по моделированию.	7 неделя	10

2.	Зачетное занятие по практическим занятиям № 7–11 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий по моделированию. 1-е тестирование.	12 неделя	12
3.	Зачетное занятие по практическим занятиям № 12–16 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий по моделированию. 2-е тестирование.	16 неделя	23
4.	Выполнение реферат	16 неделя	20
	Итого за 2 семестр		55
	Итого		55

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Опрос по темам, изученным самостоятельно, может проходить в интерактивной форме в виде дискуссий или презентаций.

Выполнение заданий ведется в тетрадях для СРС или в электронном виде. Второй вид может быть использован для конспектирования.

Подготовка к практическим занятиям представляет собой внеаудиторную самостоятельную работу студентов и заключается в чтении:

- конспекта соответствующей лекции (если она читалась по данной теме);
- соответствующего раздела учебника и первоисточников (основная и дополнительная литература, интернет-ресурсы).

4.1 Работа с литературой

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки является работа с литературой ко всем видам занятий: семинарским, практическим, при подготовке к зачетам, экзаменам, тестированию, участию в научных конференциях.

Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться источниками. Прежде чем приступить к освоению научной литературы, рекомендуется чтение учебников и учебных пособий.

Существует несколько методов работы с литературой.

Один из них - самый известный - метод повторения: прочитанный текст можно заучить наизусть. Простое повторение воздействует на память механически и поверхностно. Полученные таким путем сведения легко забываются.

Наиболее эффективный метод - метод кодирования: прочитанный текст нужно подвергнуть большей, чем простое заучивание, обработке. Чтобы основательно обработать информацию и закодировать ее для хранения, важно произвести целый ряд мыслительных операций: прокомментировать новые данные; оценить их значение; поставить вопросы; сопоставить полученные сведения с ранее известными.

Для улучшения обработки информации очень важно устанавливать осмысленные связи, структурировать новые сведения.

Изучение научной, учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей.

Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект.

План - первооснова, каркас какой-либо письменной работы, определяющие последовательность изложения материала.

План является наиболее краткой и потому самой доступной и распространенной формой записей содержания исходного источника информации. По существу, это перечень основных вопросов, рассматриваемых в источнике. План может быть простым и развернутым. Их отличие состоит в степени детализации содержания и, соответственно, в объеме.

Преимущество плана состоит в следующем.

Во-первых, план позволяет наилучшим образом уяснить логику мысли автора, упрощает понимание главных моментов произведения.

Во-вторых, план позволяет быстро и глубоко проникнуть в сущность построения произведения и, следовательно, гораздо легче ориентироваться в его содержании.

В-третьих, план позволяет - при последующем возвращении к нему - быстрее обычного вспомнить прочитанное.

В-четвертых, с помощью плана гораздо удобнее отыскивать в источнике нужные места, факты, цитаты и т. д.

Выписки - небольшие фрагменты текста (неполные и полные предложения, отдельные абзацы, а также дословные и близкие к дословным записи об излагаемых в нем фактах), содержащие в себе квинтэссенцию содержания прочитанного.

Выписки представляют собой более сложную форму записей содержания исходного источника информации. По сути, выписки - не что иное, как цитаты, заимствованные из текста. Выписки позволяют в концентрированной форме и с максимальной точностью воспроизвести в произвольном (чаще последовательном) порядке наиболее важные мысли автора, статистические и даталогические сведения. В отдельных случаях — когда это оправданно с точки зрения продолжения работы над текстом - вполне допустимо заменять цитирование изложением, близким к дословному.

Тезисы - сжатое изложение содержания изученного материала в утвердительной (реже опровергающей) форме.

Отличие тезисов от обычных выписок состоит в следующем. *Во-первых*, тезисам присуща значительно более высокая степень концентрации материала. *Во-вторых*, в тезисах отмечается преобладание выводов над общими рассуждениями. *В-третьих*, чаще всего тезисы записываются близко к оригинальному тексту, т. е. без использования прямого цитирования.

Исходя из сказанного, нетрудно выявить основное преимущество тезисов: они незаменимы для подготовки глубокой и всесторонней аргументации письменной работы любой сложности, а также для подготовки выступлений на защите, докладов и пр.

Аннотация - краткое изложение основного содержания исходного источника информации, дающее о нем обобщенное представление. К написанию аннотаций прибегают в тех случаях, когда подлинная ценность и пригодность исходного источника информации исполнителю письменной работы окончательно неясна, но в то же время о нем необходимо оставить краткую запись с обобщающей характеристикой. Для указанной цели и используется аннотация.

Характерной особенностью аннотации наряду с краткостью и обобщенностью ее содержания является и то, что пишется аннотация всегда после того, как (хотя бы в предварительном порядке) завершено ознакомление с содержанием исходного источника информации. Кроме того, пишется аннотация почти исключительно своими словами и лишь в крайне редких случаях содержит в себе небольшие выдержки оригинального текста.

Резюме - краткая оценка изученного содержания исходного источника информации, полученная, прежде всего, на основе содержащихся в нем выводов. Резюме весьма сходно по своей сути с аннотацией. Однако, в отличие от последней, текст резюме концентрирует в себе данные не из основного содержания исходного источника информации, а из его заключительной части, прежде всего выводов. Но, как и в случае с аннотацией, резюме излагается своими словами - выдержки из оригинального текста в нем практически не встречаются.

Конспект - сложная запись содержания исходного текста, включающая в себя заимствования (цитаты) наиболее примечательных мест в сочетании с планом источника, а также сжатый анализ записанного материала и выводы по нему.

Для работы над конспектом следует:

- определить структуру конспектируемого материала, чему в значительной мере способствует письменное ведение плана по ходу изучения оригинального текста;
- в соответствии со структурой конспекта произвести отбор и последующую запись наиболее существенного содержания оригинального текста — в форме цитат или в изложении, близком к оригиналу;
- выполнить анализ записей и на его основе - дополнение записей собственными замечаниями, соображениями, "фактурой", заимствованной из других источников и т. п. (располагать все это следует на полях тетради для записей или на отдельных листах-вкладках);
- завершить формулирование и запись выводов по каждой из частей оригинального текста, а также общих выводов.

Систематизация изученных источников позволяет повысить эффективность их анализа и обобщения. Итогом этой работы должна стать логически выстроенная система сведений по существу исследуемого вопроса.

Необходимо из всего материала выделить существующие точки зрения на проблему, проанализировать их, сравнить, дать им оценку.

Обзор - краткое точное изложение сущности какого-либо вопроса, темы на основе одной или нескольких книг, монографий или других первоисточников. Обзор

должен содержать основные фактические сведения и выводы по рассматриваемому вопросу.

Обзор выполняет следующие функции:

- информативная;
- поисковая;
- справочная;
- сигнальная;
- индикативная;
- коммуникативная.

Степень выполнения этих функций зависит от содержательных и формальных качеств обзора, а также от того, кто и для каких целей их использует. Язык обзора должен отличаться ясностью, точностью, краткостью и простотой. Содержание следует излагать объективно от имени автора.

При оценке обзора учитывается не только качество реферирования прочитанной литературы, но и аргументированное изложение собственных мыслей студента по рассматриваемому вопросу. Результат работы студента оценивается преподавателем по бальной системе. Также допускается оценивать работы, удовлетворяющие или не удовлетворяющие предъявляемым требованиям, «зачтено» или «не зачтено» соответственно.

Письменный обзор должен содержать следующие структурные элементы: титульный лист, заполненный по единой форме; оглавление с указанием всех разделов обзора и номерами страниц; введение объемом не более 1,5-2 печатные страницы; основная часть, которая содержит одну или несколько глав, состоящих из 23 параграфов (пунктов, разделов); заключение, которое содержит главные выводы основной части, и в котором отмечается выполнение задач и достижение цели, сформулированных во введении; приложения, включающие график и таблицы (если таковые имеются); библиографическое описание использованных источников оформленных по ГОСТ 7.82-2001, ГОСТ 7.1-2003. В тексте обзора обязательны ссылки на первоисточники.

Печатный вариант работы выполняется на белой бумаге формата А4 (210х297 мм). Текст работы излагается на одной стороне листа. Все линии, цифры, буквы и знаки работы должны быть черного цвета.

Текст обзора, рисунки, формулы, таблицы, а также номера страниц не должны выходить за пределы двухсантиметровой рамки листа А4. Номера страниц должны быть проставлены внизу по центру. При использовании текстового редактора Word, для выполнения этих условий необходимы следующие настройки:

- размер бумаги А4;
- поля слева, сверху, справа по 2 см, нижнее поле 2,5 см, расстояние от нижнего края страницы до нижнего колонтитула 2 см;
- номер страницы - внизу по центру.

Основной текст обзора быть должен быть набран шрифтом Times New Roman, размер 14 пт, начертание обычное, через полуторный интервал, выравнивание по ширине страницы. Для оформления таблиц и подписей к рисункам допускается Times New Roman, размер 12 пт.

Название каждой главы начинается с новой страницы, объем главы не может быть меньше 5 страниц. Заголовки и подзаголовки должны быть выделены и отличаться от основного текста (шрифтом, жирностью, курсивом и пр.). Подзаголовки следует отделять от основного текста сверху двумя строками, снизу - одной. В тексте должны отсутствовать сокращения, кроме общепринятых ГОСТ 7.88-2003, общепринятые или необходимые сокращения при первоначальном употреблении должны быть расшифрованы. Каждый рисунок, график или таблица в письменном обзоре должны быть пронумерованы и иметь заголовки или подпись. При наличии в обзоре ссылок на использованные научные или нормативные источники, сноски должны быть оформлены в соответствии с установленной формой по ГОСТ 7.32-2001.

Письменный обзор должен быть переплетен в обложку или помещен в папку-скоросшиватель (картонную или пластиковую).

Письменный обзор должен быть предоставлен в установленный преподавателем срок. В случае несвоевременного представления работы, Письменный обзор не проверяется преподавателем и не зачитывается как выполненный.

В процессе работы над обзором можно выделить 4этапа:

- вводный - выбор темы, работа над планом и введением;
- основной - работа над содержанием и заключением обзора;
- заключительный - оформление обзора;
- защита обзора (на практическом занятии, экзамене, студенческой конференции и т.д.)

Работа над обзором начинается с выбора темы исследования. Заинтересованность автора в проблеме определяет качество проводимого исследования и соответственно успешность его защиты. Выбирая круг вопросов своей работы, не стоит спешить воспользоваться списком тем, предложенным преподавателем. Надо попытаться сформулировать проблему своего исследования самостоятельно. При определении темы обзора нужно учитывать и его информационную обеспеченность. С этой целью, во-первых, можно обратиться к библиотечным каталогам, а во-вторых, проконсультироваться с преподавателем и библиотекарем.

Выбрав тему обзора и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план обзора. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно надо думать над составлением плана: необходимо четко соотносить цель и план работы.

План - это точный и краткий перечень положений в том порядке, как они будут расположены в обзоре, этапы раскрытия темы. Существует два основных типа плана: простой и сложный (развернутый). В простом плане содержание обзора делится на параграфы, а в сложном на главы и параграфы. При работе над планом обзора необходимо помнить, что формулировка пунктов плана не должна повторять формулировку темы.

При работе над введением необходимо опираться на навыки, приобретенные при написании изложений и сочинений. В объеме обзора введение, как правило, составляет 1 -2 машинописные страницы. Введение обычно содержит вступление, обоснование актуальности выбранной темы, формулировку цели и задач обзора, краткий обзор литературы и источников по проблеме, историю вопроса и вывод. Содержание обзора должно соответствовать теме, полно ее раскрывать. Все рас-

суждения нужно аргументировать. Обзор показывает объективное отношение автора к излагаемому материалу. Следует стремиться к тому, чтобы изложение было ясным, простым и точным.

Заключение - самостоятельная часть обзора. Оно не должно быть переложением содержания работы. Заключение должно содержать основные выводы в сжатой форме, а также оценку полноты и глубины решения тех вопросов, которые вставали в процессе изучения темы.

Объем заключения не должен превышать 2 печатных страниц.

Типичными ошибками, допускаемыми студентами при подготовке обзора, являются:

- недостаточное обоснование актуальности, практической и теоретической значимости полученных результатов, поверхностный анализ используемого материала;
- неглубокие критические оценки и рекомендации по решению исследуемой проблемы;
- поверхностные выводы и предложения;
- нарушение требований к оформлению письменного обзора;
- использование информации без ссылок на источник.

4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего контроля

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины

учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

По результатам опроса в рамках текущего контроля выставляется рейтинговый балл по каждому рейтинговому мероприятию. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Таблица 6 – Расчет рейтинговых баллов по результатам текущего контроля

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Конкретное значение рейтингового балла определяется распределением рейтинговых баллов по контрольным мероприятиям.

6 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

6.1 Основная литература

1. Афонин В.В. Моделирование систем / Афонин В.В., Федосин С.А.— М.: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), 2016.— 269 с. [Электронный ресурс]
2. Сильвашко, С.А. Программные средства компьютерного моделирования элементов и устройств электроники : учебное пособие / С.А. Сильвашко, С.С. Фролов - Оренбург : ОГУ, 2014. - 170 с. : ил., схем. - Библиогр.: с. 162163 [Электронный ресурс].
3. Болотовский Ю.И. OrCAD. Моделирование: учебное пособие/ Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009.— 200 с. [Электронный ресурс]

6.2. Дополнительная литература:

1. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры: учебное пособие/ Поляков А.К.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009.— 314 с.— [Электронный ресурс]
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / Дьяконов В.П.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009.— 577 с. [Электронный ресурс]
3. Перельройзен Е.З. Проектируем на VHDL [Электронный ресурс]/ Перельройзен Е.З.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008.— 448 с.— [Электронный ресурс]
4. Бибило П.Н. Синтез логических схем с использованием языка VHDL [Электронный ресурс]/ Бибило П.Н.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009.— 384 с.— [Электронный ресурс]
5. А. А. Самарский, А. П. Михайлов Математическое моделирование. Москва: Физматлит, 2001. 320 с.
6. Антипенский Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. - М.: Техносфера, 2007. - 128 с.

7. Плис А. И., Сливина Н.А. MathCAD: математический практикум для экономистов и инженеров. М.: Финансы и статистика, 1999. - 656 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



Методические указания

к практическим занятиям по дисциплине
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

для студентов направления подготовки
11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(профиль: «Интеллектуальные программируемые
системы и устройства»)

**Ставрополь
2026**

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Автоматизированные системы обеспечения надёжности и качества электронных средств» являются: обучение магистрантов системному подходу к обеспечению надёжности и качества электронных средств на основе использования автоматизированных систем, как специализированных для расчетов показателей надёжности, так и систем моделирования физических процессов (электрических, тепловых и др.), протекающих в схемах и конструкциях электронных средств на основе методов математического моделирования; ознакомить магистрантов с применением ЭВМ для решения задач автоматизированного анализа и обеспечения надёжности радиоэлектронных средств.

Задачи дисциплины:

- формирование у студентов представлений об основах теории надёжности и методов оценки показателей надёжности технических изделий с ориентацией на элементы и устройства радиоэлектроники и приборостроения;

- формирование у студентов представлений о возможностях применения автоматизированных методик анализа электрических, тепловых и механических процессов, протекающих в схемах и конструкциях электронных средств с учетом особенностей их применения, а также методиками расчёта показателей надёжности электронных средств;

- ознакомление студентов с современными методиками и программными средствами оценки надёжности электронных средств – автоматизированными методиками оценки надёжности электронных средств;

- ознакомление студентов с моделями и методами теории надёжности радиоэлектронных средств;

- ознакомление студентов с современными подходами к обеспечению надёжности и качества радиоэлектронных средств; с отечественными и зарубежными стандартами в области обеспечения и менеджмента надёжности;

- обучение студентов принципам анализа результатов расчета надёжности электронных приборов, устройств и оборудования различного назначения, умению предлагать способы ее повышения и оценивать их эффективность;

- приобретение студентами практических навыков и опыта применять программные средства для расчётов электрических, тепловых и механических режимов работы комплектующих элементов и расчётов тепловых и механических нагрузок элементов конструкций радиоэлектронных средств; осуществлять выбор метода прогнозирования для оценки индивидуальной безотказности элементов.

Практическое занятие № 1

Практическое занятие

Раздел 1. Основы теории надежности.

Расчет критериев надежности для невосстанавливаемых систем Часть 1

Задача 1

Пусть на испытании находилось N_0 образцов невосстанавливаемой системы. Через промежуток времени t часов отказало R образцов. Требуется определить вероятность безотказной работы $P(t)$. Исходные данные приведены в таблице 1.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Исходные данные										
N_0	1000	1200	2000	3000	4000	5000	1500	2500	4500	3500
t , ч	100	200	300	250	400	150	120	450	230	220
R	200	150	400	250	500	400	300	200	120	230

Задача 2

Пусть на испытании находилось N_0 образцов невосстанавливаемой системы. Через промежуток времени t часов отказало R образцов. Требуется определить вероятность отказов $Q(t)$. Исходные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_0	1250	1300	2400	2500	4100	5400	1500	2500	4800	3700
t , ч	140	100	330	250	420	180	120	500	250	240
R	300	250	400	270	504	420	300	100	100	300

Задача 3

Пусть на испытании находилось N_0 образцов невосстанавливаемой системы. Вероятность безотказной работы систем за t часов $P(t)$. Определить вероятность отказов систем за t часов. Исходные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_0	1250	1300	2400	2500	4100	5400	1500	2500	4800	3700
t , ч	140	100	330	250	420	180	120	500	250	240
$P(t)$	0,5	0,67	0,7	0,72	0,8	0,81	0,83	0,87	0,9	0,93

Задача 4

Пусть на испытании находилось N_0 образцов невосстанавливаемой системы. Через промежуток времени t часов отказало R образцов. Требуется определить частоту отказов $a(t)$. Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Исходные данные										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_0	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	1500	1550	1900
t , ч	180	190	200	210	250	230	300	250	150	220
R	200	100	50	70	85	78	30	90	120	130

Задача 5

Пусть на испытании находилось 1500 образцов невосстанавливаемой системы. Через промежуток времени 250 часов отказало 300 образцов. Требуется определить интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Задача 6

Пусть на испытании находилось 1000 образцов некоторой невосстанавливаемой системы, и отказы фиксировались через каждые 100 часов работы, результаты представлены в таблице 5. Требуется определить: вероятность безотказной работы, вероятность отказов, интенсивность отказов и частоту отказов на каждом участке времени, а также построить графики зависимости всех вышеперечисленных параметров от времени.

Таблица 5

Результаты испытаний										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δt , ч	R , штук									
0-100	50	60	40	75	85	80	35	45	40	73
100-200	40	48	32	60	68	64	28	39	33	65
200-300	32	38	26	48	54	51	22	32	25	50
300-400	25	30	20	38	43	40	18	25	21	45
400-500	20	24	16	30	34	32	14	22	18	29
500-600	17	20	14	26	29	27	12	21	17	25
600-700	16	19	13	24	27	26	11	16	15	23
700-800	16	19	13	24	27	26	11	16	14	23
800-900	15	18	12	23	26	24	11	17	12	23
900-1000	14	17	11	21	24	22	10	14	11	22
1000-1100	15	18	12	23	26	24	11	15	12	24
1100-1200	14	17	11	21	24	22	10	14	11	22
1200-1300	14	17	11	21	24	22	10	12	11	22

1300-1400	13	16	10	20	22	21	9	13	10	20
1400-1500	14	17	11	21	24	22	10	15	11	22
1500-1600	13	16	10	20	22	21	9	14	10	20
1600-1700	13	16	10	20	22	21	9	13	10	20
1700-1800	13	16	10	20	22	21	9	13	10	21
1800-1900	14	17	11	21	24	22	10	14	11	22
1900-2000	12	14	10	18	20	19	8	11	9	19
2000-2100	12	14	10	18	20	19	8	11	9	19
2100-2200	13	16	10	20	22	21	9	11	9	21
2200-2300	12	14	10	18	20	19	8	12	10	19
2300-2400	13	16	10	20	22	21	9	13	10	21
2400-2500	14	17	11	21	24	22	10	14	11	22
2500-2600	16	19	13	24	27	26	11	16	13	28
2600-2700	20	24	16	30	34	32	14	21	16	34
2700-2800	25	30	20	38	43	40	18	26	20	39
2800-2900	30	36	24	45	51	48	21	29	25	45
2900-3000	40	48	32	60	68	64	28	40	33	63

Задача 7

В процессе эксплуатации 1000 систем учитывалось число отказов каждые 100 часов, результаты представлены в таблице 6. Определите среднее время исправной работы за: а) 900 часов; б) 600 часов; в) 300 часов.

Таблица 6

Результаты эксплуатации

Δt , ч	0	100	200	300	400	500	600	700	800
----------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

	100	200	300	400	500	600	700	800	900
R	20	25	35	50	30	50	40	45	47

Задача 8

Какова вероятность безотказной работы системы в начальный момент времени?

Задача 9

На испытание поставлено N_0 образцов. За период времени t часов произошло R_c сбоев. Необходимо определить вероятность безотбойной работы образцов. Результаты испытаний представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты испытаний

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_0	100	200	230	150	220	120	130	140	150	120
t , ч	10	20	40	30	50	15	30	60	50	12
R_c	5	10	12	16	20	25	20	2	5	7

Задача 10

На испытание поставлено 5 образцов. Первый проработал безотказно 1 час, второй 3 часа, третий 2 часа, четвертый 4 часа, пятый 1 час. Необходимо определить среднее время безотказной работы.

Пример выполнения работы № 1.

Решим первый вариант задачи. Определим сначала вероятность безотказной работы для всех отрезков времени:

$$P(t) = \frac{(N_0 - R(t))}{N_0},$$

где N_0 - количество образцов в начальный момент времени;

$R(t)$ - количество отказов образцов.

$$P(100) = \frac{(1000 - 50)}{1000} = 0,95,$$

$$P(200) = \frac{(1000 - 90)}{1000} = 0,91,$$

.....

$$P(3000) = \frac{(1000 - 575)}{1000} = 0,425.$$

На основании полученных результатов строим график зависимости безотказной работы системы от времени (рисунок 1).

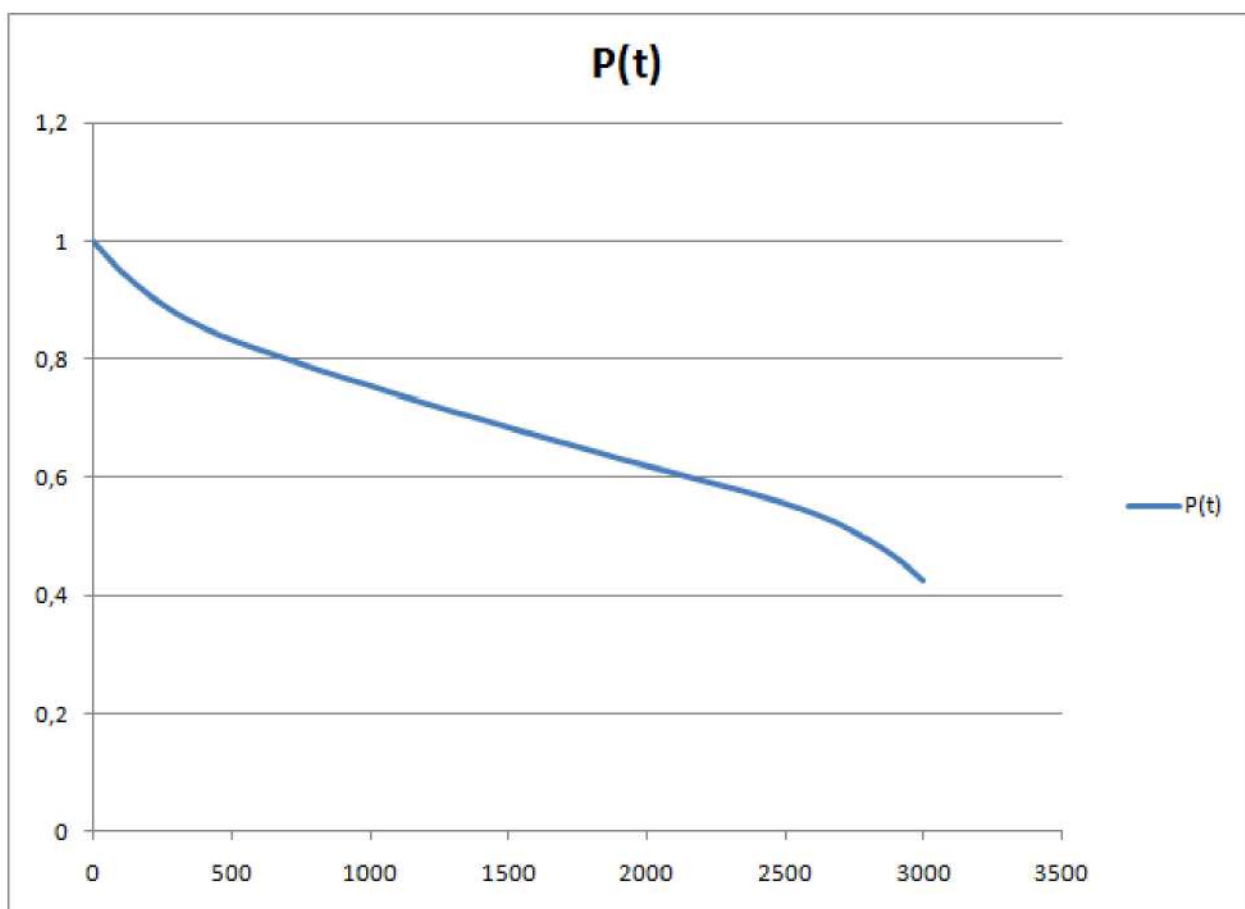


Рисунок 1 – Зависимость вероятности безотказной работы системы от времени

Затем рассчитаем вероятность отказа:

$$Q(t) = 1 - P(t),$$

$$Q(100) = 1 - 0,95 = 0,05,$$

$$Q(200) = 1 - 0,91 = 0,09,$$

.....

$$Q(3000) = 1 - 0,425 = 0,575.$$

По полученным данным строится график зависимости вероятности отказов системы от времени (рисунок 2).

