ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Жураева Нафиса Иноятовна
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий
E-mail: juraeva.0878@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются методы аналитической оценки надёжности волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ) с учётом особенностей восстановления и резервирования элементов. Показано, что использование преобразования Лапласа–Стилтьеса позволяет формализовать вероятность безотказной работы системы при наличии восстановления элементов. Особое внимание уделено моделированию деградации элементов и асимптотическому анализу надёжности с учётом различий в законах распределения отказов аппаратных и программных элементов. Представлен графический анализ, демонстрирующий эффективность предложенного подхода в сравнении с системами, не имеющими резервирования.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи информации, преобразование Лапласа–Стилтьеса, законы распределения отказов.

Abstract. The article considers methods of analytical assessment of reliability of fiber-optic data transmission systems taking into account features of restoration and redundancy of elements. It is shown that the use of the Laplace–Stieltjes transform allows one to formalize the probability of failure-free operation of the system in the presence of restoration of elements. Particular attention paid to modeling the degradation of elements and asymptotic analysis of reliability taking into account differences in the laws of failure distribution of hardware and software elements. Graphical analysis presented demonstrating the effectiveness of the proposed approach in comparison with systems that do not have redundancy.

Keywords: fiber-optic data transmission systems, Laplace–Stieltjes transform, laws of failure distribution.

Annotatsiya. Maqolada tolali-optik ma’lumot uzatish tizimlari ishonchliligini analitik baholash usullari, xususan, elementlarning tiklanish va zaxiralanish xususiyatlari hisobga olingan holda ko‘rib chiqiladi. Laplas–Stiltjes almashtirishidan foydalanish orqali qayta tiklanishi mavjud bo‘lgan elementlar tizimining rad etmasdan ishlash ehtimolini ifodalash mumkinligi ko‘rsatib berilgan. Elementlarning degradatsiyasini modellashtirishga va apparat va dasturiy elementlarning nosozliklarni taqsimlash qonuniyatlaridagi farqlarni hisobga olgan holda asimptotik ishonchlilik tahliliga alohida e’tibor beriladi. Taklif etilgan

ISSN 3030-3907

yondashuvning samaradorligi zaxiralanmagan tizimlar bilan taqqoslanib, grafik tahlillar orqali ko‘rsatigan.

Kalit so‘zlar: tolali-optik ma’lumotlar uzatish tizimlari, Laplas–Stiltjes almashtiishi, rad etishlar taqsimoti qonunlari.

Введение

Волоконно-оптические системы передачи информации (ВОСПИ) являются основным элементом телекоммуникационной инфраструктуры, обеспечивая высокоскоростную и надёжную передачу данных на большие расстояния. Высокие требования к отказоустойчивости таких систем обусловлены необходимостью обеспечения непрерывности информационного обмена.

Надёжность ВОСПИ определяется комплексом факторов, в частности характеристики аппаратных и программных компонентов, схемы резервирования, а также способность системы к восстановлению после отказов. В реальных условиях компоненты системы могут подчиняться различным законам распределения времени отказов и восстановления, что требует применения более универсальных и точных аналитических методов моделирования.

Одним из таких методов является преобразование Лапласа–Стилтьеса, позволяющее учитывать дискретные, непрерывные и смешанные функции распределения, а также проводить асимптотический анализ надёжности систем с восстановительными процессами. Преобразование Лапласа–Стиелтьеса применимо для проведения асимптотического анализа надёжности в ВОСПИ, где отказ одного элемента может зависеть от того, успеет ли восстановиться другой, и где требуется учитывать совместные вероятности состояний.

Метод исследования.

ВОСПИ представляет собой совокупность компонентов и устройств, предназначенных для преобразования, передачи и приёма оптических сигналов, задачей которой является обеспечение надежной и высокоскоростной передачи данных на дальние расстояния [1,2].(рис.1)

Для повышения точности оценки надёжности ВОСПИ с резервируемыми и восстанавливаемыми компонентами целесообразно рассматривать аналитические методы, позволяющие учитывать как восстановление элементов, так и эффект деградации при многократных отказах, в частности для элементов таких как волоконно-оптическая линия связи и усилитель. Один из таких методов предложен в работе [3], в которой предлагается аналитическая модель для системы с двумя компонентами и

ISSN 3030-3907

холодным резервом, в которой после каждого отказа система переходит в состояние восстановления. Особенностью модели является учёт процесса деградации, при котором с каждым последующим отказом среднее время восстановления увеличивается.

