ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 58341.13— 2022

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Учет фактически выработанного и оценка остаточного ресурса

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2022 г. № 1552-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Сокращения 2
5 Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик 3
6 Обоснование остаточного ресурса элементов системы контроля и управления 8
Приложение А (рекомендуемое) Управление моральным старением элементов системы контроля и управления 12
Приложение Б (рекомендуемое) Оценка остаточного ресурса элементов системы контроля и управления расчетно-аналитическим методом 16
Библиография 28

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Учет фактически выработанного и оценка остаточного ресурса

Elements of the control and management system for nuclear power plants. Accounting of actually worked out and assessment of residual resource

Дата введения — 2023—03—01

1 Область применения

1.1 Требования настоящего стандарта распространяются на оборудование важных для безопасности систем контроля и управления, элементы которых отнесены в проекте блока атомной станции (АС) к элементам класса по безопасности 2 или 3 по классификации [1], которые применяют на блоках АС с водо-водяными энергетическими реакторами, реакторами большой мощности канальными, энергетическими гетерогенными петлевыми реакторами и реакторами на быстрых нейтронах.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения при эксплуатации блоков АС, в том числе при продлении срока эксплуатации (службы), при подготовке к выводу из эксплуатации блока, а также при выводе из эксплуатации блока АС.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 16504 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения

ГОСТ 26291 Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей

ГОСТ Р 27.102 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения

ГОСТ Р 51372 Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения

ГОСТ Р 58341.1 Элемент блока атомной станции. Порядок управления ресурсом

ГОСТ Р МЭК 62342 Атомные станции. Контроль и управление, важные для безопасности. Управление старением

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения. Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **время реакции:** Время, необходимое для достижения элементом установившего значения на выходе из элемента после изменения значения сигнала на входе в элемент.

3.2

испытания: Экспериментальное определение количественных и/или качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта и/или воздействий.

[ГОСТ 16504—81, статья 1]

3.3

коэффициент ускорения испытаний: Величина, показывающая, во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности или срок сохраняемости при испытаниях относительно заданных значений показателей долговечности или срока сохраняемости в эксплуатации или при хранении до ввода в эксплуатацию.

[ГОСТ Р 51372—99, пункт 3.13]

3.4

критерий предельного состояния: Признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

Примечания

1 В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

2 Предельное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов/причин, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 20]

3.5 **моральное старение:** Процесс постепенной потери качества продукции при сохранении абсолютного значения ее показателей.

Примечание — Виды морального старения приведены в А.4 приложения А.

3.6

предельное состояние: Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 19]

3.7 **предиктивная аналитика:** Прогнозирование, основанное на исторических данных.

3.8 **ускоренные испытания:** Испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надежности объекта в более короткий срок, чем при испытаниях, проводимых в условиях эксплуатации объекта.

3.9 **элемент:** Составная часть системы, рассматриваемая при расчете надежности как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению.

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;

ВБР — вероятность безотказной работы;

ВФП — ведущая функция потока;

ИТТ — исходные технические требования;

НД — нормативная документация;

НФП — нормализующая функция потока;

ПКД — проектно-конструкторская документация;

ППО — параметр потока отказов;

ПУР — программа управления ресурсом;
РБ — руководство по безопасности;
РУ — реакторная установка;
РХ — ресурсные характеристики;
СКУ — системы контроля и управления;
СМР — строительно-монтажные работы;
ТЗ — техническое задание;
ТОиР — техническое обслуживание и ремонт;
ТУ — технические условия;
УМС — управление моральным старением;
УР — управление ресурсом;
ФНП — федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии;
ЭМС — электромагнитная совместимость;
ЭО — эксплуатирующая организация.

5 Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик

5.1 Порядок установления и обоснования ресурсных характеристик элементов системы контроля и управления

5.1.1 Обоснование и установление РХ и критериев оценки ресурса элементов СКУ, на которые распространены требования ФНП [2], должны быть выполнены на стадии проектирования и включены в ПКД на элементы СКУ, если ПКД разработана после ввода в действие ФНП [2].

5.1.2 В начале проектирования элементов СКУ на основании задания на проектирование и исходя из опыта эксплуатации для элементов СКУ назначают сроки службы.

5.1.3 ИТТ согласно ФНП [2] разрабатывают на оборудование, системы (группы оборудования), материалы и изделия классов безопасности 2 и 3 по классификации ФНП [1].

5.1.4 ИТТ на оборудование, системы (группы оборудования), материалы и изделия разрабатывает генеральный проектировщик проекта на стадиях выпуска проектной и рабочей документации.

На стадии «Проектирование (проектная документация)» разрабатывают ТЗ/ТУ на оборудование. Указанные документы содержат информацию о параметрах и соответствующих им РХ в соответствии с требованиями ФНП [2]. При этом разработку основного объема ТЗ/ТУ выполняют на стадии «Рабочая документация и строительство».

5.1.5 Поставщик/изготовитель в соответствии с ИТТ и договором поставки разрабатывает ТЗ/ТУ и направляет их на согласование генеральному проектировщику. ТЗ/ТУ содержат техническую информацию на элементы СКУ для разработки проектной документации АС в соответствии с объемом, указанным генеральным проектировщиком/проектировщиком в ИТТ. ТЗ/ТУ рассматривают на предмет выполнения требований в части назначения сроков службы и параметров. В процессе разработки и согласования ТЗ/ТУ могут быть дополнены необходимыми данными, включая параметры, определяющие ресурс элементов СКУ.

5.1.6 При разработке ИТТ, ТУ, ТЗ на СКУ должны быть выполнены требования ФНП [2] при необходимости включения в ПКД РХ критериев оценки ресурса. РХ элементов СКУ устанавливают с учетом рекомендаций руководств [3], [4].

5.1.7 Для обоснования РХ могут быть использованы:

- опыт эксплуатации элементов СКУ аналогичной конструкции (в соответствии с руководствами [5], [6]);
- результаты управления ресурсом аналогичных элементов СКУ (в соответствии с рекомендациями руководств [5], [6]);
- результаты эксплуатации прототипов, имеющих наибольшую наработку и эксплуатируемых в наиболее жестких условиях по параметрам рабочей среды, внешним и внутренним воздействиям;
- расчетно-аналитические методы и результаты аналитических исследований;
- результаты испытаний образцов, в том числе на ускоренное старение, по ГОСТ Р 51372;
- прогнозируемые механизмы старения и деградации;
- базы данных по УР элементов СКУ, сформированные по результатам выполнения ПУР;
- методы математического моделирования и модели эксплуатации элементов СКУ.

5.1.8 Для организации контроля за выработанным и остаточным ресурсами на этапе эксплуатации блока АС в ПКД должны быть включены требования к системам и/или способам контроля необходимых параметров, определяющих ресурс элементов СКУ, в соответствии с требованиями ФНП [2]. Контроль за выработанным ресурсом ведет персонал ЭО в соответствии с требованиями, которые устанавливают в ПУР.

5.1.9 Для тех элементов СКУ, для которых проектная документация разработана до ввода в действие ФНП [1], а также в случаях прекращения деятельности разработчика СКУ установление и обоснование РХ выполняет ЭО. Основанием для установления РХ является ПУР элементов СКУ, которую разрабатывает ЭО и согласует с разработчиками СКУ в соответствии с ФНП [2]. ПУР разрабатывают для каждого блока АС.

5.1.10 При подготовке отчета «Обоснование и установление РХ элементов СКУ» необходимо:

- провести анализ РХ, рекомендованных руководствами [3], [4], и обосновать, какие РХ из рекомендованных руководствами [3],[4] должны быть установлены для данного элемента СКУ, дать краткую информацию о тех причинах, по которым не все рекомендованные руководствами [3], [4] РХ следует устанавливать для данного элемента;
- обосновать, что для данного элемента СКУ установленных РХ достаточно и они обеспечивают УР элемента СКУ в полном объеме с учетом всех выявленных механизмов деградации и доминирующих механизмов старения, деградации и повреждений элементов СКУ.

5.1.11 Для установления и обоснования РХ могут быть использованы:

- результаты оценки технического состояния и остаточного ресурса, отчеты по обоснованию и установлению РХ элементов СКУ, которые оформляют для обоснования продления срока службы СКУ;
- расчетные обоснования РХ, выполненные в соответствии с требованиями действующих ФНП, национальных стандартов;
- рекомендации руководств по безопасности при использовании атомной энергии [3], [4];
- результаты мониторинга РХ при выполнении ПУР.

5.1.12 При обосновании и установлении РХ по результатам работ по продлению срока службы элементов СКУ для элементов СКУ, включенных в ПУР, оформляют отчет «Обоснование и установление РХ», на основании которого при наличии положительных результатов обоснования возможности продления срока службы ЭО оформляет решение о продлении срока службы элементов СКУ и вносит необходимые изменения в ПУР. Данный отчет является приложением ПУР.

5.1.13 Процедура отбора элементов СКУ, подлежащих включению в ПУР, должна соответствовать требованиям ФНП [2] и учитывать рекомендации руководств [5], [6].

5.1.14 Для элементов СКУ, не включенных в ПУР, УР выполняют в соответствии с ГОСТ Р 58341.1 в рамках ТОиР, модернизации и замены.

5.2 Порядок управления ресурсом и учета фактически выработанного ресурса системы контроля и управления

5.2.1 В соответствии с требованиями ФНП [1] и ГОСТ Р 58341.1 ЭО разрабатывает ПУР.

5.2.2 Оценку выработанного ресурса и обоснование остаточного ресурса проводят в соответствии и в рамках выполнения ПУР в соответствии с ГОСТ Р 58341.1.

5.2.3 Результаты работ по выполнению ПУР и работ по регламенту контроля технического состояния элементов СКУ вносят в базу данных по УР и используют для учета выработанного ресурса и оценки остаточного ресурса.

5.2.4 Срок службы элементов СКУ может быть сокращен:

- при выявлении по результатам эксплуатации и контроля ускоренной деградации, которая может привести к ускоренному исчерпанию РХ;
- повреждениях элементов СКУ, которые могут привести к ускоренному исчерпанию РХ;
- выявлении новых механизмов деградации, которые требуют изменения РХ или введения дополнительных РХ, которые могут быть исчерпаны ранее установленного срока службы.

5.2.5 Срок службы элементов СКУ может быть продлен, если по результатам эксплуатации и контроля выявлено, что РХ на момент истечения установленного срока службы не будут выработаны. Продление срока службы — в соответствии с требованиями раздела 6.

5.2.6 Организацию работ по УР и учету выработанного ресурса элементов СКУ осуществляет ЭО с привлечением (при необходимости) специализированных организаций, имеющих соответствующие лицензии на выполнение работ и/или оказание услуг ЭО и квалифицированных специалистов с соответствующим опытом работы.

5.2.7 Методология УР устанавливается в ПУР и должна быть реализована в процессе выполнения ПУР. Процесс управления ресурсом должен включать в себя действия, направленные на идентификацию частей оборудования, имеющих изменяющиеся во времени характеристики. Необходимо осуществлять контроль за данными характеристиками, а также корректирующие или смягчающие меры для того, чтобы гарантировать общую надежность, эффективность и назначенный ресурс.

5.2.8 Для элементов СКУ актуальным является «моральное» старение, которое определяет возможность его использования в части обеспечения работ по техническому обслуживанию, ремонту, замене элементов СКУ, модернизации. Для элементов СКУ в обязательном порядке должна быть разработана и выполнена программа УМС. Требования к программе УМС элементов СКУ установлены в приложении А.

5.2.9 Срок службы элементов СКУ может быть увеличен, если их РХ не выработаны и если обосновано, что срок службы может быть установлен выше проектного.