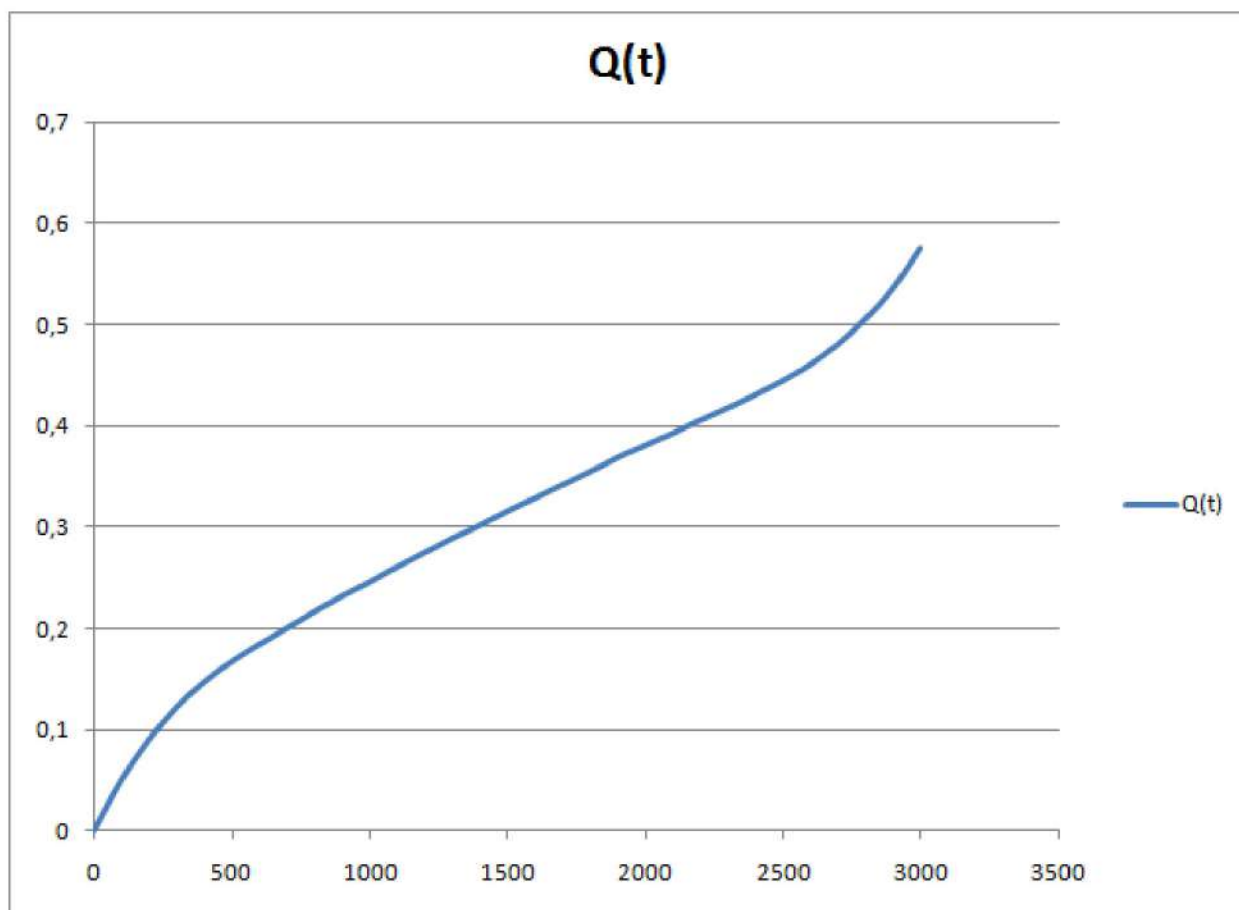


Рисунок 2 – Зависимость вероятности отказов системы от времени

Теперь определим частоту отказов системы на отрезках времени:

$$a(t) = \frac{R(t)}{N_0 \Delta t},$$

$$a(50) = \frac{50}{1000 * 100} = 0,5 * 10^{-3} \text{ ч}^{-1},$$

$$a(150) = \frac{40}{1000 * 100} = 0,4 * 10^{-3} \text{ ч}^{-1},$$

$$a(2950) = \frac{40}{1000 * 100} = 0,4 * 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

По полученным данным строится график зависимости частоты отказов системы от времени (рисунок 3).

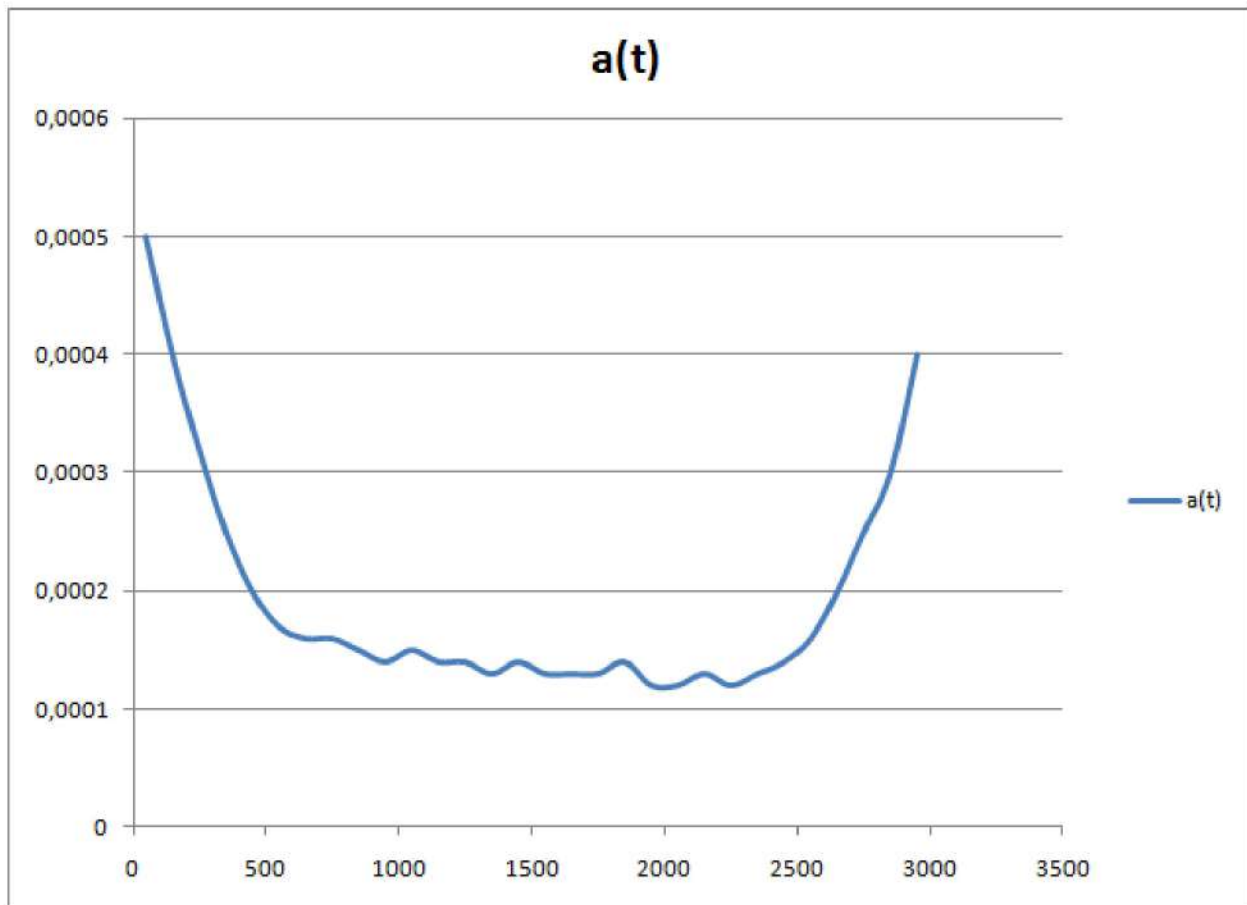


Рисунок 3 - Зависимость частоты отказов системы от времени

Теперь определим интенсивность отказов на отрезках на отрезках времени:

$$\lambda(t) = \frac{R(t)}{N_{CP} \Delta t},$$

$$\lambda(50) = \frac{50}{\frac{1000 + 950}{2} * 100} = 0,514 * 10^{-3} \text{ ч}^{-1},$$

$$\lambda(150) = \frac{40}{\frac{950 + 910}{2} * 100} = 0,43 * 10^{-3} \text{ ч}^{-1},$$

.....

Построим график зависимости интенсивности отказов системы от времени (рисунок 4).

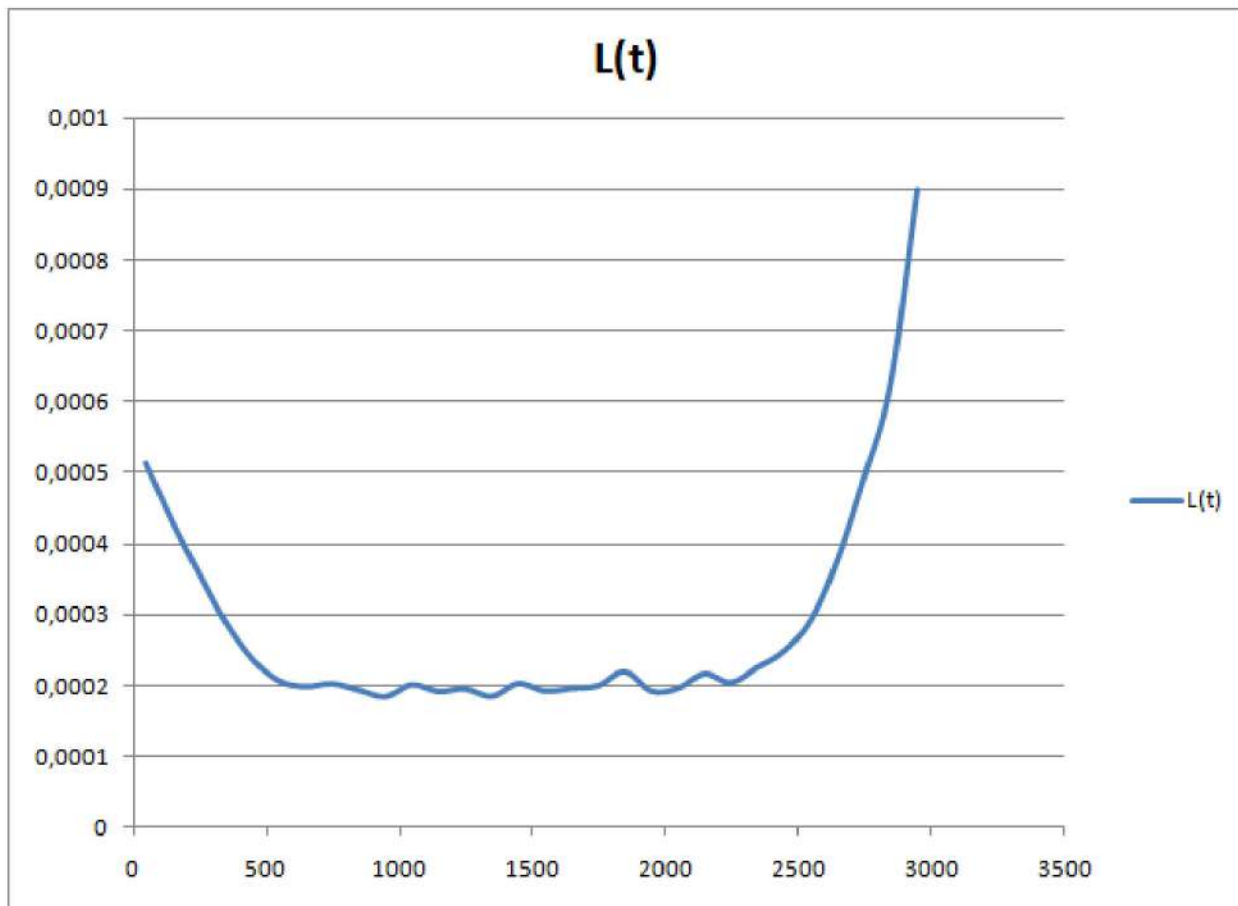


Рисунок 4 - Зависимость интенсивности отказов системы от времени

Практическое занятие № 2

Расчет критериев надежности для невосстанавливаемых систем

Задача 1

Определить средний срок сохраняемости, если интенсивность отказов при хранении λ_c (Таблица 1).

Таблица 1

Значения интенсивности отказов при хранении

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_c \cdot 10^{-2}$ ч	0,1	0,12	0,13	0,11	0,18	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19

Задача 2

Пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 500 часов $p(500)=0,71$ и вероятность безотказной работы элемента за 1000 часов $p(1000)=0,56$. Необходимо определить вероятность безотказной работы элемента, проработавшего 500 часов, за промежуток времени от 500 до 1000 часов.

Задача 3

Пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 300 часов $p(300)=0,8$ и вероятность безотказной работы элемента за 1200 часов $p(1200)=0,5$. Необходимо определить вероятность безотказной работы элемента, проработавшего 900 часов, за промежуток времени от 300 до 1200 часов.

Задача 4

Пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 120 часов $p(120)=0,9$ и вероятность безотказной работы элемента за 300 часов $p(300)=0,45$. Требуется определить вероятность отказа за интервал времени от 120 до 300 часов.

Задача 5

Имеется система, состоящая из 5 последовательно соединенных элементов с вероятностями безотказной работы за период времени 2000 часов соответственно 0,65; 0,78; 0,85; 0,8; 0,9. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы за период времени 2000 часов.

Задача 6

Имеется система, состоящая из 3 последовательно соединенных элементов с вероятностями безотказной работы за период времени 1000 часов

соответственно 0,7; 0,82; 0,8. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы за период времени 1000 часов.

Задача 7

Определите вероятность отказов системы, состоящей из 4 последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы 0,87 за период времени 300 часов.

Задача 8

Определите вероятность безотказной работы системы, состоящей из 3 последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы 0,87 за период времени 100 часов.

Задача 9

Имеется система, состоящая из пяти независимых последовательно соединенных элементов. Каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы с параметрами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ и λ_5 . Значения интенсивностей отказов элементов представлены в таблице 2. Определите вероятность безотказной работы системы.

Таблица 2

Значения интенсивности отказов элементов и времени наработки

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_1, \text{ч}^{-1}$	0,05	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,09	0,06	0,05	0,04
$\lambda_2, \text{ч}^{-1}$	0,03	0,06	0,05	0,05	0,05	0,08	0,02	0,01	0,01	0,07
$\lambda_3, \text{ч}^{-1}$	0,1	0,09	0,02	0,05	0,08	0,03	0,12	0,11	0,09	0,06
$\lambda_4, \text{ч}^{-1}$	0,02	0,01	0,02	0,01	0,1	0,04	0,11	0,04	0,02	0,03
$\lambda_5, \text{ч}^{-1}$	0,06	0,08	0,04	0,02	0,09	0,06	0,04	0,07	0,06	0,05
t, ч	0,5	0,4	0,8	0,9	1	1	1	0,6	0,7	0,9

Задача 10

Имеется система, состоящая из трех независимых последовательно соединенных элементов. Каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы с параметрами λ_1, λ_2 и λ_3 . Значения интенсивностей отказов элементов представлены в таблице 3. Определите вероятность отказов системы.

Таблица 2

Значения интенсивности отказов элементов и времени наработки

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_1, \text{ч}^{-1}$	0,06	0,02	0,04	0,03	0,01	0,07	0,09	0,06	0,08	0,04
$\lambda_2, \text{ч}^{-1}$	0,03	0,06	0,05	0,07	0,02	0,08	0,02	0,04	0,01	0,03

$\lambda_3, \text{ч}^{-1}$	0,12	0,09	0,02	0,05	0,08	0,03	0,13	0,11	0,09	0,06
t, ч	0,6	0,3	0,6	0,9	0,7	0,8	0,4	0,6	0,7	1

Основные соотношения, необходимые для расчетов

$p(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}$ - условная вероятность безотказной работы

$p(t) = e^{-\lambda t}$ - экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы

$P_N(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t)$ - вероятность безотказной работы системы N элементов

$P_N(t) = (p(t))^N$ - вероятность безотказной работы системы N элементов с одинаковой вероятностью безотказной работы.

$T_{x.c.} = \frac{1}{\lambda_c}$ - средний срок сохраняемости

λ_c – интенсивность отказов при хранении

Пример выполнения работы № 2.

Задача 1 определить средний срок сохраняемости, если интенсивность отказов при хранении $\lambda_c = 0,15$.

$$T_{xc} = \frac{1}{\lambda_c} = 6,66$$

Задача 2 пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 500 часов $p(500)=0,71$ и вероятность безотказной работы элемента за 1000 часов $p(1000)=0,56$. Необходимо определить вероятность безотказной работы элемента, проработавшего 500 часов, за промежуток времени от 500 до 1000 часов.

$$p(t_1, t_2) = \frac{p(t_2)}{p(t_1)} = \frac{0,56}{0,71} = 0,788$$

Задача 3 пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 300 часов $p(300)=0,8$ и вероятность безотказной работы элемента за 1200 часов $p(1200)=0,5$. Необходимо определить вероятность безотказной работы элемента, проработавшего 900 часов, за промежуток времени от 300 до 1200 часов.

$$p(t_1, t_2) = \frac{p(t_2)}{p(t_1)} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625$$

Задача 4 пусть нам известны вероятность безотказной работы элемента за 120 часов $p(120)=0,9$ и вероятность безотказной работы элемента за 300 часов $p(300)=0,45$. Требуется определить вероятность отказа за интервал времени от 120 до 300 часов.

$$p(t_1, t_2) = \frac{p(t_2)}{p(t_1)} = \frac{0,45}{0,9} = 0,5$$

Задача 5 имеется система, состоящая из 5 последовательно соединенных элементов с вероятностями безотказной работы за период времени 2000 часов соответственно 0,65; 0,78; 0,85; 0,8; 0,9. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы за период времени 2000 часов.

$$p(t) = \prod_{i=0}^N p_i(t) = 0,65 * 0,78 * 0,85 * 0,8 * 0,9 = 0,31$$

Задача 6 имеется система, состоящая из 3 последовательно соединенных элементов с вероятностями безотказной работы за период времени 1000 часов соответственно 0,7; 0,82; 0,8. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы за период времени 1000 часов.

$$p(t) = \prod_{i=0}^N p_i(t) = 0,7 * 0,82 * 0,8 = 0,45$$

Задача 7 определите вероятность отказов системы, состоящей из 4 последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы 0,87 за период времени 300 часов.

$$p(t) = [p(t)]^N = 0,87^4 = 0,57$$

Задача 8 определите вероятность безотказной работы системы, состоящей из 3 последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы 0,87 за период времени 100 часов.

$$p(t) = [p(t)]^N = 0,87^3 = 0,658$$

Задача 9 имеется система, состоящая из пяти независимых последовательно соединенных элементов. Каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы с параметрами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ и λ_5 . Определите вероятность безотказной работы системы.

$$p(t) = e^{-\lambda t} = 0,683$$

Задача 10 имеется система, состоящая из трех независимых последовательно соединенных элементов. Каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы с параметрами λ_1, λ_2 и λ_3 . Определите вероятность отказов системы.

$$p(t) = e^{-\lambda t} = 0,908$$

Практическое занятие № 3

Расчет критериев надежности для невосстанавливаемых систем

Задача 1

Поставлено 100 систем на восстановление, из них только 50 систем восстановилось менее чем за 30 часов, а время восстановления остальных систем составило больше 30 часов. Определить вероятность восстановления систем за 30 часов.

Задача 2

Поставлено 150 систем на восстановление, из них только 60 систем восстановилось менее чем за 20 часов, а время восстановления остальных систем составило больше 20 часов. Определить вероятность того, что восстановление систем не произойдет за 20 часов.

Задача 3

Вероятность безотказной работы системы за 200 часов составляет 0,94, интенсивность отказа составляет $\lambda(200)=0,29 \cdot 10^{-3}$ час⁻¹. Определите частоту отказа системы за 200 часов.

Задача 4

Вероятность безотказной работы системы за 250 часов составляет 0,96. Определите частоту отказа системы за 250 часов.

Задача 5

Интенсивность отказа составляет $\lambda(300)=0,33 \cdot 10^{-3}$ час⁻¹. Определите частоту отказа системы за 300 часов.

Задача 6

В результате эксплуатации N_0 образцов системы было зафиксировано R неисправностей. При этом каждый из испытываемых образцов исправно проработал t часов. Необходимо определить среднее время между соседними отказами. Результаты эксплуатации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_0	36	40	35	40	35	37	38	41	42	39
R	231	240	260	250	235	255	236	237	248	245
t , ч	19	20	25	20	17	18	22	23	24	21

Задача 7

Определите общую интенсивность отказов, если первая группа однотипных по надёжности элементов состоит из 2 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_1(t)=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, вторая группа состоит из 4 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_2(t)=0,3 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, а третья группа из 3 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_3(t)=0,4 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$.

Задача 8

Определите общую интенсивность отказов, если первая группа однотипных по надёжности элементов состоит из 5 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_1(t)=0,4 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, вторая группа состоит из 3 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_2(t)=0,6 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, а третья группа из 4 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_3(t)=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$.

Задача 9

Частота отказов системы $a(t)$, система состоит из N_0 элементов. Определите, сколько элементов откажет за время t . Значения частоты отказов, количества элементов и время указаны в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a(t) \cdot 10^{-4}, \text{ ч}^{-1}$	0,25	0,24	0,26	0,3	0,4	0,35	0,5	0,6	0,7	0,2
N_0	100	120	130	140	150	100	120	90	80	110
$t, \text{ ч}$	400	500	300	200	250	350	500	600	700	550

Задача 10

Интенсивность отказов системы $\lambda(t)$. Определите среднее время безотказной работы системы. Значения интенсивностей отказов систем приведены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda(t) \cdot 10^{-3}, \text{ ч}^{-1}$	0,2	0,25	0,27	0,23	0,26	0,22	0,3	0,18	0,17	0,24

Основные соотношения, необходимые для расчетов

$$S(t) = \frac{N_B(t)}{N_{0B}} - \text{вероятность восстановления систем за время } t$$

$a(t) = -P'(t)$ - частота отказа системы за время t ; определяется как производная вероятности безотказной работы с обратным знаком

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r} - \text{среднее время между соседними отказами}$$

r – число отказов системы за время t

t_i – время исправной работы системы между $(i-1)$ -м и i -м отказами

$\Lambda = N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2 + \dots + N_s \lambda_s$ - общая интенсивность отказов

s – число групп однотипных по надёжности элементов системы

N_i – число элементов i -й группы

λ_i – интенсивность отказов элементов i -й группы

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt - \text{среднее время безотказной работы}$$

Пример выполнения работы № 3.

Задача 1

Поставлено 100 систем на восстановление, из них только 50 систем восстановилось менее чем за 30 часов, а время восстановления остальных систем составило больше 30 часов. Определить вероятность восстановления систем за 30 часов.

Решение:

$$S(t) = \frac{N_B(t)}{N_{OB}} = \frac{50}{100} = 0,5$$

Вероятность восстановления систем за 30 часов равна 0,5.

Задача 2

Поставлено 150 систем на восстановление, из них только 60 систем восстановилось менее чем за 20 часов, а время восстановления остальных систем составило больше 20 часов. Определить вероятность того, что восстановление систем не произойдёт за 20 часов.

Решение:

$$S(t) = \frac{N_B(t)}{N_{0B}} = \frac{60}{150} = 0,4$$

Вероятность того, что восстановление систем не произойдет за 30 часов, равна 0,4.

Задача 3

Вероятность безотказной работы системы за 200 часов составляет 0,94, интенсивность отказа составляет $\lambda(200) = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$. Определите частоту отказа системы за 200 часов.

Решение:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$P'(t) = -\lambda t \cdot e^{-\lambda t}$$

$$a(t) = -P'(t) = \lambda t \cdot e^{-\lambda t} = 0,29 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot e^{0,29 \cdot 10^{-3} \cdot 200} = 0,058 \cdot e^{0,058}$$

Частота отказа системы за 200 часов равна $0,058 \cdot e^{0,058}$.

Задача 4

Вероятность безотказной работы системы за 250 часов составляет 0,96. Определите частоту отказа системы за 250 часов.

Решение:

$$P(t) = \frac{(N_0 - R(t))}{N_0} \quad a(t) = \frac{R(t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

Выразим $R(t)$ через $P(t)$ и подставим в уравнение $a(t)$:

$$R(t) = (1 - P(t)) \cdot N_0$$

$$a(t) = \frac{(1 - P(t)) \cdot N_0}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{1 - P(t)}{\Delta t} = \frac{1 - 0,96}{250} = \frac{0,04}{250} = 0,00016$$

Частота отказа системы за 250 часов равна 0,00016.

Задача 5

Интенсивность отказа составляет $\lambda(300) = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$. Определите частоту отказа системы за 300 часов.

Решение:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$P'(t) = -\lambda t \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\begin{aligned} a(t) &= -P'(t) = \lambda t \cdot e^{-\lambda t} = 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot e^{0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = \\ &= 0,099 \cdot e^{0,099} \end{aligned}$$

Частота отказа системы за 300 часов равна $0,099 \cdot e^{0,099}$.

Задача 6

В результате эксплуатации $N_0=37$ образцов системы было зафиксировано $R=255$ неисправностей. При этом каждый из испытываемых образцов исправно проработал $t=18$ часов. Необходимо определить среднее время между соседними отказами.

Решение:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r} = \frac{37 \cdot 18}{255} = 2,613$$

Среднее время между соседними отказами $T_{cp}=2,613$.

Задача 7

Определите общую интенсивность отказов, если первая группа однотипных по надежности элементов состоит из 2 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_1(t) = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, вторая группа состоит из 4 элементов с интенсивностью

отказов $\lambda_2(t) = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, а третья группа из 3 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_3(t) = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$.

Решение:

$$\Lambda = N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2 + N_3 \lambda_3 = 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = \\ = 0,4 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-3} = 2,8 \cdot 10^{-3}$$

Общая интенсивность отказов равна $2,8 \cdot 10^{-3}$.

Задача 8

Определите общую интенсивность отказов, если первая группа однотипных по надежности элементов состоит из 5 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_1(t) = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, вторая группа состоит из 3 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_2(t) = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$, а третья группа из 4 элементов с интенсивностью отказов $\lambda_3(t) = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$.

Решение:

$$\Lambda = N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2 + N_3 \lambda_3 = 5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = \\ = 2 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3} = 4,6 \cdot 10^{-3}$$

Общая интенсивность отказов равна $4,6 \cdot 10^{-3}$.

Задача 9

Частота отказов системы $a(t) = 0,35 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$, система состоит из $N_0 = 100$ элементов. Определите, сколько элементов откажет за время $t = 350$ ч.

Решение:

$$a(t) = \frac{R(t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

$$R(t) = a(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t = 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 350 = 12250 \cdot 10^{-4}$$

За время $t=350$ ч откажет $12250 \cdot 10^{-4}$ элемента.

Задача 10

Интенсивность отказов системы $\lambda(t) = 0,22 \cdot 10^{-3}$. Определите среднее время безотказной работы системы.

Решение:

$$p(t) = 1 - \lambda \cdot t$$

$$\begin{aligned} T_{cp} &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - 0,22 \cdot 10^{-3} t) dt = \int_0^{\infty} dt - \int_0^{\infty} 0,22 \cdot 10^{-3} t dt = \\ &= t - 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 \cdot 0,5 = t - 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 \end{aligned}$$

Практическое занятие № 4

Расчет критериев надежности для восстанавливаемых систем

Задача 1

На испытании находилось 4 системы, фиксировались отказы и время, затраченное на восстановление работоспособного состояния систем, результаты испытаний приведены в таблице 1. Определить среднее время восстановления для 4 систем.

Таблица 1

№ системы	Исходные данные									
	Номер отказа									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, затраченное на восстановление работоспособности системы, ч										
1	28	2	5	4	7	3	2	1	6	4
2	13	2	10	3	8	5	3	12	9	5
3	17	3	4	2	1	8	6	4	9	14
4	12	1	2	6	5	3	2	15	3	1

Задача 2

На испытание поставлено 1000 систем. За 100 часов произошло 100 отказов. Определите среднюю частоту отказов за 100 часов.

Задача 3

На испытание поставлено 500 систем. За 80 часов произошло 100 отказов. Определите среднюю частоту отказов за 80 часов.

Задача 4

Интенсивность ремонта системы $\mu = 0,256 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Определите ремонтпригодность системы за 1 час, если известно, что мы имеем дело с экспоненциальным законом распределения времени ремонта.

Задача 5

Интенсивность ремонта системы $\mu = 0,256 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Определите ремонтпригодность системы за 2 часа, если известно, что мы имеем дело с экспоненциальным законом распределения времени ремонта.

Задача 6

Определите среднее время восстановления, если известно среднее время контроля, среднее время поиска дефекта и среднее время устранения дефекта (таблица 2).