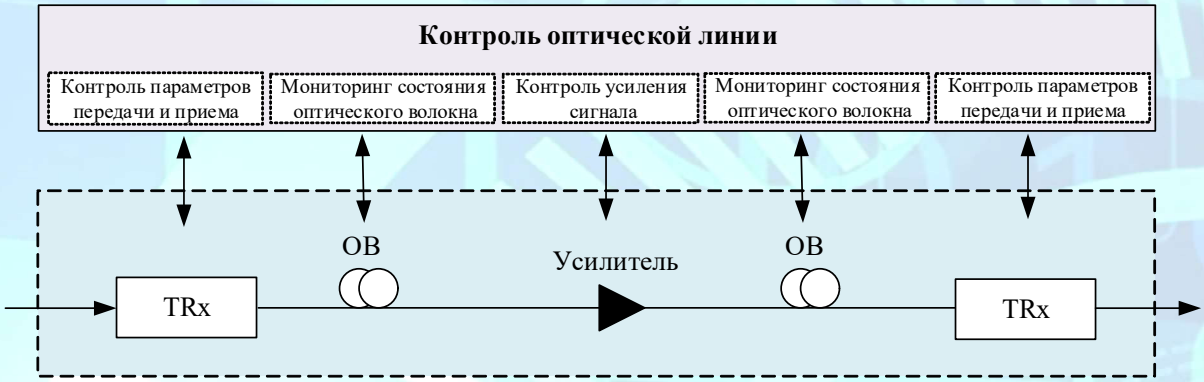


Рис 1. Схема волоконно- оптической системы передачи информации. TRx – Трансивер, ОВ – Оптическое волокно

ВОСПИ, как высоконадёжные системы, включают резервирование и возможность восстановления элементов. В таких случаях важна оценка вероятности того, что один элемент не выйдет из строя до восстановления другого. Эта вероятность выражается как [4]:

$$p = P\{\xi > \gamma\} = \int_0^\infty e^{-\lambda x} d\Phi(x) = \Phi^*(\lambda) \qquad (1)$$

где λ — интенсивность отказов работающего элемента, Φ(x) — функция распределения времени восстановления, $\Phi^*(\lambda)$ — преобразование Лапласа–Стиелтьеса от распределения времени восстановления, показывающее вероятность, что один элемент не выйдет из строя во время восстановления другого, ξ - время отказа резервного элемента системы, γ - время восстановления основного элемента, $P\{\xi > \gamma\}$ - вероятность того, что резервный элемент не откажет, пока не восстановится основной элемент.

Закономерности изменения надёжности во времени моделей надёжности аппаратных и программных элементов волоконно-оптических систем передачи информации эффективно описываются с использованием вероятностных распределений. Применение рассмотренных моделей позволяет количественно оценивать надёжность элементов ВОСПИ с учётом различий в характере отказов, в частности, постоянной интенсивности для электронных компонентов и возрастающей интенсивности отказов.

В последовательных системах все компоненты должны быть в исправном состоянии для функционирования системы, а её надёжность выражается как [5]:

ISSN 3030-3907

$$P_{сис}(t) = \prod_{i=1}^{m} P_i(t) \qquad (2)$$

где $P_i(t)$ - надежности компонентов.

Отказ компонентов аппаратного обеспечения ВОСПИ, таких как, трансивер, усилитель, лазер и программного обеспечения, например, системы управления, системы мониторинга могут подчиняться разным законам распределения. Общая надёжность системы на основе формулы (2) будет иметь следующий вид [6]:

$$P_{\text{сис}}(t) = P_{\text{тр}}(t) \cdot P_{\text{кс}}(t) \cdot P_{\text{ус}}(t) \cdot P_{\text{ПО}}(t). \qquad (3)$$

где $P_{\text{тр}}(t)$ - вероятность безотказной работы трансивера, $P_{\text{кс}}(t)$ - вероятность безотказной работы канала связи, $P_{\text{ус}}(t)$ - вероятность безотказной работы усилителя, $P_{\text{ПО}}(t)$ - вероятность безотказной работы программного обеспечения.

