

УДК 531.8

**ПРОЕКТНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА НА
СТАДИИ ЕГО РАЗРАБОТКИ****Бабаев Джамиль Джониевич,**кандидат технических наук, доцент,
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 разработан алгоритм получения проектной оценки безотказности газового лазера на основании физических принципов его функционирования. Предлагаемый в научной статье алгоритм 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: лазер, безотказность, логико-вероятностный метод, наработка на отказ, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, стадия проектирования, опытный образец, техническое обслуживание и ремонт.

**DESIGN EVALUATION OF THE RELIABILITY OF A GAS LASER AT THE
STAGE OF ITS DEVELOPMENT****Jamil D. Babaev,**Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
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 algorithm of the design assessment of the reliability of gas laser based on the physical principles of its functioning. The algorithm 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, reliability, logical-probabilistic method, operational efficiency, time to failure, failure flow parameter, probability of failure-free operation, design stage, prototype, maintenance and repair.

Введение. Оценка технического состояния лазера на основе показателей надёжности даёт возможность рационально управлять ресурсами, вкладываемыми в содержание последнего, оценивать необходимые затраты при изменении условий опытной и технической эксплуатации, а также совершенствовать систему технического обслуживания (ТО) и ремонта.

Целью научной статьи является получение расчётной оценки безотказности газового лазера (далее – лазера) логико-вероятностным методом в соответствии с правилами, приведёнными в [1]. Указанная цель достигается путём последовательного решения следующих задач:

1. Оценка показателей безотказности отдельных элементов лазера;
2. Оценка показателей безотказности лазера при реализации последним основных функций в отдельно выделенных режимах работы;
3. Оценка безотказности лазера в целом в течение требуемого отчётного периода времени.

Предлагаемый в данной научной статье алгоритм 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. 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 обеспечения такого режима работы на практике необходимо включение в работу

импульсного модулятора, находящегося в составе генератора накачки. Это позволяет получить лазерную генерацию в виде коротких импульсов, длительностью не более 10^{-8} секунды и высокой пиковой мощностью свыше 10^8 Ватт.

Расчётная оценка показателя безотказности лазера в виде вероятности безотказной работы R выполняется в три этапа (рис. 1) [2, с. 15; 3, с. 24]:

Первый этап – этап расчёта вероятностей безотказной работы элементов лазера $R_j, j \in \Omega$, где на основании логических критериев указанные вероятности рассчитываются для каждой из вершин схемы функциональной целостности лазера;

Второй этап – этап расчёта вероятности безотказной работы лазера $R_i \pm \Delta R_i, i = \overline{1, n}$ при реализации основных его функций отдельно для каждого i -го режима работы.