5.2.10 Потенциальные механизмы старения, контролируемые параметры и предельные состояния для элементов СКУ следует устанавливать с учетом рекомендаций руководств [3], [4], а также включать приведенные в таблице 1 параметры, определяющие ресурс элементов СКУ. Для конкретных элементов СКУ могут быть установлены другие контролируемые параметры и предельные состояния исходя из реального исполнения и конструктивных особенностей элементов СКУ.

Таблица 1 — Параметры, определяющие ресурс элементов СКУ

Оборудование СКУ	Механизм старения	Эффект старения	Контролируемый параметр	Критерий предельного состояния (браковочный критерий)
Программно-технический, аппаратно-технический комплекс в целом	Деградация диэлектриков, полупроводников электронных компонентов	Увеличение отказов оборудования	Поток отказов	Увеличение потока отказов (устанавливается индивидуально на основании наблюдений в течение основного срока эксплуатации)
Соединители, разъемы	Деградация полимерных материалов, диэлектриков	Охрупчивание, растрескивание	Внешний вид	Наличие трещин, выкрашивание материала
		Изменение геометрии	Надежность фиксации токопроводящих элементов в разъемах	Случаи выпадения ламелей, штырьков из разъема
	Коррозия контактных элементов	Увеличение переходных сопротивлений	Видимые следы коррозии	Наличие видимых следов коррозии
			Переходное сопротивление	Увеличение переходного сопротивления сверх допустимого значения
			Нагрев разъемных соединений	Повышенный нагрев
Провода, жгуты, элементы внутреннего монтажа	Деградация, высыхание изоляции	Потеря механических свойств, растрескивание, охрупчивание	Внешний вид	Наличие трещин, осыпания изоляции
			Удлинение на разрыв у контрольного образца	Уменьшение показателя ниже допустимого для данного типа изоляционного материала
		Потеря изоляционных свойств	Сопротивление изоляции	Снижение сопротивления изоляции ниже значений, указанных в документации завода-изготовителя

Окончание таблицы 1

Оборудование СКУ	Механизм старения	Эффект старения	Контролируемый параметр	Критерий предельного состояния (браковочный критерий)
Автоматические выключатели	Механический износ	Заедания при включении/отключении	Четкость фиксации в крайних положениях	Отсутствие четкой фиксации
	Деградация изоляционных материалов	Изменение сопротивления в токопроводящих цепях	Токи отсечки	Несоответствие паспортным значениям
Реле, контакторы	Механический износ контактных площадок	Увеличение переходных сопротивлений	Переходные сопротивления контактных групп	Увеличение сверх допустимого значения
	Механический износ подвижных частей	Увеличенное время переключения	Время переключения	Увеличение сверх допустимого значения

5.2.11 Поддержание заданных характеристик и общей надежности СКУ ограничено:

- физическим старением элементов СКУ, приводящим к его дефектам;
- «моральным» старением элементов СКУ с точки зрения как взаимозаменяемости деталей, так и технической поддержки, осуществляемой поставщиками.

5.2.12 Задачи обеспечения общей надежности элементов СКУ в течение всего срока службы обусловлены относительно длительным сроком эксплуатации блоков АС по сравнению со сроком службы элементов СКУ.

5.2.13 Оценку текущего технического состояния элементов СКУ проводят на основании анализа следующих данных:

- метрологического обеспечения элементов СКУ;
- сведения по наработке СКУ и его компонентов с начала эксплуатации;
- информация о соответствии параметров оборудования СКУ (устройств, процессоров, блоков, крейтов, плат, элементов и др.) параметрам, указанным в ТУ;
- положительная оценка технического состояния элементов СКУ (стоек, шкафов, щитов, панелей, устройств, программного обеспечения и др.) по результатам контроля в процессе эксплуатации;
- результаты оценки состояния элементов СКУ системами диагностики (при наличии) и обработки параметров эксплуатации методами предиктивного анализа технического состояния (при наличии);
- положительные результаты комплексных функциональных испытаний СКУ.

5.2.14 Состояние элементов СКУ признают работоспособным при выполнении следующих условий:

- положительная оценка состояния метрологического обеспечения элементов СКУ;
- фактическая наработка элементов СКУ не превышает значений РХ, установленных ЭО или указанных в ТУ, в руководствах по эксплуатации организаций-изготовителей и в НД;
- значения параметров технического состояния элементов СКУ соответствуют требованиям ТУ, руководств по эксплуатации организаций-изготовителей;
- значения технических и метрологических (при их наличии) параметров/характеристик элементов СКУ соответствуют значениям, указанным в ТУ, в руководствах по эксплуатации, паспортах и формулярах организаций-изготовителей.

При необходимости принимают решение о необходимости выполнения ТОиР или замены элементов СКУ.

5.2.15 Средства для УР элементов СКУ

Контроль РХ элементов СКУ должен включать в себя следующее:

- периодические измерения и испытания, результаты которых могут подтвердить рабочие характеристики [время реакции, результаты последних (действующих) поверок и/или калибровок средств измерений] элементов СКУ и любое изменение характеристик частей, подверженных старению (датчики, преобразователи и т. д.). Если точные рабочие характеристики элементов СКУ измерить невозможно, следует определить приемлемость параметров рабочих характеристик оборудования. Периодические измерения выполняют с периодичностью и по методическим документам, которые установлены в ПУР;
- увеличение объемов испытаний элементов, демонстрирующих начало деградации или отклонение от спецификаций;

- замену комплектующих;
- управление и замедление процесса старения путем изменения процедур ТОиР либо принятия мер по восстановлению рабочих характеристик оборудования до приемлемых критериев.

Примечание — Изменение характеристик в основном рассматривают для аналоговых частей системы, таких как датчики, кабели, усилители и преобразователи.

5.2.16 Мониторинг РХ элементов СКУ блока АС выполняют для всех включенных в ПУР элементов СКУ с целью периодической или непрерывной (с использованием систем автоматизированного контроля параметров технического состояния) оценки технического состояния и выявления доминирующих механизмов старения и деградации СКУ.

5.2.17 Для контроля выработанного ресурса и оценки эффективности ПУР для каждого блока АС выпускают годовой отчет по оценке состояния безопасной эксплуатации блоков АС с анализом изменения РХ, основанным на годовом отчете УР СКУ. Годовой отчет УР элементов СКУ выпускают за период предыдущего года не позднее марта следующего года, который утверждает главный инженер АС.

5.2.18 Годовой отчет по УР элементов СКУ за отчетный период должен содержать:

- информацию об установлении и обосновании РХ;
- результаты периодической оценки фактического технического состояния и остаточного ресурса элементов СКУ;
- результаты мониторинга и прогнозирования тенденций механизмов деградации и старения;
- отчет о выполнении назначенных мероприятий по отслеживанию и/или сдерживанию деградации;
- результаты оценки эффективности выполненных мероприятий по мониторингу РХ, отслеживанию и/или сдерживанию деградации;
- выявленные при очередном контроле и не предусмотренные в проекте АС факторы, способные негативно повлиять на механизмы деградации элементов СКУ и привести к ускоренной выработке их остаточного ресурса (при их наличии);
- предложенные организацией — разработчиком АС меры по исключению или снижению влияния и не предусмотренные в проекте АС факторы, способные негативно повлиять на механизмы деградации элементов СКУ и привести к ускоренной выработке их остаточного ресурса (при их наличии);
- информацию о сокращенных сроках службы элементов СКУ в том случае, если обнаружены не предусмотренные в проекте факторы, негативно влияющие на механизмы старения и деградации;
- информацию о продленных сроках службы элементов СКУ.

5.2.19 В годовом отчете УР элементов СКУ определяют перечни элементов СКУ, расчетный срок службы которых составляет менее срока эксплуатации блока АС. Для этих элементов СКУ в ПУР вносят изменения в части увеличения объема контроля технического состояния и/или уменьшения интервалов между периодическими оценками фактического технического состояния. Результаты периодических обоснований остаточного ресурса приводят в отчетах по периодической оценке безопасности.

5.2.20 Учет выработки остаточного ресурса проводят в соответствии с требованиями 5.1, 5.2, в ходе которого должны быть пройдены следующие этапы работ:

- обоснование и установление РХ, разработка ПУР, в которых установлены РХ (контролируемые параметры), критерии оценки ресурса, мероприятия по УР, контролю параметров его определяющих, периодичность (сроки выполнения мероприятий);
- в соответствии со сроками, установленными в ПУР, выполняют предусмотренные в ней мероприятия и устанавливают (при необходимости) новые значения параметров, определяющих РХ;
- по результатам выполнения ПУР АС выпускается годовой отчет, в котором приводят актуальные значения РХ для тех элементов СКУ, по которым в течение года выполнялись мероприятия, предусмотренные ПУР;
- результаты работ по УР на основании годовых отчетов вносят в базу данных по УР, по каждому элементу СКУ, для которого проводились работы УР, или по контролю состояния либо в случаях выявления дефектов, неисправностей или других факторов, влияющих на РХ;
- актуальные значения РХ на основании годового отчета вносят в ПУР для тех элементов СКУ, по которым они вновь установлены по результатам выполнения ПУР за отчетный период. Изменения в ПУР оформляют извещением, которое утверждается ЭО и согласовывается с главным конструктором РУ (в зоне проектирования) и генеральным проектировщиком (в зоне проектирования).

5.2.21 Сбор, систематизация и хранение данных по элементам системы контроля и управления

5.2.21.1 Персонал АС организовывает сбор, обработку, систематизацию, анализ и хранение информации по исходным и фактическим значениям параметров, определяющих установленные РХ элементов СКУ, по отказам и нарушениям в работе, а также по режимам работы, включая переходные

режимы, испытания, в том числе предаварийные ситуации и аварии. Указанную информацию следует хранить в течение всего срока службы элементов СКУ в формате, позволяющем в случае необходимости оперативно на этапе эксплуатации провести сравнение исходных и фактических значений параметров, определяющих РХ элементов СКУ. Информацию в полном объеме вносят в базу данных по УР.

5.2.21.2 С момента монтажа элемента СКУ формируют электронное дело изделия, в которое вносят следующие данные:

- данные паспортов и формуляров элементов СКУ;
- данные изготовителей и монтажных организаций о наличии или отсутствии отклонений от конструкторской (проектной) документации на элементы СКУ и от технологии его изготовления, данные о ремонтах и данные о дополнительных испытаниях;
- данные по специализированным организациям, оказывающим услуги ЭО по сопровождению эксплуатации и технической диагностике элементов СКУ;
- сведения о наличии или отсутствии отклонений от конструкторской (проектной) документации на компоненты СКУ при их хранении, перевозке и транспортировании;
- данные по изменениям РХ;
- технические характеристики имеющихся отклонений (при их наличии) при изготовлении, хранении, транспортировании и монтаже;
- параметры испытаний элементов СКУ при вводе в эксплуатацию;
- данные по опыту эксплуатации элементов СКУ;
- данные по мониторингу фактических условий эксплуатации элементов СКУ;
- данные по повреждениям, их накоплению и развитию, по отказам и нарушениям в работе элементов СКУ;
- данные по оценкам остаточного ресурса элементов СКУ.

5.2.21.3 Для элементов СКУ, включенных в ПУР, оформляют электронное дело элементов СКУ. В электронное дело включают информацию по изменениям РХ и результаты испытаний, предусмотренных руководством по эксплуатации элементов СКУ. Электронное дело СКУ вносят в базу данных по УР элементов блока АС. Базу данных ведет персонал АС.

