



УДК 531.8

ФИЗИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА НА СТАДИИ ЕГО РАЗРАБОТКИ

Бабаев Джамиль Джониевич,

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,

г. Москва, dzhamil.babaev.70@mail.ru

Белый Вячеслав Сергеевич,

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,

el.belaya2015@yandex.ru

Аннотация

В настоящей научной статье приводится методика-обоснование проектной оценки безотказности объектов лазерной техники на примере гелий-неонового лазера на основании физических принципов его функционирования. Предлагаемая в научной статье методика распространяется на проектируемые лазеры при выполнении расчётной оценки требуемого уровня безотказности на этапе разработки аванпроекта, на проектируемые лазеры при выполнении расчётно-экспериментальной оценки нормативного уровня безотказности на этапе разработки опытных образцов или опытных установок, а также на проектируемые лазеры при выполнении расчётно-экспериментальной оценки эксплуатационного уровня безотказности на этапе разработки опытной партии при постановке лазеров на производство.

Ключевые слова: лазерная техника, лазер, безотказность, эффективность функционирования, наработка на отказ, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, стадия проектирования, опытный образец, техническое обслуживание и ремонт.

PHYSICAL AND METHODOLOGICAL SUBSTANTIATION OF THE DESIGN EVALUATION OF THE RELIABILITY OF A HELIUM-NEON LASER AT THE STAGE OF ITS DEVELOPMENT

Jamil D. Babaev,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics named after V.A. Fabrikant, of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

Vyacheslav S. Belyi,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics named after V.A. Fabrikant of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

ABSTRACT

This scientific article provides a methodology-justification of the design assessment of the reliability of laser equipment objects on the example of a helium-neon laser based on the physical principles of its functioning. The methodology proposed in the scientific article applies to the designed lasers when performing a calculated assessment of the required level of reliability at the stage of development of an advance project, to the designed lasers when performing a calculated and experimental assessment of the standard level of reliability at the stage of development of prototypes or experimental installations, as well as to the designed lasers when performing a calculated and experimental assessment of the operational level of reliability at the stage of development of an experimental batches when setting up lasers for production.

Keywords: laser technology, laser, reliability, operational efficiency, time to failure, failure flow parameter, probability of failure-free operation, design stage, prototype, maintenance and repair.

Введение. Под лазерной техникой (ЛТ) будем понимать совокупность технических средств, предназначенных для генерации, преобразования, передачи, приёма и использования лазерного излучения. Обеспечение надёжной работы ЛТ является одной из важнейших проблем, которая обостряется по мере усложнения конструкции самих лазеров, автоматизации процессов преобразования энергии, управления, регулирования с помощью современных электрических, электронных и программируемых электронных систем, повышения эффективности режимов их использования. Оценка реального состояния ЛТ на основе показателей надёжности даёт возможность рационально управлять ресурсами, вкладываемыми в содержание последней, оценивать необходимые затраты при изменении условий опытной и технической эксплуатации, а также совершенствовать систему технического обслуживания (ТО) и ремонта.

Целью научной статьи является разработка методики-обоснования проектной оценки безотказности ЛТ на примере гелий-неонового лазера (далее – лазера) на основании физических принципов функционирования последнего.

Указанная цель достигается путём последовательного решения следующих задач:

1. Первичное структурно-логическое моделирование лазера, учитывающее структуру лазера и функциональные взаимосвязи между его элементами;
2. Моделирование и расчёт показателей безотказности составных частей лазера и лазера в целом;
3. Анализ результатов расчётов, выработка и обоснование окончательного проектного решения.

Предлагаемая в данной научной статье методика распространяется:

- на проектируемые лазеры при выполнении расчётной оценки требуемого уровня безотказности на этапе разработки аванпроекта;

- на проектируемые лазеры при выполнении расчётно-экспериментальной оценки нормативного уровня безотказности на этапе разработки опытных образцов или опытных установок;
- на проектируемые лазеры при выполнении расчётно-экспериментальной оценки эксплуатационного уровня безотказности на этапе разработки опытной партии при постановке лазеров на производство.

Анализ состояния вопроса. Конструкция лазера как объекта эксплуатации включает в себя совокупность взаимосвязанных между собой состоящего из двух зеркал (непрозрачного (слева) и полупрозрачного (справа)) оптического резонатора, активной среды и генератора накачки (рис. 1).



Рисунок 1 – Обобщённая структурная схема лазера

Лазер может работать в одном из следующих режимов: непрерывном (стационарном) и импульсно-периодическом (нестационарном). Режим работы лазера обусловлен, в первую очередь, режимом работы генератора накачки. Большинство лазеров работают в импульсно-периодическом (нестационарном) режиме. Для включения такого режима работы на практике помимо импульсного источника накачки используется метод модуляции добротности резонатора. Такой метод позволяет получить лазерную генерацию в виде коротких импульсов длительностью, не превышающей значения 10^{-8} секунды и высокой пиковой мощностью свыше 10^8 ватт. В этом режиме в резонатор лазера помещается затвор, перекрывающий оптический путь между зеркалами. В некоторый момент времени затвор открывается, и накопленная энергия излучается в виде мощного импульса. При этом происходит изменение добротности резонатора от низких до высоких значений.

Проектная оценка безотказности лазера выполняется в три этапа (рис. 2) [1, с. 15; 2, с. 24]:

Первый этап – этап первичного структурно-логического моделирования, предусматривающий разработку функциональной схемы лазера и моделей безотказности реализации отдельных его функций, а также задание логических критериев работоспособности или отказа функций лазера;

Второй этап – этап моделирования и расчёта показателей безотказности, предусматривающий разработку модели надёжности лазера и процесс определения значений показателей безотказности лазера расчётным методом



Рисунок 2 – Основные этапы проектной оценки безотказности лазера

Третий этап – это этап анализа результатов, выработки и обоснования проектных решений, включающий в себя процессы анализа проектной оценки безотказности лазера и обоснование её соответствия требованиям.

Постановка задачи. Расчёт безотказности лазера выполняется для обеспечения возможности реализации следующих целевых задач:

- определение ожидаемого уровня безотказности лазера по показателям безотказности комплектующего оборудования или элементов комплектующего оборудования;
- проверка соответствия ожидаемого уровня безотказности лазера техническим требованиям.

Для обеспечения статистической устойчивости исходных значений показателей безотказности, при построении модели и выполнении расчётов принимается, что все элементы лазера функционируют в условиях, соответствующих требованиям нормативно-технической документации.

- При моделировании и расчёте безотказности лазера учитываются следующие факторы:
- структурная организация функционирования элементов лазера при реализации основных функций;

- параметры безотказности элементов, применяемых в лазере.

При моделировании и расчёте показателей безотказности лазера принимаются следующие допущения:

- отказы элементов лазера в совокупности являются независимыми;
- отказы элементов или групп элементов лазера носят естественный характер;
- случайные величины времени безотказной работы и времени восстановления всех элементов лазера распределены по экспоненциальному закону.

Критерием отказа лазера является необходимость снятия его с эксплуатации для восстановления работоспособности путём проведения непланового ремонта. Расчётный интервал времени представляет собой наработку лазера между плановыми текущими ремонтами. В этот период лазер рассматривается как невосстанавливаемая система.

По результатам инженерного анализа структуры лазера устанавливаются группы основных его элементов:

- группа элементов, отказ которых не влияет на работоспособность лазера;
- группа элементов, работоспособность которых в течение расчётного периода практически не изменяется по сравнению с работоспособностью на момент начала эксплуатации;
- группа элементов, отказ которых приводит к отказу лазера.

При оценке проектной безотказности лазера, первые две группы его элементов считаются абсолютно надёжными. Безотказность элементов, входящих в третью группу, определяется по нормативно-технической документации на эти элементы. При отсутствии в нормативно-технической документации данных по безотказности элементов, используются данные по безотказности элементов-аналогов.

Методика проектной оценки значений показателей безотказности лазера включает в себя [3, с. 12; 4, с. 10; 5, с. 11]:

- классификацию лазера;
- моделирование и оценку безотказности лазера;

Классификация лазера выполняется методом инженерного анализа по признакам на основе технического задания на разработку лазера или технических условий на лазер.

Классификационными признаками лазера являются:

- определённость назначения;
- количество возможных или учитываемых состояний;
- режим применения;
- последствия наступления отказов или достижения предельного состояния при применении;
- возможность восстановления работоспособного состояния локомотива после наступления отказа;
- характер основных процессов, определяющих переход лазера в предельное состояние;
- возможность и способ восстановления технического ресурса;
- возможность и необходимость технического обслуживания;

- возможность контроля работоспособности составных частей лазера перед применением по назначению;
- наличие в составе комплектующих лазера средств вычислительной техники.

Традиционно в каждом классификационном признаке предполагается наличие двух и более вариантов значений [6, с. 4; 7, с. 6]. Однако проектируемому образцу лазера может соответствовать только одно значение. По результатам классификации составляется таблица 1.

Таблица 1

Классификация лазера

Классификационный признак	Вариант значений	Значения, соответствующие лазеру
1		
...	...	...
<i>N</i>		

Номенклатура показателей безотказности лазера сводится в таблицу 2.

Таблица 2

Номенклатура показателей безотказности лазера

№ п/п	Наименование показателя, единица измерения	Значение
1	Показатель 1	
...	...	...
<i>M</i>	Показатель <i>M</i>	

Виды и периодичность ТО и ремонта лазера сводятся в таблицу 3.

Таблица 3

Структура цикла ТО (ремонта) лазера

Наименование вида технического обслуживания или ремонта	Периодичность проведения
Техническое обслуживание	
Текущий ремонт	

Проектная оценка безотказности лазера выполняется расчётным методом. Проектная оценка основывается на анализе схемно-функциональной целостности лазера и применении информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования структурно-сложных многофункциональных систем [8, с. 102; 9, с. 75; 10, с. 19]. Проектная оценка осуществляется логико-вероятностным методом, обеспечивающим построение точных логических и расчётных вероятностных функций безотказности лазера.

Аппарат математической логики в логико-вероятностном методе используется для первичного аналитического и графического описания условий реализации функций лазера, его отдельных элементов и групп элементов. Количественная оценка безотказности лазера выполняется методами теории вероятностей.

На этапе первичного структурно-логического моделирования последовательно осуществляются следующие мероприятия:

- на основании имеющейся технической документации, разрабатывается исходная структурно-функциональная схема лазера;

- на основании подготовленных структурных схем и их описаний разрабатываются специальные структурные модели безотказности реализации лазером отдельных функций в виде схем функциональной целостности;
- задаются логические критерии работоспособности или отказа исследуемых функций лазера.

На этапе автоматизированного моделирования и расчёта показателей безотказности:

- осуществляется математическое моделирование систем лазера;
- выполняется расчёт безотказности лазера.

На заключительном этапе анализа результатов, выработки и обоснования проектных решений по результатам расчёта безотказности выполняется содержательный анализ свойства безотказности лазера и обоснование его соответствия техническим требованиям.

Моделирование и расчёт проектной безотказности лазера проводится на основе программно-реализованной информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования. Необходимые для моделирования и расчёта безотказности схемы строятся на основе проектной технической документации лазера.

В общем виде схема функциональной целостности сложной технической системы представляет собой строгое формализованное описание условий, при которых она реализует значимые функции при использовании по назначению. Считается, что все элементы модели являются простыми бинарными событиями с заранее известными вероятностями [11, с. 15].

Эквивалентом схемы функциональной целостности системы является система логических уравнений вида:

$$\begin{cases} y_1 = y_1(z_l), & l \in L \\ y_2 = y_2(z_m), & m \in M \\ \dots \\ y_n = y_n(z_s), & s \in S \end{cases}, \quad (1)$$

В выражении (1):

l, m, s – количество элементов системы, используемых при реализации системой основных функций;

n – количество реализуемых системой основных функций;

$y_i, i = \overline{1, n}$ – логические функции работоспособности системы при реализации системой основных функций;

z_l, z_m, z_s – обобщённые логические переменные работоспособности элементов системы при реализации системой основных функций.

