

δS_U – на 25,9 % [6]. Это позволяет улучшить качество случайных числовых последовательностей в программно-аппаратных комплексах защиты информации.

Предложенная технология апробирована и внедрена в производство ШД. Для оценки качества ШД были разработаны и реализованы измерительные схемы и алгоритмы цифровой обработки шумовых сигналов. Это подтвердило состоятельность разработанных технологических методов как для дискретных ШД, так и для аналого-цифровых шумовых модулей [7].

Список использованных источников

1. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. – Л., 1980.
2. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума / В. В. Буслюк, И. Ю. Нерода, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский, Р. А. Лановский // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 95–99.
3. Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes / V. V. Buslyuk, V. B. Odzhayev, A. K. Panfilenko, A. N. Petlitsky, V. S. Prosolovich, V. A. Filipyenyay, Yu. N. Yankovsky // Russian Microelectronics. – 2020. – Vol. 49, № 4. – P. 295–301.
4. Буслюк, В. В. Технология кремниевых диодов генераторов шума / В. В. Буслюк // Электроника НТБ. – 2021. – № 4. – С. 136–138.
5. Формирование стабильной дефектной структуры в кремниевых диодах генераторов шума / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов, В. В. Буслюк // Весці НАН Беларусі. Сер. Фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 145–153.
6. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов-генераторов шума / В. В. Буслюк, В. А. Емельянов, В. В. Баранов, С. С. Дереченник, В. С. Просолович // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 32–41.
7. Особенности формирования и факторы качества случайных сигналов специализированного шумового модуля / В. В. Буслюк, С. С. Дереченник, И. В. Лешкевич, В. С. Разумейчик, И. А. Пешко // Электроника инфо. – 2015. – № 6 (120). – С. 46–49.

УДК 519.6

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДОМ

С.Ф. Лебедь

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Reliability theory establishes the patterns of failures and restoration of the system and its elements, considers the influence of external and internal influences on the processes in systems, creates the basis for calculating reliability and predicting failures, seeks ways to improve reliability in the design and manufacture of systems and elements, as well as ways to maintain reliability during operation.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования технических систем (ТС) в значительной степени зависит от надежности как отдельных устройств, входящих в системы, так и элементов, обеспечивающих взаимодействие между этими устройствами.

Следует отметить, что, несмотря на значительные усилия в области повышения надежности ТС, уровень их надежности остается недостаточно высоким и не удовлетворяет все возрастающим требованиям производства. Недостаточ-

ная надежность элементов и устройств не только приводит к значительным простоям систем, но и к удорожанию стоимости их эксплуатации. Кроме того, отказы технических устройств могут привести к аварийным ситуациям (например, к отказу работы склада), последствия которых трудно представить.

Теория надёжности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности при конструировании и изготовлении систем и элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации [1].

Базовыми понятиями в теории надежности являются понятия *элемента, системы, компонента*.

Элемент, объект: любая часть, компонент, устройство, подсистема, функциональный модуль, оборудование или система, которая может быть рассмотрена как самостоятельная единица. Под элементом понимают часть системы, которая имеет самостоятельную характеристику надежности, используемую при расчетах надежности, и выполняет определенную частную функцию в интересах системы.

Примечание: элемент может представлять собой аппаратное средство, программное обеспечение или то, и другое. Он может, в отдельных случаях, включать людей.

Система: совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.

С точки зрения надежности система должна иметь: определенную цель, выраженную в виде требований к функционированию системы; заданные условия эксплуатации; иерархическую структуру.

Компонент: элемент, рассматриваемый на самом низком иерархическом уровне при анализе системы.

Понятие «система» является в определенной степени условным. В зависимости от объектов исследования, от тех задач, которые поставлены перед специалистами, в понятие «система» могут попадать различные совокупности объектов. Например, в качестве систем могут рассматриваться система управления робота, мехатронный модуль, двигатель, редуктор, микросхема, резистор и т. д. В нашем случае под системой понимаем автоматизированный склад хранения сырья и готовой продукции.

Элементы, используемые в системах, можно разделить на первичные элементы и элементы, состоящие из первичных элементов.

Как правило, либо путем анализа физических процессов в элементах, либо путем проведения испытаний, либо из опыта эксплуатации определяют характеристики надежности первичных элементов. Для остальных элементов, в том числе и для систем, характеристики надежности определяются с учетом характеристик надежности первичных элементов различными расчетными методами.

Каждая группа элементов имеет свои особенности относительно надежности, что приводит к необходимости учитывать эти особенности при проведении расчетов показателей надежности.

Только в двух состояниях, исправном и работоспособном, система может выполнять свои функции. Поэтому, с позиций теории надежности все элементы и системы могут находиться в двух состояниях: работоспособном и неработо-

способном. Понятие работоспособности является одним из основных понятий теории надежности. Переход из одного состояния в другое происходит в результате событий, называемых отказом и повреждением. **Повреждение** – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния. **Отказ** – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы.

1. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое, в зависимости от назначения объекта и условий его применения, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. Например, для неремонтируемых объектов основным свойством является **безотказность**.

Показатель надежности (Reliability measure) – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Поскольку отказы и сбои элементов являются случайными событиями, то теория вероятностей и математическая статистика являются основным аппаратом, используемым при исследовании надежности, а сами характеристики надежности должны выбираться из числа показателей, принятых в теории вероятностей.

Все показатели надежности могут определяться аналитически по формулам, полученным на основе теории вероятности, и по результатам испытаний или наблюдений, т. е. в виде статистических оценок показателей надежности, полученным на основе методов математической статистики.

Рассмотрим показатели надежности, позволяющие оценить безотказность элементов или систем. Основными показателями безотказности являются: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ.

2. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Вероятность безотказной работы (Reliability function, survival function) – вероятность того, что в пределах заданной наработки на отказ (в заданном интервале времени t) отказ объекта не возникнет.

Эта характеристика связана с функцией распределения времени безотказной работы следующим соотношением:

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

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта;

$Q(t)$ – функция распределения времени безотказной работы, которая представляет собой вероятность появления отказа в течение времени t .

Очевидно, что $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Следует отметить, что функция $P(t)$ является монотонно убывающей функцией (надежность в процессе эксплуатации может только уменьшаться), а функция $Q(t)$ – монотонно возрастающей функцией.

Интенсивность отказов (Failure rate) – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Иначе говоря, это условная плотность распределения времени безотказной работы для момента времени t при условии, что до момента времени t отказ объекта не произошел.

Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа системы или элемента за интервал $(t, t+dt)$, взятых из группы элементов или систем, которые остались работоспособными к моменту времени t .

Связь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов определяется следующим равенством:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}.$$

Эта зависимость, устанавливающая связь между вероятностью безотказной работы объекта и его интенсивностью отказов, в общем виде может рассматриваться как основной закон надёжности.

Например, если $\lambda(t) = \lambda = const$, то

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

Рассмотренный случай достаточно широко встречается на практике, а приведенное соотношение характеризует экспоненциальное распределение времени безотказной работы.

Средняя наработка на отказ (наработка до отказа) T представляет собой математическое ожидание наработки до первого отказа.

Таким образом, проведя элементарные расчеты, получаем, что

$$T = \frac{1}{\lambda}.$$

Для некоторых компонентов производители выкладывают данные по надежности оборудования прямо на своих сайтах, но чаще всего там вы найдете не интенсивность отказов, а наработку на отказ, известную за рубежом как MTBF - Mean time between failures. λ задается в размерности 10 в минус 6 степени отказов в час (отказов на миллион часов работы).

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ

Вероятность безотказного выполнения операций при последовательном соединении элементов определяется по формуле

$$P(t) = e^{-t \cdot \sum \lambda_i n_i},$$

где $P(t)$ – вероятность безотказного выполнения операций;

λ_i – интенсивность отказов i -го элемента;

n_i – количество однотипных элементов;

t – длительность операций, ч.

Вероятность безотказного выполнения операций при параллельном соединении элементов определяется по формуле

$$P(t) = 1 - [1 - P(t_1)] \cdot \dots \cdot [1 - P(t_n)],$$

где $P(t_i), i = 1, \dots, n$ – вероятность безотказного выполнения операции отдельной цепочкой или элементом, входящими в параллельную цепь, t – длительность операций, ч.

$$\lambda = \sum \frac{n_i}{T_i},$$

где n_i – количество однотипных компонент; T_i – наработка до отказа i -го компонента.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов вероятности выхода из строя приняты следующие гипотезы на основе опроса экспертов со стороны заказчика.

Рассматриваемая система является невозстановливаемой, т.к. восстановление работоспособности любого элемента невозможно ввиду отсутствия возможности заменить компоненты и внести изменения в исходный код системы управления.

1. Выход из строя одного из компонентов системы приводит к существенным потерям для заказчика, поэтому для расчета вероятности выхода из строя всего склада рассматривается худший случай – последовательное соединение всех элементов.

2. В оценках и расчетах не применяются данные выхода из строя механических узлов и компонентов, так как они являются восстанавливаемыми.

Данные о надежности работы элементов и компонент системы взяты из открытых источников: порталов производителей, каталогов продукции.

В результате анализа представленной топологии сети, было выделено 79 элементов системы 11 типов (см. таблицу 1). Для каждого типа оборудования был произведен расчет среднего времени наработки на отказ на основе данных из каталогов производителя.