6 Обоснование остаточного ресурса элементов системы контроля и управления

6.1 Порядок и состав работ по оценке технического состояния и обоснованию остаточного ресурса элементов СКУ, очередность их выполнения и порядок оформления результатов работ определены следующими требованиями ГОСТ Р МЭК 62342, ГОСТ Р 58341.1:

- анализ технической документации;
- контроль и анализ условий эксплуатации, включая анализ параметров электромагнитной обстановки;
- анализ результатов работ по учету выработанного и оценке остаточного ресурса с начала эксплуатации;
- анализ воздействия за предыдущее время эксплуатации предусмотренных проектной документацией механизмов старения и деградации;
- разработка программы обследования;
- контроль технического состояния, включая операции проверок и испытаний;
- установление механизмов старения и деградации, определяющих ресурс элементов СКУ;
- оценка технического состояния;
- обоснование остаточного ресурса на основе настоящего стандарта, стандартов ЭО (соответствующих требованиям ГОСТ Р 58341.1 и пункта 22 [7]).

По результатам работ выполняют подготовку и оформление:

- обоснования возможности продления срока службы элементов СКУ, в котором приведены выводы о техническом состоянии, остаточном ресурсе и о возможности продлить срок службы элементов СКУ;
- заключения о техническом состоянии, остаточном ресурсе и продлении срока службы элементов СКУ;
- решения (технического решения) о продлении срока службы, в котором установлены срок службы и условия дальнейшей эксплуатации.

6.1.1 По результатам выполнения работ по ПУР, в том числе работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса, по учету выработанного и остаточного ресурсов, может быть принято решение о сокращении срока службы, о модернизации оборудования или системы, о замене элементов СКУ.

6.1.2 Решение (техническое решение) о продлении срока службы может быть оформлено ЭО при наличии положительных результатов обоснования возможности продления срока службы только для тех элементов СКУ, остаточный ресурс которых с запасом позволяет продолжить его эксплуатацию на блоке АС в течение проектного или продленного срока службы блока АС.

6.1.3 Критериями возможности продления срока службы элементов СКУ свыше назначенного срока службы являются следующие:

- соответствие параметров элементов СКУ (устройств, процессоров, блоков, крейтов, плат, элементов и др.) параметрам, указанным в ТУ;
- положительная оценка технического состояния элементов СКУ (стоек, шкафов, щитов, панелей, устройств и др.) по результатам комплексного обследования и проведенных проверок по группам и/или отдельным видам оборудования;
- положительные результаты оценки остаточного ресурса с анализом эксплуатационной надежности элементов СКУ;
- положительные результаты комплексных функциональных испытаний элементов СКУ.

6.1.4 При проверке технического состояния элементов СКУ рассматривают результаты технического контроля и проверок в соответствии с программой обследования, в которую необходимо включать анализ технической документации и оценку остаточного ресурса.

6.1.4.1 Анализ технической документации

Установление параметров и критериев оценки технического состояния осуществляют на основании анализа документации, в которой приведено описание систем и их составных частей с анализом условий нормальной эксплуатации и с перечислением параметров и границ интервалов, в которых должны находиться их значения.

Необходимую для расчета надежности элементов СКУ статистическую информацию по дефектам (отказам) оборудования и его элементов подготавливают по следующим эксплуатационным источникам:

- журнал дефектов АС;
- акты работы комиссии по обследованию оборудования;
- справки о состоянии оборудования;
- акты обследования оборудования.

Информацию классифицируют в соответствии со следующим перечнем:

- система, подсистема, оборудование, узел;
- дата, время отказа;
- дата установки;
- срок службы;
- количество однотипных элементов;
- описание отказа;
- уровень по шкале ИНЕС;
- количество отказов;
- непосредственная причина отказов;
- коренная причина отказов;
- последствия и принятые меры;
- расчетное время неготовности;
- продолжительность восстановления;
- дополнительная информация.

6.1.4.2 Подлежат контролю и анализу режимы работы оборудования [продолжительность работы, число включений и отключений, температура, влажность, вибрация, ЭМС, обработка дезактивирующими растворами, содержание пыли в помещениях размещения шкафов оборудования СКУ, эксплуатационные параметры (напряжение, сила тока) и отклонения от установленных ТУ режимов и условий эксплуатации]. В эксплуатационной документации на элементы СКУ должны быть установлены требования по мониторингу:

- за отсутствием течей с потолков, стен на электрооборудование;
- температурными условиями работы электрооборудования по стационарно установленным в помещениях термометрам;
- влажностью в помещениях,

а также значения напряжений питания шкафов.

6.1.4.3 Перечень проверок должен быть указан в программе обследования.

6.1.5 Оценка остаточного ресурса элементов СКУ расчетно-аналитическим методом

6.1.5.1 Использование показателей надежности для обоснования остаточного ресурса должно быть основано на максимально возможном объеме статистических данных по отказам оборудования и подтверждено при проведении регламентных процедур ТОиР по контролю технического состояния элементов СКУ.

6.1.5.2 Номенклатура показателей надежности

Номенклатура основных нормируемых показателей надежности элементов СКУ установлена в соответствии с ГОСТ 26291.

Показатели надежности подразделяют на единичные и комплексные. Единичные показатели, приведеные в таблице 2 и используемые в приложении Б, характеризуют каждое из составных свойств надежности (безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость) в отдельности.

Таблица 2 — Единичные показатели надежности

Характеризуемое свойство надежности	Показатель надежности	Обозначение
Безотказность невосстанавливаемых объектов	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Вероятность отказа	$Q(t)$
	Средняя наработка на отказ	$T_{ср}$
	Плотность распределения наработки до отказа	$f(t)$
	Интенсивность отказа	$\lambda(t)$
Безотказность восстанавливаемых объектов	Наработка на отказ	T_0
	Параметр потока отказов	$\Omega(t)$
Безотказность восстанавливаемых объектов в сложном режиме работы	Вероятность срабатывания на требование	$V_{с.т}(t)$
	Вероятность оперативного срабатывания на требование	$V_{о.с.т}(t)$
	Средний ресурс	$T_р$
	Гамма-процентный ресурс	$T_{р\gamma}$
Долговечность	Назначенный ресурс	$T_{р.н}$
	Средний срок службы	$T_с$
	Гамма-процентный срок службы	$T_{с\,\gamma}$
	Назначенный срок службы	$T_{с.н}$
	Среднее время восстановления	$T_в$
Ремонтопригодность	Вероятность восстановления	$P_в(t)$
	Интенсивность восстановления	$\mu(t)$
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости	$T_{с.с}$
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{с.с\gamma}$

6.1.5.3 Дополнительные показатели надежности

При анализе эксплуатационной надежности элементов СКУ стоит задача посредством реальной статистической информации о поведении объекта в процессе эксплуатации оценить его остаточный ресурс. Для решения данной задачи рассматривают два вспомогательных процесса, называемых обратным остаточным временем, или возрастом объекта, и прямым остаточным временем, или остаточной наработкой объекта к моменту t.

Существенное для практики расчетов характеристик надежности значение имеет нестационарный коэффициент оперативной готовности, который определяют через функцию распределения прямого остаточного времени. Этот показатель характеризует вероятность того, что объект, работоспособный к моменту времени t, не откажет на интервале $(t, t + x]$. Нестационарный коэффициент оперативной готовности применяют при анализе надежности объектов, находящихся в дежурном режиме.

6.1.5.4 Обработка исходных статистических данных

При определении показателей надежности элементов СКУ в качестве исходной информации используют данные об отказах элементов СКУ во время эксплуатации. Применяя математические методы статистического оценивания, можно получить оценки функции распределения или плотности распределения для наработки до отказа и далее их использовать как входные характеристики при расчетах исследуемых показателей надежности.

Основными источниками статистических данных о дефектах и отказах являются:

- журналы дефектов, которые ведут в соответствии с правилами технической эксплуатации блоков АС;
- акты расследования нарушений в работе АС, составляемые по результатам расследований нарушений;
- данные паспортов и формуляров на элементы СКУ;
- сведения о плановых ремонтах;
- статистические данные о наработках оборудования;
- сведения о выводе оборудования из эксплуатации;
- ежегодные отчеты и справки о состоянии оборудования, базы данных исследовательских организаций.

Поступающие статистические данные об отказах могут быть представлены в следующем виде:

- если установлены моменты отказов для каждого из однотипных объектов, достаточно построить эмпирическую функцию распределения, которая будет достаточно четко оценивать функцию распределения;
- если моменты отказов установлены не для каждого конкретного объекта, а для совокупности однотипных объектов, при этом указано количество таких объектов, необходимо использовать ядерные оценки параметра потока отказов;
- если определено количество отказов однотипных элементов в течение заданного промежутка времени (года эксплуатации) и количество элементов в составе устройства, при этом наработки до отказа неизвестны, можно воспользоваться ядерным оцениванием параметра потока отказов с учетом цензурированных данных.

6.1.5.5 При проведении расчетов характеристик надежности необходимо оперировать такими понятиями, как система и элемент. Под системой понимают совокупность взаимодействующих и взаимосвязанных элементов, предназначенную для самостоятельного выполнения определенной практической функции. Термин «элемент» применяют для составной части системы, рассматриваемой при расчете надежности как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению. Элемент не предназначен для самостоятельного практического применения вне связи с другими элементами системы. Каждый элемент должен обладать способностью выполнять определенные функции в системе. Элементом системы следует считать такое(ую) оборудование или коммуникацию, на которое(ую) собраны статистические данные по их эксплуатационной надежности, по рекомендациям руководства [8]. Элементом системы является элемент схемы системы, отказы которого включаются в логические модели системы по анализируемым функциям. Исключение элементов системы из логических моделей системы по анализируемым функциям необходимо обосновать.

6.1.5.6 Рекомендации по выполнению работ по оценке остаточного ресурса элементов СКУ расчетно-аналитическим методом приведены в приложении Б. Также могут применяться другие расчетно-аналитические методы, которые установлены стандартами ЭО, которые используют ЭО для обоснования остаточного ресурса элементов СКУ в соответствии с требованиями пункта 22 ФНП [7].

6.2 Если по результатам оценки технического состояния и обоснования остаточного ресурса будет установлено, что возникновение дефектов (повреждений), отклонений от установленных проектом параметров связано с режимами эксплуатации или конструктивными особенностями элементов СКУ, то организация, проводившая оценку технического состояния и обоснование остаточного ресурса, должна уведомить об этом ЭО для принятия решения о корректирующих мерах.

Приложение А
(рекомендуемое)

Управление моральным старением элементов системы контроля и управления

А.1 Целью проведения работ по УМС элементов СКУ является обеспечение надежного и экономически выгодного производства электроэнергии при безусловном соблюдении требований ядерной, радиационной, технической, пожарной и экологической безопасности.

А.2 УМС является частью общего подхода к повышению безопасности АС путем постоянного совершенствования как эксплуатационных характеристик элементов СКУ, так и управления безопасностью. УМС должно соответствовать рекомендациям [9].

А.3 Рост потребностей АС связан с моральным старением элементов по причине того, что поставщики более не поддерживают гарантийные обязательства и не проводят обслуживание оборудования или прекратили производство компонентов и запасных частей, а также ввиду того, что на рынке появилось более современное изделие, выполняющее аналогичные и другие (дополнительные) функции, в процессе эксплуатации изменились требования к функционалу изделия, как правило, в сторону увеличения количества функций и их усложнения.

А.4 Виды морального старения

А.4.1 Устаревание систем и элементов относительно современного уровня развития технологии (технологическое устаревание)

В настоящем приложении установлены требования по управлению технологическим устареванием элементов СКУ.

А.4.2 Устаревание элементов СКУ относительно современного уровня развития знаний, норм и правил

Устаревание элементов СКУ относительно современного уровня развития знаний, норм и правил, новых подходов к метрологическому обеспечению, в т.ч. к автоматизации процедур поверки и/или калибровки средств измерений и выявлению отказов элементов. Данный вид морального старения не рассмотрен в рамках настоящего приложения; управление осуществлено в рамках программы обеспечения качества углубленной оценки безопасности блоков АС.