На основании системы логических уравнений (1) строятся два вида расчётных моделей:

логическая функция работоспособности системы вида

$$Y = Y(z_j), j \in \Omega. \quad (2)$$

многочлен расчётной вероятностной функции вида

$$P = F[R_j], j \in \Omega. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3):

j – номера элементов систем;

P – вероятность безотказной работы системы в целом;

R_j – вероятностная функция работоспособности j -го элемента системы;

Y – логическая функция работоспособности системы в целом.

Множество Ω является результатом объединения множеств $L, M, \dots, S$:

$$\Omega = L \cup M \cup \dots \cup S. \quad (4)$$

Логическая функция работоспособности $Y = Y(z_j)$ является решением системы уравнений (1) и является критерием работоспособности системы. В наиболее общем случае, когда одновременное выполнение системой всех её основных функций исключено, такое решение имеет вид:

$$Y = \bigvee_{i=1}^n [\bigwedge_{j=1}^{l_i, \dots, m} z_j]_i = (z_1 \wedge \dots \wedge z_{l_1})_1 \vee \dots \vee (z_{l_{n+1}} \wedge \dots \wedge z_m)_n. \quad (5)$$

Многочлен расчётной вероятностной функции P составляется из вероятностных функций работоспособности R_j и неработоспособности Q_k элементов системы

$$P = \sum_{i=1}^n [\prod_{l_j} R_{l_j} \cdot \prod_{k_j} Q_{k_j}]_i. \quad (6)$$

Исходными данными для расчёта безотказности лазера являются указанные в Технических условиях показатели безотказности элементов лазера, последствием отказа которых является отказ лазера в целом. Предварительно осуществляется приведение значений этих показателей к значению функции вероятности безотказной работы $P(x)$. В качестве аргумента x функции $P(x)$ может использоваться расчётный интервал наработки локомотива между плановыми текущими ремонтами:

Расчётный интервал наработки лазера может быть только временным. В этом случае выполняется условие вида $x = t$, а интервал наработки измеряется в часах. Формулы, по которым показатели безотказности элементов лазера приводятся к функции $P(x)$, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Выражения для оценки вероятности безотказной работы на основании других показателей безотказности

Известный показатель безотказности		Выражение для расчета вероятности безотказной работы за период Δx
Наименование	Обозначение	
Параметр потока отказов	ω	$P(\Delta x) = e^{-\omega \cdot \Delta x}$
Средняя наработка до (между) отказа(ми)	X_0	$P(\Delta x) = e^{-\frac{\Delta x}{X_0}}$
Вероятность безотказной работы за период наработки Δx_1	$P(\Delta x_1)$	$P(\Delta x) = e^{-\frac{\ln(P(\Delta x_1)) \cdot \Delta x}{\Delta x_1}}$

Пересчет конечного результата $P(x)$ в другой показатель безотказности осуществляется:

в параметр потока отказов:

$$\omega = -\frac{\ln P(x)}{x}, \quad (7)$$

в среднюю наработку на отказ (между отказами):

$$X_0 = -\frac{x}{\ln P(x)}. \quad (8)$$

Вывод. Таким образом, в настоящей научной статье приводится методика обоснования проектной оценки безотказности объектов лазерной техники на примере гелий-неонового лазера на основании физических принципов его функционирования. Цель исследования достигнута путём решения следующих задач:

1. Первичного структурно-логического моделирования лазера, учитывающего его структуру и функциональные взаимосвязи между элементами;

2. Моделирования и расчёта показателей безотказности составных частей лазера и лазера в целом;
3. Анализа результатов расчётов, выработки и обоснования окончательного проектного решения.

Список литературы:

1. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчёт надёжности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами и оборудованием на стадии проектирования. Методические рекомендации. СПб.: Севзапмонтажавтоматика, 2003. – 37 с.
2. Белый В.С., Кузьмин А. Б., Шишкин В. Ю. К вопросу о синтезе смешанной системы эксплуатации технического объекта. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2002. № 35. С. 24.
3. ГОСТ 27.003–2016 Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности [Текст]. – Введ. 2017-09-01. – М.: Стандартиформ, 2017. – 23 с.
4. ГОСТ 27.301–95 Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 138 с.
5. ГОСТ Р 51901.14–2007 Менеджмент риска. Структурная схема надёжности и булевы методы. – Введ. 2005-09-30. – М.: Стандартиформ, 2008. – 23 с.
6. Белый В.С., Адамушко Н. Н. Применение рядов Фурье для прогнозирования технического состояния здания. Экология и строительство. 2015. №1. С. 11–14.
7. Белый В.С. Применение многомерной математической модели для решения задачи оптимизации стратегии технического обслуживания сложных технических систем. В сборнике: Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы. Материалы IV Международной научно-практической конференции. 2017. С. 11–21.
8. Белый В. С. Ремонтпригодность автомобилей новой модели в прикладной исследовательской проектной задаче для школьников старших классов / В. С. Белый // Методология, теория и практика инновационного развития регионального образования: Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, Борисоглебск, 22–23 ноября 2019 года. – Борисоглебск: Издательство «Перо», 2019. – С. 350–354.
9. Белый В. С. Оценка безотказности топливного насоса грузовых автомобилей по результатам контрольных испытаний / В. С. Белый // Научные разработки: евразийский регион: материалы международной научной конференции теоретических и прикладных разработок, Москва, 11 сентября 2019 года / отв. ред. Хисматуллин Д.Р.. – Москва: Инфинити, 2019. – С. 71–80.
10. Белый, В. С. Оценка ремонтпригодности карбюраторного двигателя по результатам контрольных испытаний / В. С. Белый // Colloquium-Journal. – 2019. – № 22–1(46). – С. 18–20.
11. Можаев А.С. Общий логико-вероятностный метод автоматизированного структурно-логического моделирования надёжности, безопасности и риска сложных систем // Многотомное издание «Безопасность России». Анализ риска и проблем безопасности.

В четырех частях. Часть 1. Основы анализа и регулирования безопасности. М.: МГФ «Знание», 2006. – 640 с.

References:

1. Automated structural and logical modeling and calculation of reliability and safety of automated control systems for technological processes and equipment at the design stage. Methodical recommendations. St. Petersburg: Sevzapmontazhavtomatika, 2003. – 37 p.
2. Bely V.S., Kuzmin A.B., Shishkin V.Yu. On the synthesis of a mixed system for the operation of a technical facility. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2002. No. 35. p. 24.
3. GOST 27.003-2016 Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements [Text]. – Introduction. 2017-09-01. – Moscow: Standartinform, 2017. – 23 p.
4. GOST 27.301-95 Reliability in engineering. Reliability calculation. The main provisions [Text]. – Introduction. 1997-01-01. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002. – 138 p.
5. GOST R 51901.14-2007 Risk management. Reliability block diagram and Boolean methods. – Introduction. 2005-09-30. – Moscow: Standartinform, 2008. – 23 p.
6. Bely V.S., Adamushko N.N. Application of Fourier series to predict the technical condition of a building. Ecology and construction. 2015. No. 1. pp. 11-14.
7. Bely V.S. Application of a multidimensional mathematical model to solve the problem of optimizing the strategy of maintenance of complex technical systems. In the collection: Technology and Technology, Politics and Economics: problems and prospects. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference. 2017. pp. 11-21.
8. Bely V. S. Maintainability of new model cars in an applied research project task for high school students / V. S. Bely // Methodology, theory and practice of innovative development of regional education: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Borisoglebsk, November 22-23, 2019. – Borisoglebsk: Publishing House "Pero", 2019. – pp. 350-354.
9. Bely V. S. Evaluation of the reliability of the fuel pump of trucks based on the results of control tests / V. S. Bely // Scientific developments: the Eurasian region : materials of the International scientific conference of theoretical and Applied developments, Moscow, September 11, 2019 / ed. Khismatullin D.R.. – Moscow: Infiniti, 2019. – pp. 71-80.
10. Bely, V. S. Evaluation of the maintainability of a carburetor engine based on the results of control tests / V. S. Bely // Colloquium-Journal. – 2019. – № 22-1(46). – Pp. 18-20.
11. Mozhaev A.S. General logic-probabilistic method of automated structural-logical modeling of reliability, safety and risk of complex systems // Multi-volume edition "Security of Russia". Risk analysis and security issues. In four parts. Part 1. Fundamentals of safety analysis and regulation. Moscow: MGF "Znanie", 2006. – 640 p.