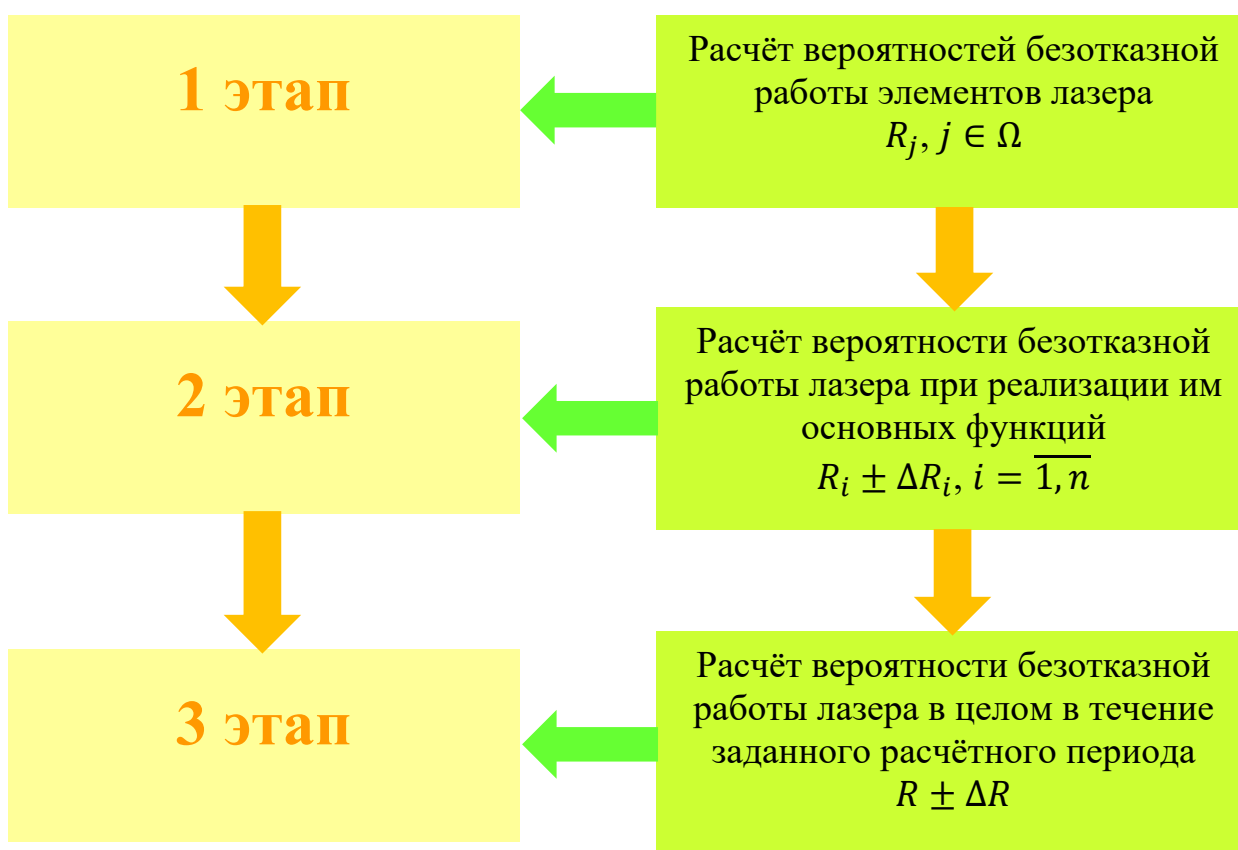


Рисунок 1 – Основные этапы проектной оценки безотказности лазера

На основании многочлена $F[R_j]$ вероятностной функции (3), приведённой в [1], методом Монте-Карло при заданном количестве серий статистических испытаний рассчитывается доверительный интервал значений $R_i \pm \Delta R_i$ при уровне значимости α .

Третий этап – это этап расчёта доверительного интервала вероятности безотказной работы лазера в целом $R \pm \Delta R$ в течение требуемого отчётного периода времени. На основании схемы функциональной целостности лазера выполняется расчётная оценка вероятности безотказной работы лазера R в целом в течение заданного отчётного периода времени. Методом Монте-Карло для заданного объёма испытаний при уровне значимости α рассчитывается доверительный интервал значений $R \pm \Delta R$.

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.

Алгоритм получения проектной оценки значений показателей безотказности лазера включает в себя [4, с. 12; 5, с. 10; 6, с. 11] классификацию лазера, разработку модели его схемно-функциональной целостности, а также оценку безотказности лазера.

Классификация лазера выполняется методом инженерного анализа по признакам на основе технического задания на разработку лазера или технических условий на лазер. Традиционно в каждом классификационном признаке предполагается наличие двух и более вариантов значений [7, с. 4], [8, с. 6]. Однако проектируемому образцу лазера может соответствовать только одно значение. По результатам классификации составлена таблица вида (табл.1).

Таблица 1

Классификация лазера

Классификационный признак	Значения, соответствующие лазеру
Определённость назначения	Изделие конкретного назначения
Количество возможных или учитываемых состояний	Два состояния: работоспособное и неработоспособное
Режим применения	Многократный циклический
Последствия наступления отказов или достижения предельного состояния при применении	Отказы или переход в предельное состояние не приводят к последствиям катастрофического или критического характера
Возможность восстановления работоспособного состояния после наступления отказа	Восстановление работоспособного состояния после наступления отказа возможно
Характер основных процессов, определяющих переход лазера в предельное состояние	Процессы старения
Возможность и способ восстановления технического ресурса	Восстановление технического ресурса возможно путём проведения ремонта обезличенным способом
Возможность и необходимость технического обслуживания	Техническое обслуживание возможно и необходимо
Возможность контроля работоспособности составных частей лазера перед применением по назначению	Контроль работоспособности составных частей лазера перед применением по назначению возможен
Наличие в составе комплектующих лазера средств вычислительной техники	Нет

Номенклатура целевых показателей безотказности лазера и их значений сводится в таблицу 2.