А.4.3 Признаки технологического устаревания

Технологическое моральное устаревание определяют как отсутствие запасных частей и/или технической поддержки, а также отсутствие поставщиков и/или промышленного потенциала (см. [9]).

А.4.4 Оборудование/запасные части/детали считают морально устаревшими в том случае, если изготовитель:

- более не производит комплектующие и запасные части с первоначально установленными характеристиками (размеры, материал и пр.);
- меняет модель или коммерческое обозначение детали;
- не обеспечивает модель соответствующей документацией или подтверждение возможности применения.

Кроме того, могут быть сложности с приобретением элемента на рынке (т. е. когда элемент производится, но отсутствует возможность его приобрести, или целесообразность его приобретения из-за неоправданной цены, или по какой-либо другой причине).

А.4.5 Факт устаревания элемента не зависит от его наличия на складе, а связан с возможностью его приобретения на рынке.

А.5 Организация работ по управлению моральным старением элементов систем контроля и управления на атомной станции

А.5.1 Формирование перечней элементов, подверженных моральному старению.

А.5.2 Целью формирования перечней элементов, подверженных моральному старению, является определение морально устаревших элементов оборудования в соответствии с А.4, а также тех элементов, которые устарели в течение установленного срока службы и для которых запасные части более не производятся или их сложно закупить.

Кроме того, возникают сложности с получением необходимых документов и/или подтверждением возможности применения.

А.5.3 Предварительные перечни элементов, подверженных моральному старению, составляют на базе регистра систем и оборудования.

В объем таких перечней следует включать все компоненты (конструкции, оборудование, средства измерений, программное обеспечение, средства вывода информации и т. д.), значимые для безопасности, а также запасные части, которые требуются для подержания этих компонентов в работоспособном состоянии в течение всего установленного срока службы.

Перечни составляют в электронном виде и размещают в базе данных АС по моральному старению.

Для каждого элемента перечня должна быть определена и указана минимально необходимая информация для его точной технической идентификации (производитель, модель или номер артикула и т. п.). В случае невозможности идентификации всей необходимой информации такие элементы вносят в отдельный перечень неидентифицированных элементов и организуют специальные мероприятия для восстановления информации.

А.5.4 После составления предварительного перечня проводят оценку уже произошедшего или будущего (в течение срока службы) морального устаревания для каждого элемента.

Источниками информации при выполнении такой оценки для формирования перечней элементов, подверженных моральному старению, являются:

- потребности, связанные с уменьшенным запасом запасных частей;
- потребности в связи с техническим обслуживанием и ремонтом АС;
- персонал АС, выявляющий проблемы в процессе повседневной работы;
- информация от поставщиков о снятии с производства, усовершенствовании конструкции и т. д.;
- информация от других АС или от внешних источников;
- проверки уязвимости оборудования (целевые проверки, обходы оборудования станции для выявления проблем морального старения);
- на рынке появилось усовершенствованное изделие, выполняющее те же и другие (дополнительные) функции;
- в процессе эксплуатации изменились требования к функционалу изделия, как правило, в сторону увеличения количества функций и их усложнения;
- отчеты и оценки состояния системы, оборудования, элемента оборудования, программного обеспечения.

При формировании перечней элементов, подверженных моральному старению, необходимо учитывать следующие факторы:

- количество идентичного оборудования, находящегося в эксплуатации на АС;
- текущие уровни запасов;
- история потребления запасных частей;
- частота отказов оборудования;
- время на организацию снабжения;
- ревизия максимального и минимального запасов;
- перспективная потребность при техническом обслуживании и ремонте;
- старение запасов оборудования;
- классификация оборудования на основе критичности (в стандарте «критичность» рассмотрена как свойство элемента СКУ, характеризующее его влияние на выполнение системой ее функций);
- влияние на безопасность и надежную эксплуатацию АС при отказе/неработоспособности этого оборудования;
- возможность поддерживать морально устаревший компонент, используя имеющиеся запасные части.

А.5.5 Если оценка показывает, что элемент является доступным на рынке, отсутствует вероятность прекращения его производства либо складские запасы позволяют поддерживать работоспособность компонентов в течение установленного срока службы, такой элемент исключают из перечня.

А.5.6 Если в результате оценки признают уже случившееся или высоковероятное в течение срока службы устаревание элемента, этот факт отражают в перечне.

А.5.7 Определение приоритетов

В полученных перечнях элементов, подверженных моральному старению, для каждого элемента СКУ следует установить приоритеты решения проблемы исходя из степени влияния на безопасность станции. Учитывают три основных фактора:

а) значимость компонента для АС;

б) спрос АС на запасные части;

в) доступность запасных частей на складе АС.

Эту схему приоритетов осуществляют на основе классификации компонентов информации: о нарядах на работы, истории движения запасных частей на складе, истории отказов или любых дополнительных критериях, определенных ЭО. Относительную значимость каждого фактора определяет ЭО, и относительный вес либо важность присваивают для каждого фактора. Схема приоритетов основана на приведенном выше.

Можно иметь достаточно запасных частей для устаревшего элемента на складе в надлежащих условиях, чтобы гарантировать безопасную и надежную работу в течение достаточно длительного периода времени. Каждая станция может иметь конкретные приоритеты. Как правило, следующие факторы рассматривались при определении приоритетности:

- количество идентичного оборудования, эксплуатирующегося на станции;
- текущий уровень запасов;
- история потребления запасных частей;
- интенсивность отказов оборудования;
- сроки производства;
- максимальные и минимальные складские запасы;
- предстоящий спрос для ТОиР;
- старение оборудования на складе;
- классификация оборудования по критичности (критическое, некритическое, ведет к останову);
- воздействие на безопасность и надежную работу АС в случае отказа/отсутствия этого элемента;
- способность поддерживать работоспособность устаревшего компонента с использованием имеющихся запасных частей.

Примечание — В настоящем стандарте понятие «критичность» рассмотрено как свойство компонента СКУ, характеризующее его влияние на выполнение системой ее функций.

А.5.8 Определение способов управления моральным старением

Для УМС могут быть использованы следующие методы:

- поддержание на необходимом уровне страхового и неснижаемого запасов, а также ремонтного обменного фонда оборудования, узлов и запасных частей. Этот метод может быть применен для элементов, пока имеющихся на рынке, для которых прогнозируется устаревание в течение установленного срока службы.

Организацию деятельности по поддержанию страхового и неснижаемого запасов, а также ремонтного обменного фонда оборудования, узлов и запасных частей осуществляют в соответствии со стандартами ЭО, устанавливающими требования по страховому запасу, неснижаемому запасу товарно-материальных ценностей для обеспечения ремонтно-эксплуатационных нужд АС и ремонтному обменному фонду оборудования, узлов и запасных частей;

- приобретение запасных частей на рынке запасов в том случае, когда изготовитель более не выпускает изделие и могут существовать запасы таких изделий, и они могут быть в продаже у отдельных поставщиков либо предлагаться к реализации для других АС. Это наиболее приемлемое решение, так как оно обеспечивает идентичными деталями и компонентами для решения проблемы морального старения;

- организация индивидуального производства. Первоначальные изготовители продукта иногда готовы изготавливать снятые с производства образцы в определенном количестве для пополнения запаса морально устаревших деталей для АС;

- закупка отдельной партии изделий, ранее снятых с серийного производства, которую осуществляют в соответствии с требованиями программы обеспечения качества при эксплуатации АС;

- использование деталей от других компонентов возможно при ТОиР. Детали, требуемые для перестройки компонента, демонтируют с идентичного оборудования, как правило, выведенного из эксплуатации;

- обратное проектирование с целью воссоздания запасных частей. Этот путь решения состоит в разработке конструкторской документации на оборудование, достаточной для дублирования изделия, путем проверки технической информации и проведения физического изучения оригинального образца. Поставщик третьей стороны, не являющийся изготовителем оригинального оборудования, может быть привлечен к выполнению такого анализа и проектирования изделия с идентичными характеристиками для последующего воспроизводства изделия. Реализация такого пути решения требует выполнения необходимых подтверждений, что созданная идентичная деталь может быть применена без снижения безопасности и надежности;

- эквивалентная замена запасных частей. Определяют другое изделие в качестве замены того, которое более не выпускается, проводят технологический анализ для проверки и подтверждения взаимозаменяемости и влияния замененного изделия на работу системы. Эквивалентную замену запасных частей выполняют в рамках ТОиР;

- эквивалентная замена оборудования. Определяют другое изделие в качестве замены того, которое более не выпускается или отсутствует возможность поддержания его работоспособности в рамках ТОиР. Проводят технологический анализ для проверки и подтверждения взаимозаменяемости и влияния замененного изделия на работу системы.

А.6 Формирование программы управления моральным старением

Станционную программу УМС формируют ежегодно в первом квартале, которая включает в себя:

- вводную часть, состоящую из основания для разработки, цели программы, информацию по выполненным мероприятиям по УМС и оценку эффективности УМС за предыдущий год;

- сводный перечень элементов, подверженных моральному старению по всем подразделениям АС;

- мероприятия по УМС по всем подразделениям АС с указанием планируемых сроков выполнения, установленных с учетом присвоенных приоритетов.

А.7 Выполнение и контроль мероприятий, включенных в программу УМС, осуществляют в рамках программ:

- комплектации запасными частями, поддержания страхового и неснижаемого запасов, а также ремонтного обменного фонда оборудования, узлов и запасных частей в рамках программы финансирования АС;

- поставки запасных частей и выполнения планов по ТОиР оборудования;

- поставки оборудования и выполнения СМР по замене оборудования в рамках программы реализации планов модернизации.

А.8 Оценка эффективности управления моральным старением

Оценку эффективности выполняют по результатам реализации программы УМС за истекший год; результаты оценки эффективности используют при формировании программы УМС на текущий год и отражают в ней:

- процент устаревших компонентов от общего количества компонентов, значимых с точки зрения безопасности;

- количество инцидентов, связанных с моральным старением, в год;

- количество приоритетных компонентов, подверженных моральному старению, с распределением по установленным приоритетам;

- количество компонентов с неполными данными (количество компонентов с недостаточной идентификационной информацией);

- общее количество систем или их компонентов, которые рассмотрены в течение года;

- среднее время закрытия, т. е. время между идентификацией устаревшего элемента и положительными доказательствами решения проблемы;

- потеря выработки энергии в связи с моральным старением;
- количество отмененных или отложенных действий по техническому обслуживанию и ремонту в связи с моральным старением;
- количество временных модификаций (или несоответствий проекту) для решения задач управления моральным старением.

Оценку эффективности программы УМС выполняют по факту достижения следующих критериев:

- отсутствие неудач выявления и устранения неблагоприятного воздействия на компоненты систем и элементы, входящие в объем, вызванного устареванием;
- недоступность этих компонентов не будет превышать допустимых пределов;
- надежность этих компонентов не ухудшается из-за устаревания.

Программа УМС должна соответствовать девяти атрибутам, установленным в таблице А.1, если применимо.