Произведение индивидуальных функций плотности вероятности для различных компонентов системы используется для построения совместной плотности вероятности при условии, что компоненты независимы друг от друга [7,8]. В ВОСПИ различные компоненты аппаратного и программного обеспечения рассматриваются как независимые. Это означает, что вероятность того, что определенные события произойдут одновременно в различных компонентах системы, равна произведению вероятностей этих событий в каждом отдельном компоненте.

Суммирование индивидуальных функций плотности вероятности для создания совместной плотности вероятности не является корректным подходом для независимых случайных величин так как сумма функций плотности вероятности не отражает свойства совместной вероятности независимых случайных величин. Суммирование приводит к неверному результату, который не соответствует законам вероятности.

Результаты и обсуждение.

Для оценки надёжности ВОСПИ важно учитывать не только вероятность отказов, но и возможность восстановления элементов системы, что важно для систем с постоянным резервированием, где отказ основного элемента компенсируется резервируемым. Надёжность системы в этом случае определяется с учётом вероятности безотказной работы резервного элемента до завершения восстановления основного элемента (или заменой если элемент невосстанавливаемый). В таких условиях применимо преобразование Лапласа–Стиелтьеса и формулу общей надёжности системы (3) можно написать в следующем виде [4,5]:

ISSN 3030-3907

$$P_{\text{сис}}(t) = \prod_{i \in A} P_i(t) \cdot \prod_{j \in R} \Phi_j^*(\lambda_j) \qquad (4)$$

где A – элементы без резервирования, R- элементы с резервированием, $\Phi_j^*(\lambda_j)$- преобразование Лапласа-Стилтьеса от функции распределения восстановления $\Phi_j(t)$, рассчитывающее вероятность того, что восстановление элемента j завершится до отказа другого элемента с интенсивность отказов λ_i

Предположим, что линия связи и усилитель резервированы, в этом случае формулу (2) с учётом (4) можно написать в следующем виде:

$$P_{\text{сис}}(t) = P_{\text{тр}}(t) \cdot \Phi_{\text{кс}}^*(\lambda_{\text{кс}}) \cdot \Phi_{\text{ус}}^*\left(\lambda_{\text{ус}}\right)(t) \cdot P_{\text{ПО}}(t). \qquad (5)$$

При частичном резервировании, когда некоторые элементы системы могут быть восстановлены до отказа резерва, вероятность безотказной работы системы представляется как произведение надёжностей невосстанавливаемых компонентов и вероятностей успешного восстановления, выраженных через преобразование Лапласа–Стилтьеса [4,9]:

$$\Phi^*(\lambda) = \int_0^\infty e^{-\lambda t} d\Phi(t) \qquad (6)$$

При вычислении этого интеграла (или приближении), можно использовать численное значение, либо аппроксимацию через:

В результате полная вероятность безотказной работы системы принимает вид:

$$P_{\text{сис}}(t) = P_{\text{тр}}(t) \cdot P_{\text{ПО}}(t) \cdot \left[\int_0^\infty e^{-\lambda_{\text{кс}} t} d\Phi_{\text{кс}}(t)\right] \cdot \left[\int_0^\infty e^{-\lambda_{\text{ус}} t} d\Phi_{\text{ус}}(t)\right] \qquad (7)$$

Особенность полученной формулы заключается в том, что она позволяет учитывать восстановление элементов системы. В отличие от моделей, предполагающих только невосстанавливаемые элементы, здесь применяется преобразование Лапласа–Стилтьеса, которое используется в качестве математической основы для вычисления вероятности того, что основной элемент будет успешно восстановлен до наступления отказа резервного элемента. Это делает модель более реалистичной и адаптированной к условиям эксплуатации системы с частичным резервированием.

Для наглядного сравнения эффективности данной модели проведён графический анализ, где сопоставлены результаты, полученные на основе

ISSN 3030-3907

базовой формулы (2) и выражения (7) с учётом восстановительных процессов (рис.2).