Таблица 2

Номенклатура показателей безотказности лазера

№ п/п	Наименование показателя, единица измерения	Значение
1	Вероятность безотказной работы, б/размер.	0.99

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	12 месяцев
Текущий ремонт	По техническому состоянию

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 [9, с. 102; 10, с. 75; 11, 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:

1. На основании имеющейся технической документации разрабатывается исходная структурно-функциональная схема лазера (рис. 2)

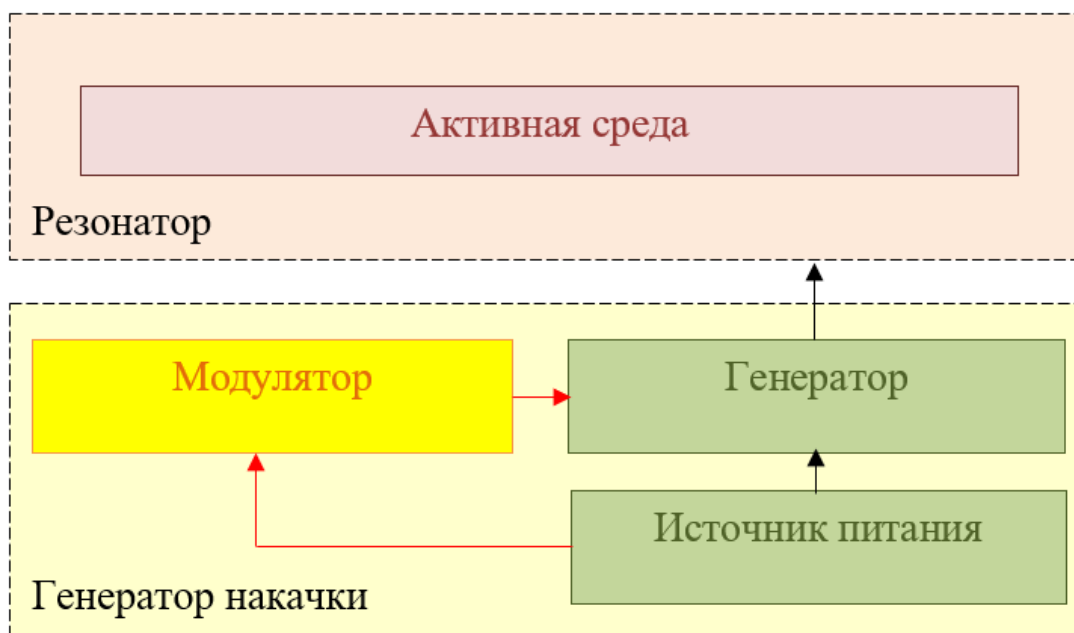


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема лазера

Структурно-функциональная схема лазера включает в себя резонатор с активным веществом и генератор накачки, состоящий из генератора непрерывного напряжения, импульсного модулятора и источника питания, необходимого для электроснабжения всех электрических элементов лазера.

2. На основании заранее подготовленной структурно-функциональной схемы лазера и её описания разрабатывается специальная структурная модель безотказности реализации лазером отдельных его функций в различных режимах работы в виде схемы функциональной целостности. Обобщённая схема функциональной целостности лазера показана на рисунке 3. Из анализа изображённой на рисунке 3 специальной структурной модели безотказности реализации лазером отдельных его функций в виде схемы функциональной целостности следует:

- лазер может работать в одном из следующих режимов: непрерывном и импульсном. Режим работы лазера обусловлен режимом работы генератора накачки;
- для обеспечения импульсного режима работы лазера необходимо включение в работу импульсного модулятора, находящегося в составе генератора накачки.