Таблица А.1 — Основные атрибуты эффективной программы управления старением

Атрибут	Описание
1 Область применения программы управления старением, основанная на понимании процессов старения	Конструкции (в том числе конструкционные элементы) и элементы, в отношении которых применяется управление старением. Понимание явлений старения (значительные механизмы деградации, чувствительные участки): - материалы конструкции или элемента, условия эксплуатации, стресс-факторы, участки деградации, механизмы деградации и эффекты старения; - показатели состояния и критерии приемлемости конструкции/элемента; - количественные и качественные прогнозные модели соответствующих явлений старения
2 Профилактические меры, направленные на сведение к минимуму ухудшения конструкций или элемента СКУ, и контроль деградации вследствие старения	Определение профилактических мероприятий. Определение параметров эксплуатации (например, условия окружающей среды и условия эксплуатации) и практическая эксплуатационная деятельность, направленная на замедление возможного ухудшения характеристик конструкции или элемента
3 Выявление эффектов старения	Идентификация спецификации параметров, которые следует отслеживать или проверять. Эффективные технологии (проверка, испытания и методы мониторинга) для выявления эффектов старения до отказа конструкции или элемента
4 Мониторинг и тенденции эффектов старения	Контролируемые показатели и параметры состояния. Данные, собираемые с целью облегчения оценки старения конструкции или элемента. Методы оценки (включая анализ и тенденции данных)
5 Смягчение эффектов старения	Действия по эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и замене для смягчения обнаруженных эффектов старения и/или деградации конструкции или элемента
6 Критерии приемлемости	Критерии приемлемости, с учетом которых оценивают необходимость принятия корректирующих мер
7 Корректирующие меры	Корректирующие меры в том случае, если конструкция или элемент не соответствуют критериям приемлемости
8 Обмен опытом эксплуатации и результатами научных исследований и разработок	Механизм, обеспечивающий своевременный обмен опытом эксплуатации и результатами исследований и разработок (если применимо), а также предоставляющий объективные данные по их учету в программе управления старением
9 Управление качеством	Средства административного контроля, посредством которых документально оформляется реализация программы управления старением, и принятые меры. Показатели для облегчения оценки и совершенствования программы управления старением. Процесс подтверждения (проверки) адекватности и правильности профилактических мер и полноты и эффективности всех корректирующих мер. Подлежащая выполнению практическая деятельность по ведению документации

Приложение Б
(рекомендуемое)

Оценка остаточного ресурса элементов системы контроля и управления расчетно-аналитическим методом

Б.1 Номенклатура показателей надежности и требования к обработке исходных статистических данных установлены в 6.1.5.

Б.2 Когда информация об отказах представлена в виде моментов отказов и поток отказов формируют отказы одного объекта, можно восстановить время i-й наработки по формуле $\xi_1 = \tau_1$; $\xi_i = \tau_i - \tau_{i-1}$, $i = 2, 3, n$. Задачу сводят к оцениванию функции или плотности распределения по выборке $\xi_1,\ldots,\xi_n$.

Эмпирическую оценку функции распределения $\hat{F}_\xi(x)$ вычисляют по формуле

$$\hat{F}_\xi(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I\{\xi_i < x\} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H(x - \xi_i), \tag{Б.1}$$

где $H(x) = I\{0 < x\}$ — функция Хэвисайда.

Данная простейшая оценка функции распределения является несмещенной и асимптотически нормальной.

Если поток отказов формируют отказы m однотипных объектов и можно предположить, что объекты абсолютно идентичны и эксплуатируются в одинаковых условиях, то для каждого i-го элемента определена выборка $\xi_1^i, \xi_2^i,\ldots, \xi_k^i$, их наработки можно сгруппировать. В этом случае оценка функции распределения также может быть описана гистограммой.

Эмпирическую оценку для плотности распределения $\hat{f}_\xi(x)$ определяют по формуле

$$\hat{f}_\xi(x) = \frac{1}{N|\Delta_S|}\sum_{i=1}^{N} I\{\xi_i \mid \in \Delta_S\}, \tag{Б.2}$$

где N — объем данных;

S — число разбиений множества наблюдений на интервалы длиной $|\Delta_s|$.

Гистограммная оценка по формуле (Б.2) обладает рядом недостатков:

- для построения гистограммы необходимо знать, сколько наблюдений попало в выбранный интервал разбиения, при этом значения наработок зафиксированных отказов при обработке не используют (следовательно, происходит потеря информации);
- принцип разбиения множества, на котором находятся наблюдения ξ_i, а также число разбиений S зависят только от исследователя. Для проверки скорости сходимости гистограммной оценки по формуле (Б.2) к существующему потоку отказов M необходимо провести проверку сходимости по формуле

$$\sqrt{\mathrm{M}(\hat{f}_\xi - f_\xi)^2} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{N}}. \tag{Б.3}$$

Если сходимость отсутствует, то для сглаживания оценок и получения более высокой точности и достоверности целесообразно использовать ядерную оценку плотности распределения $\hat{f}_\xi(t)$ наработки на отказ, вычисляемую по формуле

$$\hat{f}_\xi(t) = \frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{N} V\left(\frac{t - \xi_i}{h}\right), \tag{Б.4}$$

где N — объем данных;

h — параметр локальности, который является основным управляющим параметром.

В качестве ядра можно рекомендовать гауссовское ядро $V(x)$, вычисляемое по формуле

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{-x^2}{2}\right), \tag{Б.5}$$

Б.3 Когда имеются данные лишь о моментах отказов и не установлено, какой конкретно элемент отказал, применяют метод, основанный на оценивании ППО.

Пусть в состав системы входят m однотипных элементов и моменты отказов τ_i образуют на оси непрерывного времени поток отказов.

Ведущую функцию потока отказов $\Omega(t)$ определяют как математическое ожидание числа отказов до момента времени t по формуле

$$\Omega(t) = Mn(t) = \sum_{i=1}^{\infty} MI\{\tau_i < t\} = \sum_{i=1}^{\infty} F_{\tau_i}(t), \tag{Б.6}$$

где $F_{\tau_i}(t)$ — функция распределения случайной величины τ_i.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ можно определить как производную ВФП по формуле

$$\omega(t) = \Omega'(t) = \sum_{i=1}^{\infty} f_{\tau_i}(t), \tag{Б.7}$$

где $f_{\tau_i}(t)$ — плотность распределения случайной величины τ_i.

Согласно теории восстановления ППО связан с плотностью распределения и функцией распределения наработки до отказа и определяется по следующим уравнениям:

$$f_{\xi}(t) = \omega(t) - \int_0^t f_{\xi}(t-\tau)\omega(\tau)d\tau, \tag{Б.8}$$

$$F_{\xi}(t) = \int_0^t \left(1 - F_{\xi}(t-\tau)\right)\omega(\tau)d\tau. \tag{Б.9}$$

Решение интегральных уравнений (Б.8), (Б.9) позволяет оценить плотность распределения или функцию распределения наработки до отказа по известному ППО. Далее по указанной плотности распределения можно определить ресурсные показатели объекта, например: средний ресурс и срок службы, гамма-процентный ресурс, срок службы и т. д.

Ядерную оценку ППО $\hat{\omega}(t)$ в общем случае определяют по формуле

$$\hat{\omega}(t) = \frac{1}{mh}\sum_{i=1}^{n} V\left(\frac{t-\tau_i}{h}\right), \tag{Б.10}$$

где m — число однотипных элементов в системе;

h — параметр локальности, определяемый как величина, приближенно равная среднеквадратическому отклонению случайной величины τ_i, по формуле

$$h(i) = \sigma\sqrt{i}, \tag{Б.11}$$

где σ — дисперсия, равная $\sqrt{D\xi}$;

$D\xi$ — дисперсия случайной наработки, которую можно оценить по выборке моментов отказов. В случае более сложной структуры данных оценку дисперсии проводят с помощью итеративных процедур.

Если $m = 1$, то можно вычислить наработки до отказа элементов $\xi_i = \tau_i - \tau_{i-1}$ и получить оценку плотности распределения.

Когда $m > 1$ и отсутствует информация о том, какой именно из элементов m отказал, для оценки дисперсии наработки до отказа $D\xi$ можно использовать нижеприведенный итеративный метод.

При произвольном значении параметра $\hat{\sigma}$ с использованием оценки ППО оценивают плотность распределения путем решения уравнения восстановления. Затем определяют следующее значение дисперсии $\hat{\sigma}^2$ по формуле

$$\hat{\sigma}^2 = D\xi = \int_0^T \left(t-\hat{a}\right)^2 \hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt + \int_T^{\infty} \left(t-\hat{a}\right)^2 \hat{f}_{\xi}^{(p)}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt, \tag{Б.12}$$

где $\hat{a} = \int_0^T t\hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt + \int_T^{\infty} t\hat{f}_{\xi}^{(p)}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt$ — математическое ожидание наработки до отказа ξ;

$\hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)$ — оценка функции, вычисляемая по уравнению восстановления

$$\hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right) = \hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right) - \int_0^t \hat{f}_{\xi}\left(t-\tau,\hat{\sigma}\right)\hat{\omega}\left(\tau,\hat{\sigma}\right)d\tau, \tag{Б.13}$$

где $\hat{\omega}\left(\tau,\hat{\sigma}\right)$ — оценка ППО.

Компонента $\hat{f}_{\xi}^{(p)}\left(t,\hat{\sigma}\right)$ — это оценка плотности на хвосте распределения, на участке $[T; \infty)$, на котором статистическая информация об отказах отсутствует. Эта компонента плотности возникает в том случае, если $\int_0^T \hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt < 1$. Следовательно, прогнозируют плотность распределения на участке $[T; \infty)$. В качестве прогнозной функции берут (как наиболее простую и носящую пессимистический характер) функцию вида $\hat{f}_{\xi}^{(p)}\left(t,\hat{\sigma}\right) = Ce^{-\lambda t}$, где коэффициенты C и λ определяют исходя из двух условий:

условия непрерывности — $\hat{f}_{\xi}^{(p)}\left(T,\hat{\sigma}\right)=\hat{f}_{\xi}\left(T,\hat{\sigma}\right)$;

условия нормировки — $\int\limits_{0}^{T}\hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt+\int\limits_{T}^{\infty}\hat{f}_{\xi}\left(t,\hat{\sigma}\right)dt=1$.

Имитационные исследования показали, что при таком способе оценивания дисперсии $\hat{\sigma}$ возникают ситуации, когда алгоритм начинает расходиться. В связи с этим предложен итеративный алгоритм поиска значения $\hat{\sigma}$. Рекомендуемые значения этого параметра предпочтительно выбирать из области значений [0; 3]. Чем ближе значение $\hat{\sigma}$ к нулю, тем точнее оценка. Параметр $\hat{\sigma}$ выступает в качестве основного управляющего параметра, поэтому его не допускается брать бесконечно малым, так как в этом случае дисперсия оценки параметра потока отказов будет стремиться к бесконечности, а также большим, так как тогда увеличивается систематическая погрешность оценки. Ввиду этого существует нижнее допустимое значение такого параметра, которое определяют только итеративно, неоднократным прогоном программного кода.

В уравнении восстановления [см. формулу (Б.10)] используют оценку ППО. Существуют разные методы их получения в случае разного рода входной информации. Когда $m > 1$ и отсутствует информация о том, какой именно из элементов m отказал, оценку $\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)$ ППО определяют по формуле

$$\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi i m\hat{\sigma}}}\exp\left(-m\left(\frac{t-\tau_i}{\hat{\sigma}\sqrt{2i}}\right)^2\right), \tag{Б.14}$$

где t — время наработки элемента, ч;

m — число однотипных элементов в системе;

τ — параметр, выступающий в качестве основного параметра отказа.

Кроме того, необходимо учитывать систематическую погрешность ε в определении параметров потока отказов при оценивании ППО:

$$\varepsilon\left(t,n,m\right)\approx\frac{1}{2a}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{a\cdot nm-t}{\sqrt{2\cdot nm}\sigma_2}\right)+e^{\frac{2at}{\sigma_{2^2}}}\operatorname{erfc}\left(\frac{a\cdot nm+t}{\sqrt{2\cdot nm}\sigma_2}\right)\right], \tag{Б.15}$$

где параметр σ_2 подбирают также вручную, итеративным способом. В идеале $\sigma_2=\hat{\sigma}$, но практически это два различных параметра.

Среднюю наработку a определяют по формуле

$$a=\frac{m}{n}\tau_n, \tag{Б.16}$$

где τ_n — момент последнего ненулевого отказа.