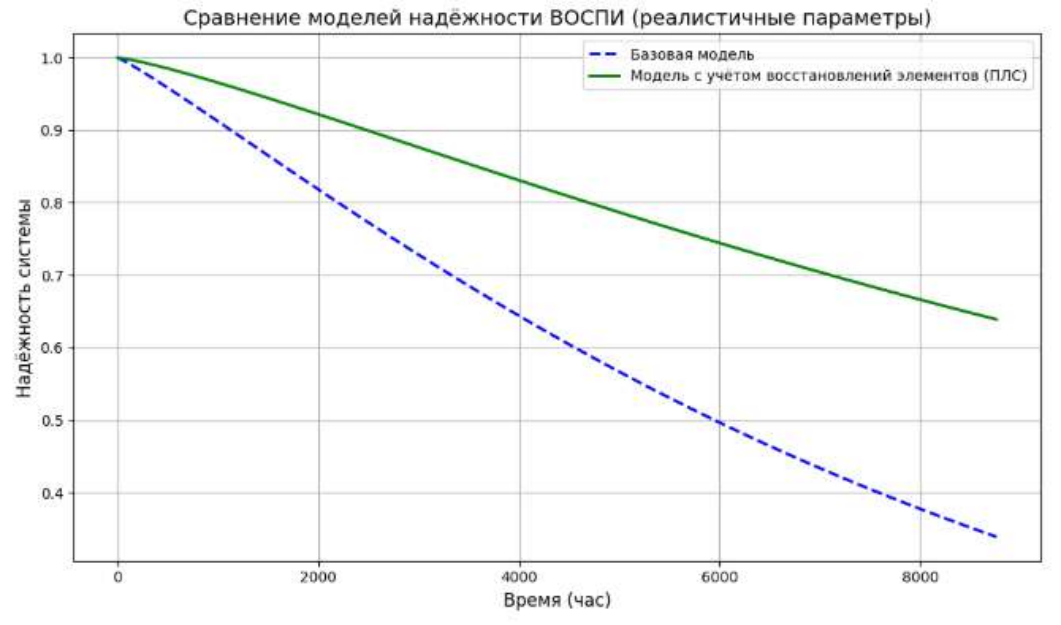


Рис. 2. Сравнение моделей надёжности ВОСПИ с учётом преобразования Лапласа–Стиелтьеса

График (рис.2) показывает, что внедрение восстановительных процессов приводит к значительному увеличению общей вероятности безотказной работы системы, особенно на более длительных временных интервалах. Это подтверждает эффективность предложенного математического подхода и демонстрирует его практическую применимость при проектировании высоконадёжных телекоммуникационных систем.

Таким образом, включение преобразования Лапласа–Стиелтьеса в модель надёжности позволяет не только учитывать возможность восстановления компонентов, но и адаптировать расчёты под реальные условия эксплуатации, что особенно важно для проектирования надёжных волоконно-оптических систем передачи информации.

Заключение.

Проведённый графический анализ подтвердил, что включение восстановительных процессов в расчёт существенно увеличивает надёжность системы по сравнению с моделями, не учитывающими такие процессы. Это открывает возможности для более точного проектирования систем, ориентированных на высокую отказоустойчивость, и разработки эффективных алгоритмов прогнозирования и минимизации отказов.

Разработанная модель позволяет более точно оценивать надёжность систем с частичным резервированием, в которых важна вероятность успешного завершения восстановления до отказа резервного элемента.

ISSN 3030-3907

Полученные результаты могут быть использованы в построении телекоммуникационных систем, а также как база для дальнейших исследований в области надёжности сложных технических систем с переменной интенсивностью отказов и восстановлений.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Rongqing Hui. Introduction to Fiber-Optic Communications, Academic Press, 2020,Pages 621-635, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.09993-5
2. Alan E. Willner. Optical Fiber Telecommunications VII. 2020 Elsevier Inc.1094
3. Laplace–Stieltjes transform of the system mean lifetime via geometric process model Gökdere & Gürcan, 2016
4. Trivedi, Kishor. (2016). Probability & Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications. 10.1109/TR.1982.5221442.
5. Hamid Bazargan_Harandi Reliabilty Engineering. Theory and Practice. January 2023. P 477.
6. Dilmurod Davronbekov, Nafisa Juraeva. Evaluation of the Reliability of Fiber-Optic Information Transmission Systems Based on the Laws of Failure Distribution. International Journal of Innovative Research in Engineering and Management (IJIREM) Volume-12, Issue-2, April 2025 Pages 30-35. https://doi.org/10.55524/ijirem.2025.12.2.5
7. Д.Давронбеков. Надёжность радиотехнических систем. Ташкент.-Тафаккур томчилари.2021.-192 с.
8. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.34-37
9. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие / Черкесов Г.Н. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с

ISSN 3030-3907