Таблица 2

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_k , ч	10	9	8	7	11	12	10	6	11	15
T_d , ч	4	2	3	4	5	5	3	3	2	5
$T_{\text{уср.д}}$, ч	2	1	3	3	1	2	3	2	3	5

Эксплуатационные критерии надежности системы

Задача 7

Определите коэффициент готовности, если время безотказной работы системы t_p часов, а время восстановления системы t_v часов. Значения времени безотказной работы системы и времени ее восстановления представлены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_p , ч	100	80	67	56	66	55	80	87	45	72
t_v , ч	20	10	15	16	9	5	14	11	6	7

Задача 8

Среднее число исправных комплектов 25, общее число комплектов системы 100 штук. Определите коэффициент готовности.

Задача 9

Коэффициент готовности системы K_G , а вероятность безотказной работы системы $P(t)$. Определите коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$. Значения коэффициента готовности системы и вероятности безотказной работы системы представлены в таблице 4.

Таблица 4

Исходные данные

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_G	0,6	0,7	0,65	0,72	0,68	0,77	0,75	0,74	0,8	0,82
$P(t)$	0,85	0,89	0,82	0,9	0,79	0,76	0,72	0,65	0,92	0,56

Задача 10

Определите коэффициент вынужденного простоя, если время безотказной работы системы 20 часов, а время восстановления системы 5 часов.

Задача 11

Коэффициент готовности системы K_r . Определите коэффициент вынужденно простоя. Значения коэффициента готовности системы представлены в таблице 5.

Таблица 5

Исходные данные										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_r	0,6	0,5	0,8	0,78	0,55	0,65	0,82	0,54	0,45	0,73

Задача 12

Определите коэффициент профилактики, если время безотказной работы системы 15 часов, а время восстановления системы 5 часов.

Задача 13

Определите коэффициент профилактики, если время безотказной работы системы 20 часов, а время восстановления системы 10 часов.

Задача 14

Определите эффективность профилактики системы W , если известна наработка на отказ профилактируемой системы $T_{пф}$ часов и наработка на отказ непрофилактируемой системы $T_{нпф}$ часов. Значения наработки на отказ профилактируемой системы и непрофилактируемой системы представлены в таблице 6.

Таблица 6

Исходные данные										
№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{пф}, ч$	100	150	200	100	250	400	300	350	100	450
$T_{нпф}, ч$	50	100	100	50	110	100	150	50	10	200

Задача 15

Число отказов непрофилактируемой системы за 100 часов эксплуатации $N_{нпф}=50$, число отказов профилактируемой системы за 100 часов эксплуатации $N_{пф}=10$. Определите эффективность профилактики.

Задача 16

Система состоит из 200 элементов, элементов i -го типа 50 штук. Всего произошло 30 отказов, из них элементов i -го типа наблюдалось 5 отказов. Определите относительный коэффициент отказов.

Задача 17

Стоимость изготовления системы составляет 100000 руб., а стоимость эксплуатации системы в течение одного года составляет 1000 руб. Определите коэффициент стоимости эксплуатации.

Задача 18

Стоимость изготовления системы составляет 500000 руб., а стоимость эксплуатации системы в течение одного года составляет 10000 руб. Определите коэффициент стоимости эксплуатации.

Основные соотношения, необходимые для расчетов

Средняя частота отказов

$$\omega(t) = \frac{R(t)}{N_0 \Delta t}.$$

Среднее время восстановления

$$T_B = T_K + T_{\Pi} + T_Y;$$

T_K - среднее время контроля;

T_{Π} - среднее время поиска дефекта;

T_Y - среднее время устранения дефекта;

$$T_B = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \tau_i;$$

τ_i - время, затраченное на восстановление i-го отказа.

Ремонтопригодность

Вероятность восстановления системы в заданное время.

$$P(\tau) = 1 - e^{(-\mu \tau)};$$

μ - интенсивность ремонта системы.

Коэффициент готовности

Вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольно выбранный момент времени кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусмотрено.

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_B};$$

t_p - время безотказной работы системы;

t_B - время восстановления.

$$K_r = \frac{M_{cp.u}}{M};$$

$M_{cp.u}$ - среднее число исправных комплектов;

M - общее число комплектов системы.

Коэффициент оперативной готовности

Характеризует вероятность того, что система, находясь в режиме ожидания, окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет безотказно работать в течение заданного интервала времени.

$$K_{ог} = K_r P(t);$$

Коэффициент вынужденного простоя

Отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев.

Отношение времени восстановления к сумме времени восстановления и безотказной работы системы.

$$K_{п} = \frac{\sum_{i=1}^z t_{Bi}}{\sum_{i=1}^z t_{pi} + \sum_{i=1}^z t_{Bi}};$$

$$K_{п} = 1 - K_r$$

Коэффициент профилактики

Отношение числа часов, которые были затрачены на профилактику и ремонт системы, ко времени его исправной работы, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_{п} = \frac{\sum_{i=1}^z t_{Bi}}{\sum_{i=1}^z t_{pi}}$$

Эффективность профилактики

Отношение наработки на отказ профилактируемой и не профилактируемой системы.

$$W = \frac{T_{\text{ПФ}}}{T_{\text{НПФ}}};$$

$T_{\text{ПФ}}$ - наработка на отказ профилактируемой системы;

$T_{\text{НПФ}}$ - наработка на отказ непрофилактируемой системы.

$$W = \frac{N_{\text{НПФ}}}{N_{\text{ПФ}}};$$

$N_{\text{ПФ}}$ - число отказов профилактируемой системы;

$N_{\text{НПФ}}$ - число отказов непрофилактируемой системы.

Относительный коэффициент отказов

Отношение процентов отказов системы вследствие выхода из строя элементов данного типа к проценту этих элементов в системе.

$$K_{\text{н.о.}} = \frac{r_i N}{R N_i};$$

r_i - число отказов системы, вызываемых элементами i-го типа;

N - общее число элементов в системе;

R - общее число отказов системы;

N_i - число элементов i-го типа системы.

Коэффициент стоимости эксплуатации

Отношение стоимости эксплуатации системы в течение одного года к стоимости изготовления системы.

$$K_{\text{с.э.}} = \frac{C_{\text{с.э.}}}{C_{\text{с.и.}}};$$

$C_{\text{с.э.}}$ - стоимость эксплуатации системы в течение одного года;

$C_{\text{с.и.}}$ - стоимость изготовления системы.

Пример выполнения лабораторной работы № 4.

Задача 1

На испытании находилось 4 системы, фиксировались отказы и время, затраченное на восстановление работоспособного состояния систем: 1система – 3 ч., 2система – 5ч., 3система – 8ч., 4система – 3ч. Определить среднее время восстановления для 4 систем.

Решение:

$$T_B = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \tau_i = \frac{3+5+8+3}{4} = \frac{19}{4} = 4,75ч.$$

Задача 2

На испытание поставлено 1000 систем. За 100 часов произошло 100 отказов. Определите среднюю частоту отказов за 100 часов.

Решение:

$$\omega(t) = \frac{R(t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{100}{1000 \cdot 100} = 0,001$$

Задача 3

На испытание поставлено 500 систем. За 80 часов произошло 100 отказов. Определите среднюю частоту отказов за 80 часов.

Решение:

$$\omega(t) = \frac{R(t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{100}{500 \cdot 80} = 0,0025$$

Задача 4

Интенсивность ремонта системы $\mu = 0,256 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Определите ремонтпригодность системы за 1 час, если известно, что мы имеем дело с экспоненциальным законом распределения времени ремонта.

Решение:

$$P(t) = 1 - e^{(\mu t)} = 1 - e^{(0,256 \cdot 10^{-3} \cdot 1)} = -0,254 \cdot 10^{-3}$$

Задача 5

Интенсивность ремонта системы $\mu = 0,256 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Определите ремонтпригодность системы за 2 часа, если известно, что мы имеем дело с экспоненциальным законом распределения времени ремонта.

Решение:

$$P(t) = 1 - e^{(\mu t)} = 1 - e^{(0,256 \cdot 10^{-3} \cdot 2)} = 1 - e^{(0,512 \cdot 10^{-3})} = -0,509 \cdot 10^{-3}$$

Задача 6

Определите среднее время восстановления, если известно среднее время контроля $T_k = 12 \text{ ч.}$, среднее время поиска дефекта $T_d = 5 \text{ ч.}$, и среднее время устранения дефекта $T_{\text{устр.д.}} = 2 \text{ ч.}$

Решение:

$$T_v = T_k + T_d + T_{\text{устр.д.}} = 12 + 5 + 2 = 19 \text{ ч.}$$

Эксплуатационные критерии надежности системы

Задача 7

Определите коэффициент готовности, если время безотказной работы системы $t_p = 55$ часов, а время восстановления системы $t_v = 5$ часов.

Решение:

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_v} = \frac{55}{55 + 5} = \frac{55}{60} = 0,92$$

Задача 8

Среднее число исправных комплектов 25, общее число комплектов системы 100 штук. Определите коэффициент готовности.

Решение:

$$K_r = \frac{M_{\text{сп.и}}}{M} = \frac{25}{100} = 0,25$$

Задача 9

Коэффициент готовности системы $K_{\Gamma}=0,77$, а вероятность безотказной работы системы $P(t)=0,76$. Определите коэффициент оперативной готовности $K_{ОГ}$.

Решение:

$$K_{ОГ} = K_{\Gamma} * P(t) = 0,77 * 0,76 = 0,5852$$

Задача 10

Определите коэффициент вынужденного простоя, если время безотказной работы системы 20 часов, а время восстановления системы 5 часов.

Решение:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum t_B}{\sum t_p + \sum t_B} = \frac{5}{20 + 5} = \frac{5}{25} = 0,2$$

Задача 11

Коэффициент готовности системы $K_{\Gamma} = 0,65$. Определите коэффициент вынужденно простоя.

Решение:

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma} = 1 - 0,65 = 0,35$$

Задача 12

Определите коэффициент профилактики, если время безотказной работы системы 15 часов, а время восстановления системы 5 часов.

Решение:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum t_B}{\sum t_p} = \frac{5}{15} = 0,33$$

Задача 13

Определите коэффициент профилактики, если время безотказной работы системы 20 часов, а время восстановления системы 10 часов.

Решение:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum t_B}{\sum t_p} = \frac{10}{20} = 0,5$$

Задача 14

Определите эффективность профилактики системы W , если известна наработка на отказ профилактируемой системы $T_{пф}=400$ часов и наработка на отказ непрофилактируемой системы $T_{нпф}=100$ часов.

Решение:

$$W = \frac{T_{пф}}{T_{нпф}} = \frac{400}{100} = 4$$

Задача 15

Число отказов непрофилактируемой системы за 100 часов эксплуатации $N_{нпф}=50$, число отказов профилактируемой системы за 100 часов эксплуатации $N_{пф}=10$. Определите эффективность профилактики.

Решение:

$$W = \frac{N_{нпф}}{N_{пф}} = \frac{50}{10} = 5$$

Задача 16

Система состоит из 200 элементов, элементов i -го типа 50 штук. Всего произошло 30 отказов, из них элементов i -го типа наблюдалось 5 отказов. Определите относительный коэффициент отказов.

Решение:

$$K_{н.о} = \frac{r_i \cdot N}{R \cdot N_i} = \frac{5 \cdot 200}{30 \cdot 50} = 0,66$$

Задача 17

Стоимость изготовления системы составляет 100000 руб., а стоимость эксплуатации системы в течение одного года составляет 1000 руб. Определите коэффициент стоимости эксплуатации.

Решение:

$$K_{с.э.} = \frac{C_{с.э.}}{C_{с.и}} = \frac{1000}{100000} = 0,01$$

Задача 18

Стоимость изготовления системы составляет 500000 руб., а стоимость эксплуатации системы в течение одного года составляет 10000 руб. Определите коэффициент стоимости эксплуатации.

Решение:

$$K_{c.э.} = \frac{C_{c.э.}}{C_{c.и.}} = \frac{10000}{500000} = 0,02$$

Практическое занятие №5

Раздел 2. Прогнозирование показателей качества и надежности компонентов радиоэлектронных средств.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ПЭВМ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1. Цель занятия

Определить показатели надёжности РЭУ моделированием на ПЭВМ отказов элементов.

Для достижения цели необходимо:

- ознакомиться с математическим описанием основных законов распределения времени до отказа элементов;
- исследовать моделированием на ПЭВМ влияние параметров законов распределения времени до отказа элементов на показатели их надёжности;
- определить моделированием на ПЭВМ показатели надёжности РЭУ при одинаковых и различных законах распределения времени до отказа элементов.

5.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Продолжительность работы изделия (элемента, устройства и т.д.), измеренную в часах, циклах переключения или других единицах, в технике называют **наработкой**. В радиоэлектронике наработка элементов и устройств в большинстве случаев выражается в часах. Для некоторых элементов (переключатели, реле и др.) наработка может измеряться в циклах переключения или в циклах функционирования.

В теории и практике надёжности часто интересуются **наработкой** изделий **до отказа**. В качестве наработки элементов до отказа рассматривается суммарное время (без учёта перерывов) с момента начала эксплуатации до момента возникновения отказа. В этом случае наработку до отказа обычно называют временем безотказной работы или временем до отказа.

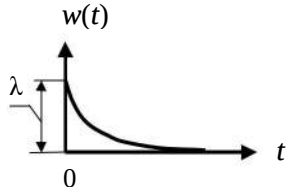
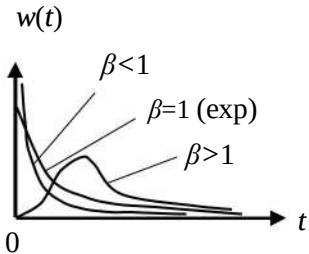
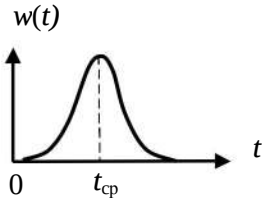
Известно [1], что отказ элементов РЭУ по своей физической сущности является событием случайным. Случайной величиной, описывающей отказ, является время до отказа. Для математического описания времени до отказа элементов (кратко говорят – описания отказов) наиболее часто используются следующие законы: **экспоненциальный, нормальный, Вейбулла** (табл. 1.1).

Экспоненциальный закон долгое время использовался для описания времени до отказа большинства элементов РЭУ. В последнее время установлено, что время до отказа ряда элементов лучше описывается другими законами – нормальным, Вейбулла, логарифмически нормальным.

Распределение Вейбулла хорошо описывает время до отказа большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем ($\beta < 1$), а также некоторых механических элементов ($\beta > 1$).

При $\beta = 1$ распределение Вейбулла (см. табл. 1.1) превращается в экспоненциальное распределение, при $\beta > 2 \dots 3$ – приближается к нормальному закону.

Таблица 1.1

Закон распределения времени до отказа	Выражение функции плотности распределения и связь параметров закона распределения с числовыми характеристиками времени до отказа: $M(t)$ и $\sigma(t)$	График плотности распределения $w(t)$	Выражение для определения вероятности безотказной работы за заданное время t_3	Выражение для определения средней наработки до отказа T_{cp}
Экспоненциальный	$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; t \geq 0,$ где λ – параметр распределения. $\lambda = \frac{1}{M(t)}; \lambda = \frac{1}{\sigma(t)}.$ Свойство распределения: $M(t) = \sigma(t)$		$P(t_3) = e^{-\lambda t_3}$	$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}$
Вейбулла	$w(t) = r b t^{b-1} e^{-r t^b}; t \geq 0,$ где r, β – параметры распределения (β – коэффициент формы)		$P(t_3) = e^{-r t_3^b}$	$T_{cp} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)}{r^{1/b}},$ где $\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)$ – гамма-функция (прил. 1); $\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) = \int_0^\infty U^{1/b} \cdot e^{-U} dU$
Нормальный	$w(t) = \frac{1}{s_t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_{cp})^2}{2s_t^2}\right]; t \geq 0,$ где t_{cp}, σ_t – параметры распределения. $\begin{cases} t_{cp} = M(t) \\ \sigma_t = \sigma(t) \end{cases}$		$P(t_3) = \Phi\left(\frac{t_{cp} - t_3}{\sigma_t}\right)$ где $\Phi(\dots)$ – функция распределения стандартного нормального распределения ($m = 0, \sigma = 1$)	$T_{cp} \approx t_{cp}$

Примечание. Функцию $\Phi(\dots)$ обычно называют «нормальная функция распределения», для неё численными методами получена таблица значений (см., например, [1, с. 296]).

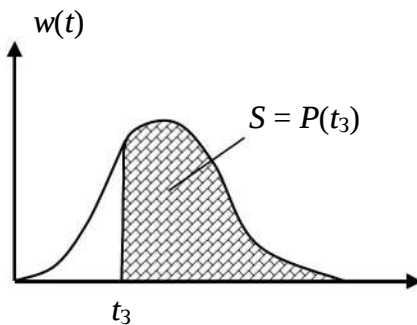
Отказы некоторых типов элементов хорошо описываются **нормальным законом распределения**. Так как наработка до отказа – величина сугубо положительная, то распределение является не чисто нормальным, а усечённым нормальным. Усечённым его называют потому, что область отрицательных значений наработки, как не имеющую физического смысла, отбрасывают (отсекают).

При значении $t_{cp}/\sigma_t > 2$ в расчётах пользуются чисто нормальным распределением, не принимая во внимание область отрицательных значений наработки до отказа, лишённую физического смысла.

Нормальный закон распределения характерен для элементов, работа которых сопровождается заметными процессами старения и износа (электронно-лучевые трубки, кинескопы, тумблеры, переключатели и т.п.).

Для элементов, отказ которых происходит в результате усталостного разрушения, наработка до отказа подчинена логарифмически нормальному закону.

Зная плотность распределения времени до отказа $w(t)$, можно определить вероятность безотказной работы элемента для любого заданного интервала времени t_3 . Из рис. 1.1 видно, что эта вероятность $P(t_3)$ численно равна площади



под кривой $w(t)$, лежащей правее точки $t = t_3$ (заштрихованная область), поэтому можно записать

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt. \quad (1.1)$$

Рис. 1.1. Определение вероятности безотказной работы за время t_3

Применяя выражение (1.1), можно получить формулы для определения $P(t_3)$ для любых законов распределения времени до отказа (см. табл. 1.1).

Среднюю наработку до отказа элемента, определяемую как математическое ожидание наработки до отказа, можно вычислить с помощью выражения

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.2)$$

С учётом выражения (1.2) получены формулы для определения T_{cp} для основных законов распределения времени до отказа (см. табл. 1.1).

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ для любого времени t может быть определена как отношение

$$l(t) = \frac{w(t)}{P(t)}. \quad (1.3)$$

При решении практических задач по оценке показателей надёжности РЭУ аналитические расчёты могут оказаться весьма трудоёмкими либо ими вообще нельзя воспользоваться. В этих случаях поставленные задачи удобно решать моделированием отказов элементов на ПЭВМ.

Пусть РЭУ состоит из n элементов. При моделировании значение (реализацию) случайного времени до отказа i -го элемента t_i получают с учётом закона распределения этого времени, используя формулы, приведённые в [1, табл. 9.1, с. 270]. Выполняя моделирование надёжности РЭУ в j -й реализации, для всех n элементов с учётом законов распределения их времени до отказа получают значения случайных наработок до отказа $t_1^{(j)}, t_2^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}$. Считают, что отказ РЭУ в j -й реализации наступает при отказе хотя бы одного из n элементов. Поэтому за отказ всего РЭУ в j -й реализации принимают отказ элемента, имеющего минимальную наработку до отказа:

$$t_j = \min[t_1^{(j)}, t_2^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}],$$

где $t_i^{(j)}$ – наработка до отказа i -го элемента в j -й реализации РЭУ.

Таким способом получают N реализаций РЭУ и, следовательно, N значений времени до отказа РЭУ.

Количественные показатели безотказности РЭУ получают путём статистической обработки всех N значений времени до отказа РЭУ t_j ($j = 1, 2, \dots, N$).

Среднее время до отказа (среднее время безотказной работы) РЭУ определяют по выражению

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j. \quad (1.4)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3 находят как

$$P(t_3) = \frac{N - N(t_3)}{N}, \quad (1.5)$$

где $N(t_3)$ – количество реализаций РЭУ, для которых оказалось $t_j < t_3$.

Для определения γ -процентной наработки до отказа можно использовать следующий алгоритм. Значения t_j ($j = 1, 2, \dots, N$), полученные при моделировании, располагают по убыванию. В итоге получают массив $T_1 \geq T_2 \geq \dots \geq T_N$. Элементом под номером $(\gamma/100)N$ этого массива определяется значение γ -процентной наработки до отказа.

В лабораторной работе показатели надёжности (конкретно – безотказности) РЭУ определяются по результатам моделирования времени до отказа элементов. Со структурной схемой алгоритма моделирования надёжности РЭУ на ПЭВМ и пояснением этой схемы можно ознакомиться [1, с. 292–293, рис. 9.12].

Программа моделирования надёжности РЭУ на ЭВМ позволяет получать случайные значения наработок до отказа, отвечающих следующим законам распределения: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла. Для получения последовательности чисел (времени до отказа), распределённых по указанным законам, используются функциональные преобразования последовательности равномерно распределённых случайных чисел в диапазоне $(0...1)$, генерируемых с помощью встроенной функции **random** (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Закон распределения	Параметры распределения	Алгоритм вычисления случайного числа t [1, с. 270]
Экспоненциальный	λ	$-\frac{1}{\lambda} \ln(1-r)$
Вейбулла	ρ, β	$\left(-\frac{1}{r} \ln(1-r)\right)^{1/\beta}$
Нормальный	t_{cp}, σ_t	$t_{cp} + \sigma_t \left(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6\right)$

В табл. 1.2 символом r обозначены случайные стандартные равномерно распределенные числа в диапазоне (0...1).

Для исследования влияния параметров законов распределения на показатели надёжности элемента необходимо принять, что в РЭУ содержится всего один элемент.

Для повышения достоверности показателей надёжности, определяемых

по результатам моделирования, число реализаций N следует брать не менее 500–1000. В то же время лучшая наглядность процесса отказа элементов на экране дисплея обеспечивается при $N \leq 50$ –200. Поэтому для наглядной демонстрации процесса моделирования рекомендуется использовать значение $N = 200$.

5.3. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТ ЧАСТЬ

А. Используя моделирование на ПЭВМ отказов элементов (программа, получить данные, на основании которых:

1) построить график зависимости показателя T_{cp} от параметра λ экспоненциального распределения времени до отказа элемента; для построения графика использовать 5–7 точек;

2) сравнить показатели $P(t_3)$ для времени $t_3 = 5000$ ч двух элементов, взятых из партий, имеющих нормальные законы распределения времени до отказа, но с различными значениями параметров распределения t_{cp} и σ_t ;

3) определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ в случае, если все элементы имеют экспоненциальный закон распределения времени до отказа;

4) определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ в случае, если элементы имеют различные законы распределения времени до отказа.

Примечание. При выполнении пп. 1–4 следует руководствоваться рекомендациями табл. 1.3 и указаниями программы

Таблица 1.3

Пункт исследования	Рекомендации по выбору параметров моделирования для рабочих условий применения элементов
1	Диапазон λ : $10^{-4} \dots 10^{-2}$ 1/ч
2	Элемент из первой партии: $t_{cp} = 10\,000 \dots 12\,000$ ч; $\sigma_t = 4000$ ч; элемент из второй партии: $t_{cp} = 6000 \dots 6500$ ч; $\sigma_t = 500$ ч; $t_3 = 5000$ ч
3	Число элементов $n = 3$; диапазон λ : $(1 \dots 3) \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $t_3 = 1000$ ч; $\gamma = 90\%$
4	Число элементов $n = 3$; $t_3 = 1000$ ч; $\gamma = 90\%$ Законы распределения времени до отказа: экспоненциальный, Вейбулла, нормальный Для экспоненциального закона $\lambda = 0,3 \times 10^{-4}$ 1/ч Для закона Вейбулла $\rho = 0,3 \times 10^{-2}$ 1/ч; $\beta = 0,5$ Для нормального закона $t_{cp} = 20\,000$ ч; $\sigma_t = 9000$ ч

Б. Используя один из источников [1, 2], выполнить аналитический расчёт показателей надёжности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для условий моделирования, выбранных по табл. 1.3 при выполнении пп. 3, 4 раздела А. В случае нехватки времени на аудиторных занятиях раздел Б задания может выполняться дома.

В. Написать отчёт по работе.

1.4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Формулировка цели работы.

2. Таблица с координатами экспериментальных точек (по результатам моделирования), используемыми для построения графика зависимости $T_{cp} = f(\lambda)$.

3. График зависимости $T_{cp} = f(\lambda)$, построенный по данным таблицы, приводимой в п. 2. При построении графика необходимо на координатную сетку нанести экспериментальные точки и провести **аппроксимирующую линию**, математическое выражение которой должно быть получено по программе (папка **NRES**) и записано на свободном поле координатной сетки.

4. Результаты исследования надёжности (вероятности безотказной работы) двух элементов, имеющих нормальное распределение времени до отказа, но с разными значениями параметров t_{cp} и σ_t , а также **объяснение с помощью геометрической интерпретации (плотностей распределения)** кажущегося парадокса: *элемент, взятый из партии с меньшим значением показателя t_{cp} , имеет в среднем большую вероятность безотказной работы* для времени $t_3 = 5000$ ч.

5. Сравнительная оценка показателей безотказности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, полученных аналитическим способом (расчётом) и найденных с помощью моделирования на ПЭВМ отказов элементов для случая экспоненциального распределения времени до отказа.

6. Сравнительная оценка показателей безотказности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, полученных аналитическим способом (расчётом) и найденных с помощью моделирования на ПЭВМ отказов элементов для случая разных законов распределения времени до отказа элементов.

Примечание. Ответы на пп. 5, 6 следует дать в виде табл. 1.4.

Таблица 1.4

Элемент	Закон распределения времени до отказа	Параметры закона распределения	Значение T_{cp} РЭУ, полученное		Значение $T_{\gamma=90\%}$ РЭУ, полученное		Значение $P(t_3)$ РЭУ, полученное	
			моделированием отказов элементов	расчётом	моделированием отказов элементов	расчётом	моделированием отказов элементов	расчётом
1	...	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...						
3	...	...						

7. Выводы по работе с обязательным объяснением причины расхождения показателей $T_{\text{ср}}$, T_{γ} и $P(t_3)$, полученных аналитическим методом и найденных с использованием моделирования отказов элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО КАСКАДА ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Проверить правильность выбора элементов с точки зрения регламентированных максимальных значений коэффициентов их электрической нагрузки. При этом элемент считается выбранным правильно, если его номинальная (допустимая по ТУ или другому нормативно-техническому документу) эксплуатационная энергетическая нагрузка такова, что коэффициент электрической нагрузки при работе элемента в составе электронного каскада не превышает регламентированного значения.

6.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Степень энергетической нагруженности элементов РЭС характеризуется коэффициентом электрической нагрузки, кратко – коэффициентом нагрузки. Количественно коэффициент нагрузки K_n подсчитывается с помощью выражения

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (2.1)$$

где $F_{\text{раб}}$ – значение энергетической (электрической) нагрузки элемента в рабочем режиме, т.е. той фактической нагрузки, которая имеет место на данном элементе;

$F_{\text{ном}}$ – номинальная или максимально допустимая по ТУ нагрузка того элемента, который реализует в электрической схеме функцию схемного элемента.

В качестве электрической нагрузки F для элементов выбирают такой параметр его электрического режима, который в наибольшей степени влияет на безотказность данного элемента. Например, для резисторов это мощность рассеивания, для конденсаторов – прикладываемое к обкладкам напряжение и т. д. [1].