Таким образом, оценка ППО может быть определена по формуле

$$\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi i m\hat{\sigma}}}\exp\left(-m\left(\frac{t-\tau_i}{\hat{\sigma}\sqrt{2i}}\right)^2\right)+\varepsilon\left(t\right). \tag{Б.17}$$

Б.4 Когда приведена информация только о количестве отказов отдельных элементов за определенный период времени (например, календарный год, т. е. статистические данные об отказах сгруппированы по годам эксплуатации), применяют ядерную оценку ППО. В отличие от предыдущих рассматриваемых случаев исследователю неизвестны ни наработки до отказов элементов, ни моменты отказов, при наличии данных о которых можно было бы вычислить наработки до отказа.

Период проведения наблюдений за функционированием объекта можно представить в виде массива интервалов $\overline{LR}=\left[\left(l_1,r_1\right);\left(l_2,r_2\right);...;\left(l_n,r_n\right)\right]$, на которых произошло $\bar{\nu}=\left(\nu_1,\nu_2,...,\nu_n\right)$ — случайное число отказов, причем $l_j + 1 = r_j$.

Пусть n — общее число отказов, m — количество однотипных объектов, формирующих данный поток отказов.

Ядерную оценку ППО определяют по формуле

$$\begin{gathered}\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)=\sum_{i=1}^{n}\frac{\nu_i}{m\left(r_i-l_i\right)}\cdot\left[G\left(\frac{t-l_i}{h}\right)-G\left(\frac{t-r_i}{h}\right)\right]+\varepsilon\left(t\right);\\ G(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{x}e^{-\frac{t^2}{2}}dt;\quad h(i)=\hat{\sigma}\sqrt{-0{,}5\nu_i+\sum_{j=1}^{i}\nu_j},\end{gathered} \tag{Б.18}$$

где h — параметр локальности, который является основным управляющим параметром. Определяется количеством исходных статистических данных;

G — количество отказов за год эксплуатации элемента.

Параметр $\hat{\sigma}$ (по указанным выше причинам) определяют итеративно, $\varepsilon(t)$ — систематическая погрешность, вычисляемая по формуле (Б.15).

Б.5 Если структура данных об отказах смешанного типа (данные о количестве отказов, сгруппированные по годам эксплуатации и в виде указания даты отказа устройства исходя из совокупности однотипных объектов), то ядерную оценку $\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)$ ППО рассчитывают по формуле

$$\hat{\omega}\left(t,\hat{\sigma}\right)=\sum_{i=1}^{n}\frac{\nu_i}{m\left(r_i-l_i\right)}\cdot\left[G\left(\frac{t-l_i}{h_i}\right)-G\left(\frac{t-r_i}{h_i}\right)\right]+\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{\sqrt{2\pi i m}\hat{\sigma}}\exp\left(-m\left(\frac{t-\tau_i}{\hat{\sigma}\sqrt{2i}}\right)^2\right)+\varepsilon\left(t\right),\qquad\text{(Б.19)}$$

где k — количество известных моментов отказов.

Б.6 Методика расчета показателей надежности элементов в предположении об однородности потока отказов содержит методику:

- проверки гипотез о простейшем потоке отказов и наличии старения;
- оценки интенсивности отказов элементов;
- оценки остаточного ресурса элементов;
- оценки дополнительных ресурсных характеристик (прямого и обратного остаточного времени) элементов.

В методике рассмотрены вопросы проверки следующих гипотез: о пуассоновском приращении числа отказов; о постоянстве приращения числа отказов; о случайности приращения числа отказов, а также гипотезы старения оборудования. Также представлены методы оценки интенсивности отказов и остаточной наработки до отказа (остаточного ресурса) с учетом цензурирования исходных данных.

Б.7 Методика проверки гипотезы о простейшем потоке отказов включает в себя этапы по Б.8 — Б.11.

Б.8 Для получения корректных оценок характеристик надежности и статистического прогнозирования остаточного ресурса на этапе анализа исходной информации необходимо проверить гипотезы случайности, принадлежности частот пуассоновскому закону, постоянства приращений, отсутствия старения. Анализ статистических данных об отказах объектов показал, что для ряда элементов не выполняется предположение об однородности потока отказов. Следовательно, применение стандартных процедур оценивания может привести к существенным ошибкам. Если принимается гипотеза о неоднородности потока отказов, необходимо использовать иные методы оценивания. Поэтапная схема методики приведена на рисунке Б.1.

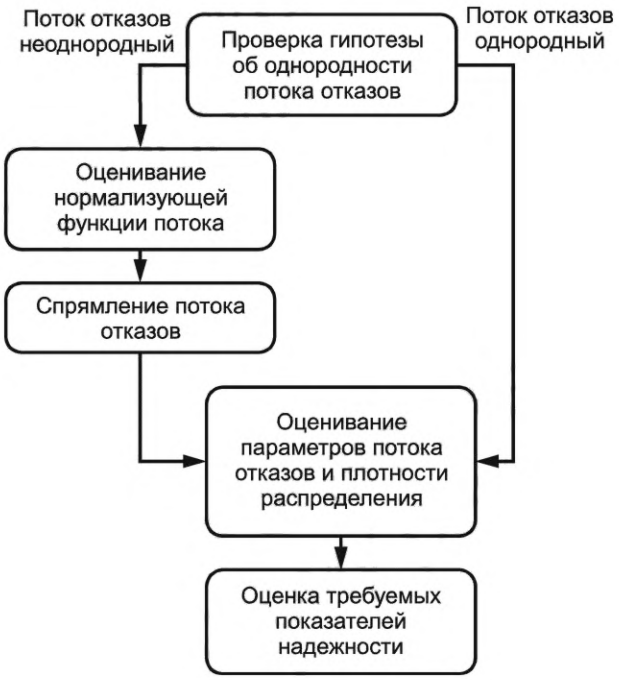

Рисунок Б.1 — Этапы анализа исходной информации об отказах

Исходной информацией являются данные об отказах m однотипных объектов, группированные по годам эксплуатации.

Проверку гипотезы об однородности потока отказов осуществляют с помощью последовательного применения трех критериев:

- о пуассоновском приращении числа отказов;
- постоянстве приращения числа отказов;
- случайности приращения числа отказов.

Считается что поток отказов не является однородным, если отвергается как минимум один из трех критериев. Критерии о постоянстве приращения числа отказов и о случайности приращения числа отказов существенно коррелируют между собой, но тем не менее в некоторых ситуациях дополняют друг друга.

Б.9 На следующем этапе проводят проверку гипотезы о принадлежности частот отказов пуассоновскому закону распределения. Для проверки гипотез о законе распределения применяют критерии согласия. Когда по выборке оценивают параметры распределения, используют критерий Фишера χ^2.

Статистике такого критерия необходима сгруппированная информация об отказах, т. е. массив частот отказов. Поэтому в случае наличия информации в виде известных моментов отказов или информации смешанного вида ее необходимо сгруппировать.

Для критерия проверки принадлежности эмпирических частот пуассоновскому закону χ^2 необходимо рассчитать статистику по формуле

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{s} \frac{\left[n_{i_k} - T \cdot p_{i_k}\left(\hat{\lambda}\right) \right]^2}{T \cdot p_{i_k}\left(\hat{\lambda}\right)}, \tag{Б.20}$$

где T — общее число лет наблюдений;

n_{i_k} — эмпирическая частота (количество лет) с числом отказов, равным i;

p_{i_k} — теоретическая вероятность i отказов за один год;

s — количество интервалов группирования отказов.

Отдельно следует рассчитать оценку $\hat{\lambda}$, которую определяют методом максимизации функции правдоподобия по сгруппированным данным следующим образом:

$$l\left(\hat{\lambda}\right) = \sum_{i=0}^{s} \frac{n_i}{T} \ln\left(p_i\left(\lambda\right)\right) \to \max_{\lambda}, \tag{Б.21}$$

где $\hat{\lambda}$ — средняя функция правдоподобия по сгруппированным данным;

p_i — уровень значимости отказа элемента;

λ — функция правдоподобия по сгруппированным данным элемента.

В этом случае

$$\hat{\lambda} = \arg\max_{\lambda} l\left(\lambda\right) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{s} i \cdot n_i. \tag{Б.22}$$

Далее рассчитывают значение $p(x, \gamma)$ по формуле

$$p\left(x, \gamma\right) = \int_{x}^{\infty} f\left(u, \gamma\right) du, \tag{Б.23}$$

где $p(x, \gamma)$ — уровень значимости отказа элемента со степенями свободы x и γ;

$f(u, \gamma)$ — плотность распределения χ^2 со степенями свободы γ;

x — рассчитанное значение статистики.

Если $p(x, s - 2) < \alpha$, где $\alpha = 0{,}05$ — уровень значимости, то нулевую гипотезу о пуассоновском распределении не принимают для заданного уровня значимости.

Количество интервалов группирования отказов s рассчитывают по формуле

$$s = 1 + \sum_{i=0}^{q} I\left\{n_i \neq 0\right\}, \tag{Б.24}$$

где $I\{n_i \neq 0\}$ — индикаторная функция;

$q = \max_i \nu_i$ — максимальное число отказов за весь период наблюдения. Если эмпирическая частота n_i равна 0, то ее включают в группу нулевых частот. Для этой группы рассчитывают соответствующую теоретическую вероятность.

Б.10 Для проверки гипотезы постоянства частот отказов (приращений) также применяют критерий Фишера χ^2. При этом необходимо рассчитать статистику по критерию Фишера по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{T} \frac{\left(v_i - \overline{v}\right)^2}{\overline{v}}, \quad (Б.25)$$

где T — общее количество лет наблюдений;

v_i — количество отказов за i-й год эксплуатации;

$\overline{v}$ — среднее число отказов, рассчитываемое по формуле

$$\overline{v} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} v_i. \quad (Б.26)$$

Далее рассчитывают значение p со степенями свободы $T - 1$. Если $p(x, T - 1) < \alpha$, где $\alpha = 0{,}05$ — уровень значимости, то нулевую гипотезу о постоянстве эмпирических частот отказов отклоняют.

Б.11 На заключительном этапе проводят проверку гипотезы случайности наблюдаемых величин (отсутствия монотонных трендов). В математической статистике для проверки гипотезы случайности наблюдаемых величин (отсутствия монотонных трендов) используют критерии, основанные на применении коэффициента ранговой корреляции, а также другие критерии, основанные на рангах, порядковых номерах наблюдений в вариационном ряде.

Проверку гипотезы отсутствия линейного тренда осуществляют в несколько этапов:

а) рассчитывают статистику K по формуле

$$K = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} sign\left[\left(T_i - T_j\right)\cdot\left(S_i - S_j\right)\right], \quad (Б.27)$$

где $T_i = i$, $i = 1, n$ — год наблюдения;

$S_i = i$, $i = 1,\ldots,n$ — ранг числа отказов для i-го года наблюдения;

б) рассчитывают дисперсию статистики Кендалла DK с поправками по формуле

$$DK = \frac{\left\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^{k} t_j\left(t_j - 1\right)\left(2t_j + 5\right)\right\}}{18}, \quad (Б.28)$$

где n — количество лет наблюдений;

k — количество групп совпадающих наблюдений;

t_j, $j = 1, \ldots, k$ — объем k-й группы совпадающих наблюдений. Несовпадающие наблюдения рассматривают как группу совпадающих наблюдений объема $i = 1$.

Решающее правило критерия формулируют следующим образом: нулевую гипотезу (отсутствует тренд) отвергают тогда, когда значение p меньше, чем заданный уровень значимости $\alpha = 0{,}05$:

$$p\left(\frac{K}{\sqrt{DK}}\right) < \alpha, p'(x) = \int_{x}^{\infty} f(u)\,du, p = 2\cdot\min\left\{p'(x), 1 - p'(x)\right\}, \quad (Б.29)$$

где $f(u)$ — плотность распределения нормального закона $N(0,1)$.