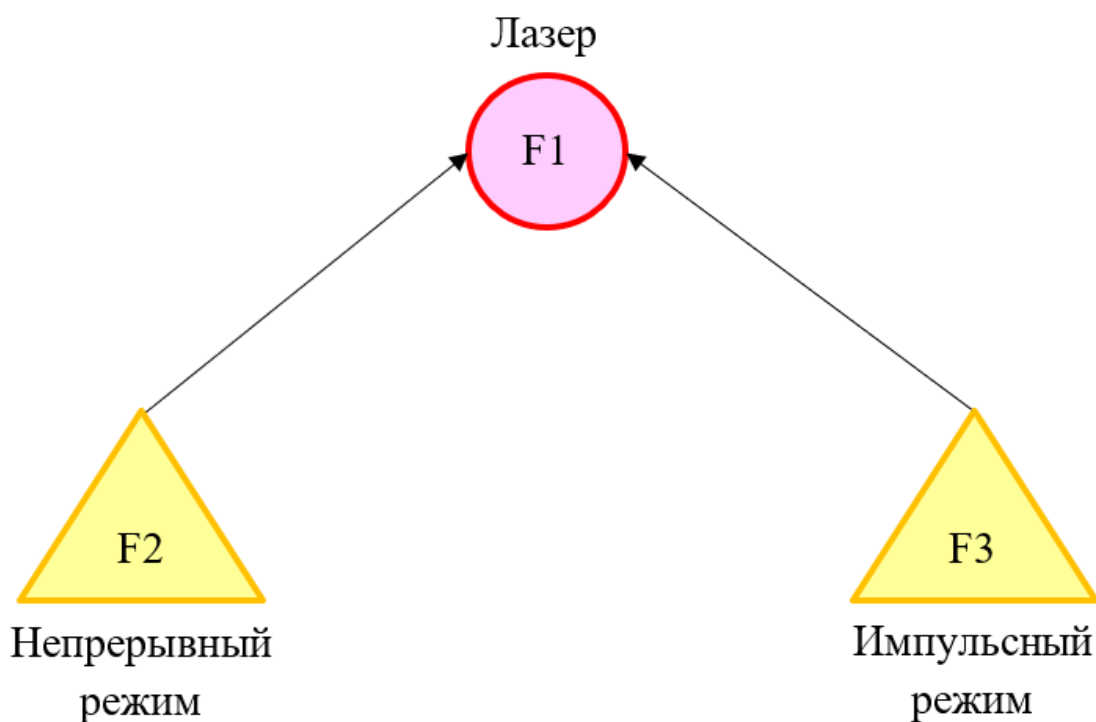


Рисунок 3 – Обобщённая схема функциональной целостности лазера

3. Логическим критерием отказа исследуемых функций лазера, выполняемых в каждом из режимов его работы, является невозможность использования последнего в соответствии с предназначением при нарушении работоспособности хотя бы одного из его структурных элементов.

На этапе моделирования и расчёта показателей безотказности осуществляется математическое моделирование систем лазера. Конечным результатом данного этапа является логико-вероятностная модель схемно-функциональной целостности лазера, представленная на рисунке 4.

Расчёт значения показателя безотказности лазера осуществляется на основании исходных данных, включающих в себя значения показателей безотказности R_i отдельных его составных частей.

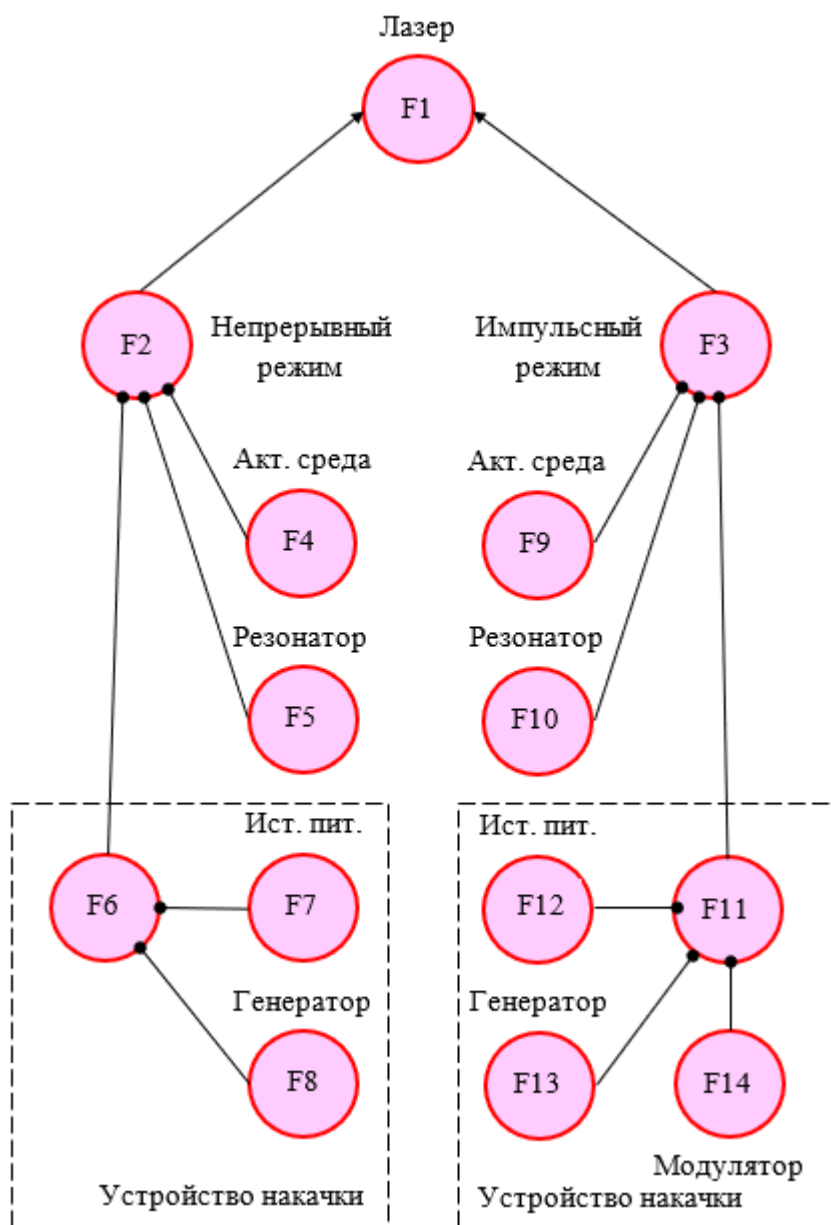


Рисунок 4 - Логико-вероятностная модель (ЛВМ) схемно-функциональной целостности лазера

По результатам инженерного анализа структуры лазера устанавливается факт наличия следующих групп его элементов:

1. Группа элементов, работоспособность которых в течение отчётного периода времени практически не изменяется по сравнению с работоспособностью на момент начала эксплуатации. К данной группе относятся резонатор с активным веществом. Значения вероятностей безотказной работы вышеуказанных элементов заведомо равны $R_1 = R_2 = 1$ (табл. 4).

Таблица 4

Значения вероятностей безотказной работы R_i первой группы элементов

№ п/п	Элемент	Обозначение в ЛВМ	Значение R_i
1	Активное вещество	F4; F9	1
2	Резонатор	F5; F10	1

2. Группа элементов, отказ которых приводит к отказу лазера. К ним относятся все элементы генератора накачки: генератор, модулятор и источник питания. Статистические вариационные ряды, включающие в себя по пять значений вероятностей безотказной работы каждого из элементов группы, представляющие собой данные по безотказности элементов-аналогов, представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения вероятностей безотказной работы R_i второй группы элементов

№ п/п	Элемент (обозначение в ЛВМ)	Значения R_i				
		1	2	3	4	5
1	Генератор (F8; F13)	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995
2	Модулятор (F14)	0,996	0,996	0,997	0,997	0,998
3	Источник питания (F7; F12)	0,996	0,998	0,998	0,998	0,999

Доверительные интервалы для случайных величин R_i , $i = \overline{1, n}$, определяются следующим образом:

1. Сначала с помощью выражений (1) и (2) определяются их математические ожидания

$$m(R_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

и среднеквадратические отклонения

$$\sigma(R_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |R_i - m(R_i)|, \quad (2)$$

2. Предполагая, что ошибка определения значений R_i носит случайный характер, при уровне значимости α с доверительной вероятностью p_d определяется доверительный интервал ΔR_i таких значений, половина которого определяется с помощью выражения вида

$$\Delta R_i = t_{\alpha, n} \cdot \sigma(R_i), \quad (3)$$

где $t_{\alpha, n}$ – квантиль распределения Стьюдента.

3. Окончательный результат определения вероятности безотказной работы элемента лазера для производства дальнейших расчётов представляется в виде:

$$R_i = \langle R_i \rangle \pm \Delta R_i. \quad (4)$$

В выражении (4) среднее значение вероятности безотказной работы элемента лазера $\langle R_i \rangle$ численно равно математическому ожиданию случайной величины R_i , определяемому с помощью выражения (1), т. е. имеет место равенство вида $\langle R_i \rangle = m(R_i)$. Для объема выборки $n = 5$ и значения доверительной вероятности $p_d = 0,9$ результаты расчёта исходных вероятностей безотказной работы сведены в таблицу 6.

Таблица 6

Результаты расчёта исходных вероятностей безотказной работы

№ п/п	Элемент (обозначение в ЛВМ)	Вероятность безотказной работы	
		Среднее значение $\langle R_i \rangle$	Доверительный интервал ($\pm \Delta R_i$)
1	Генератор (F8; F13)	0,994	$\pm 0,002$
2	Модулятор (F14)	0,997	$\pm 0,002$
3	Источник питания (F7; F12)	0,998	$\pm 0,002$

В общем виде схема функциональной целостности лазера 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 [12, с. 15].

Как показано в [1], на основании схемы функциональной целостности лазера строятся логическая функция работоспособности лазера как для непрерывного режима работы

$$Y_2 = z_4 \cdot z_5 \cdot z_6, \tag{5}$$

где $z_6 = z_7 \cdot z_8$, так и для импульсного режима работы

$$Y_3 = z_9 \cdot z_{10} \cdot z_{11}, \tag{6}$$

где $z_{11} = z_{12} \cdot z_{13} \cdot z_{14}$,

а также одночлены расчётной вероятностной функции R для обоих вышеуказанных режимов:

$$\langle R_2 \rangle = \langle R_4 \rangle \cdot \langle R_5 \rangle \cdot \langle R_7 \rangle \cdot \langle R_8 \rangle, \tag{7}$$

$$\langle R_3 \rangle = \langle R_9 \rangle \cdot \langle R_{10} \rangle \cdot \langle R_{12} \rangle \cdot \langle R_{13} \rangle \cdot \langle R_{14} \rangle. \tag{8}$$

Значения нижних индексов величин z , Y и $\langle R \rangle$, используемых в выражениях (5)-(8), а также в последующих формулах, определяются номерами элементов лазера, указанных в ЛВМ, представленной на рисунке 4. При условии физической одинаковости элементов лазера имеют место равенства логических переменных $z_4 = z_9$, $z_5 = z_{10}$, $z_7 = z_{12}$ и $z_8 = z_{13}$, а функции работоспособности (5) и (6) преобразуются к виду

$$Y_2 = z_4 \cdot z_5 \cdot z_7 \cdot z_8, \tag{9}$$

$$Y_3 = z_4 \cdot z_5 \cdot z_7 \cdot z_8 \cdot z_{14}. \tag{10}$$

Тогда логическая функция работоспособности Y_1 лазера принимает следующий вид

$$Y_1 = 1 - \bar{Y}_2 \cdot \bar{Y}_3. \tag{11}$$

В силу равенства $R_4 = R_9$, $R_5 = R_{10}$, $R_7 = R_{12}$ и $R_8 = R_{13}$ по причине одинаковости соответствующих логических переменных z , выражения для вероятностных функций (7) и (8) примут вид:

$$\langle R_2 \rangle = \langle R_4 \rangle \cdot \langle R_5 \rangle \cdot \langle R_7 \rangle \cdot \langle R_8 \rangle, \tag{12}$$

$$\langle R_3 \rangle = \langle R_4 \rangle \cdot \langle R_5 \rangle \cdot \langle R_7 \rangle \cdot \langle R_8 \rangle \cdot \langle R_{14} \rangle. \tag{13}$$

В соответствии с критерием отказа лазера, а также с учётом (12) и (13) многочлен расчётной вероятностной функции записывается в виде:

$$\langle R_1 \rangle = 1 - (1 - \langle R_2 \rangle) \cdot (1 - \langle R_3 \rangle). \tag{14}$$

Абсолютные погрешности величин R_2 , R_3 и R_1 определяются соответственно по формулам:

$$\Delta R_2 = \langle R_2 \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta R_4}{R_4}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_5}{R_5}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_7}{R_7}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_8}{R_8}\right)^2}, \tag{15}$$

$$\Delta R_3 = \langle R_3 \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta R_4}{R_4}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_5}{R_5}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_7}{R_7}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_8}{R_8}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{14}}{R_{14}}\right)^2}, \tag{16}$$

$$\Delta R_1 = \langle R_1 \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3}\right)^2}. \tag{17}$$

Результаты расчёта вероятностей безотказной работы R_1 , R_2 и R_3 представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты расчёта вероятностей безотказной работы R_1 , R_2 и R_3

№ п/п	Величина R_i	Среднее значение $\langle R_i \rangle$	Доверительный интервал ($\pm \Delta R_i$)
1	R_2	0,992	$\pm 0,002$
2	R_3	0,989	$\pm 0,003$
3	R_1	0,999	+0,001 -0,004

Расчётный интервал наработки лазера может быть только временным и измеряться в часах. Формулы, по которым показатели безотказности элементов лазера приводятся к функции $R(t)$, представлены в [1]. При выводе вышеуказанных формул учитывается, что интервалы времени безотказной работы лазера носят случайный характер, а распределение указанных интервалов является экспоненциальным. Конечный результат $R_1(t)$ может быть пересчитан в другой показатель безотказности, например, в параметр потока отказов:

$$\omega = -\frac{\ln R_1(t)}{t}, \quad (18)$$

или в среднюю наработку на отказ (между отказами):

$$T_0 = -\frac{t}{\ln R_1(t)}. \quad (19)$$

Результаты пересчёта вероятности безотказной работы R_1 в параметр потока отказов ω_1 и в среднюю наработку до первого отказа T_1 (между отказами T_0), с учётом того, что расчётное значение вероятностной функции $R_1(t)$ должно сохраняться на интервале эксплуатации длительностью $t = 1000$ часов, представлены в таблице 8.

Таблица 8

Результаты пересчёта вероятности безотказной работы в параметр потока отказов и среднюю наработку между отказами

№ п/п	Вероятность безотказной работы R_1	Параметр потока отказов ω_1 , [ч ⁻¹]	Средняя наработка между отказами T_0 , [ч]
1	0,999	10^{-6}	10^6

Вывод. Таким образом, в настоящей научной статье приводится алгоритм получения проектной оценки безотказности газового лазера в виде интервальной оценки вероятности безотказной работы R . Цель исследования достигнута по результатам решения следующих задач:

1. Расчёт вероятностей безотказной работы элементов лазера R_j , $j \in \Omega$, где на основании логических критериев указанные вероятности рассчитываются для каждой из вершин схемы функциональной целостности лазера, представленной на рисунке 4. В таблице 4 представлена группа элементов, работоспособность которых в течение отчётного периода времени практически не изменяется по сравнению с работоспособностью на момент начала эксплуатации. В таблице 5 представлены статистические вариационные ряды значений вероятностей безотказной работы элементов, отказ которых приводит к отказу лазера, и представляющие собой данные по безотказности элементов-аналогов.
2. Расчёт вероятности безотказной работы лазера $R_i \pm \Delta R_i$, $i = \overline{1, n}$ при реализации основных его функций отдельно для непрерывного и импульсного режимов работы последнего. Интервальные оценки вероятности безотказной работы составляют:
 - для непрерывного режима излучения лазера $R_2 = 0,992 \pm 0,002$;
 - для импульсного режима $R_3 = 0,989 \pm 0,002$.
3. Расчёт доверительного интервала вероятности безотказной работы лазера в целом $R \pm \Delta R$ в течение требуемого отчётного периода времени. Интервальная оценка вероятности безотказной работы лазера составляет $R_1 = 0,999_{-0,004}^{+0,001}$.

Список литературы:

1. Бабаев, Д.Д., Белый, В. С. Физико-методологическое обоснование проектной оценки безотказности гелий-неонового лазера на стадии его разработки. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 211–220.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. ГОСТ 27.301–95 Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 138 с.
6. ГОСТ Р 51901.14–2007 Менеджмент риска. Структурная схема надёжности и булевы методы. – Введ. 2005-09-30. – М.: Стандартиформ, 2008. – 23 с.
7. Белый В.С., Адамушко Н. Н. Применение рядов Фурье для прогнозирования технического состояния здания. Экология и строительство. 2015. №1. С. 11–14.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Белый, В. С. Оценка ремонтпригодности карбюраторного двигателя по результатам контрольных испытаний / В. С. Белый // Colloquium-Journal. – 2019. – № 22–1(46). – С. 18–20.
12. Можаяев 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. Babaev, D.D., Bely, V. S. Physical and methodological substantiation of the design evaluation of the reliability of a helium-neon laser at the stage of its development. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – pp. 211-220.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. GOST R 51901.14-2007 Risk management. Reliability block diagram and Boolean methods. – Introduction. 2005-09-30. – Moscow: Standartinform, 2008. – 23 p.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.