Пример 1. Через коллекторную цепь транзистора протекает ток $I_k = 10$ мА (рис. 2.1). Функцию схемного элемента $R1$ реализует резистор типа С2-33 с номинальным значением сопротивления $R1_{\text{ном}} = 1$ кОм и номинальной мощностью рассеивания $P_{\text{ном}} = 0,25$ Вт. Определим, какое значение коэффициента нагрузки будет иметь место для выбранного резистора.

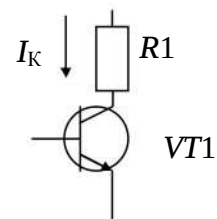


Рис. 2.1. Коллекторная цепь транзистора

Решение:

1) в качестве нагрузки F для резисторов используют мощность рассеивания P . Поэтому согласно формуле (2.1)

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}};$$

2) из условия примера видно, что $P_{\text{ном}} = 0,25$ Вт ;

3) зная значение тока $I_{\text{к}}$, протекавшего через резистор $R1$, и номинальное значение сопротивления этого резистора, находим величину $P_{\text{раб}}$:

$$P_{\text{раб}} = I_{\text{к}}^2 \cdot R1 = 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 0,1 \text{ Вт};$$

4) определяем коэффициент нагрузки резистора

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{0,1}{0,25} = 0,4.$$

Нетрудно заметить, что если в качестве резистора $R1$ взять резистор с номинальной мощностью рассеивания 0,5 Вт, то коэффициент электрической нагрузки этого резистора будет равен значению 0,2.

Для многих элементов с точки зрения безотказности принципиальными могут быть несколько параметров электрического режима – несколько характеристик F . Например, для биполярных транзисторов – это ток, протекающий через коллекторный переход; напряжение на переходе; мощность, рассеиваемая на переходе. Поэтому применительно к транзисторам можно говорить о коэффициентах нагрузки по току $K_{\text{н}}^{(I)}$, по напряжению $K_{\text{н}}^{(U)}$ и по мощности $K_{\text{н}}^{(P)}$.

С точки зрения надёжности недопустимо использовать элементы при значении коэффициента нагрузки, превышающем единицу даже хотя бы по одному из параметров электрического режима. С целью повышения надёжности РЭС регламентируются предельно допустимые коэффициенты нагрузки элементов. Такая регламентация является разумным компромиссом между надёжностью элемента при его использовании в составе РЭС и технико-экономической эффективностью использования элемента. Причём в общем случае для разных элементов и различных классов РЭС регламентируемые предельно допустимые значения коэффициентов нагрузки могут различаться. Объясняется это следующим.

Известно [2], что интенсивность отказов λ многих элементов является нелинейной функцией окружающей температуры $T_{\text{окр}}$ и коэффициента нагрузки $K_{\text{н}}$, т.е.

$$\lambda(v) = \varphi(T_{\text{окр}}, K_{\text{н}}),$$

где $\lambda(v)$ – интенсивность отказов элемента с учётом окружающей температуры и коэффициента электрической нагрузки.

Поэтому регламентируют в той области, где кривая интенсивности отказов $\lambda(v)$ при максимально возможной для данного РЭС окружающей температуре начинает круто возрастать. Например, для металлодиэлектрических резисторов по результатам опытных данных кривые интенсивностей отказов имеют вид, приведённый на рис. 2.2.

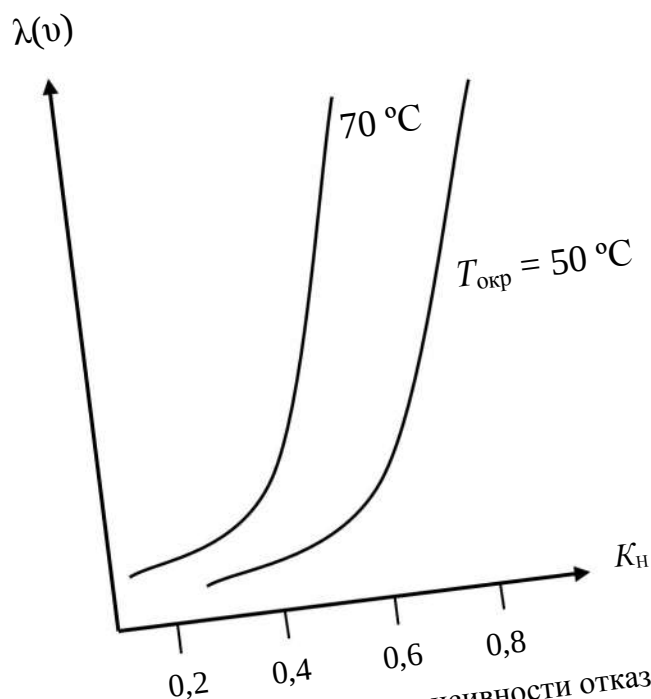


Рис. 2.2. Зависимость интенсивности отказов $\lambda(v)$ от коэффициента электрической нагрузки для металлодиэлектрических резисторов

Из рис. 2.2 видно, что при средней температуре внутри блоков (стоек, шкафов) РЭС порядка $50\ldots 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается резкое увеличение интенсивности отказов резисторов при $K_n \approx 0,4\ldots 0,6$. Поэтому с точки зрения надёжности коэффициент нагрузки резисторов не должен превышать значения $K_n = 0,4\ldots 0,6$.

Указанный принцип выбора предельных электрических нагрузок применяется для всех элементов РЭС, по которым имеются опытные данные. Например, для наземной (полевой, переносимой, автомобильной) и судовой аппаратуры следует использовать регламентацию предельных энергетических нагрузок в соответствии с табл. 2.1 [2].

Для проверки выполнения ограничительных требований по коэффициентам нагрузки используют результаты расчёта и экспериментальной проверки режимов на макетах устройств. Сводка этих данных оформляется разрабатчиком в виде карт режимов всех элементов.

Коэффициенты нагрузки элементов обычно определялись с учётом номинальных значений параметров всех элементов, питающих напряжений и электрических режимов. Обозначим коэффициенты электрической нагрузки, найденные с учётом номинальных режимов, через $K_{n\text{ ном}}$. Несмотря на то что для всех элементов обеспечивались условия $K_{n\text{ ном } i} < K_{n\text{ пред } i}$ (где индекс i означает i -й элемент), реальные коэффициенты нагрузки для отдельных элементов оказывались заметно выше указанных в табл. 2.1. Происходило это в результате неудачного сочетания (комбинации) отклонений от номинала параметров элементов и источников питания. Сказанное иллюстрируется примером.

Таблица 2.1

Элементы	Параметр нагрузки	$K_{н\text{ пред}}$
1. Резисторы непроволочные	Мощность рассеивания	0,5
2. Резисторы проволочные	Мощность рассеивания	0,6
3. Транзисторы биполярные	Мощность на переходе	0,5
	Напряжение на переходе	0,7
	Ток коллектора	0,9
4. Полупроводниковые диоды	Прямой ток	0,9
	Обратное напряжение	0,7
	Мощность рассеивания на переходе	0,5
5. Переключатели, микро-переключатели, тумблеры	Коммутируемый ток	0,5
	Коммутируемая мощность	0,3
6. Соединители (разъёмы), гнезда штепсельные	Напряжение на контакте	0,3
	Ток через контакт	0,5

Пример 2. На рис. 2.3 приведён фрагмент электрической цепи.

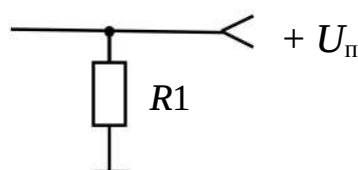


Рис. 2.3. Фрагмент электрической цепи

$U_{п} = 10 \text{ В} \pm 10 \%$, $R1 = 430 \text{ Ом} \pm 10 \%$. Номинальная мощность рассеивания резистора $P_{ном} = 0,5 \text{ Вт}$.

Нетрудно определить, что коэффициент нагрузки резистора для номинального электрического режима $K_{н\text{ ном}} \approx 0,46$. По табл. 2.1 предельное значение коэффициента нагрузки для постоянных металлодиэлектрических резисторов $K_{н\text{ пред}} = 0,5$. Условие $K_{н\text{ ном}} < K_{н\text{ пред}}$ выполняется.

Можно убедиться, что за счёт неблагоприятного сочетания отклонений параметров резистора $R1$ и источника питания $U_{п}$ реальный коэффициент нагрузки может оказаться заметно выше и не будет отвечать требованию табл. 2.1. Обозначим коэффициент нагрузки, соответствующий наихудшему (экстремальному) случаю, через $K_{н\text{ max}}$. Определим это значение. Мощность, рассеиваемая резистором в экстремальном режиме, определится как

$$P_{\text{раб max}} = \frac{U_{п\text{ max}}^2}{R1_{\text{min}}},$$

так как экстремальному режиму соответствуют значения $U_{п} = U_{\text{max}}$ и $R1 = R1_{\text{min}}$.

$$P_{\text{раб max}} = \frac{(10 + 0,1)^2}{(430 - 43)} \approx 0,313 \text{ Вт},$$

$$K_{H \max} = \frac{P_{\text{раб max}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{0,313}{0,5} \approx 0,63,$$

что выше регламентируемой предельной нагрузки для резисторов (см. табл. 2.1).

Поэтому, чтобы не совершить ошибку в выборе эксплуатационной электрической характеристики элемента, нужно принять во внимание не номинальное значение коэффициента нагрузки ($K_{H \text{ ном}}$), а максимальный коэффициент нагрузки элемента по данному электрическому параметру. Причём этот максимальный коэффициент нагрузки $K_{H \max}$ должен быть определён из условия наиболее неблагоприятного сочетания отклонений от номинала параметров элементов, источников питания и внешних нагрузок, т.е. для экстремального режима работы элемента. В сложных случаях определения $K_{H \max}$ целесообразно использовать ЭВМ, применяя покаскадный расчёт экстремальных режимов нагрузки элементов.

В инженерной практике широко используют приближённые методы расчёта, позволяющие определить искомые величины с погрешностью, не превышающей 15...20 %. Такая точность достаточна в большинстве практических случаев.

6.3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования в лабораторной работе являются различные электронные каскады, как правило, с использованием транзисторов и интегральных микросхем.

Методика проведения исследований поясняется ниже на примере простейшего НЧ усилительного каскада, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 2.4.

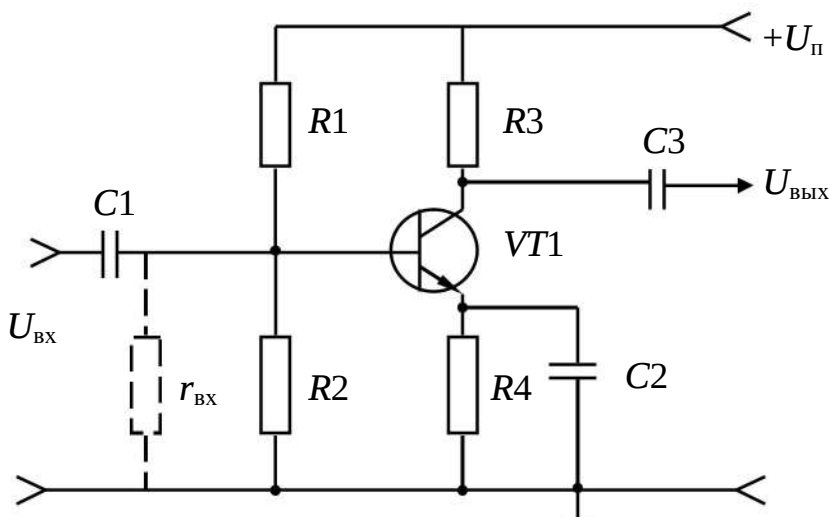


Рис. 2.4. Электрическая принципиальная схема НЧ усилительного каскада

Тип транзистора, номинальные значения параметров элементов, значения допусков на параметры, а также номинальные (допустимые по ТУ) эксплуатационные электрические характеристики элементов, напряжение источника питания $U_{\text{п}}$ и допуск на него указаны в табл. 2.2 .

ника питания $U_{\text{п}}$ и допуск на него указаны в табл. 2.2 .

Таблица 2.2

Но- мер вари- анта	R1		R2		R3		R4		$U_{\text{п}}$	VT1		
	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номиналь- ное значение и допуск	Тип	β_{min} ... β_{max}	$I_{\text{к пред}}$ (ТУ), мА
1	27к ± 10 %	0,125	5,1к ± 10 %	0,125	4,7к ± 10 %	0,125	0,47к ± 10 %	0,125	12 В ± 10 %	КТ201А	20–60	20
2	47к ± 10 %	0,125	2,2к ± 10 %	0,125	8,2к ± 10 %	0,125	0,33к ± 10 %	0,125	15 В ± 10 %	КТ203Б	30–100	10
3	33к ± 10 %	0,125	4,7к ± 10 %	0,125	2,7к ± 10 %	0,125	0,16к ± 10 %	0,125	7 В ± 10 %	КТ203В	30–200	10
4	13к ± 10 %	0,125	1,3к ± 10 %	0,125	1,0к ± 10 %	0,125	0,18к ± 10 %	0,125	15 В ± 10 %	КТ315В	20–90	100
5	75к ± 10 %	0,125	10к ± 10 %	0,125	1,2к ± 10 %	0,125	0,18к ± 10 %	0,125	15 В ± 10 %	КТ315Г	50–350	100
6	27к ± 10 %	0,125	8,2к ± 10 %	0,125	5,1к ± 10 %	0,125	0,75к ± 10 %	0,125	10 В ± 10 %	КТ342Б	200–500	50
7	68к ± 10 %	0,125	4,7к ± 10 %	0,125	3,3к ± 10 %	0,125	0,16к ± 10 %	0,125	10 В ± 10 %	КТ342Г	50–125	50
8	27к ± 10 %	0,125	4,7к ± 10 %	0,125	3,3к ± 10 %	0,125	0,47к ± 10 %	0,125	12 В ± 10 %	КТ373А	100–250	50
9	47к ± 10 %	0,125	2,2к ± 10 %	0,125	8,2к ± 10 %	0,125	0,33к ± 10 %	0,125	15 В ± 10 %	КГ373Г	50–125	50

Для определения максимальных коэффициентов нагрузки $K_{H \max}$, соответствующих экстремальному режиму работы элементов, используется ЭВМ. При этом необходимо иметь в виду, что экстремальный режим для одного элемента (например для $R1$) необязательно будет экстремальным режимом для другого элемента (например для $R3$).

При расчёте экстремальных режимов работы элементов исследуемого каскада (см. рис. 2.4) учитывается эквивалентное входное сопротивление цепи база–эмиттер ($r_{вх}$), включенное параллельно резистору $R2$:

$$r_{вх} = r_{\bar{o}} + (1 + \beta)R4 \approx (1 + \beta)R4, \quad (2.2)$$

где $r_{\bar{o}}$ – сопротивление тела базы;

β – коэффициент усиления транзистора по току.

Выражение (2.2) использовано при расчёте на ЭВМ экстремальных режимов для элементов каскада.

При выполнении исследований необходимо:

1) по запросу программы ввести в ЭВМ информацию о первичных параметрах исследуемого каскада (параметрах элементов и источника питания) согласно выполняемому варианту;

2) последовательно для каждого элемента найти экстремальный режим и соответствующее этому режиму значение величины $K_{H \max i}$;

3) сравнить полученные значения величин $K_{H \max i}$ со значениями $K_{H \text{ пред } i}$, указанными в табл. 2.1;

4) сделать выводы о правильности использования элементов по коэффициентам их нагрузки;

5) при необходимости дать рекомендации по замене элементов.

Информация, необходимая для исследования элементов каскада, вводится в ЭВМ по запросу при выполнении программы и может многократно корректироваться.

Поиск экстремального режима, т.е. неблагоприятного сочетания отклонений первичных параметров, выполняется последовательно для всех элементов. Для транзистора экстремальный режим ищется лишь по одному параметру режима: току коллектора I_k . Поиск экстремального режима для рассматриваемого элемента сводится к указанию (назначению) для первичных параметров предельных отклонений (+ или –). Этот процесс должен выполняться целенаправленно, т.е. с учётом влияния характера отклонения первичного параметра от номинала (+ или –) на электрический режим работы рассматриваемого элемента. Если этот процесс выполнять случайным образом, то следует знать, что максимальное число сочетаний предельных отклонений первичных параметров (+ или –), которое может понадобиться перебирать, равно

$$N = 2^k,$$

где k – число первичных параметров, определяющих экстремальный режим работы рассматриваемого элемента.

Программа для ЭВМ, используемая в лабораторной работе, составлена таким образом, что проверяется соответствие сочетания предельных отклонений первичных параметров экстремальному режиму. Если режим не является экстремальным, то ЭВМ предлагает указать новое сочетание предельных отклонений, которое, по мнению студента, может соответствовать экстремальному режиму работы рассматриваемого элемента. И так до тех пор, пока экстремальный режим не будет найден.

Если величины $K_{\text{н max } i}$ для каждого элемента найдены, то заключение о правильности использования i -го элемента по коэффициенту его нагрузки делается при выполнении условия

$$K_{\text{н max } i} \leq K_{\text{н пред } i}, \quad (2.3)$$

где $K_{\text{н пред } i}$ – регламентированное предельное (максимальное) значение коэффициента нагрузки i -го вида элемента (см. табл. 2.1).

Рекомендации по замене элемента даются в случае невыполнения условия (2.3). Суть рекомендаций должна сводиться к замене рассматриваемого элемента новым элементом с такой эксплуатационной электрической характеристикой, для которой условие вида (2.3) будет выполняться.

6.4. ЗАДАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ ЧАСТЬ

1. Запустить программу для ПЭВМ с именем используемую для расчёта режимов работы элементов каскада.

2. Уточнить у преподавателя номер исследуемого каскада.

3. По запросу программы **lab2.exe** (при ее выполнении) ввести требуемую информацию о первичных параметрах и эксплуатационных электрических характеристиках элементов согласно выполняемому варианту задания. При исследовании НЧ усилительного каскада эта информация соответствует табл. 2.2, для других каскадов указывается ПЭВМ.

4. Последовательно для каждого из элементов исследуемого каскада найти значения величин $K_{\text{н max } i}$, соответствующие экстремальным режимам их работы; для транзисторов и интегральных микросхем необходимо найти значения величины $K_{\text{н max } i}$ только по одному параметру, указываемому ПЭВМ, например для НЧ усилительного каскада – току коллектора. Процесс нахождения величин $K_{\text{н max } i}$ должен выполняться целенаправленно, т.е. с учётом влияния характера отклонения первичного параметра от номинала (+ или –) на электрический режим работы рассматриваемого элемента, что требует от студента детального анализа электрической схемы.

5. Сделать выводы о правильности использования элементов по коэффициентам их нагрузки и при необходимости заменить элементы, не обеспечивающие надёжную работу усилительного каскада. В случае замены одного из элементов п. 4 должен быть выполнен снова.

Примечания.

1. В программе для ПЭВМ, используемой для выполнения экспериментальной части лабораторной работы, может быть установлен режим контроля действий студента. Если студент пытается добиться нахождения величин $K_{H \max i}$ методом случайного перебора отклонений параметров от номинала (+ или –), то за каждую неверную попытку ему начисляются штрафные баллы, причём в геометрической прогрессии. Большое число штрафных баллов свидетельствует о том, что методика выполнения работы и анализ схемы каскада не были осмыслены на должном уровне, а экспериментальная часть лабораторной работы выполнялась на «чисто механическом» уровне. Студенту (бригаде студентов), получившему 100 и более штрафных баллов, по усмотрению преподавателя может быть предложено выполнить лабораторную работу заново, но на примере уже другого электронного каскада.

2. Экспериментальная часть работы предусматривает последовательное выполнение всех вариантов заданий исследуемого каскада.

3. По усмотрению преподавателя для исследований может быть предложено несколько каскадов с уменьшением (при необходимости) числа вариантов в пределах каждого каскада.

6.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.

2. Схема исследуемого устройства.

3. Исходные данные для выполнения экспериментальной части работы согласно варианту задания.

4. Значения величин $K_{H \max i}$, полученные при анализе устройства на ПЭВМ; эти величины рекомендуется привести совместно с другой информацией в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Позиционное обозначение	Номинальное значение и допуск параметра	Характеристика $F_{\text{ном}}$ (по ТУ)	$K_{H \text{ ном}}$	$K_{H \text{ max}}$	$K_{H \text{ пред}}$
R1	18к ± 10 %	0,125 Вт	0,13	0,21	0,5
...	...	...	...	...	...

5. Выводы по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

2. Улинич, Р. Б. Практическое обеспечение надёжности РЭА при проектировании / Р. Б. Улинич. – М. : Радио и связь, 1985. – 85 с.

Практическое занятие №7

ОТБОР ТРАНЗИСТОРОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ НАДЁЖНОСТИ МЕТОДОМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

7.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научить будущих специалистов применять методы индивидуального прогнозирования для отбора элементов повышенного уровня надёжности. Для достижения цели лабораторная работа предусматривает следующее:

- общее знакомство с индивидуальным прогнозированием надёжности (технического состояния) элементов и РЭС;
- изучение метода индивидуального прогнозирования, основанного на принципах пороговой (мажоритарной) логики;
- решение задачи индивидуального прогнозирования надёжности транзисторов методом пороговой логики с использованием результатов обучающего эксперимента, смоделированного на ПЭВМ.

7.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

7.2.1. Общие сведения об индивидуальном прогнозировании надёжности элементов РЭС методами распознавания образов

Средние статистические (вероятностные) показатели надёжности характеризуют надёжность в целой партии однотипных элементов. Действительные значения показателей надёжности для разных экземпляров могут существенно отличаться от средних значений.

В процессе сборки ответственных устройств РЭС возникают задачи отбора элементов повышенного уровня надёжности (качества). Для решения этих задач пригодны методы индивидуального прогнозирования распознаванием образов. Методы основаны на использовании вероятностных связей между значениями электрофизических параметров изделий (элементов) и уровнем надёжности элементов. Электрофизические параметры, «несущие» информацию о качестве изделий, называют информативными параметрами или, кратко, признаками. Поэтому индивидуальное прогнозирование распознаванием образов называют также прогнозированием по признакам.

Для элементов РЭС индивидуальное прогнозирование с использованием одного признака малоэффективно. На практике приходится использовать совокупность признаков $x_1, \dots, x_k$, состоящую из k признаков. Измерение k признаков j -го экземпляра $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ образует образ этого экземпляра. Задача индивидуального прогнозирования состоит в том, чтобы правильно распознать этот образ.

Методы на основе распознавания образов позволяют по результатам измерения признаков предсказать поведение конкретного экземпляра до некоторого момента времени $t_{\text{пр}}$ – заданного времени прогнозирования. При использовании этих методов результат прогнозирования (прогноз) обычно получают в виде отнесения экземпляра к тому или иному классу. Причём класс характеризует уровень надёжности экземпляра до момента времени $t_{\text{пр}}$.

В практических приложениях находит применение случай отнесения контролируемого экземпляра к одному из двух классов: K_1 – классу надёжных экземпляров, K_2 – классу ненадёжных (дефектных) экземпляров. Приводимые далее соображения относятся именно к этому случаю.

Решение о классе конкретного экземпляра принимают по значениям его признаков, измеренных в момент времени $t = 0$. Для принятия решения используется так называемое прогнозирующее правило, которое получают заранее с помощью предварительных исследований интересующего типа элементов или РЭС.

Если информативные параметры (признаки) найдены или известны априорно, то процедура решения задачи индивидуального прогнозирования включает следующие этапы:

- обучающий эксперимент;
- обучение;
- экзамен;
- индивидуальное прогнозирование однотипных экземпляров, не участвовавших в обучающем эксперименте.

Цель первых трёх этапов – построение прогнозирующего правила. Четвертый этап – это уже само прогнозирование.

Обучающий эксперимент состоит в испытании на надёжность в течение времени $t_{\text{пр}}$ выборки рассматриваемого типа изделия. Эту выборку называют обучающей. Перед проведением испытаний элементы обучающей выборки помечают и у каждого экземпляра этой выборки в момент времени $t = 0$ измеряют значения признаков. Так как заданное время $t_{\text{пр}}$ может быть большим (сотни, тысячи и даже десятки тысяч часов), то обычно проводят ускоренные испытания в течение времени $t_y \ll t_{\text{пр}}$, но эквивалентном с точки зрения возникновения отказов времени $t_{\text{пр}}$. По истечении времени испытаний фиксируется класс экземпляра. Результатом обучающего эксперимента является табл. 3.1.

Обучение состоит в обработке результатов обучающего эксперимента (см. табл. 3.1) по алгоритму, определяемому используемым методом индивидуального прогнозирования. На практике широкое применение находят методы, основанные на эвристических алгоритмах [1, 3, 4]. С помощью этих методов прогнозирующее правило, используемое для принятия решения о классе j -го экземпляра, задаётся выражением вида

$$\left. \begin{aligned} X^{(j)} \in K_1, & \text{ если } F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}) \geq P_0, \\ X^{(j)} \in K_2, & \text{ если } F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}) < P_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $x_1, \dots, x_k$ – признаки, используемые для прогнозирования;
 $F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)})$ – значение решающей функции, подсчитанное для j -го экземпляра;

P_0 – порог (критерий) разделения классов;
 $X^{(j)} = \{x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\}$ – образ j -го экземпляра.

Запись $X^{(j)} \in K_S$ означает, что j -й экземпляр относят к классу K_S ($S = 1; 2$).

Решающая функция F показывает, какие операции (арифметические, логические и др.) должны быть выполнены со значениями признаков. Она составляет основу метода прогнозирования.

Таблица 3.1

Номер экземпляра обучающей выборки	Значения признаков при $t = 0$			Класс экземпляра на момент времени $t_{пр}$
	x_1	...	x_k	
1	$x_1^{(1)}$	...	$x_k^{(1)}$	$K_S^{(1)}$
2	$x_1^{(2)}$	...	$x_k^{(2)}$	$K_S^{(2)}$
...	...	...	...	...
n	$x_1^{(n)}$	...	$x_k^{(n)}$	$K_S^{(n)}$

Приведённое прогнозирующее правило вида (3.1) предполагает, что более высокому уровню надёжности (классу K_1) в среднем соответствуют большие значения решающей функции F (рис. 3.1).

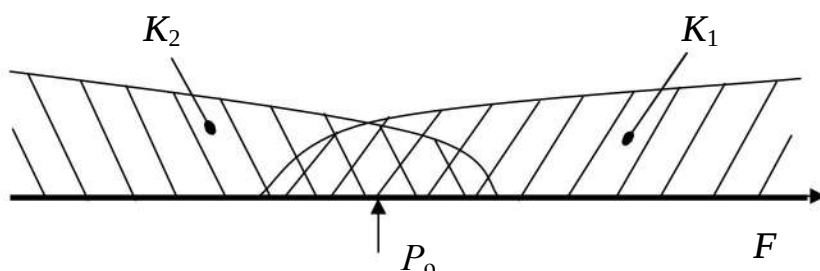


Рис. 3.1. К вопросу о соответствии значений функции F уровню надёжности

На этапе обучения подсчитывают значения решающей функции F для всех экземпляров обучающей выборки, т.е. ищется связь признаков (в момент времени $t = 0$) со значениями решающей функции F (говорят: выполняется обучение).

Задача следующего этапа – экзамена состоит в выборе порога P_0 (лучшего с точки зрения определенного критерия) и оценке значений ошибок, которые могут возникнуть при прогнозировании с помощью построенного прогнозирующего правила. Отсюда понятно название этапа.