Б.12 В методике проверки гипотезы старения элементов учитывают нижеприведенные положения. На начальном этапе эксплуатации сложного оборудования проявляются скрытые дефекты оборудования, что приводит к тенденции увеличения наработок между отказами, а на завершающем периоде эксплуатации начинают сказываться эффекты износа и старения и, как следствие, уменьшаются наработки между отказами.

Входная информация должна быть представительной, чтобы принимаемые решения обладали приемлемой погрешностью. С точки зрения получения достоверных результатов оценивания предпочтительнее, чтобы среднее число отказов $N_{ср}$ за весь период наблюдений было предельно высоким. В противном случае, с большой вероятностью в группе однотипных элементов будут существовать те, у которых не зафиксированы отказы. Следовательно, в данном случае вопрос старения можно не рассматривать.

С учетом вышесказанного решающее правило формулируют нижеприведенным образом. Нулевую гипотезу (отсутствует старение) отвергают тогда, когда значение p меньше, чем заданный уровень значимости $\alpha = 0{,}05$:

$$p\left(\frac{K}{\sqrt{DK}}\right) < \alpha, p(x) = \int_{x}^{\infty} f(u)\,du, \quad (Б.30)$$

где $f(u)$ — плотность распределения нормального закона $N(0,1)$.

Причем значение p рассчитывают так же, как и в случае правосторонней альтернативы. При этом среднее количество отказов за весь период наблюдения должно быть значимым. Рекомендуемое значение значимого среднего числа отказов с учетом этого более или равно 1,5.

Б.13 В методике оценки интенсивности отказов элементов учитывают положения, указанные в Б.14 — Б.18.

Б.14 Наиболее информативной функцией, по виду которой можно судить о работоспособности оборудования, для невосстанавливаемых объектов является функция интенсивности отказов $\lambda(t)$, для восстанавливаемых — параметр потока отказов $\omega(t)$.

Б.15 Когда приведена достаточная статистика отказов, интенсивность отказов $\lambda(t)$ можно определить как отношение количества отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, продолжающих исправно работать в данный интервал времени по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{Б.31}$$

где $\Delta n(\Delta t)$ — количество отказов объекта за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

$N(t) = (N_{i-1} + N_i)/2$, где N_{i-1} — количество исправно работающих объектов в начале интервала времени Δt;

N_i — количество исправно работающих объектов в конце интервала времени Δt.

Б.16 Доверительные границы для функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ рассчитывают по формулам:

$$\lambda(t)_{\text{н}} = \frac{\chi^2(1-\alpha_1, 2m)}{2NT}; \tag{Б.32}$$

$$\lambda(t)_{\text{в}} = \frac{\chi^2(\alpha_2, 2m+2)}{2NT}, \tag{Б.33}$$

где индекс «н» означает нижнее, а индекс «в» — верхнее значение доверительного интервала;

α_1 — вероятность события $\lambda \geq \lambda_{\text{н}}$;

α_2 — вероятность события $\lambda \leq \lambda_{\text{в}}$;

$\chi^2(k, m)$ — квантиль χ^2 распределения с параметром k и числом степеней свободы m.

Для построения доверительных границ рекомендуется использовать значения уровней значимости $\alpha_1 = \alpha_2 = 0{,}025$.

Б.17 Если статистических данных об отказах конкретного оборудования недостаточно, для определения интенсивности отказов приходится применять другие методы оценивания интенсивности отказов, которые позволяют использовать дополнительную априорную информацию об отказах, предположения о виде функции интенсивности [$\lambda(t)$ – возрастающая функция времени] и т. д.

Б.18 Для восстанавливаемых объектов рассчитывают параметр потока отказов элемента $\omega(t)$ по формуле

$$\omega(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{Б.34}$$

где $\Delta n(\Delta t)$ — количество отказов объекта за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

$N(t) = (N_{i-1} + N_i)/2$, где N_{i-1} — количество исправно работающих объектов в начале интервала времени Δt;

N_i — количество исправно работающих объектов в конце интервала времени Δt.

Б.19 В методике оценки остаточной наработки элементов учтены указанные в Б.19.1, Б.19.2.

Б.19.1 При использовании параметрических методов оценивания остаточного ресурса предполагается, что известны законы распределения исходных параметров модели (наработки до отказа, времени восстановления): экспоненциальный, гамма, усеченный нормальный, Вейбулла и др. При этом конкретный вид распределения определяют по статистическим данным о наработках до отказа, полученных в результате эксплуатации аналогичных объектов.

В случае параметрического закона распределения наработки до отказа остаточную наработку от времени эксплуатации объекта $T(t)$ можно рассчитывать по формуле

$$T(t) = \frac{\int_t^{\infty} P(\tau)\, d\tau}{P(t)}, \tag{Б.35}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы за время t.

Остаточная наработка $T(t)$ представляет собой величину, пропорциональную условной вероятности безотказной работы на промежутке времени от $[t; \infty)$, отнесенную к вероятности безотказной работы за время t, где t — время, отработанное системой к моменту наблюдения. Однако если рассматривать использование зависимости [см. формулу (Б.34)] для оценки остаточного ресурса элементов блоков АС, то исследователю придется столкнуться с рядом трудностей, прежде всего связанных с получением входных данных для применения метода.

Б.19.2 В случае цензурированных интервалом данных об отказах оборудования целесообразно использовать непараметрические методы оценивания, приведенные в перечислениях а) — г).

а) Например, в состав системы входит m однотипных элементов, а также доступна информация об их отказах, сгруппированная по годам эксплуатации $\vec{\nu} = (\nu_1, \nu_2, \ldots, \nu_n)$ за период времени $[0; \tau]$.

б) Для оценивания плотности распределения наработки до отказа используют метод ядерного оценивания.

в) Рассчитывают функцию распределения $F(t)$ наработки до отказа, интегрируя плотность распределения, по формуле

$$F(t) = \int_0^t f(t)\,dt. \tag{Б.36}$$

Далее можно рассчитать ВБР $P(t)$ по формуле

$$P(t) = 1 - F(t). \tag{Б.37}$$

г) Так как непараметрическая оценка ВБР построена только на интервале наблюдений, а для оценки остаточного ресурса необходимо определить вероятностные показатели наработки на интервале [t; ∞), для проведения расчетов можно воспользоваться свойствами интегралов и определением средней наработки до отказа и оценки остаточного ресурса $T(t)$ по формуле

$$T(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \left(T_{\text{ср}} - \int_0^t P(\tau)\,d\tau \right). \tag{Б.38}$$

Среднюю наработку на отказ $T_{\text{ср}}$ вычисляют по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{t}{\int_0^t \omega(\tau)\,d\tau}. \tag{Б.39}$$

Б.20 Наряду с указанными методиками применяют методику оценки других показателей, положения которой приведены в перечислениях а) — в).

а) Среднее прямое остаточное время — это математическое ожидание оставшегося времени работы системы до очередного отказа начиная с момента времени t работоспособности системы.

Среднее обратное остаточное время — это математическое ожидание времени работы системы от начала эксплуатации или ее возобновления после последнего восстановления до момента времени t работоспособности системы.

Процессы $\{R_t,\ t \geq 0\}$ и $\{V_t,\ t \geq 0\}$ называются соответственно процессами обратного и прямого остаточного времени.

Обратное остаточное время, или возраст R_t, и прямое остаточное время V_t, или остаточную наработку работающей системы к моменту времени t (см. рисунок Б.2), рассчитывают по формулам:

$$R_t = t - \tau_{N(t)}; \tag{Б.40}$$

$$V_t = \tau_{N(t)+1} - t; \tag{Б.41}$$

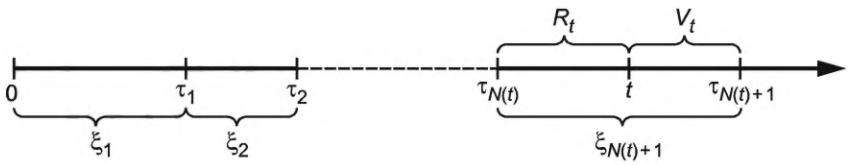

Рисунок Б.2 — Прямое и обратное остаточное время

При этом $\{R_t\}$ и $\{V_t\}$ являются однородными марковскими процессами с множеством состояний [0; ∞).

б) Функции распределения обратного $R_t(x)$ и прямого остаточного времени $V_t(x)$ определяют следующим образом:

$$R_t(x) = P(R_t < x) = \begin{cases} \int_{t-x}^{t} \bar{F}(t-u)\,d\Omega_1(u), & x < t, \\ 1, & x \geq t, \end{cases} \tag{Б.42}$$

$$V_t(x) = P(V_t < x) = F_1(t+x) - \int_0^t \bar{F}(t+x-u)\,d\Omega_1(u). \tag{Б.43}$$

Плотности распределения обратного $r_t(x)$ и прямого остаточного времени $v_t(x)$ определяют по формулам:

$$r_t(x) = \begin{cases} \bar{F}(x)\,\omega_1(t-x), & x < t, \\ 0, & x \geq t, \end{cases} \tag{Б.44}$$

$$v_t(x) = f_1(t+x) - \int_0^t f(t+x-u)\omega_1(u)\,du. \qquad (Б.45)$$

в) Средний ресурс представляет собой среднюю наработку объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после предупредительного ремонта до наступления предельного состояния.

В случае однородного потока выражения для определения среднего прямого $V(t)$ и обратного остаточного времени $R(t)$ представляют собой уравнения Вольтера 2-го рода:

$$V(t) = \int_t^\infty P(x)\,dx + \int_0^t V(\tau) f_\xi(t-\tau)\,d\tau; \qquad (Б.46)$$

$$R(t) = tP(t) + \int_0^t R(\tau) f_\xi(t-\tau)\,d\tau. \qquad (Б.47)$$

Средний остаточный ресурс $T(t)$ определяют по формуле

$$T(t) = V(t) + R(t). \qquad (Б.48)$$

Б.21 Методика расчета показателей надежности элементов в предположении неоднородности потока отказов содержит методы теории надежности, в основе которых лежит предположение о неоднородности потока отказов, включая:

- анализ характеристик надежности методом сгущающих отображений;
- методику расчета среднего прямого, обратного остаточного времени и среднего ресурса в предположении о неоднородности потока отказов.

Б.22 Построение модели неоднородного потока отказов выполняют с учетом положений перечислений а) и б).

а) Неоднородным потоком событий называют тот поток, у которого частоты появления событий неодинаково распределены и могут быть зависимы.

б) Рассматривают случайный процесс, образованный последовательностью случайных моментов времени наступления события $\mu_1, \mu_2, \ldots$. При этом $\xi_i = \mu_i - \mu_{i-1}$, $i = 1, 2, \ldots$, $\mu_0 = 0$ будет определять промежуток времени между двумя последовательными моментами времени μ_i и μ_{i-1}. Если $\xi_1, \xi_2, \ldots$ — независимые, одинаково распределенные случайные величины, т. е. для любого $n \geq 1$

$$P(\xi_1 < x_1; \xi_2 < x_2; \ldots; \xi_n < x_n) = \prod_{i=1}^n P(\xi_i < x_i),$$

и для любого $i = 1, 2, \ldots, n$ функции распределения ξ_i

$$F_i(x) = P(\xi_i < x) = F(x),$$

то случайный процесс называют однородным (во времени) потоком событий.