Таблица 1 – Структура системы

№ п/п	Название элемента	Количество, шт.	T (MTBF), ч.
1	Шкаф управления 1	1	составной элемент
2	Шкаф управления 2	6	составной элемент
3	Шкаф управления 3	6	составной элемент
4	Шкаф управления 4	6	50 000
5	Шкаф управления 5	6	составной элемент
6	Оптическая система	28	100 000
7	Шкаф управления 6	6	50 000
8	Сканер штрихкода	2	963 600
9	Шкаф управления 7	2	составной элемент
10	Серверопреобразователь	2	595 680

Элемент состоит из компонентов. Считаем, что компоненты элемента включены в цепь последовательно, т.к. отказ хотя бы одного из компонент приводит к отказу элемента. Интенсивность отказа элемента вычисляется по формуле:

$$\lambda = \sum \frac{n_i}{T_i},$$

где n_i – количество однотипных компонент;
 T_i – наработка до отказа i - го компонента.

Для наглядности приведем расчет интенсивности отказа Шкафа управления 1:

№ п/п	Название компонента	Количество, шт.	T (MTBF), ч.
1	Компонет 1	1	481 800
2	Компонет 2	1	525 600
3	Компонет 3	1	1 492 537
4	Модуль интерфейса	2	490 560
Интенсивность отказа (λ) Шкафа управления 1			$8,72 \cdot 10^{-6}$

Аналогично рассчитываем интенсивности отказов всех составных элементов системы.

5. ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ СИСТЕМЫ

Для расчета отказа работы склада необходимо найти вероятность безотказной работы склада, т.е., что на протяжении времени t все 79 элементов склада будут работать безотказно. Для этого найдем интенсивности отказа λ всех элементов

№ п/п	Название элемента	Кол-во, шт.	T (MTBF), ч.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/ч.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/ч. без учета панели
1	Шкаф управления 1	1	-	8,73	8,73
2	Шкаф управления 2	6	-	26,82	6,82
3	Шкаф управления 3	6	-	26,75	6,75
4	Шкаф управления 4	6	50 000	20,00	0
5	Шкаф управления 5	6	-	5,40	5,40
6	Оптическая система	28	100 000	10,00	10,00
7	Шкаф управления 6	6	50 000	20,00	0
8	Сканер штрихкода	2	963 600	1,04	1,04
9	Шкаф управления 7	2	-	3,40	3,40
10	Серверопреобразователь	2	595 680	1,68	1,68
11	Датчик расстояния	14	100 000	10,00	10,00

В ходе вычисления интенсивности отказа системы было выявлено три элемента: панель управления, датчик расстояния и оптическая система передачи данных, наработка на отказ которых в разы меньше, чем у других элементов и, соответственно, надежность которых в 10 раз меньше остальных элементов. В связи с этим, расчет надежности проведен с учетом работоспособности панели и без учета работоспособности панели.

Вычисления, полученные в ходе исследования, показали, что предположения в постановке задачи слишком жесткие, а именно последовательное соединение всех элементов. Было принято решение распараллелить процессы согласно производственным процессам.

Был произведен расчет интенсивности отказа системы с несколькими параллельными элементами. Расчет одного из таких элементов приведен ниже.

Рассчитаем вероятность отказа работы одного из объектов системы, состоящего из 10 элементов, при условии, что отказ любого элемента приводит к отказу работы этого объекта. Для этого найдем интенсивности отказа λ всех элементов

№ п/п	Название элемента	Кол-во, шт.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/ч.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/ч. без учета панели
1	Шкаф управления 2	1	26,82	6,82
2	Шкаф управления 3	1	26,75	6,75
3	Шкаф управления 4	1	20,00	0
4	Шкаф управления 5	1	5,40	5,40
5	Оптическая система передачи данных	4	10,00	10,00
6	Датчик расстояния	2	10,00	10,00
Интенсивность отказа объекта			0,00013897	0,00007897

Вероятность выхода из строя объекта по годам с шагом в 6 месяцев приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Вероятность выхода из строя объекта

	на 31.12.2022 t=19710 ч.	на 30.06.2023 t=24090 ч.	на 31.12.2023 t=28470 ч.	на 30.06.2024 t=32850 ч.	на 31.12.2024 t=37230 ч.
С учетом всех элементов					
$P(t) = e^{-t \cdot \sum \lambda_i}$	0,064628	0,035162	0,019130	0,010408	0,005662
$Q(t) = 1 - P(t)$	0,935371	0,964837	0,980869	0,989591	0,994337
Без учета панели управления					
$P(t) = e^{-t \cdot \sum \lambda_i}$	0,210873	0,149212	0,105581	0,074708	0,052862
$Q(t) = 1 - P(t)$	0,78912	0,85078	0,89441	0,92529	0,947137

В результате аналогичных приведенных расчетов были выявлены ненадежные элементы системы и рассчитаны вероятности отказа работы объектов системы.

Список использованных источников

1. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, Л.О., 1984. – 208 с.
2. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.001–95. Межгосударственный стандарт. Система стандартов «Надежность в технике». Основные положения.