Индивидуальное прогнозирование основано на использовании вероятностных связей между набором признаков и номером класса экземпляра, поэтому всегда существует определённая вероятность принятия ошибочных решений. В практических приложениях индивидуального прогнозирования с разделением на классы наиболее часто используют следующие две вероятности:

$P(K_1/\text{реш } K_2)$ – вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_1 при условии, что принято решение отнести его по прогнозу к классу K_2 (риск изготовителя);

$P(K_2/\text{реш } K_1)$ – вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_2 при условии, что принято решение отнести его по прогнозу к классу K_1 (риск потребителя).

Для простоты записи обозначим:

$$P(K_1/\text{реш } K_2) = p_{12};$$

$$P(K_2/\text{реш } K_1) = p_{21}.$$

С величиной p_{12} связаны ошибки первого рода n_{12} , а с величиной p_{21} – ошибки второго рода n_{21} .

Вероятности ошибочных решений вычисляются по результатам обучающего эксперимента и обучения по формулам [1]

$$p_{12} = \frac{n(K_1/\text{реш } K_2)}{n(\text{реш } K_2)} = \frac{n_{12}}{n(\text{реш } K_2)}, \quad (3.2)$$

$$p_{21} = \frac{n(K_2/\text{реш } K_1)}{n(\text{реш } K_1)} = \frac{n_{21}}{n(\text{реш } K_1)}, \quad (3.3)$$

где $n(K_u/\text{реш } K_v)$ – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении экземпляров обучающей выборки класса K_u в класс K_v ; $u, v = 1, 2$; $u \neq v$;

$n(\text{реш } K_s)$ – общее число решений, заключающихся в отнесении экземпляров обучающей выборки к классу K_s ($s = 1, 2$).

Для количественной оценки достоверности прогнозирования (эффективности) используют также вероятность принятия правильных решений ($P_{\text{прав}}$), определяемую по результатам обучающего эксперимента выражением [1]

$$P_{\text{прав}} = 1 - \frac{n(K_2/\text{реш } K_1) + n(K_1/\text{реш } K_2)}{n}, \quad (3.4)$$

где n – объём обучающей выборки.

На этапе экзамена величину порога разделения классов определяют путем просчёта по формулам (3.2)–(3.4) нескольких вариантов и выбора такого значения порога P_0 , при котором выполняется одно из заданных к достоверности прогнозирования условий:

$$P_{\text{прав}} \rightarrow \max; \quad (3.5)$$

$$p_{12} \rightarrow \min \text{ при } p_{21} \leq p_{21 \text{ доп}}, \quad (3.6)$$

где $p_{21 \text{ доп}}$ – допустимое для данной задачи значение риска потребителя.

Если требования к эффективности прогнозирования обеспечиваются, то прогнозирование однотипных изделий, не участвовавших в обучающем экспе-

рименте, сводится к измерению значений признаков l -го экземпляра, вычислению для экземпляра значения решающей функции $F(x_1^{(l)}, \dots, x_k^{(l)})$, вид которой зависит от используемого метода, и проверке соотношения (3.1).

Описанная процедура индивидуального прогнозирования по признакам наглядно может быть отражена логической схемой, приведённой на рис. 3.2.

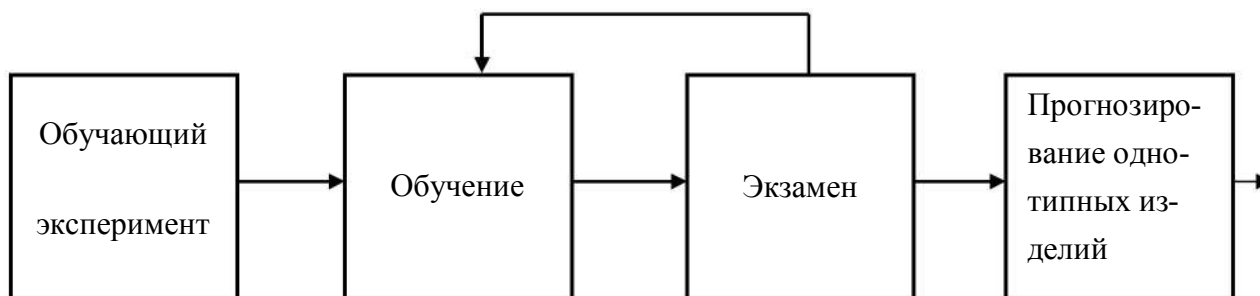


Рис. 3.2. Логическая схема процедуры прогнозирования

Обратная связь, обозначенная на схеме, указывает на то, что возможно снижение ошибок прогнозирования, если они велики.

7.2.2. Прогнозирование методом пороговой логики

Хорошо разработанные и широко используемые в практике методы прогнозирования по признакам, такие как метод статистических решений (оптимальный метод) и метод потенциальных функций, при числе признаков $k > 2$ связаны с громоздкими математическими вычислениями. В этом случае использование указанных методов целесообразно лишь на основе применения ЭВМ и в условиях производства не всегда возможно. Другие же, более простые методы в ряде случаев не обеспечивают допустимых ошибок прогнозирования.

Простым и в то же время эффективным является метод индивидуального прогнозирования, основанный на принципах пороговой логики [1, 2].

Суть метода пороговой логики (далее кратко – МПЛ) состоит в преобразовании признаков j -го экземпляра в двоичные числа (сигналы) и принятии решения о классе экземпляра по набору (комбинации) двоичных чисел.

При k признаках, используемых для прогнозирования, число возможных наборов двоичных чисел T определяется выражением

$$T = 2^k. \quad (3.7)$$

Поэтому прогнозирующее правило для этого метода может быть представлено простой логической таблицей с числом строк не более T . Таблица может использоваться непосредственно в наглядной форме или храниться в запоминающих устройствах.

Преобразование значений признаков $x_1, \dots, x_k$ в двоичные числа $z_1, \dots, z_k$ (ноль или единицу) может выполняться по соотношениям [1, 2]:

$$\left. \begin{array}{l} z_i = 1, \quad \text{если } x_i \geq x_{i0}, \\ z_i = 0, \quad \text{если } x_i < x_{i0}, \end{array} \right\} \quad \text{при } m_i^{(1)} > m_i^{(2)}; \quad (3.8)$$

$$\left. \begin{array}{l} z_i = 1, \quad \text{если } x_i \leq x_{i0}, \\ z_i = 0, \quad \text{если } x_i > x_{i0}, \end{array} \right\} \quad \text{при } m_i^{(1)} < m_i^{(2)}, \quad (3.9)$$

где x_{i0} – выбираемое пороговое значение i -го признака, кратко – порог;
 $m_i^{(S)}$ – среднее значение i -го признака в классе K_S ($S = 1, 2$).

Прогнозирующее правило для данного метода прогнозирования задается соотношением [1, 2]

$$R^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i^{(j)}) \geq P_0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i^{(j)}) < P_0, \end{cases} \quad (3.10)$$

где $R^{(j)}$ – выходной двоичный сигнал (пороговая функция), соответствующий j -му экземпляру, равный единице для класса K_1 и нулю для класса K_2 ;
 $\alpha(z_i^{(j)})$ – вес входного двоичного сигнала z_i , выбираемый в зависимости от значения z_i , соответствующего j -му экземпляру;

P_0 – порог разделения классов, вещественное число.

Вес $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала z_i характеризует ценность z_i для процедуры прогнозирования и определяется соотношением [1, 2]

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} P(K_1 / z_i = 1), & \text{если } z_i = 1; \\ P(K_1 / z_i = 0), & \text{если } z_i = 0, \end{cases} \quad (3.11)$$

где $P(K_1 / z_i = \xi)$ – оценка вероятности того, что изделие принадлежит к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$).

Оценки вероятностей $P(K_1 / z_i = 1)$ и $P(K_1 / z_i = 0)$ получают из результатов испытаний изделий обучающей выборки, используя следующие выражения [1]:

$$P(K_1 / z_i = 1) = \frac{n(K_1 / z_i = 1)}{n(z_i = 1)}; \quad (3.12)$$

$$P(K_1 / z_i = 0) = \frac{n(K_1 / z_i = 0)}{n(z_i = 0)}, \quad (3.13)$$

где $n(K_1 / z_i = \xi)$ – число изделий класса K_1 в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$);

$n(z_i = \xi)$ – общее число изделий в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$).

При использовании на практике МПЛ рекомендуется следующая последовательность выполнения этапов обучения, оценки результатов обучения (экзамена) и прогнозирования однотипных изделий, не участвовавших в обучающем эксперименте:

- 1) определение пороговых значений, необходимых для преобразования признаков в двоичные сигналы;
- 2) преобразование признаков каждого экземпляра обучающей выборки в двоичные сигналы;
- 3) определение весов двоичных сигналов (единицы и нуля);
- 4) подсчёт значения решающей функции для каждого экземпляра обучающей выборки;
- 5) построение решающего правила и определение значения порога разделения классов;
- 6) представление решающего правила логической таблицей, используемой для выполнения прогнозирования;
- 7) прогнозирование однотипных изделий, не участвовавших в обучающем эксперименте.

Величина x_{i0} в МПЛ может выбираться как средняя точка зоны перекрытия (пересечения) классов K_1 и K_2 по признаку x_i (рис. 3.3).

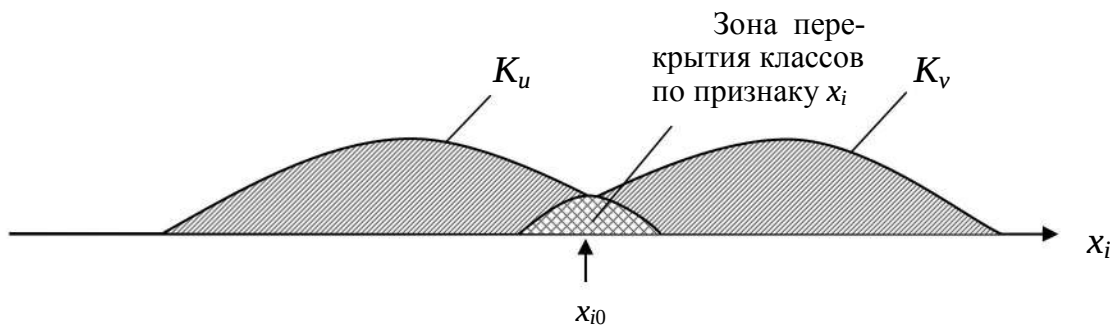


Рис. 3.3. Группирование значений признака x_i на его числовой оси при наличии зоны перекрытия классов ($u, v = 1, 2; u \neq v; x_{i0}$ – пороговый уровень)

Из рис. 3.3 видно, что

$$x_{i0} = \frac{x_{i \max}^{(K_u)} + x_{i \min}^{(K_v)}}{2}, \quad (3.14)$$

где $x_{i \max}^{(K_u)}$ – максимальное значение признака x_i , имевшее место в момент $t = 0$ для экземпляров класса K_u ;

$x_{i \min}^{(K_v)}$ – минимальное значение признака x_i , имевшее место в момент $t = 0$ для экземпляров K_v ; $u, v = 1, 2; u \neq v$.

Указанный способ является простейшим, однако может обеспечить приемлемые для практики результаты в случаях, когда в обучающей выборке количество экземпляров каждого класса достаточно велико ($n_u, n_v \geq 50 \dots 100$).

Если в обучающей выборке количество экземпляров для одного из классов относительно невелико, то за счёт вероятностного разброса параметров признаков может возникнуть ситуация вложенности классов (рис. 3.4). Подобная ситуация может случиться и при больших значениях n_u и n_v .

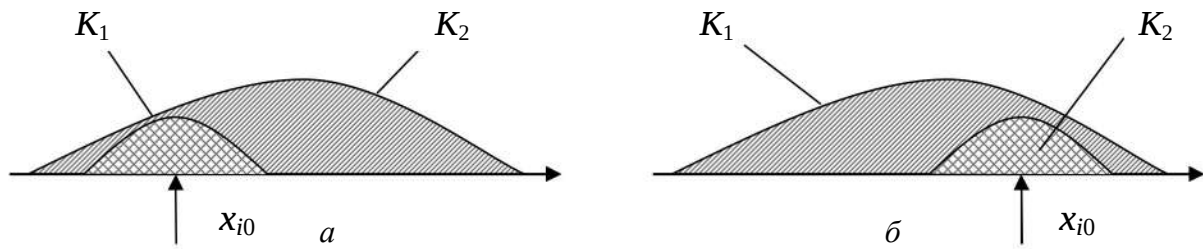


Рис. 3.4. Группирование значений признака x_i на его числовой оси в случае эффекта «вложенности» классов K_1 и K_2 :
 a – класс K_1 вложен в класс K_2 ; b – класс K_2 вложен в класс K_1 ;
 x_{i0} – пороговый уровень признака x_{i0}

В таких случаях выбор x_{i0} по выражениям, аналогичным (3.14), далёк от оптимального (см. рис. 3.4). Здесь необходимо использовать другие способы.

Указанного недостатка лишён способ, при котором x_{i0} выбирают как среднюю точку между центрами классов K_1 и K_2 . В качестве центров классов используют оценки математических ожиданий (т.е. средние значения) признака x_i в соответствующих классах, найденные с использованием экземпляров обучающей выборки (рис. 3.5).

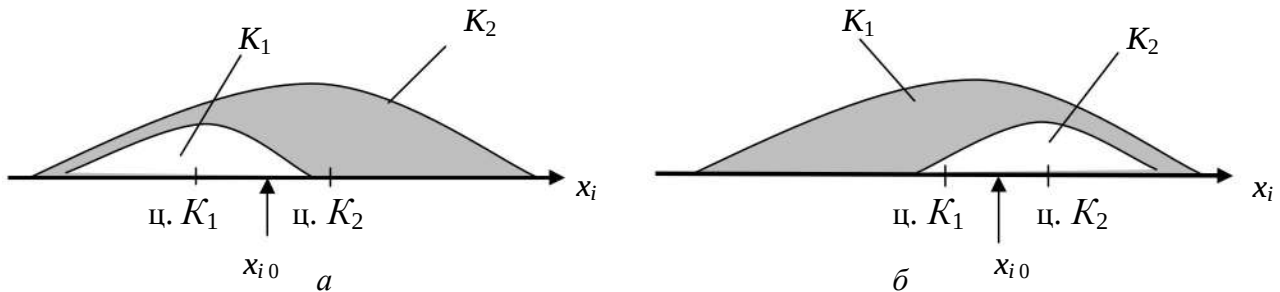


Рис. 3.5. Возможное расположение центров классов (средних значений x_i в классах) на числовой оси признака x_i в случае эффекта «вложенности» классов:
 a – класс K_1 вложен в класс K_2 ; b – класс K_2 вложен в класс K_1 ; ц. K_1 – центр класса K_1 ;
 ц. K_2 – центр класса K_2 ; x_{i0} – пороговый уровень признака x_i

Рабочая формула для определения x_{i0} в этом случае принимает вид

$$x_{i0} = \frac{M(x_i / K_1) + M(x_i / K_2)}{2}, \quad (3.15)$$

где $M(x_i / K_1)$ – математическое ожидание признака x_i , подсчитанное для экземпляров класса K_1 обучающей выборки;

$M(x_i / K_2)$ – математическое ожидание признака x_i , подсчитанное для экземпляров класса K_2 обучающей выборки.

Величина x_{i0} может также выбираться из условия [4]

$$P_{\text{прав}}(x_{i0}) \rightarrow \max, \quad (3.16)$$

где $P_{\text{прав}}(x_{i0})$ – вероятность принятия правильных решений, соответствующая выбираемому пороговому уровню x_{i0} .

С учётом выражений (3.8) или (3.9), используемых для преобразования признака x_{i0} в двоичный сигнал z_i , условие (3.16) равносильно следующему:

$$n(\text{реш } z_i = 1 / K_1) + n(\text{реш } z_i = 0 / K_2) \rightarrow \max, \quad (3.17)$$

где $n(\text{реш } z_i = 1 / K_1)$ – количество решений $z_i = 1$, принятых по выражениям (3.8) или (3.9) для экземпляров класса K_1 ;

$n(\text{реш } z_i = 0 / K_2)$ – количество решений $z_i = 0$, принятых по выражениям (3.8) или (3.9) для экземпляров класса K_2 .

При выборе величин x_{i0} условие (3.16) или, что то же самое, (3.17) нужно последовательно применить для каждого признака x_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

Способы, использующие формулы (3.14) и (3.15), в общем случае не являются оптимальными ни с точки зрения минимума среднего риска [3], ни с точки зрения вероятности принятия правильных решений [1, 3, 4]. Способ на основе критерия (3.16) или, что то же самое, (3.17) даёт оптимальные результаты лишь в случае независимых признаков. Параметры-признаки полупроводниковых приборов (ППП) в той или иной степени всегда являются коррелированными, а следовательно, и зависимыми. Поэтому применительно к ППП этот способ определения x_{i0} не является лучшим.

В работе [5] предложен способ, согласно которому оптимальным считается такое значение x_{i0} , при котором двоичный сигнал (ноль или единица), полученный по результатам преобразования признака любого наугад взятого экземпляра, обеспечивает получение максимального количества информации о классе этого экземпляра. Для определения x_{i0} предлагается использовать информационный подход (положения теории информации).

Возможность применения информационного подхода к определению пороговых уровней признаков обосновывается следующим [5]. Контроль (измерение) признака $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра и его преобразование по выражениям вида (3.8) или (3.9) в двоичный сигнал $z_i^{(j)}$ с учётом выбранного порогового уровня x_{i0} позволяет в какой-то степени снять неопределённость класса j -го экземпляра. Например, если по результатам преобразования окажется, что $z_i^{(j)} = 1$, то j -й экземпляр скорее всего окажется представителем класса K_1 , ибо по результатам преобразования этому классу в основном должны соответствовать сигналы $z_i^{(j)} = 1$ и, наоборот, при $z_i^{(j)} = 0$ – представителем класса K_2 .

Другими словами, пороговый уровень x_{i0} даёт о классе экземпляра определённое количество информации $I(x_{i0})$. В качестве критерия выбора x_{i0} можно взять максимум этой информации, т.е.

$$I(x_{i0}) \rightarrow \max. \quad (3.18)$$

Для информации $I(x_{i0})$ справедливо выражение

$$I(x_{i0}) = H(K_S) - H(K_S / x_{i0}), \quad (3.19)$$

где $H(K_S)$ – энтропия (степень неопределённости) класса экземпляра до контроля признака x_i и его преобразования в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} ;

$H(K_S / x_{i0})$ – условная энтропия класса экземпляра после контроля признака x_i и преобразования его в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} .

На основе положений теории информации, описанных в работе [6], получены следующие формулы для подсчёта величин $H(K_S)$ и $H(K_S / x_{i0})$ [5]:

$$H(K_S) = - \sum_{S=1}^2 P(K_S) \log P(K_S); \quad (3.20)$$

$$H(K_S / x_{i0}) = - \sum_{l=1}^2 p(z_i = o_l) \sum_{S=1}^2 P(K_S / z_i = o_l) \log P(K_S / z_i = o_l), \quad (3.21)$$

где $p(z_i = o_l)$ – априорная вероятность того, что с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ_l ; $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = 0$;

$P(K_S / z_i = \xi_l)$ – условная вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_S при условии, что с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ_l ; $S = 1, 2$; $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = 0$.

Оценка всех вероятностей, используемых в формулах (3.20) и (3.21), может быть сделана по данным обучающего эксперимента и результатам преобразования по выражениям (3.8) или (3.9) признака x_i в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} .

$$p(z_i = \xi) = \frac{n(z_i = \xi)}{n}; \quad (3.22)$$

$$P(K_S / z_i = \xi) = \frac{n(K_S / z_i = \xi)}{n(z_i = \xi)}, \quad (3.23)$$

где $n(z_i = \xi)$ – количество в обучающей выборке экземпляров, для которых с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ ; $\xi = 1$ или $\xi = 0$;

$n(K_S / z_i = \xi)$ – количество в обучающей выборке экземпляров класса K_S , для которых с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ ; $\xi = 1$ или $\xi = 0$; $S = 1, 2$.

С учётом того, что в МПЛ z_i может принимать лишь два значения (нуль или единицу), рабочие формулы для подсчёта интересующих вероятностей примут вид [5]

$$\left. \begin{aligned} P(K_1 / 1) &= \frac{n(K_1 / 1)}{n(1)}; & P(K_1 / 0) &= \frac{n(K_1 / 0)}{n(0)}; \\ P(K_2 / 1) &= \frac{n(K_2 / 1)}{n(1)}; & P(K_2 / 0) &= \frac{n(K_2 / 0)}{n(0)}; \\ p(1) &= \frac{n(1)}{n}; & p(0) &= \frac{n(0)}{n}, \end{aligned} \right\} (3.24)$$

где $n(K_1 / 1)$ – число экземпляров класса K_1 , для которых $z_i = 1$;
 $n(K_1 / 0)$ – число экземпляров класса K_1 , для которых $z_i = 0$;
 $n(K_2 / 1)$ – число экземпляров класса K_2 , для которых $z_i = 1$;
 $n(K_2 / 0)$ – число экземпляров класса K_2 , для которых $z_i = 0$;
 $n(1)$ – общее число экземпляров, для которых $z_i = 1$;
 $n(0)$ – общее число экземпляров, для которых $z_i = 0$.

Предполагается, что указанные характеристики соответствуют рассматриваемому значению x_{i0} .

Изменяя значения порога x_{i0} , с использованием формул (3.19)–(3.21) можно построить график зависимости информации $I(x_{i0})$ от величины x_{i0} и по нему с учётом критерия (3.18) выбрать оптимальное значение x_{i0} (рис. 3.6, а).

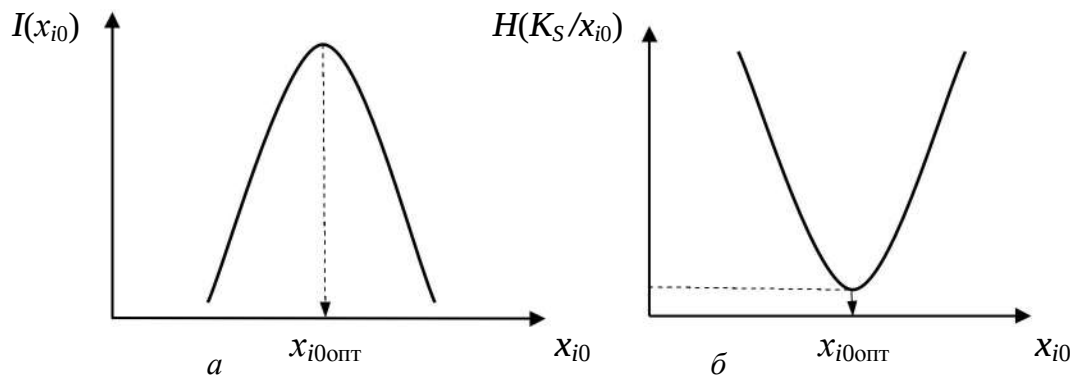


Рис. 3.6. Теоретические (гипотетические) зависимости информационных характеристик от порогового уровня x_{i0} :

а – для количества информации; б – для условной энтропии;

x_{i0opt} – оптимальное значение порогового уровня x_{i0}

Энтропия $H(K_S)$, используемая в выражении (3.19), для конкретной задачи индивидуального прогнозирования ППП является величиной постоянной. Поэтому при практическом определении оптимального значения x_{i0} можно также пользоваться критерием

$$H(K_S / x_{i0}) \rightarrow \min, \quad (3.25)$$

согласно которому лучшим считается такое значение x_{i0} , при котором условная энтропия (степень неопределённости) класса экземпляра минимальна. В этом случае выбор x_{i0} может выполняться по графику зависимости условной энтропии $H(K_S/x_{i0})$ от x_{i0} (рис. 3.6, б).

2. Преобразование признаков $x_1, \dots, x_k$ экземпляров обучающей выборки в двоичные сигналы $z_1, \dots, z_k$ выполняется по выражениям (3.8), (3.9).

3. Для определения веса $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала с учётом выбранного порогового значения x_{i0} , подсчитываются по соотношениям (3.12), (3.13) оценки вероятностей $P(K_1/z_1 = 1)$ и $P(K_1/z_1 = 0)$. Эти оценки в соответствии с выражением (3.11) принимаются в качестве веса $\alpha(z_i)$.

4. Значение решающей функции $F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)})$ j -го экземпляра обучающей выборки определяется по формуле

$$F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)}) = \sum_{i=1}^k \alpha(z_i^{(j)}) , \quad (3.26)$$

где $\alpha(z_i^{(j)})$ – значение веса i -го двоичного сигнала z_i , взятое для j -го экземпляра с учётом значения z_i .

5. Для определения порога разделения классов P_0 задаются несколькими точками из области изменения решающей функции $F(z_1, \dots, z_k)$ для экземпляров обучающей выборки. Для каждой выбранной точки, пользуясь правилом, задаваемым соотношением (3.10), подсчитывают по формуле (3.4) вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$. В качестве искомого порога разделения классов P_0 берут такое значение, которое отвечает условию (3.5), т.е.

$$P_{\text{прав}} \rightarrow \max .$$

Выбор значения величины P_0 может выполняться также и по условию вида (3.6), т.е.

$$p_{12} \rightarrow \min \quad \text{при} \quad p_{21} \leq p_{21 \text{ доп}} .$$

6. Представление прогнозирующего правила логической таблицей, используемой для прогнозирования, осуществляется следующим образом. Для всех теоретически возможных наборов двоичных сигналов $z_1, z_2, \dots, z_k$ подсчитываются по выражению (3.26) значения решающей функции $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$. Используя построенное прогнозирующее правило вида (3.10), определяют, какому классу соответствует тот или иной набор двоичных сигналов.

Логическая таблица для прогнозирования оформляется в виде, приведённом на рис. 3.7. С целью уменьшения строк таблицы рекомендуется включать в неё наборы лишь для одного из классов.

Номер набора (комбинации)	Двоичные сигналы			Значения решаю- щей функции $\Sigma\alpha(z_i)$	Класс изделия по прогнозу
	z_1	...	z_k		
1	$z_1^{(1)}$	...	$z_k^{(1)}$		$K_s^{(1)}$
2	$z_1^{(2)}$	...	$z_k^{(2)}$		$K_s^{(2)}$
...	...	...	...	...	...

Рис. 3.7. Общий вид логической таблицы

7. Прогнозирование новых однотипных изделий, не участвовавших в обучающем эксперименте, выполняется в следующем порядке:

- а) измерение значений признаков l -го экземпляра;
- б) преобразование признаков l -го экземпляра $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)}$ по выражениям (3.8) или (3.9) в двоичные сигналы $z_1^{(l)}, z_2^{(l)}, \dots, z_k^{(l)}$;
- в) поиск в логической таблице набора, соответствующего l -му экземпляру и принятие решения о классе этого экземпляра.

7.3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лабораторная работа предусматривает решение методом пороговой логики задачи индивидуального прогнозирования надёжности (качества) транзисторов типа 2Т645 на заданный будущий момент времени $t_{пр}$. При этом предполагается, что отобранные транзисторы повышенного уровня надёжности будут устанавливаться в устройства (каскады), работающие в ключевом режиме. Считаются также априорно известными информативные параметры (признаки) транзистора для ключевого режима (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Информативный параметр	Обозначение	Режим измерения
Коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером	$h_{21Э}$	$I_Э = 600$ мА (ток эмиттера) $U_{КЭ} = 10$ В (напряжение коллектора–эмиттер)
Напряжение насыщения коллектор–эмиттер	$U_{КЭ\text{ нас}}$	$I_Э = 600$ мА $I_Б = 100$ мА (ток базы)
Ток запертого транзистора	$I_{КЭХ}$	$U_{КЭ} = 10$ В, $U_{БЭ} = -5$ В (напряжение база–эмиттер)
Ёмкость коллекторного перехода	C_K	$U_{КБ} = 0$ (напряжение коллектор–база)

Время прогнозирования $t_{\text{пр}}$, на момент которого интересуются надёжностью транзистора, составляет обычно сотни, тысячи и даже десятки тысяч часов. Получение результатов обучающего эксперимента для времени $t_{\text{пр}}$ с использованием даже ускоренных испытаний в рамках времени, отведённого для лабораторной работы, не представляется возможным. Поэтому в лабораторной работе результаты обучающего эксперимента для заданного момента времени $t_{\text{пр}}$ получают на ЭВМ с помощью математического моделирования информативных параметров и уровня надёжности транзисторов [7]. В качестве уровня надёжности транзисторов указывается класс экземпляра к моменту времени $t_{\text{пр}}$: K_1 – для неотказавших (надёжных) и K_2 – для отказавших (дефектных, ненадёжных) экземпляров.

При получении на ЭВМ результатов обучающего эксперимента информативные параметры обозначены как x_i ($i = 1, 2, \dots$). Связь между обозначениями информативных параметров в табл. 3.2 и обучающем эксперименте такова: $h_{21\Omega} \rightarrow x_1, U_{\text{КЭ нас}} \rightarrow x_2, I_{\text{КЭХ}} \rightarrow x_3, C_{\text{К}} \rightarrow x_4$.

При моделировании по указанию преподавателя могут использоваться три или четыре информативных параметра. Для удобства анализа результатов обучающего эксперимента экземпляры сгруппированы по классам. Вначале представлены экземпляры класса K_1 , а затем экземпляры класса K_2 . Соотношение между количеством экземпляров классов K_1 и K_2 зависит от заданного времени $t_{\text{пр}}$.

Чем больше значение объёма обучающей выборки (n), тем выше достоверность прогнозирования. Верхнее значение числа n ограничивается обычно экономическими соображениями. На практике для элементов РЭС значение n выбирают из диапазона не менее 30...100. В лабораторной работе следует выбрать $n = 100$, если нет других указаний от преподавателя.

Располагая результатом обучающего эксперимента, студент должен методом пороговой логики (см. подразд. 3.2.2) получить прогнозирующее правило в виде логической таблицы (см. рис. 3.7), которая может быть использована для принятия решения о классе новых экземпляров исследуемого типа транзисторов. Причём под словом «новые экземпляры» понимаются те экземпляры, которые не участвовали в обучающем эксперименте.

Экземпляры, которые участвовали в обучающем эксперименте, свою функцию выполнили, и, если они даже оказались надёжными (класс K_1), ставить их в устройства нельзя: они отработали время $t_{\text{пр}}$ и их рабочий ресурс может находиться на исходе.

Последовательность применения метода пороговой логики приведена в подразд. 3.2.2.

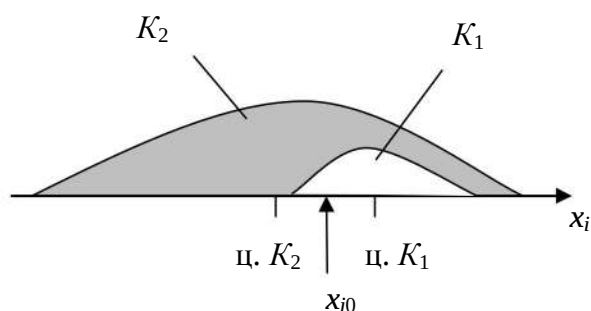
Покажем на примере, как определить пороговые значения x_{i0} , необходимые для преобразования признаков в двоичные сигналы z_i , и как подсчитать веса двоичных сигналов z_i .

Пример 1. Определим пороговое значение x_{i0} признака x_i . Результаты измерений признака x_i в момент времени $t = 0$ и информация о классе экземпляров в момент времени $t = t_{\text{пр}}$ представлены в табл. 3.3 (столбцы 1–3).

Таблица 3.3

Номер экземпляра	Значение x_i при $t = 0$	Класс при $t = t_{\text{пр}}$	Значение сигнала z_i
1	14	1	1
2	13	1	1
3	10,5	1	0
4	14	1	1
5	10,5	1	0
6	13	1	1
7	10	2	0
8	7	2	0
9	15	2	1
10	6	2	0

Решение. Анализируя значения признака x_i экземпляров класса K_1 и класса K_2 , можно убедиться, что имеет место эффект «вложенности» класса K_1 в класс K_2 (рис. 3.8).

Рис. 3.8. Связь признака x_i с номером класса

Определим значение x_{i0} с помощью формулы (3.15). Используя экземпляры класса K_1 , находим

$$M(x_i / K_1) = \text{ц. } K_1 = 12,5.$$

Принимая во внимание значения x_i для экземпляров класса K_2 , получим

$$M(x_i / K_2) = \text{ц. } K_2 = 9,5.$$

Следовательно,

$$x_{i0} = (12,5 + 9,5)/2 = 11.$$

Значения двоичного сигнала z_i , соответствующие выбранному пороговому уровню $x_{i0} = 11$, получены по соотношению (3.8). Они представлены в табл. 3.3 (последний столбец) и в дальнейшем будут использованы для определения веса двоичного сигнала, т.е. значения $\alpha(z_i)$.

Пример 2. Для условий примера 1 определить вес двоичного сигнала x_i при пороговом значении равном $x_{i0} = 11$.

Решение. 1. Используя формулу (3.12), подсчитаем оценку вероятности того, что экземпляр обучающей выборки принадлежит к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = 1$.

С помощью табл. 3.3 (последний столбец) получим

$$n(K_1 / z_i = 1) = 4, \quad n(z_i = 1) = 5.$$

Тогда оценка искомой вероятности может быть определена как

$$P(K_1 / z_i = 1) = \frac{n(K_1 / z_i = 1)}{n(z_i = 1)} = \frac{4}{5} = 0,8.$$

2. С помощью формулы (3.13) определим оценку вероятности вида $P(K_1/z_i = 0)$.

$$P(K_1/z_i = 0) = \frac{n(K_1/z_i = 0)}{n(z_i = 0)} = \frac{2}{5} = 0,4.$$

В качестве весов $\alpha(z_i)$ входного сигнала z_i в соответствии с выражением (3.11) выбираем

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} 0,8, & \text{если } z_i = 1; \\ 0,4, & \text{если } z_i = 0. \end{cases}$$

В дальнейшем значения весов $\alpha(z_i)$ используются при подсчёте по формуле (3.26) значения решающей функции F , соответствующей j -му экземпляру.

Порог разделения классов P_0 в прогнозирующем правиле (3.10) ищется способом, описанным в подразд. 3.2.1. Оптимальное значение величины P_0 может определяться с учётом критерия (3.5) либо критерия (3.6).

Пример 3 (иллюстрация подсчёта характеристик n_{21} , n_{12} , $P_{\text{прав}}$, p_{12} , p_{21}). В табл. 3.4 приведены значения решающей функции F , подсчитанные для экземпляров обучающей выборки.

Таблица 3.4

Номер экземпляра	Действительный класс при $t = t_{\text{пр}}$	Значение функции F	Класс экземпляра по прогнозу при выбранном значении $P_0 = 2,3$
1	1	2,8	1
2	1	2,1	2
3	1	2,2	2
4	1	2,7	1
5	2	2,0	2
6	2	2,1	2
7	2	2,4	1
8	2	1,8	2

Требуется рассчитать значения характеристик $P_{\text{прав}}$, p_{12} , p_{21} для точки $P_0 = 2,3$. Эта точка взята из области пересечения классов K_1 и K_2 (перекрытия значений функции F).

Решение. 1. Подставляя в прогнозирующее правило вида (3.10) значение порога $P_0 = 2,3$, определяем класс экземпляров по прогнозу (см. последний столбец табл. 3.4).

2. Сравнивая действительный класс экземпляра (второй столбец табл. 3.4) с классом экземпляра по прогнозу (последний столбец табл. 3.4), определяем характеристики $n_{12} = n(K_1/\text{реш } K_2)$, $n_{21} = n(K_2/\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_2)$. Не трудно убедиться, что

$$n_{12} = 2; n_{21} = 1; n(\text{реш } K_1) = 3; n(\text{реш } K_2) = 5.$$

3. По формулам (3.2)–(3.4) подсчитываем искомые характеристики, учитывая, что объём обучающей выборки $n = 8$.

$$P_{\text{прав}} = 1 - \frac{n_{21} + n_{12}}{n} = 1 - \frac{1 + 2}{8} = 0,625; \quad p_{12} = \frac{n_{12}}{n(\text{реш } K_2)} = \frac{2}{5} = 0,4;$$

$$p_{21} = \frac{n_{21}}{n(\text{реш } K_1)} = \frac{1}{3} \approx 0,33.$$

Программа для ПЭВМ, используемая в лабораторной работе, написана таким образом, что все последующие действия студенту подсказываются. Программа имеет режим, предусматривающий контроль знаний и навыков студента. В этом случае отдельные характеристики и величины предлагается студенту определить путём обычного «ручного» расчёта. Если характеристика или величина рассчитана верно, ПЭВМ в автоматическом режиме подсчитывает остальную требуемую информацию, т.е. от «чисто механической» работы студент освобождается.

После того как прогнозирующее правило в виде логической таблицы построено, студенту предлагается применить это правило к экземплярам контрольной выборки, действительная надёжность экземпляров которой на момент времени $t_{\text{пр}}$ будет указана после выполнения студентом прогнозирования.

74. ЗАДАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ ЧАСТЬ

1. Уточнить у преподавателя исходные данные, необходимые для моделирования на ПЭВМ обучающего эксперимента. Этими данными являются:

- число информативных параметров (признаков);
- объём обучающей выборки;
- время, для которого интересуются надёжностью транзисторов.

2. Запустить программу для ПЭВМ с именем **lab3.exe**. В некоторых редакциях программы её выполнение начинается после ввода кода, который вводит преподаватель.

3. Для признака, который будет указан ПЭВМ, «ручными» приёмами определить значение порогового уровня x_{i0} и ввести его в ПЭВМ по запросу программы. Способ определения x_{i0} также указывается ПЭВМ. Если значение x_{i0} определено верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то значения пороговых уровней для остальных признаков будут подсчитаны ПЭВМ автоматически.

4. Проанализировать двоичные сигналы для признака (столбца), указанного ПЭВМ, и определить «ручным» расчётом вес двоичных сигналов $z_i = 1$ и $z_i = 0$ (см. пример 2). Если эти характеристики подсчитаны верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то аналогичные характеристики, соответствующие остальным признакам, будут подсчитаны ПЭВМ автоматически.

5. Для указанного ПЭВМ экземпляра с учётом его двоичных сигналов подсчитать значение решающей функции F . Если подсчёт выполнен верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то для остальных $(n - 1)$ экземпляров значение функции F будет подсчитано автоматически.

6. Проанализировать столбец значений решающей функции и определить границы зоны перекрытия функции F .

7. Задаться 6–10 значениями функции F , включая границы зоны перекрытия. Эти точки в дальнейшем будут использоваться для определения значения порога разделения классов P_0 . Для одной из точек, указанной ПЭВМ, определить характеристики $P_{\text{прав}}$, p_{12} и p_{21} (см. пример 3). Для чего вначале, принимая во внимание значения точки (величины P_0), подсчитать характеристики: n_{12} , n_{21} , $n(\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_2)$. Столбец с указанием класса экземпляра по прогнозу при значении величины P_0 будет выведен на экран монитора.

Если характеристики $P_{\text{прав}}$, p_{12} и p_{21} , соответствующие указанному ПЭВМ значению величины P_0 , подсчитаны верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то для остальных точек зоны перекрытия значений F указанные характеристики будут определены автоматически.

8. Построить график зависимости $P_{\text{прав}}$ от P_0 и в качестве искомой величины P_0 выбрать такое значение, которое отвечает условию $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. После ввода в ПЭВМ найденного значения P_0 будут указаны более точные значения величин P_0 и $P_{\text{прав}}$ и приведено прогнозирующее правило в виде логической таблицы, содержащей комбинации двоичных сигналов, соответствующие классу K_1 .

9. По запросу программы дать указание ПЭВМ о числе транзисторов контрольной выборки, надёжность которых на момент времени $t_{\text{пр}}$ известна, но временно недоступна для пользователя. Число экземпляров контрольной выборки брать не менее 20.

Транзисторы контрольной выборки предъявляются для анализа по одному экземпляру. Задача студента – с учётом значений пороговых уровней x_{i0} преобразовать признаки исследуемого экземпляра в двоичные сигналы z_i , с помощью логической таблицы принять решение о классе экземпляра и сообщить это ПЭВМ. После этого ПЭВМ укажет действительный класс экземпляра. В процессе анализа экземпляров контрольной выборки ПЭВМ подсчитывает число правильных и число ошибочных решений. После завершения анализа экземпляров контрольной выборки она даёт оценку вероятности принятия правильных решений применительно к этой выборке.

10. Используя результаты, полученные в п. 7, построить графики зависимости риска потребителя p_{21} и риска изготовителя p_{12} от выбираемого значения порога P_0 и с помощью графиков определить значение порога P_0 , соответствующее условию $p_{21} \leq p_{21\text{доп}}$. Рекомендуется $p_{21\text{доп}}$ брать не выше значения 0,1.

Для выбранного по графикам значения порога разделения классов P_0 зафиксировать значения p_{21} и p_{12} . После этого ввести в ПЭВМ значение порога P_0 . На экране монитора будет представлена логическая таблица, содержащая комбинации двоичных сигналов, соответствующие классу K_1 .

Далее, используя полученную логическую таблицу (прогнозирующее правило), необходимо выполнить действия, указанные в п. 9.

Примечания.

1. Пункт 10 выполняется по указанию преподавателя. Значение величины $p_{21\text{доп}}$ согласовывается.

2. Расчёт некоторых величин, выполняемых «ручными» приёмами, преподавателем может быть опущен. Для этого им вводится в ПЭВМ код сложности работы.

3. При вводе в ПЭВМ неверных ответов, в том числе с целью получения правильного ответа методом случайного перебора, студенту (бригаде студентов) начисляются штрафные баллы в геометрической прогрессии за каждый последующий неверный ответ. Большое число штрафных баллов (100 и более) рассматривается преподавателем как следствие слабой подготовки студента к работе и свидетельствует о том, что методика выполнения лабораторной работы и метод прогнозирования не были осмыслены, а экспериментальная часть работы выполнялась на «чисто механическом» уровне.

3.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.

2. Исходные данные, используемые для решения задачи индивидуального прогнозирования: число признаков (k); количество экземпляров обучающей выборки n ; время $t_{\text{пр}}$, для которого интересуются надёжностью; допустимое значение риска потребителя $p_{21\text{доп}}$.

3. Таблица с указанием номера признака, его физического смысла, порогового уровня x_{i0} , а также знака соотношения, при котором значение признака преобразуется в двоичный сигнал $z_i = 1$; $i = 1, \dots, k$. Кроме того, необходимо указать способ, используемый для определения значений x_{i0} .

4. Таблица с указанием номеров признаков и весов двоичных сигналов $z_i = 1$ и $z_i = 0$; $i = 1, \dots, k$.

5. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы, полученное исходя из критерия $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. Необходимо также указать оценку вероятности принятия правильных решений.

6. Результаты сравнения характеристик $P_{\text{прав}}$, полученных при построении прогнозирующего правила и при его применении к экземплярам контрольной выборки.

7. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы, полученное исходя из критерия $p_{21} \leq p_{21\text{доп}}$ ($p_{12} \rightarrow \min$), а также результаты сравнения характеристик p_{21} и p_{12} , полученных при построении прогнозирующего правила и при его применении к экземплярам контрольной выборки.

8. Выводы по проделанной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

Практическое занятие №8

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

8.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выполнить прогнозирование функциональных параметров биполярных транзисторов и на основе этого принять решение о параметрической надёжности каждого экземпляра на заданный будущий момент времени.

8.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

По литературным данным [1] на долю постепенных, иначе, параметрических отказов приходится до 70–80 % всех отказов полупроводниковых приборов. Поэтому обеспечению параметрической надёжности полупроводниковых приборов вообще и биполярных транзисторов в частности должно уделяться особое внимание. Одним из способов решения этой задачи является индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности и отбор тех экземпляров, которые отвечают требованию надёжности.

В лабораторной работе для индивидуального прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов используется методика, разработанная в учреждении образования БГУИР на кафедре РЭС в рамках выполнения ГБЦ НИР 01–3155 «Оценка стабильности функциональных параметров полупроводниковых приборов по их реакции на воздействие имитационного фактора» (научный руководитель – С. М. Боровиков, ответственный исполнитель – А. И. Щерба). С теоретическими подходами, положенными в основу разработки методики, можно ознакомиться в работах [2–4].

Ниже приводятся выдержки из методики, которые позволяют понять основные теоретические положения метода прогнозирования и его практическое использование в лабораторной работе.

8.2.1. Область применения методики

1. Методика индивидуального прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов позволяет применительно к конкретному экземпляру и заданной наработке t определить (спрогнозировать) значение функционального параметра P (далее параметра P), определяющего параметрическую надёжность транзисторов при их работе в аппаратуре. Соответствие рассматриваемого экземпляра требованию параметрической надёжности (с учетом заданной наработки t) выполняется путем сравнения прогнозного значения P с нормой, приведённой в технических условиях на биполярные транзисторы интересующего типа, или со значением, указанным изготовителем аппаратуры.

При работе транзистора в усилительном режиме в качестве контролируемых параметров P рекомендуется принимать коэффициент усиления $h_{21Э}$ и (или) обратные токи переходов, при работе в ключевом режиме – напряжение насыщения $U_{КЭ\text{ нас}}$.

2. Методика предполагает использование имитационных воздействий, в основе которых лежит принцип установления функциональных связей между изменениями параметра транзистора, вызванными, с одной стороны, имитационным воздействием, не приводящим к уменьшению их рабочего ресурса, и, с другой стороны, длительной наработкой (временем работы).

3. Решение задачи прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов с использованием имитационных воздействий включает в себя следующее: экспериментальные исследования определённой выборки транзисторов рассматриваемого типа на воздействие имитационного фактора и длительную наработку; получение имитационной модели; определение ошибок прогнозирования; собственно индивидуальное прогнозирование однотипных экземпляров, не принимавших участие в экспериментальных исследованиях.

4. Экспериментальные исследования выборки биполярных транзисторов рассматриваемого типа проводят с целью получения функциональных зависимостей параметра P от имитационного фактора F , а также от значения наработки t . Для этого предварительно выбирают параметр P , по значению которого судят о параметрической надёжности транзисторов, и фактор F , используемый в качестве имитационного.

В экспериментальных исследованиях участвуют обучающая и контрольная выборки транзисторов рассматриваемого типа. Результаты исследования обучающей выборки используются для получения имитационной модели, а результаты исследования контрольной выборки – для определения ошибки прогнозирования.

5. Имитационная модель представляет собой уравнение, устанавливающее соответствие между наработкой транзистора (t) и уровнем имитационного фактора F . Это уравнение называют уравнением связи. Оно показывает, какое значение имитационного фактора $F_{\text{им}}$ соответствует той или иной наработке t . Для его нахождения выполняется обработка экспериментальных данных, полученных при исследовании обучающей выборки. Находят математические выражения (модели), показывающие, как выбранный параметр P транзисторов рассматриваемого типа изменяется от уровня имитационного фактора F и от значения наработки t :

$$P = \varphi_1(F), \quad (4.1)$$

$$P = \varphi_2(t), \quad (4.2)$$

где φ_1 – функция, описывающая изменение параметра P от имитационного фактора F ;

φ_2 – функция, описывающая изменение параметра P от наработки t .

Для нахождения имитационной модели (уравнения связи) выражения (4.1) и (4.2) приравнивают друг к другу и решают полученное уравнение относительно имитационного фактора F :

$$F_{\text{им}} = f(t), \quad (4.3)$$

где f – символ функциональной связи.

6. Определение ошибок прогнозирования выполняют для того, чтобы проверить пригодность полученного уравнения связи для индивидуального прогнозирования параметрической надёжности тех экземпляров транзисторов рассматриваемого типа, которые не принимали участие в экспериментальных исследованиях (в обучающей и контрольной выборках). Среднюю ошибку прогнозирования находят, используя контрольную выборку, которую испытывают (с целью сокращения времени и экономии средств) одновременно с обучающей выборкой. Если известно значение наработки транзисторов в составе аппаратуры, то средняя ошибка прогнозирования определяется для этой наработки. В других случаях её определяют для наработки, указываемой в документации на транзисторы рассматриваемого типа. Уравнением связи можно пользоваться на практике, если средняя ошибка прогнозирования не превышает допустимого значения.

7. Индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности конкретных экземпляров транзисторов рассматриваемого типа, не участвовавших в экспериментальных исследованиях, позволяет сделать оценку их работоспособности для заданной наработки t . Для этого, пользуясь полученным уравнением связи (4.3), для наработки t определяют значение имитационного фактора $F_{\text{им}}$. Устанавливая уровень имитационного фактора, равный $F_{\text{им}}$, измеряют параметр P экземпляра (транзистора) и делают прогноз: считают, что для наработки t параметр P этого экземпляра будет иметь такое же значение, как полученное при измерении. Путём сравнения измеренного значения P с нормой (требованиями) делают заключение о параметрической надёжности испытуемого транзистора для заданной наработки t .

8.2.2. Экспериментальные исследования

1. Для проведения экспериментальных исследований формируется выборка транзисторов рассматриваемого типа. Её общий объём (N) включает обучающую (n) и контрольную (m) выборки. Результаты испытаний первой выборки используют для получения имитационной модели, второй – для определения ошибок прогнозирования. Экспериментальные исследования этих выборок проводят одновременно.

2. Для проведения экспериментальных исследований отбирается случайным образом из одной и той же партии транзисторов N экземпляров.

3. Проводят эксперимент с использованием имитационного воздействия.

В качестве имитационного фактора F выбирают ток коллектора (I_K) или температуру (T).

Дальнейшие действия излагаются применительно к случаю использования тока коллектора в качестве F .

4. При различных значениях тока I_K (примерно в 5...7 точках) измеряют значение интересующего параметра P у всех экземпляров сформированной выборки объемом N . Принимая во внимание только экземпляры обучающей выборки, для каждой точки I_K находят среднее значение P . Полученные данные рекомендуется сводить в табл. 4.1. Используя данные табл. 4.1 и прикладные программы для ПЭВМ, получают математическую модель вида

$$P = f_1(I_K), \quad (4.4)$$

где f_1 – символ функциональной связи, вид которой определяется прикладной программой.

Таблица 4.1

Значение I_K , А	Среднее значение параметра P для экземпляров обучающей выборки
I_{K1}	$P(I_{K1})$
I_{K2}	$P(I_{K2})$
.....	

5. Проводят испытания выборки объемом N на долговечность. Цель этих испытаний – выяснить, как изменяется параметр P от наработки t . Используют ускоренные испытания, позволяющие за относительно короткое время получить о параметре P ту же информацию, что и за длительную наработку t . Вначале планируют проведение чисто температурных испытаний. В случае, если действие только температуры окажется недостаточным для существенного уменьшения общей продолжительности испытаний, то дополнительно используют электрическую нагрузку.

Оценивают влияние наработки t на параметр P . Для этого для нескольких моментов времени t , выбранных на этапе испытаний, определяют среднее значение P , используя только экземпляры обучающей выборки. Полученную информацию рекомендуется заносить в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значение t , ч	Среднее значение параметра P для экземпляров обучающей выборки
t_1	$P(t_1)$
t_2	$P(t_2)$
.....	

Затем, используя данные табл. 4.2 и прикладные программы для ПЭВМ, получают математическую модель вида

$$P = f_2(t), \quad (4.5)$$

где f_2 – символ функциональной зависимости, конкретный вид которой выбирается с помощью прикладной программы.

Получают уравнение связи. Для этого приравнивают друг к другу выражения (4.4), (4.5) и находят уравнение связи в виде

$$I_{\text{Ким}} = f(t). \quad (4.6)$$

Подставляя заданное значение наработки t в уравнение (4.6), можно рассчитать имитационный ток коллектора $I_{\text{Ким}}$, который окажет такое же воздействие на интересующий параметр P , как и наработка t .

8.2.3. Определение ошибок прогнозирования

1. Ошибки прогнозирования оценивают для той наработки t , для которой интересуются параметрической надёжностью транзисторов исследуемого типа.

2. По найденному уравнению связи (4.6) рассчитываются значения имитационного фактора (тока коллектора $I_{\text{Ким}}$) для интересующей наработки t .

3. У каждого экземпляра контрольной выборки определяют прогнозное ($P_{\text{пр}}$) значение параметра P для интересующей наработки t , для чего у экземпляра измеряют значение P при значении тока коллектора, равном $I_{\text{Ким}}$.

4. Используя экспериментальные данные, полученные при испытании на долговечность контрольной выборки, определяют у каждого экземпляра истинное ($P_{\text{ист}}$) значение P для интересующей наработки t . Данные, полученные в пп. 3 и 4, рекомендуется свести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ экземпляра	$P_{\text{пр } i}$	$P_{\text{ист } i}$
1	$P_{\text{пр } 1}$	$P_{\text{ист } 1}$
2	$P_{\text{пр } 2}$	$P_{\text{ист } 2}$
.....		
m	$P_{\text{пр } m}$	$P_{\text{ист } m}$

Среднюю ошибку прогнозирования для заданной наработки t определяют по формуле

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{\text{пр } i} - P_{\text{ист } i}}{P_{\text{ист } i}} \right)^2}, \quad (4.7)$$

где m – объём контрольной выборки;

$P_{пр i}$ – прогнозное значение функционального параметра P i -го транзистора контрольной выборки, найденное в п. 3;

$P_{ист i}$ – истинное значение функционального параметра P i -го транзистора контрольной выборки, полученное в п. 4.

5. Уравнение связи (4.6) является пригодным для использования на практике при удовлетворительных ошибках прогнозирования ($\Delta_{ср} \leq 10...20 \%$).

8.2.4. Индивидуальное прогнозирование

1. Для заданной наработки t_3 по полученному уравнению связи (4.6) рассчитывается имитационное значение тока коллектора – $I_{К им}(t_3)$.

2. У экземпляра (транзистора), параметрическая надёжность которого прогнозируется, измеряют параметр P при токе коллектора, равном значению $I_{К им}(t_3)$. Считается, что контролируемый экземпляр в момент наработки t_3 будет иметь такое же значение параметра P , как и полученное в результате измерения при токе коллектора $I_{К им}(t_3)$.

3. Сравнивая значение параметра P , полученное при измерении, с требованием документации на транзисторы рассматриваемого типа или с нормой, установленной потребителем, принимают решение (делается прогноз) о параметрической надёжности экземпляра.

4. Если значение $I_{К им}(t_3)$, рассчитанное по уравнению (4.6), превышает предельно допустимое значение по ТУ более чем в 2 раза, то для заданной наработки t_3 следует отказаться от прогнозирования параметрической надёжности, т.к. существует заметный риск повреждения транзисторов при таком токе коллектора.

8.2.5. Пример практического применения методики

В качестве параметра P , определяющего параметрическую надёжность транзисторов типа КТ872А в электрической схеме РЭУ, использовалось напряжение насыщения $U_{КЭ нас}$. Выполнив пп. 1–4 подразд. 4.2.2 для параметра $U_{КЭ нас}$, была получена следующая аналитическая зависимость от тока коллектора I_K как имитационного фактора:

$$U_{КЭ нас} = 75 \cdot \exp(0,309 \cdot I_K). \quad (4.8)$$

Проведя исследования в соответствии с п. 5 подразд. 4.2.2, получена зависимость $U_{КЭ нас}$ от наработки t в диапазоне $0...t_n$ для рабочего тока коллектора, равного $I_K = 7$ А (t_n – наработка транзисторов, указанная в документации):

$$U_{КЭ нас} = 2,4 \cdot t^{0,47} + 615. \quad (4.9)$$

Размерность параметров выражений (4.8), (4.9): $[U_{КЭ нас}]$ – милливольты; $[I_K]$ – амперы; $[t]$ – часы.

Уравнение связи имитационного тока $I_{\text{К им}}$ со значением наработки t , полученное с использованием моделей (4.8), (4.9), приняло вид

$$I_{\text{К им}} = 3,24 \cdot \ln(0,032 \cdot t^{0,47} + 8,2). \quad (4.10)$$

По уравнению (4.10) можно определить, что, например, для $t_3 = 20\,000$ ч имитационный ток $I_{\text{К им}}(t_3) = 7,93$ А. Индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности новых однотипных экземпляров (транзисторов) для наработки $t_3 = 20\,000$ ч состоит в измерении параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ при этом токе коллектора и сравнении полученного значения с нормой. Предположим, что результат измерения составил 1068 мВ. Сравнивая это значение с нормой, приводимой в документации на транзистор типа КТ872А (не более 1 В), делаем вывод о несоответствии этого экземпляра требованию параметрической надёжности для наработки $t_3 = 20\,000$ ч.

8.3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Решение задачи прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов с использованием имитационных воздействий включает в себя следующее: экспериментальные исследования определённой выборки транзисторов рассматриваемого типа на воздействие имитационного фактора и длительную наработку; получение имитационной модели; определение ошибок прогнозирования; собственно индивидуальное прогнозирование однотипных экземпляров, не принимавших участие в экспериментальных исследованиях.

Поведение функционального параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ биполярных транзисторов при воздействии имитационного фактора, а также в течение заданной наработки моделируются в памяти ПЭВМ. При этом приняты во внимание закономерности функционального параметра $U_{\text{КЭ нас}}$, присущие рассматриваемому типу транзисторов. Сам обучающий эксперимент, моделируемый в памяти ПЭВМ, получение математических моделей вида (4.4) и (4.5), уравнения связи (4.6), определение ошибок прогнозирования функционального параметра $U_{\text{КЭ нас}}$, а также индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности новых экземпляров проводятся с непосредственным участием студента. Для этого от студента требуется выполнить определенные действия. В случае ошибочных действий из-за слабого усвоения методики начисляются штрафные баллы. Вначале с помощью программы для ПЭВМ **Imit.exe** (имя папки или каталога **LAB4**) получают результаты обучающего эксперимента – воздействие имитационного фактора и испытания на длительную наработку. Списывают с экрана монитора результаты параметра $U_{\text{КЭ нас}}$, усреднённые по всем экземплярам обучающей выборки, для случаев имитационного фактора и длительной наработки. Сво-рачивают программу **Imit.exe** или выходят из неё. С помощью другой программы **Skrv5.exe** (в этой же папке или каталоге) получают оптимальные математические модели вида (4.4) и (4.5), используя данные, списанные с экрана

монитора. Далее, выполняя чисто аналитические преобразования, получают уравнение связи вида (4.6), представляющее собой имитационную модель. Снова входят в программу **Imit.exe** и, используя результаты моделирования контрольной выборки, определяют среднюю ошибку прогнозирования для трёх точек диапазона интересующего времени работы, т.е., по сути, дают ответ на вопрос о пригодности для использования на практике полученной имитационной модели – уравнения связи (4.6). После этого студенту предлагается выполнить индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности новых экземпляров транзисторов рассматриваемого типа для следующих наработок: максимальной, указываемой в документации транзисторов типа КТ872А ($t_n = 20\,000$ ч), и 10 000 ч. В обоих случаях прогноз делают для выборок объёмом не менее 20 экземпляров. Затем путём сравнения прогнозного значения параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ с истинным значением, указываемым ПЭВМ по запросу студента, оцениваются средние ошибки прогнозирования параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ для этих наработок.

8.4. ЗАДАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ ЧАСТЬ

1. Запустить программу для ПЭВМ **Imit.exe**, включённую в папку (каталог) **LAB4**.
2. Получить указание преподавателя на выбор воздействия, используемого в качестве имитационного фактора: тока коллектора или температуры.
3. С учётом выбранного имитационного фактора с помощью программы **Imit.exe** снять данные, необходимые для получения математических моделей (зависимостей) вида $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_2(t)$. Рекомендуется выбрать не менее пяти–семи точек имитационного фактора F и наработки t .
4. С помощью программы **Skrv5.exe**, находящейся в той же папке (каталоге) **LAB4**, получить математические модели $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_2(t)$, являющиеся оптимальными с точки зрения метода наименьших квадратов из числа выражений, на которые ориентирована программа.
5. Используя математические модели вида $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{КЭ\text{нас}} = \varphi_2(t)$, получить имитационную модель (уравнение связи) $F_{\text{им}} = f(t)$.
6. Принимая во внимание экземпляры контрольной выборки, с помощью программы **Imit.exe** определить среднюю ошибку прогнозирования параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ для значений наработок, равных 5000, 10 000 и 20 000 ч.
7. Для наработок 10 000 и 20 000 ч выполнить индивидуальное прогнозирование параметрической надёжности новых экземпляров, т.е. тех, которые не входили в состав обучающей или контрольной выборок. Используется программа **Imit.exe**. Количество экземпляров для каждой наработки взять не менее 20, если преподавателем не указывается больший объём.
8. Определить среднюю ошибку прогнозирования параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ для наработок 10 000 и 20 000 ч, используя результаты прогнозирования и истинные значения этого параметра для новых экземпляров, в отношении которых делалось заключение о параметрической надёжности (см. п. 7).

9. Дать объяснение расхождений средних ошибок прогнозирования, рассчитанных по контрольной выборке и полученных с использованием новых экземпляров.

Примечания.

1. Максимально допустимый ток коллектора транзистора типа КТ872А составляет 8 А.
2. Требование к параметру $U_{\text{КЭ нас}}$, указанное потребителем (изготовителем аппаратуры): $U_{\text{КЭ нас}} \leq 0,8 \text{ В}$.
3. При выполнении п. 7 вместо наработки 10 000 ч преподавателем может быть задано значение 5000 ч.

8.5. РЕКОМЕНДУЕМОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы с указанием фактора, используемого в качестве имитационного.
2. Значения объёмов обучающей и контрольной выборок.
3. Информация о результатах контроля параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ при воздействии имитационного фактора F и в процессе испытаний на длительную наработку t . Должна быть приведена информация о $U_{\text{КЭ нас}}$, усреднённая по всем экземплярам обучающей выборки с обязательным указанием значений F и t .
4. Запись выражений, получаемых с помощью программы **Skrv5.exe** методом наименьших квадратов, для математических моделей $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_2(t)$ с указанием сумм квадратов отклонений экспериментальных значений (результатов моделирования на ПЭВМ) от теоретических. Приводится информация о двух–трёх лучших моделях с точки зрения метода наименьших квадратов для каждой из зависимостей $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_2(t)$.
5. Уравнение связи вида $F_{\text{им}} = f(t)$, полученное с использованием лучших математических моделей из числа зависимостей $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_1(F)$ и $U_{\text{КЭ нас}} = \varphi_2(t)$.
6. Значения средних ошибок прогнозирования параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ для наработок 5000, 10 000 и 20 000 ч.
7. Информация о прогнозном и истинном значениях параметра $U_{\text{КЭ нас}}$, а также заключение о параметрической надёжности каждого нового экземпляра, не являющегося представителем обучающей или контрольной выборок. Эта информация должна быть приведена для двух наработок, а именно: одной из наработок (5000 или 10 000 ч), указанных преподавателем, и 20 000 ч.
8. Значения средних ошибок прогнозирования для наработок 10 000 (или 5000 ч) и 20 000 ч, полученные с использованием данных п. 7.
9. Объяснение расхождений средних ошибок прогнозирования, полученных в пп. 6 и 8.
10. Конкретные предложения по совершенствованию применяемого метода прогнозирования.

Примечания.

1. Информацию, указанную в пп.3 и 7, следует обязательно свести в таблицы. В форме таблиц (по усмотрению студента) может быть представлена и другая информация.
2. Пп. 9 и 10 могут рассматриваться в качестве выводов по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ГРУППОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПО МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Решить задачу группового прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники (ИЭТ), используя физико-статистическую модель деградации функционального параметра.

В качестве ИЭТ, на примере которых решается задача группового прогнозирования, выбраны биполярные транзисторы, а в роли функционального параметра, по значению которого судят о параметрической надёжности транзисторов, рассматривается напряжение насыщения перехода коллектор–эмиттер $U_{КЭнас}$ или же статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ – коэффициент усиления.

9.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В лабораторной работе для выполнения группового прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов используется методика прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники на основе математической модели деградации функционального параметра. Методика разработана в учреждении образования БГУИР на кафедре РЭС в рамках выполнения ГБЦ НИР 05-4002 с РУП «Минский завод «Транзистор» на тему «Прогнозирование надёжности полупроводниковых приборов по реакции на имитационные воздействия» (научный руководитель – С. М. Боровиков, исполнители – аспиранты: А. И. Бересневич, А. В. Шалак; студент Е. Н. Шнейдеров). С теоретическими подходами, положенными в основу разработки методики, можно ознакомиться в работах [1, 2].

Ниже приводятся выдержки из методики, которые позволяют понять основные теоретические положения метода прогнозирования и его практическое использование в лабораторной работе.

9.2.1. Область применения методики

1. При работе ИЭТ его функциональный параметр y может рассматриваться как функция времени t . Параметрическая надёжность характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах норм (от a до b), указанных в технической документации или установленных потребителем, в течение заданного времени t_3 при выбранных режимах и условиях работы. Математическим критерием постепенного отказа в данном случае будет нарушение неравенства

$$a \leq y(t) \leq b, \quad (5.1)$$

а количественной мерой параметрической надёжности – вероятность выполнения этого условия в течение интересующего времени t_3 , т.е.

$$P_{\Pi}(t_3) = \text{Вер}\{a \leq y(t) \leq b, t \in (0 \dots t_3)\} = P\{a \leq y(t) \leq b, t \in (0 \dots t_3)\}, \quad (5.2)$$

где запись «Вер» означает вероятность, далее её будем заменять символом P .

2. Методика позволяет по заданному значению наработки t_3 для выборки ИЭТ находить вероятность $P_{\Pi}(t_3)$, задаваемую выражением (5.2). Эта вероятность в равной степени относится к любому экземпляру этой выборки, поэтому её рассматривают в качестве результата группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ.

3. Для выполнения группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ используется математическая физико-статистическая модель деградации функционального параметра y в виде условной плотности распределения этого параметра для заданной наработки – временного сечения t . Эту модель для ИЭТ рассматриваемого типа получают один раз на этапе предварительных исследований экземпляров, так называемой обучающей выборки. Принято предположение о нормальном законе распределения функционального параметра в любом временном сечении t .

9.2.2. Теоретическая основа метода прогнозирования

1. Теоретической основой возможности выполнения группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ является тесная корреляционная связь между параметрами нормального закона распределения, взятыми для начального момента времени ($t = 0$) и различных временных сечений.

Тогда приближённое аналитическое выражение условной плотности распределения $w(y/t)$ для любого интересующего времени t_3 может быть получено путём математических преобразований начального распределения $w(y/t = 0)$:

$$w(y/t = t_3) = \psi[w(y/t = 0), t_3], \quad (5.3)$$

где ψ – символ функциональной зависимости.

Физико-химические характеристики деградации функционального параметра $y(t)$, получаемые усреднением по исследуемой выборке ИЭТ, войдут в виде коэффициентов в правую часть выражения (5.3).

2. Физико-статистическая модель представляет собой математическое выражение для условного закона распределения функционального параметра y , например условной плотности распределения y – плотности распределения y для любого текущего времени работы t (рис. 5.1).

3. В качестве физико-статистической модели деградации функционального параметра y рассматривается условная плотность его распределения, которая в случае гипотезы о нормальном распределении y имеет вид

$$w(y/t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(y/t)}} \exp \left\{ -\frac{[y-m(y/t)]^2}{2[\sigma(y/t)]^2} \right\}, \quad (5.4)$$

где $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ – параметры, иначе характеристики условного (для времени t) нормального закона распределения.



Рис. 5.1. Изменение плотности распределения функционального параметра y при работе ИЭТ: $t_0, t_1, \dots, t_k$ – моменты времени – временные сечения; $m_0, m_1, \dots, m_k$ – средние значения y во временных сечениях (штриховая линия)

4. Характеристики $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ условного нормального закона распределения являются коэффициентами математической физико-статистической модели деградации y (5.4) и представляют собой соответственно среднее значение и среднее квадратическое отклонение (иначе – стандартное отклонение) функционального параметра y для временного сечения t .
5. Построение математической физико-статистической модели деградации y вида (5.4) сводится к определению характеристик $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$. Для их нахождения используются экспериментальные данные, полученные при исследовании определённой выборки ИЭТ, называемой обучающей выборкой.
6. Характеристики $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ находят как функции заданной наработки t и параметров (характеристик) нормального закона распределения y в начальный момент времени $m(y/t = 0)$, $\sigma(y/t = 0)$:

$$m(y/t) = \varphi_1[t, m(y/t = 0), \sigma(y/t = 0)]; \quad (5.5)$$

$$\sigma(y/t) = \varphi_2[t, m(y/t = 0), \sigma(y/t = 0)], \quad (5.6)$$

где φ_1, φ_2 – операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению.

7. Характеристики $m(y/t)$, $\sigma(y/t)$ для новой выборки, параметрической надёжностью которой интересуются, находят, используя заданное значение

наработки t_3 , а также характеристики $m(y/t = 0)$, $\sigma(y/t = 0)$, подсчитанные с использованием результатов измерения интересующего функционального параметра в начальный момент времени ($t = 0$) для экземпляров этой выборки.

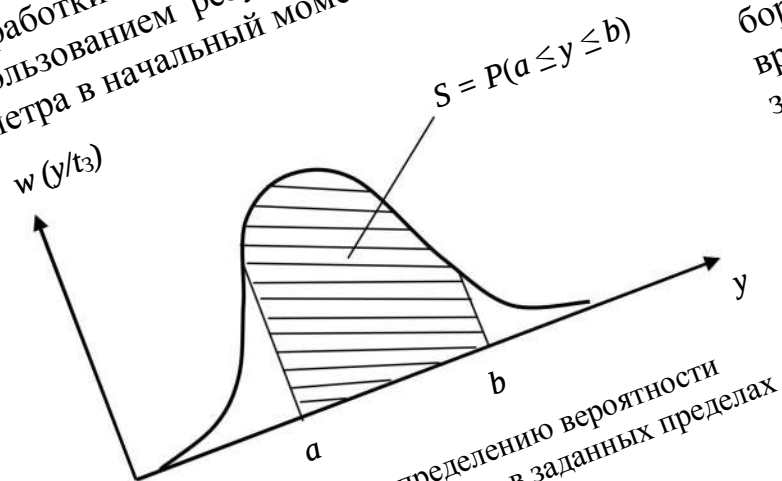


Рис. 5.2. К определению вероятности нахождения параметра в заданных пределах

$$P_{\Pi}(t_3) = \int_a^b w(y/t_3) dy = F(b/t_3) - F(a/t_3), \quad (5.7)$$

где $F(a/t_3)$, $F(b/t_3)$ – условная (для времени t_3) функция распределения функционального параметра y , подсчитанная соответственно для значений $y = a$ и $y = b$.

С учётом гипотезы о нормальном законе распределения функционального параметра y во временных сечениях t_i формула (5.7) для инженерных применений примет вид

$$P_{\Pi}(t_3) = \Phi \left[\frac{b - m(y/t_3)}{s(y/t_3)} \right] - \Phi \left[\frac{a - m(y/t_3)}{s(y/t_3)} \right], \quad (5.8)$$

где $\Phi[\dots]$ – табличная нормальная функция распределения, найденная для аргумента, указанного в скобках;
 $m(y/t_3)$, $\sigma(y/t_3)$ – характеристики нормального закона распределения, подсчитанные по выражениям (5.5) и (5.6) для времени $t_i = t_3$.

9. Процедура решения задачи группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ включает следующие основные этапы:
- экспериментальное исследование выборки ИЭТ на длительную наработку – физическое моделирование деградации функционального параметра;
 - получение физико-статистической модели деградации функционального параметра ИЭТ;
 - оценка достоверности прогнозирования;
 - групповое прогнозирование параметрической надёжности новых выборок ИЭТ рассматриваемого типа.

10. Экспериментальные исследования ИЭТ рассматриваемого типа представляют собой физическое моделирование их наработки. Для выполнения моделирования предварительно выбирают функциональный параметр y , по значению которого судят о параметрической надёжности ИЭТ. В качестве способа выполнения физического моделирования используют ускоренные испытания ИЭТ, выполняемые по типовым методикам. Цель моделирования (ускоренных испытаний) – снять у каждого экземпляра выборки ИЭТ зависимость функционального параметра y от значения наработки t (см. рис. 5.1).

Испытуемая выборка ИЭТ в дальнейшем случайным образом делится на две выборки: обучающую и контрольную.

Результаты исследования обучающей выборки используются для получения физико-статистической модели деградации функционального параметра y , а результаты исследования контрольной выборки – для оценки достоверности группового прогнозирования параметрической надёжности.

11. Оценку достоверности группового прогнозирования выполняют для того, чтобы убедиться, что полученная физико-статистическая модель (5.4) обеспечивает приемлемые для практики результаты группового прогнозирования параметрической надёжности новых выборок ИЭТ рассматриваемого типа, т.е. тех выборок, которые не принимали участие в экспериментальных исследованиях (в обучающей выборке).

12. О достоверности прогнозирования судят по значению средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$. Её определяют, используя контрольную выборку.

Считают, что физико-статистической моделью (5.4) можно пользоваться на практике, если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ не превышает допустимого значения, обычно $\Delta_{\text{ср}} \leq 5...7 \%$.

13. Групповое прогнозирование параметрической надёжности новой выборки ИЭТ сводится к следующему.

У экземпляров выборки измеряют значение функционального параметра y в начальный момент времени ($t = 0$). Используя результаты измерений y , по общепринятым формулам [1] определяют оценки его математического ожидания $M^*(y)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma^*(y)$. Эти оценки принимают в качестве характеристик условного нормального закона распределения – распределения y в момент времени $t = 0$:

$$m(y/t = 0) = M^*(y);$$

$$\sigma(y/t = 0) = \sigma^*(y).$$

С учётом заданного времени работы t_3 по найденным выражениям (5.5) и (5.6) подсчитывают характеристики $m(y/t)$, $\sigma(y/t)$ условного закона распределения y для времени $t = t_3$. Уточняют требование к норме на функциональный параметр (значение границ a и b) и по формуле (5.8) находят вероятность того, что y будет находиться в пределах нормы. Эта вероятность рассматривается как результат группового прогнозирования и в равной степени относится к любому экземпляру выборки.

9.2.3. Экспериментальные исследования

1. Для экспериментальных исследований формируется выборка ИЭТ рассматриваемого типа. Для этого случайным образом из одной из той же партии ИЭТ отбирается N экземпляров ($N \geq 160-200$).

Её общий объём (N) включает обучающую (n) и контрольную (r) выборки. Экспериментальные исследования этих выборок проводят одновременно.

2. У каждого экземпляра выборки, полученной при выполнении п. 1, измеряют функциональный параметр y в начальный момент времени ($t = 0$).

3. Проводят физическое моделирование деградации функционального параметра. Для физического моделирования пригодны ускоренные форсированные испытания ИЭТ, проводимые обычно по типовым методикам [3, 4]. Эти испытания позволяют для функционального параметра y каждого экземпляра выборки ИЭТ получить данные о его изменении за короткое время, эквивалентное с точки зрения деградации y заданному времени работы t_3 . В процессе физического моделирования в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_k$ измеряют значение y у каждого экземпляра выборки, где k – число точек контроля (временных сечений). Значение k выбирается с учётом сложности процедуры физического моделирования деградации функционального параметра ИЭТ и должно отвечать условию $k \geq (4-5)$.

4. Выборка из N экземпляров, для которой проводилось физическое моделирование деградации функционального параметра, случайным образом разбивается на две: обучающую объёмом n и контрольную объёмом r . Объём каждой из выборок должен быть не менее 80–100 экземпляров. Результаты физического моделирования обучающей выборки используют для получения математической физико-статистической модели деградации функционального параметра, контрольной – для оценки достоверности группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ.

5. Обучающая выборка случайным образом разбивается на l групп. Количество экземпляров в каждой группе следует брать не менее 20–30. При выборе числа групп рекомендуется пользоваться условием $l \geq (4-5)$.

6. Для каждой группы, на которые была разбита обучающая выборка, определяют характеристики $m(y/t = 0)$ и $\sigma(y/t = 0)$ условного нормального закона распределения функционального параметра y для времени $t = 0$. Для их получения пользуются классическими формулами подсчёта среднего значения и среднего квадратического отклонения [1]. В эти формулы подставляют начальные значения y у экземпляров соответствующей группы. Полученные данные рекомендуется свести в табл. 5.1.

В табл. 5.1 приняты следующие обозначения:

$n_1, n_2, \dots, n_l$ – номер экземпляра обучающей выборки, отвечающий последнему элементу соответствующей группы;

$m_0^{(j)}, \sigma_0^{(j)}$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение функционального параметра для экземпляров j -й группы, $j = 1, 2, \dots, l$; нижний индекс «нуль» подчёркивает то, что эти характеристики относятся к времени $t = 0$;

t_i – момент времени (временное сечение), для которого контролировались значения функциональных параметров при физическом моделировании их деградации, $i = 1, 2, \dots, k$.

Таблица 5.1

Номер экземпляра обучающей выборки	Номер группы	$m(y/t = 0)$	$\sigma(y/t = 0)$	Временное сечение t_i
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_1
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_1
...	...	...	...	t_1
$(n_{l-1} + 1) \dots n_l$	l	$m_0^{(l)}$	$\sigma_0^{(l)}$	t_1
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_2
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_2
...	...	...	...	t_2
$(n_{l-1} + 1) \dots n_l$	l	$m_0^{(l)}$	$\sigma_0^{(l)}$	t_2
...				
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_k
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_k
...	...	...	...	t_k
$(n_{l-1} + 1) \dots n_l$	l	$m_0^{(l)}$	$\sigma_0^{(l)}$	t_k

7. Используя данные табл. 5.1 и прикладные программы для ПЭВМ, для величин $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ получают математические зависимости вида (5.5) и (5.6).

8. На основе найденных зависимостей (5.5) и (5.6) строится физико-статистическая модель деградации функционального параметра ИЭТ в виде выражения (5.4) для условной плотности распределения функционального параметра $w(y/t)$.

Подставляя заданное значение наработки t_3 в выражение для $w(y/t)$, находят закон распределения интересующего функционального параметра для времени t_3 .

9.2.4. Оценка достоверности прогнозирования

1. Достоверность прогнозирования оценивают для тех наработок t_i (временных сечений), для которых контролировался функциональный параметр у при проведении физического моделирования его деградации.

2. Используя результаты измерения у, полученные при выполнении п. 2 подразд. 5.2.3, подсчитывают характеристики $m(y/t = 0)$ и $\sigma(y/t = 0)$ условного нормального закона распределения функционального параметра у для времени $t = 0$ применительно к экземплярам контрольной выборки, сформированной в п. 4 подразд. 5.2.3. Пользуются классическими формулами подсчёта среднего значения и среднего квадратического отклонения [1]. В эти формулы подставляют начальные значения у экземпляров только контрольной выборки.

3. Пользуясь выражениями (5.5) и (5.6), полученными при выполнении п. 6 подразд. 5.2.2, для каждого сечения t_i ($i = 1, 2, \dots, k$) рассчитывают характеристики $m(y/t_i)$ и $\sigma(y/t_i)$ условной плотности распределения у применительно к контрольной выборке.

4. Для контрольной выборки определяют прогнозное значение параметрической надёжности $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$ для наработок, соответствующих временным сечениям t_i . Пользуются выражением

$$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}} = \Phi \left[\frac{b - m(y/t_i)}{s(y/t_i)} \right] - \Phi \left[\frac{a - m(y/t_i)}{s(y/t_i)} \right]. \quad (5.9)$$

5. Анализируя данные, полученные при испытании наработку (при физическом моделировании) экземпляров контрольной выборки, определяют экспериментальные значения параметрической надёжности $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$, соответствующие временным сечениям t_i . Пользуются классическим выражением оценки вероятности события по его частоте

$$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}} = \frac{r(a \leq y \leq b)}{r}, \quad (5.10)$$

где $r(a \leq y \leq b)$ – количество экземпляров контрольной выборки, для которых функциональный параметр y в момент времени t_i находится в пределах указанных норм от a до b ;

r – общее количество экземпляров в контрольной выборке (объём контрольной выборки).

6. Данные, полученные в пп. 4 и 5, рекомендуется свести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Параметр	Вероятность $P_{\Pi}(t_i)$ для времени t_i							
	$t_1, \text{ ч}$		$t_2, \text{ ч}$		...		$t_k, \text{ ч}$	
	$[P_{\Pi}(t_1)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_1)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_2)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_2)]_{\text{э}}$	...	...	$[P_{\Pi}(t_k)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_k)]_{\text{э}}$
y								

Сравнивая полученные значения $P_{\Pi}(t_i)_{\text{пр}}$ и $P_{\Pi}(t_i)_{\text{э}}$, можно сделать заключение о возможности использования построенной физико-статистической модели деградации y для прогнозирования параметрической надёжности выборок ИЭТ для временных сечений в диапазоне наработок $(0 \dots t_k)$.

7. Среднюю ошибку прогнозирования параметрической надёжности по рассматриваемому функциональному параметру y определяют по формуле

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{\Pi i} - P_{\text{э} i}}{P_{\text{э} i}} \right)^2} \cdot 100 \%, \quad (5.11)$$

где k – число временных сечений;

$P_{\Pi i} = [P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$ – прогнозное значение параметрической надёжности ИЭТ контрольной выборки, найденное в п. 4;

$P_{\text{э} i} = [P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$ – экспериментальное значение параметрической надёжности ИЭТ контрольной выборки, полученное в п. 5.

8. По значению ошибки $\Delta_{\text{ср}}$ принимают решение о пригодности физико-статистической модели деградации функционального параметра для прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ.

9.2.5. Пример применения методики

1. Процедура получения физико-статистической модели деградации функционального параметра и выполнения группового прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ поясняется на примере биполярных транзисторов типа КТ872А.

В качестве функционального параметра рассматривался $h_{21Э}$ – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером. Электрический режим измерения параметра соответствовал требованиям технической документации транзисторов.

2. Для проведения физического моделирования деградации параметра $h_{21Э}$ было сформировано две выборки: обучающая объёмом $n = 200$ экземпляров и контрольная объёмом $r = 300$ экземпляров.

Обучающая выборка использовалась для получения физико-статистической модели деградации $h_{21Э}$.

Контрольная выборка предназначалась для оценки достоверности группового прогнозирования. Применительно к ней для пяти временных сечений t_i (0, 3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч) на этапе физического моделирования деградации функционального параметра контролировались его истинные значения и решалась задача группового прогнозирования параметрической надёжности для этих временных сечений.

3. Физическое моделирование деградации состояло в проведении для транзисторов по типовым методикам ускоренных форсированных испытаний, эквивалентных времени 17 280 ч с точки зрения функционирования транзисторов в нормальных условиях работы.

4. При формировании массива данных вида табл. 5.1, обучающая выборка разбивалась на пять групп по 40 экземпляров в каждой из них (табл. 5.3).

5. Выражения вида (5.5) и (5.6) для параметра $h_{21Э}$, полученные с использованием экземпляров обучающей выборки:

$$m(h_{21Э}/t) = 1,751404m_0 - 3,10914\sigma_0 - 0,00009375t;$$

$$\sigma(h_{21Э}/t) = 0,295399m_0 - 0,23067\sigma_0 - 0,00000982t,$$

где m_0 , σ_0 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение $h_{21Э}$ в начальный момент времени ($t = 0$).

Величины $m(h_{21Э}/t)$ и $\sigma(h_{21Э}/t)$ являются характеристиками физико-статистической модели деградации параметра $h_{21Э}$.

6. Для контрольной выборки объёмом $r = 300$ экземпляров по формуле (5.9) получено прогнозное $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$ значение параметрической надёжности транзисторов для наработок t_i (табл. 5.4). Условие (5.1) было выбрано в виде $h_{21Э} \geq 18$.

Таблица 5.3

Номер экземпляра обучающей выборки	Номер группы	$m(y/t = 0)$	$\sigma(y/t = 0)$	Временное сечение t_i
1...40	1	22,84	5,580637	0
41...80	2	21,68	5,488649	0
81...120	3	21,63	6,627272	0
121...160	4	22,25	4,452265	0
161...200	5	23,26	6,200914	0
1...40	1	22,84	5,580637	3840
41...80	2	21,68	5,488649	3840
81...120	3	21,63	6,627272	3840
121...160	4	22,25	4,452265	3840
161...200	5	23,26	6,200914	3840
1...40	1	22,84	5,580637	8320
41...80	2	21,68	5,488649	8320
81...120	3	21,63	6,627272	8320
121...160	4	22,25	4,452265	8320
161...200	5	23,26	6,200914	8320
1...40	1	22,84	5,580637	12 800
41...80	2	21,68	5,488649	12 800
81...120	3	21,63	6,627272	12 800
121...160	4	22,25	4,452265	12 800
161...200	5	23,26	6,200914	12 800
1...40	1	22,84	5,580637	17 280
41...80	2	21,68	5,488649	17 280
81...120	3	21,63	6,627272	17 280
121...160	4	22,25	4,452265	17 280
161...200	5	23,26	6,200914	17 280

7. Экспериментальная оценка параметрической надёжности контрольной выборки дана с использованием формулы (5.10). Результаты этой оценки в виде вероятности $P_{\Pi}(t_i)$ внесены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Пара-метр	Вероятность $P_{\Pi}(t_i)$ для времени t_i							
	3840 ч		8320 ч		12 800 ч		17 280 ч	
	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$
$h_{21\text{э}}$	0,719	0,719	0,6915	0,6808	0,6628	0,6554	0,6406	0,6293

8. Используя данные табл. 5.4, по формуле (5.11) подсчитана средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$:

$$\Delta_{\text{ср}} \approx 1,32 \%,$$

что свидетельствует о высокой достоверности прогнозирования параметрической надёжности транзисторов.

9.3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА

Решение в лабораторной работе задачи группового прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов с использованием физико-статистической модели деградации функционального параметра включает следующие этапы:

- экспериментальное исследование выборки транзисторов на длительную наработку – физическое моделирование деградации функционального параметра;
- разбиение исследованной выборки на обучающую и контрольную (с целью экономии времени экспериментальное исследование этих выборок целесообразно выполнять одновременно);
- получение физико-статистической модели деградации функционального параметра транзисторов, используя результаты физического моделирования обучающей выборки;
- решение задачи группового прогнозирования параметрической надёжности применительно к контрольной выборке и оценка достоверности прогнозирования.

Деградация функционального параметра у биполярных транзисторов в течение заданной наработки моделируется в памяти ПЭВМ. При реализации моделирования приняты во внимание закономерности функционального параметра у, присущие рассматриваемому типу транзисторов.

Процедура решения задачи прогнозирования выполняется с непосредственным участием студента и включает:

- моделирование на ПЭВМ деградации функционального параметра у;
- получение характеристик $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ условного нормального закона распределения в виде выражений (5.5), (5.6) и самой физико-статистической модели деградации у, задаваемой выражением (5.4);
- получение прогнозной и экспериментальной оценок параметрической надёжности транзисторов контрольной выборки.

От студента требуется выполнение определенных действий. В случае ошибочных действий из-за слабого освоения им методики дальнейшая работа программы для ПЭВМ приостанавливается.

Вначале с помощью программы для ПЭВМ **lab5.exe** путём выбора опции (режима) «Моделирование» должны быть получены значения функционального параметра у для каждого экземпляра исследуемой выборки транзисторов в

момент времени $t = 0$, а затем для четырёх временных сечений t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч). После этого студенту предлагается разбить выборку транзисторов случайным образом на обучающую и контрольную. Далее, используя обучающую выборку, ему необходимо найти характеристики $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ условного нормального закона распределения y , описываемого выражением (5.4). Эти характеристики, задаваемые функциями (5.5) и (6.6), предлагается получить в виде линейных уравнений регрессии, используя возможности приложения Microsoft Excel.

При получении прогнозного значения параметрической надёжности контрольной выборки по формуле (5.9) следует воспользоваться табл. П.2.1 значений нормальной функции распределения $\Phi(\dots)$, приведённой в прил. 2.

9.4. ЗАДАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ ЧАСТЬ

1. Получить указание преподавателя на выбор функционального параметра, по значению которого принимают решение о параметрической надёжности транзисторов.

2. Запустить программу для ПЭВМ **lab5.exe**, включённую в папку (каталог) **NRES**.

3. С помощью программы **lab5.exe** для каждого экземпляра выборки транзисторов объёмом 200 экземпляров смоделировать значения функционального параметра в начальный момент времени ($t = 0$) и во временных сечениях t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч).

4. Следуя указаниям программы **lab.exe**, выборку транзисторов, функциональный параметр которой моделировался, случайным образом разбить на две: обучающую и контрольную, объёмом по 100 экземпляров каждая.

5. Используя инструмент анализа **Гистограмма** электронных таблиц Microsoft Excel, просмотреть гистограммы распределения функционального параметра y для обучающей выборки в начальный момент времени и во временных сечениях. Сделать вывод о близости закона распределения y к нормальному.

6. Принимая гипотезу о нормальном законе распределения y в начальный момент времени и во временных сечениях t_i , получить характеристики условного закона распределения (5.4), пользуясь обучающей выборкой.

Вначале сформировать массив данных, аналогичный табл. 5.1. При построении таблицы обучающую выборку случайным образом разбить на четыре группы по 25 экземпляров в каждой. Используя инструмент анализа **Регрессия** электронных таблиц Microsoft Excel (прил. 3), по данным построенной таблицы последовательно получить уравнения линейной регрессии для характеристик условного нормального закона распределения $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$. При использовании инструмента анализа **Регрессия** величины $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ рассматриваются в качестве функций отклика. Аргументами (факторами) при этом являются величины $m_0 = m(y/t = 0)$, $\sigma_0 = \sigma(y/t = 0)$ и время t .

7. Применительно к контрольной выборке для временных сечений t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч) решить задачу группового прогнозирования, т.е. найти

вероятность того, что рассматриваемый функциональный параметр y в момент времени t_i будет находиться в заданных пределах от a до b . Для этого вначале необходимо определить значения характеристик $m(y/t = 0)$ и $\sigma(y/t = 0)$ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение y в начальный момент времени. Для определения прогнозного значения интересующей вероятности необходимо уточнить значения a и b , с учётом времени t_i по уравнениям регрессии, полученным при выполнении п. 7 подразд. 5.2.3, подсчитать характеристики $m(y/t_i)$ и $\sigma(y/t_i)$ и воспользоваться выражением (5.9). Значения табличной функции $\Phi(\dots)$ следует брать из прил. 2.

8. Для каждого временного сечения t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч) определить статистическую оценку вероятности нахождения функционального параметра y в заданных пределах от a до b . При выполнении этого пункта следует пользоваться выражением (5.10).

9. Сравнивая значения вероятностей, полученных в пп. 7 и 8, сделать вывод о пригодности физико-статистической модели деградации функционального параметра для группового прогнозирования параметрической надёжности транзисторов.

10. Используя формулу (5.11), подсчитать среднюю ошибку прогнозирования.

Примечания.

1. Преподавателем могут задаваться объёмы выборок, отличные от указанных.
2. Требование к функциональным параметрам, задаваемое потребителем (изготовителем аппаратуры): $h_{21Э} \geq 20$; $U_{КЭнас} \leq 0,65$ В.
3. Преподавателем могут задаваться и другие требования к нормам на функциональные параметры.

9.5. РЕКОМЕНДУЕМОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы с указанием функционального параметра y , по значению которого принималось решение о параметрической надёжности транзисторов.

2. Значения объёмов обучающей и контрольной выборок.

3. Гистограммы распределения y , построенные с использованием обучающей выборки для начального момента времени ($t = 0$) и для временных сечений t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч).

4. Массив данных, используемый для получения уравнений регрессии для характеристик $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ условного нормального закона распределения функционального параметра y (табл. 5.5). В табл. 5.5 вместо знака «?» должны стоять данные, полученные при выполнении работы.

5. Запись уравнений множественной линейной регрессии для характеристик $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ условного нормального закона распределения функционального параметра y .

6. Таблицу (табл. 5.6) с указанием для экземпляров контрольной выборки прогнозного значения и экспериментальной оценки уровня параметрической надёжности (вероятности нахождения функционального параметра в пределах заданной нормы) для временных сечений t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч). В табл. 5.6 вместо знака «?» должна быть представлена конкретная информация.

Таблица 5.5

Номер экземпляра обучающей выборки	Номер группы	$m(y/t = 0)$	$\sigma(y/t = 0)$	Временное сечение, ч
1...25	1	?	?	0
26...50	2	?	?	0
51...75	3	?	?	0
76...100	4	?	?	0
1...25	1	?	?	3840
26...50	2	?	?	3840
51...75	3	?	?	3840
76...100	4	?	?	3840
...	...	...	...	...
1...25	1	?	?	17 280
26...50	2	?	?	17 280
51...75	3	?	?	17 280
76...100	4	?	?	17 280

Таблица 5.6

Параметр	Вероятность $P_{\Pi}(t_i)$ для времени t_i							
	3840 ч		8320 ч		12 800 ч		17 280 ч	
	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$	$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$
?	?	?	?	?	?	?	?	?

7. Значение средней ошибки прогнозирования параметрической надёжности, полученное по формуле (5.11).

8. Объяснение причины расхождений прогнозной и экспериментальной оценок параметрической надёжности транзисторов контрольной выборки.

9. Конкретные предложения по совершенствованию группового прогнозирования с использованием математических физико-статистических моделей деградации функционального параметра биполярных транзисторов.

Примечания.

1. Ответы на пп. 4 и 6 следует обязательно дать в виде таблиц.

2. Ответы на пп. 8 и 9 рекомендуется оформить в качестве выводов по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения гамма-функции

Таблица П.1.1

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,0000	1,35	0,8912	1,70	0,9086
1,05	0,9735	1,40	0,8873	1,75	0,9191
1,10	0,9514	1,45	0,8857	1,80	0,9314
1,15	0,9330	1,50	0,8862	1,85	0,9456
1,20	0,9182	1,55	0,8889	1,90	0,9618
1,25	0,9064	1,60	0,8935	1,95	0,9799
1,30	0,8975	1,65	0,9001	2,00	1,000

Свойства функции:

1. $\Gamma(a + 1) = a\Gamma(a)$.
2. $\Gamma(n + 1) = n!$ (n – целое число).
3. $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения нормальной функции распределения

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$$

Таблица П.2.1

х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)
1	2	3	4	5	6
-4,00	0,0000	-1,91	0,0281	-1,62	0,0526
-3,90	0,0001	-1,90	0,0288	-1,61	0,0537
-3,80	0,0001	-1,89	0,0294	-1,60	0,0548
-3,70	0,0002	-1,88	0,0301	-1,59	0,0559
-3,60	0,0002	-1,87	0,0307	-1,58	0,0571
-3,50	0,0003	-1,86	0,0314	-1,57	0,0582
-3,40	0,0003	-1,85	0,0322	-1,56	0,0594
-3,30	0,0005	-1,84	0,0329	-1,55	0,0606
-3,20	0,0007	-1,83	0,0336	-1,54	0,0618
-3,10	0,0010	-1,82	0,0344	-1,53	0,0630
-3,00	0,0014	-1,81	0,0351	-1,52	0,0643
-2,90	0,0019	-1,80	0,0359	-1,51	0,0655
-2,80	0,0026	-1,79	0,0367	-1,50	0,0668
-2,70	0,0035	-1,78	0,0375	-1,49	0,0681
-2,60	0,0047	-1,77	0,0384	-1,48	0,0694
-2,50	0,0063	-1,76	0,0392	-1,47	0,0708
-2,40	0,0082	-1,75	0,0401	-1,46	0,0721
-2,30	0,0108	-1,74	0,0409	-1,45	0,0735
-2,20	0,0139	-1,73	0,0417	-1,44	0,0749
-2,10	0,0179	-1,72	0,0427	-1,43	0,0764
-2,00	0,0228	-1,71	0,0436	-1,42	0,0778
-1,99	0,0233	-1,70	0,0446	-1,41	0,0793
-1,98	0,0239	-1,69	0,0455	-1,40	0,0808
-1,97	0,0244	-1,68	0,0465	-1,39	0,0823
-1,96	0,0250	-1,67	0,0475	-1,38	0,0838
-1,95	0,0256	-1,66	0,0485	-1,37	0,0853
-1,94	0,0262	-1,65	0,0495	-1,36	0,0869
-1,93	0,0268	-1,64	0,0505	-1,35	0,0885
-1,92	0,0274	-1,63	0,0516	-1,34	0,0901
-1,33	0,0918	-0,89	0,1867	-0,45	0,3264
-1,32	0,0934	-0,88	0,1894	-0,44	0,3300
-1,31	0,0951	-0,87	0,1922	-0,43	0,3336
-1,30	0,0968	-0,86	0,1949	-0,42	0,3372
-1,29	0,0985	-0,85	0,1977	-0,41	0,3409
-1,28	0,1003	-0,84	0,2005	-0,40	0,3446
-1,27	0,1020	-0,83	0,2033	-0,39	0,3483
-1,26	0,1038	-0,82	0,2061	-0,38	0,3520

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6
-1,25	0,1056	-0,81	0,2090	-0,37	0,3557
-1,24	0,1075	-0,80	0,2119	-0,36	0,3594
-1,23	0,1093	-0,79	0,2148	-0,35	0,3632
-1,22	0,1112	-0,78	0,2177	-0,34	0,3669
-1,21	0,1131	-0,77	0,2206	-0,33	0,3707
-1,20	0,1151	-0,76	0,2236	-0,32	0,3745
-1,19	0,1170	-0,75	0,2266	-0,31	0,3783
-1,18	0,1190	-0,74	0,2296	-0,30	0,3821
-1,17	0,1210	-0,73	0,2327	-0,29	0,3859
-1,16	0,1230	-0,72	0,2358	-0,28	0,3897
-1,15	0,1251	-0,71	0,2389	-0,27	0,3936
-1,14	0,1271	-0,70	0,2420	-0,26	0,3974
-1,13	0,1292	-0,69	0,2451	-0,25	0,4013
-1,12	0,1314	-0,68	0,2483	-0,24	0,4052
-1,11	0,1335	-0,67	0,2514	-0,23	0,4090
-1,10	0,1357	-0,66	0,2546	-0,22	0,4129
-1,09	0,1379	-0,65	0,2578	-0,21	0,4168
-1,08	0,1401	-0,64	0,2671	-0,20	0,4207
-1,07	0,1423	-0,63	0,2643	-0,19	0,4247
-1,06	0,1446	-0,62	0,2676	-0,18	0,4286
-1,05	0,1469	-0,61	0,2709	-0,17	0,4325
-1,04	0,1492	-0,60	0,2743	-0,16	0,4364
-1,03	0,1515	-0,59	0,2776	-0,15	0,4404
-1,02	0,1539	-0,58	0,2810	-0,14	0,4443
-1,01	0,1562	-0,57	0,2843	-0,13	0,4483
-1,00	0,1587	-0,56	0,2877	-0,12	0,4522
-0,99	0,1611	-0,55	0,2912	-0,11	0,4562
-0,98	0,1635	-0,54	0,2946	-0,10	0,4602
-0,97	0,1660	-0,53	0,2981	-0,09	0,4641
-0,96	0,1685	-0,52	0,3015	-0,08	0,4681
-0,95	0,1711	-0,51	0,3050	-0,07	0,4721
-0,94	0,1736	-0,50	0,3085	-0,06	0,4761
-0,93	0,1762	-0,49	0,3121	-0,05	0,4801
-0,92	0,1788	-0,48	0,3156	-0,04	0,4840
-0,91	0,1814	-0,47	0,3192	-0,03	0,4880
-0,90	0,1841	-0,46	0,3228	-0,02	0,4920
-0,01	0,4960	0,43	0,6664	0,87	0,8078
0,00	0,5000	0,44	0,6700	0,88	0,8106
0,01	0,5040	0,45	0,6736	0,89	0,8133
0,02	0,5080	0,46	0,6772	0,90	0,8159
0,03	0,5120	0,47	0,6808	0,91	0,8186
0,04	0,5160	0,48	0,6844	0,92	0,8212
0,05	0,5199	0,49	0,6879	0,93	0,8232
0,06	0,5239	0,50	0,6915	0,94	0,8264
0,07	0,5279	0,51	0,6950	0,95	0,8289
0,08	0,5319	0,52	0,6925	0,96	0,8315
0,09	0,5359	0,53	0,7019	0,97	0,8340

Продолжение табл. П.2.1

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6
0,10	0,5398	0,54	0,7054	0,98	0,8365
0,11	0,5438	0,55	0,7088	0,99	0,8389
0,12	0,5478	0,56	0,7123	1,00	0,8413
0,13	0,5517	0,57	0,7157	1,01	0,8438
0,14	0,5557	0,58	0,7190	1,02	0,8461
0,15	0,5596	0,59	0,7224	1,03	0,8485
0,16	0,5636	0,60	0,7257	1,04	0,8508
0,17	0,5675	0,61	0,7291	1,05	0,8531
0,18	0,5714	0,62	0,7324	1,06	0,8554
0,19	0,5753	0,63	0,7357	1,07	0,8577
0,20	0,5793	0,64	0,7389	1,08	0,8599
0,21	0,5832	0,65	0,7422	1,09	0,8621
0,22	0,5871	0,66	0,7454	1,10	0,8643
0,23	0,5910	0,67	0,7486	1,11	0,8665
0,24	0,5948	0,68	0,7517	1,12	0,8686
0,25	0,5987	0,69	0,7549	1,13	0,8708
0,26	0,6026	0,70	0,7580	1,14	0,8729
0,27	0,6064	0,71	0,7611	1,15	0,8749
0,28	0,6103	0,72	0,7642	1,16	0,8770
0,29	0,6141	0,73	0,7673	1,17	0,8790
0,30	0,6179	0,74	0,7704	1,18	0,8810
0,31	0,6217	0,75	0,7734	1,19	0,8830
0,32	0,6255	0,76	0,7764	1,20	0,8849
0,33	0,6293	0,77	0,7794	1,21	0,8869
0,34	0,6331	0,78	0,7823	1,22	0,8888
0,35	0,6368	0,79	0,7852	1,23	0,8907
0,36	0,6406	0,80	0,7881	1,24	0,8925
0,37	0,6443	0,81	0,7910	1,25	0,8944
0,38	0,6480	0,82	0,7939	1,26	0,8962
0,39	0,6517	0,83	0,7967	1,27	0,8990
0,40	0,6554	0,84	0,7995	1,28	0,8997
0,41	0,6591	0,85	0,8023	1,29	0,9015
0,42	0,6628	0,86	0,8051	1,30	0,9032
1,31	0,9049	1,61	0,9463	1,91	0,9719
1,32	0,9066	1,62	0,9474	1,92	0,9726
1,33	0,9082	1,63	0,9484	1,93	0,9732
1,34	0,9099	1,64	0,9495	1,94	0,9738
1,35	0,9115	1,65	0,9505	1,95	0,9744
1,36	0,9131	1,66	0,9515	1,96	0,9750
1,37	0,9147	1,67	0,9525	1,97	0,9756
1,38	0,9162	1,68	0,9535	1,98	0,9761
1,39	0,9177	1,69	0,9545	1,99	0,9767
1,40	0,9192	1,70	0,9554	2,00	0,9772
1,41	0,9207	1,71	0,9564	2,10	0,9821
1,42	0,9222	1,72	0,9573	2,20	0,9861
1,43	0,9236	1,73	0,9583	2,30	0,9892
1,44	0,9251	1,74	0,9591	2,40	0,9918

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6
1,45	0,9265	1,75	0,9599	2,50	0,9937
1,46	0,9279	1,76	0,9608	2,60	0,9953
1,47	0,9292	1,77	0,9616	2,70	0,9965
1,48	0,9306	1,78	0,9525	2,80	0,9974
1,49	0,9319	1,79	0,9633	2,90	0,9981
1,50	0,9332	1,80	0,9641	3,00	0,9986
1,51	0,9345	1,81	0,9649	3,10	0,9990
1,52	0,9357	1,82	0,9656	3,20	0,9993
1,53	0,9370	1,83	0,9664	3,30	0,9995
1,54	0,9382	1,84	0,9671	3,40	0,9996
1,55	0,9394	1,85	0,9678	3,50	0,9997
1,56	0,9406	1,86	0,9686	3,60	0,9998
1,57	0,9418	1,87	0,9693	3,70	0,9998
1,58	0,9429	1,88	0,9699	3,80	0,9999
1,59	0,9441	1,89	0,9706	3,90	0,9999
1,60	0,9452	1,90	0,9713	4,00	1,0000

Значения $\Phi(x)$ подсчитаны по формуле

$$\Phi(x) = 1 - f(x) \sum_{i=1}^5 a_i w^i; \quad x \geq 0,$$

где $w = \frac{1}{1 + px}; \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \cdot e^{-x^2/2};$

$$p = 0,2316419; \quad a_2 = -0,3565638; \quad a_4 = -1,821256;$$

$$a_1 = 0,3193815; \quad a_3 = 1,781478; \quad a_5 = 1,330274.$$

Если $x < 0$, то $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$.

Линейные уравнения регрессии в Microsoft Excel

Электронные таблицы Microsoft Excel (MS Excel) – чрезвычайно мощная программа, позволяющая достигать нужного результата различными способами даже в самых, казалось бы, непростых ситуациях. Excel предлагает богатые возможности для задания сложных формул. Вооружившись несколькими математическими операторами и правилами ввода значений в ячейки, можно превратить рабочий лист в мощный программируемый калькулятор.

Excel имеет несколько сотен встроенных функций, которые выполняют широкий спектр различных вычислений. Функции – это специальные, заранее запрограммированные формулы, которые позволяют легко и быстро выполнять сложные вычисления, производить финансовый и статистический анализ.

С помощью Excel можно создавать различные диаграммы для данных рабочего листа.

Рабочий лист – появившаяся на экране монитора (после запуска MS Excel) область в виде таблицы, в которую можно вводить цифровую и текстовую информацию. Использование написанных пользователем программ (называемых макросами) в рабочих листах Excel позволяет вести работу пользователю в диалоговом режиме и выполнять громоздкие и трудоёмкие операции всего несколькими щелчками кнопки мыши.

Режим работы «Регрессия» используется для расчёта коэффициентов уравнения линейной регрессии, уточнения их статистической значимости и проверки адекватности построенного уравнения регрессии исследуемому процессу (объекту).

Для решения задачи в MS Excel необходимо в меню **Сервис** выбрать команду **Анализ данных** и далее – инструмент анализа **Регрессия** (рис. П.3.1).

В появившемся диалоговом окне (рис. П.3.1) задать следующие параметры:

1. **Входной интервал Y** – это диапазон ячеек – столбец таблицы рабочего листа, содержащий данные о значениях отклика (функции отклика, выходной

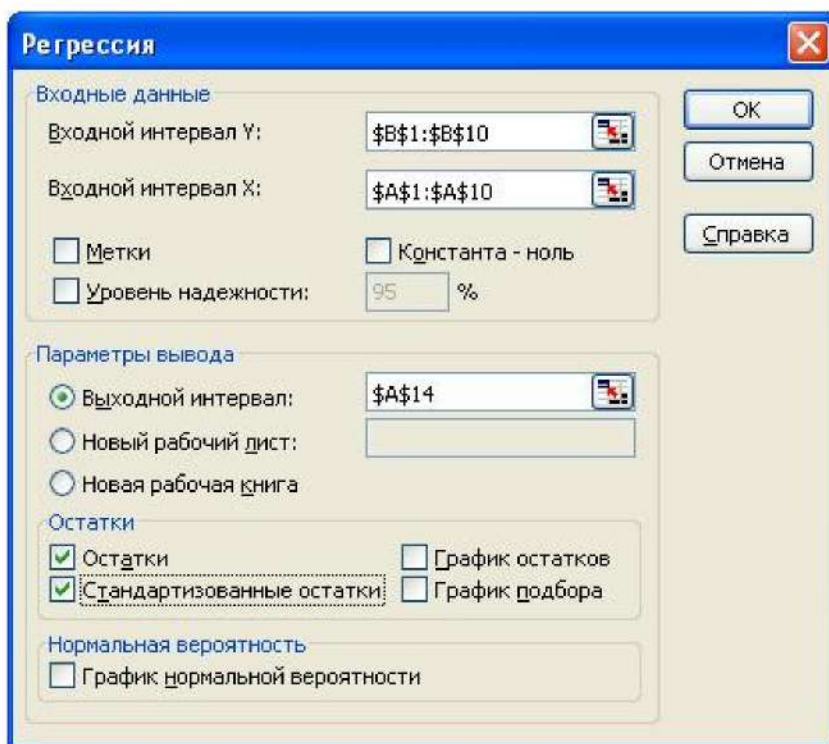


Рис. П.3.1. Окно выбора параметров регрессионного анализа

характеристике, выходном параметре и т.п.). Он должен состоять обязательно из одного столбца.

2. **Входной интервал X** – это диапазон ячеек в виде столбцов, содержащих значения факторов (независимых переменных). Число входных диапазонов (столбцов) должно быть не больше 16.

3. Флажок **Метки** устанавливается в том случае, если в первой строке диапазона стоит заголовок.

4. Флажок **Уровень надёжности** активизируется, если в поле, находящееся рядом с ним, необходимо ввести уровень надёжности, отличный от установленного по умолчанию (95 %). Используется для проверки значимости коэффициента детерминации R^2 и коэффициентов регрессии.

5. **Константа ноль**. Данный флажок необходимо установить, если линия регрессии должна пройти через начало координат.

6. **Выходной интервал / Новый рабочий лист / Новая рабочая книга** – указать адрес верхней левой ячейки выходного диапазона.

7. Флажки в группе **Остатки** устанавливаются, если необходимо включить в выходной диапазон соответствующие столбцы или графики.

8. Флажок **График нормальной вероятности** необходимо сделать активным, если требуется вывести на лист точечный график зависимости наблюдаемых значений Y от автоматически формируемых интервалов персентилей.

После нажатия кнопки **ОК** (см. рис. П.3.1) получаем вывод результатов.