Если следовать строгому математическому определению, то речь идет о рекуррентном потоке событий, однако предпочтение отдается понятию «однородный поток». Если процесс однороден во времени, то его статистические свойства не меняются с течением времени. Если процесс неоднороден, то его свойства будут зависеть от места расположения периода наблюдения на временной оси. Чаще всего для потоков в этом случае применяют такие понятия, как «стационарный» и «нестационарный» соответственно. Тем не менее используют в отношении потока понятие «однородность» (во времени), считая его более близким по смыслу. К примеру, для неоднородного потока точки моментов отказов будут либо разрежаться на временной оси (как правило, в начале периода эксплуатации), либо сгущаться (на завершающем этапе функционирования). На этапе нормальной эксплуатации в потоке отказов, скорее всего, будут отсутствовать места сгущений и разрежений, и он будет однороден. В общем случае характер неоднородности потоков событий может быть произвольным. Называя поток событий неоднородным, предполагают, что частоты появления событий неодинаково распределены и могут быть зависимыми.

Построим новую математическую модель, учитывающую возможные «искажения» потоков событий и позволяющую определять показатели надежности систем (элементов) в изменяющихся с течением времени вероятностных характеристиках процесса. В этой модели неоднородный поток является отображением однородного потока событий с помощью монотонного преобразования $\Psi(x)$, называемого НФП.

Рассмотрим поток событий, в котором под событием подразумевают либо отказ определенного элемента (индекс 0), либо его восстановление. Время работы до отказа ξ^0 и время восстановления ξ^1 — случайные величины. Пусть ξ_i^0 независимы и ξ_i^1 независимы (см. рисунок Б.3).

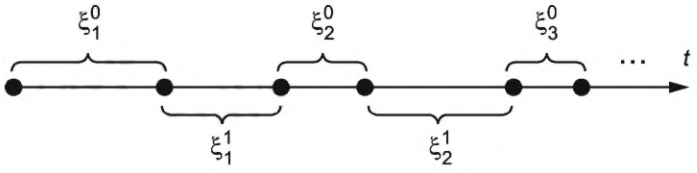

Рисунок Б.3 — Общий поток отказов — восстановлений

Б.23 Построение модели нормализующей функции потока выполняют с учетом положений перечислений а) — д).

а) Основной идеей модели нормализующей функции потока является построение непрерывного строго монотонно возрастающего отображения Ψ абстрактного рекуррентного потока событий в реальный поток событий. Абстрактный поток будет иметь размерность функции $\Psi^{-1}(t)$, где t — время. Предполагают вначале, что восстановление системы происходит мгновенно. Пусть μ_k — момент наступления k-го события абстрактного потока, т. е.

$$\mu_k = \sum_{i=1}^{k} \xi_i, \tag{Б.49}$$

где ξ_i — интервал между двумя последовательными событиями потока (отказами). В случае однородного (рекуррентного) потока отказов все ξ_i — независимые, одинаково распределенные случайные величины. Моменты реального потока событий определяют по формуле

$$\tilde{\mu}_n = \Psi\left(\sum_{i=1}^{n} \xi_i\right) = \Psi(\mu_n);\ n = 1, 2, ...;\ \mu_0 = 0, \tag{Б.50}$$

где Ψ — некоторая непрерывно-дифференцируемая, строго монотонно возрастающая на $[0; \infty)$ функция, причем $\Psi(0) = 0$.

Тогда i-ю наработку между отказами определяют по формуле

$$\zeta_i = \tilde{\mu}_i - \tilde{\mu}_{i-1} = \Psi(\mu_i) - \Psi(\mu_{i-1}). \tag{Б.51}$$

Понятно, что в этом случае $\zeta_1, \zeta_2, ...$ будут зависимыми, если только $\Psi(x) \neq \text{const} \cdot x$. Величину ζ_i называют продолжительностью цикла работы системы. Под циклом работоспособности понимают временной промежуток между двумя последовательными отказами системы.

На рисунке Б.4 изображено преобразование однородного потока событий в произвольный поток с помощью функции Ψ. События однородного и неоднородного потока событий отображены на оси абсцисс и оси ординат соответственно.

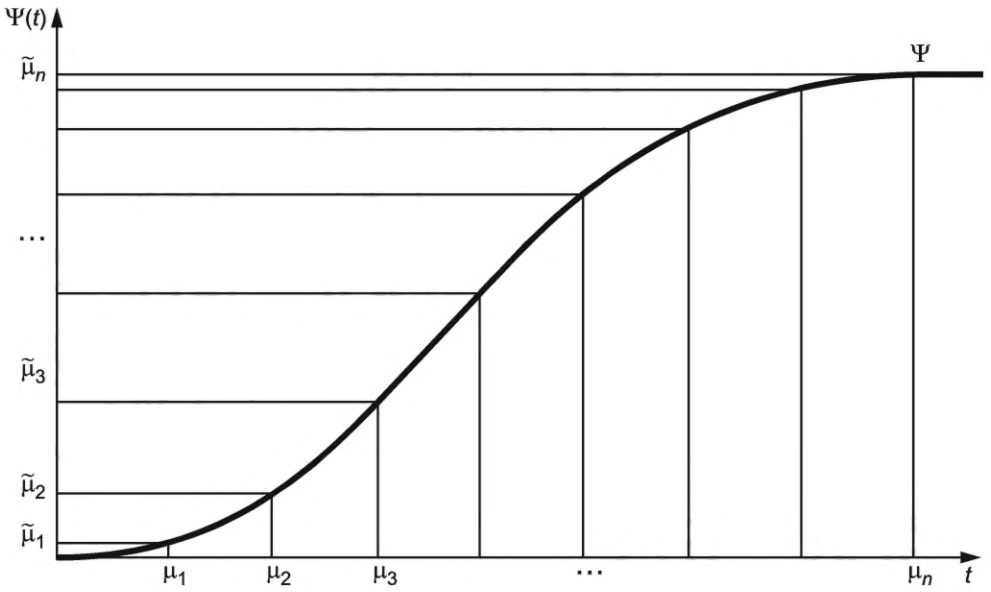

Рисунок Б.4 — Модель нормализующей функции потока

б) Ведущую функцию потока отказов $\Omega(t)$ определяют выражением

$$\Omega(t) = \nu(\Psi^{-1}(t)), \tag{Б.52}$$

где $\nu(t) = F_\xi(t) + \int_0^t \nu(t-\tau) f_\xi(\tau) d\tau$ — функция восстановления.

Асимптотически

$$\lim_{t\to\infty} \frac{\Omega(t)}{\Psi^{-1}(t)} = \frac{1}{E\xi},\ \ \Omega(t) = \frac{\Psi^{-1}(t)}{E\xi}. \tag{Б.53}$$

в) Параметр потока отказов $\omega(t)$ определяют по формуле

$$\omega(t) = [\Psi^{-1}(t)]\upsilon(\Psi^{-1}(t)), \quad (Б.54)$$

где $\upsilon(t) = f_\xi(t) + \int_0^t \upsilon(t-\tau) f_\xi(\tau) d\tau.$

Асимптотически

$$\lim_{t\to\infty} \frac{\omega(t)}{[\Psi^{-1}(t)]'} = \frac{1}{E\xi}, \ \omega(t) = \frac{[\Psi^{-1}(t)]'}{E\xi}. \quad (Б.55)$$

г) Закон распределения для i-го цикла работоспособности ζ_i определяют как

$$F_{\zeta_i}(t) = \int_0^\infty f_{\mu_{i-1}}(u) F_\xi\left(\Psi^{-1}(t + \Psi(u)) - u\right) du, \quad (Б.56)$$

где $f_{\mu_{i-1}}(t) = \int_0^t f_{\mu_{i-2}}(t-u) f_\xi(u) du.$

д) Для определения РХ надежности вводят следующие обозначения: $N(t)$ — количество событий потока, произошедших к моменту времени t; $\tilde{\mu}_k$ — k-й момент времени наступления события неоднородного потока; R_t — обратное остаточное время; V_t — прямое остаточное время. Продолжительность цикла работы системы Z_t на момент времени t определяют по формуле

$$Z_t = R_t + V_t. \quad (Б.57)$$

Функцию распределения $F_{R_t(x)}$ обратного остаточного времени R_t определяют по формуле

$$F_{R_t}(x) = \begin{cases} \int_{\Psi^{-1}(t-x)}^{\Psi^{-1}(t)} \upsilon(u) \bar{F}_\xi\left(\Psi^{-1}(t) - u\right) du, \ x < t \\ 1, \ x \geq t. \end{cases} \quad (Б.58)$$

Функцию распределения $F_{V_t(x)}$ прямого остаточного времени V_t определяют по формуле

$$F_{V_t}(x) = F_\xi\left(\Psi^{-1}(t+x)\right) - \int_0^{\Psi^{-1}(t)} \upsilon(u) \bar{F}_\xi\left(\Psi^{-1}(t+x) - u\right) du. \quad (Б.59)$$

Среднее обратное остаточное время ER_t определяют по формуле

$$ER_t = t\bar{F}_\xi\left(\Psi^{-1}(t)\right) + \int_0^\infty g_R(x;t) f_\xi(x) dx, \quad (Б.60)$$

где $g_R(x;t) = \int_{\left(\Psi^{-1}(t)-x\right)\vee 0}^{\Psi^{-1}(t)} \left(t - \Psi(\tau)\right) \upsilon(\tau) d\tau.$

Среднее прямое остаточное время EV_t определяют по формуле

$$EV_t = \int_{\Psi^{-1}(t)}^\infty (\Psi(x) - t) f_\xi(x) dx + \int_0^\infty g_V(x;t) f_\xi(x) dx, \quad (Б.61)$$

где $g_V(x;t) = \int_{\left(\Psi^{-1}(t)-x\right)\vee 0}^{\Psi^{-1}(t)} \left(\Psi(\tau + x) - t\right) \upsilon(\tau) d\tau.$

Б.24 Методика оценивания НФП и выпрямления потока отказов основана на применении асимптотической формулы. Визуально подбирают подходящую параметрическую модель поведения ведущей функции потока. Затем проводят оценку параметров методом наименьших квадратов. Для однородного потока событий ВФП асимптотически приближается прямой линией. Для неоднородного потока событий зависимость может быть произвольной. Так, анализируя элементы «неоднородной» группы, наиболее подходящей, предлагают параметрическую модель, пропорциональную функции распределения Вейбулла—Гнеденко $\Psi^{-1}(t)$, определяемую по формуле

$$\Psi^{-1}(t) = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot t^\gamma}\right). \quad (Б.62)$$

После оценивания параметров регрессии происходит выпрямление потока. Суть данного этапа сводят к преобразованию неоднородного потока отказов в абстрактный однородный поток отказов

$$\mu_i = \Psi^{-1}(\tilde{\mu}_i),\ i = 1, 2, ..., T,$$

где μ_i — абстрактное время;

$\tilde{\mu}_i$ — реальное время, по которому имеются данные об отказах.

Таким образом, в абстрактный момент времени μ_i произойдет количество отказов, соответствующих моменту времени $\tilde{\mu}_i = 1, 2, ..., T$ в данном случае.

На этом этап оценивания функции неоднородности и выпрямления потока отказов завершается.

Библиография

[1]	Федеральные нормы и правила НП-001-15	Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций
[2]	Федеральные нормы и правила НП-096-15	Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения
[3]	Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-138-17	Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик КИПиА атомных станций
[4]	Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-136-17	Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик электротехнического оборудования атомных станций
[5]	Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-017-22	Рекомендации по выбору референтных единиц типовых элементов электротехнического оборудования атомных станций для осуществления мероприятий по управлению ресурсом
[6]	Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-020-22	Рекомендации по выбору референтных единиц типовых элементов систем контроля и управления атомных станций для осуществления мероприятий по управлению ресурсом
[7]	Федеральные нормы и правила НП-017-18	Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции
[8]	Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ 024-19	Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции
[9]	Руководство по безопасности МАГАТЭ SSG-48	Управление старением атомных электростанций

УДК 621.039:006.354 ОКС 27.120

Ключевые слова: системы контроля и управления, атомные станции, ресурсные характеристики

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 23.12.2022. Подписано в печать 10.01.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,34.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru