

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ / OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND COMPLEXES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47>

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА

Научная статья

Белый В.С.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-1259-4603;

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (el.belaya2015[at]yandex.ru)

Аннотация

Актуальность материалов настоящей научной статьи определяется наличием подробного описания химического лазера как объекта технической эксплуатации в рамках концептуальных основ эксплуатации современных технических объектов, относящихся к сложным техническим системам. На основании анализа конструктивных особенностей, режимов работы, принципов функционирования и новейших областей применения современного химического лазера сформировано новое представление о техническом облике последнего. В работе приводится научный подход к определению и классификации технического состояния химического лазера, разработана модель надёжности последнего и выполнена оценка показателей надёжности лазера с применением логико-вероятностного метода, который ранее для решения данной задачи не использовался. Последним обстоятельством определяется научная новина работы, результаты которой могут представлять практическую ценность для современной науки и лазерной промышленности.

Ключевые слова: химический лазер, технический облик, техническое состояние, модель надёжности, логико-вероятностный метод, схемно-функциональная целостность, безотказность, вероятность безотказной работы.

TECHNICAL STATE AND RELIABILITY OF THE CHEMICAL LASER

Research article

Belii V.S.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-1259-4603;

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (el.belaya2015[at]yandex.ru)

Abstract

The relevance of the materials of this research article is determined by the presence of a detailed description of the chemical laser as an object of technical operation within the conceptual framework of operation of modern technical objects belonging to complex technical systems. On the basis of the analysis of design specifics, modes of operation, principles of functioning and the latest fields of application of the modern chemical laser a new idea about the technical appearance of the latter is formed. The paper presents a scientific approach to the definition and classification of the technical state of a chemical laser, develops a reliability model of the latter and evaluates the laser reliability indicators using the logical-probabilistic method, which has not been previously used to solve this problem. The last circumstance determines the scientific novelty of the work, the results of which can be of practical value for modern science and laser industry.

Keywords: chemical laser, technical appearance, technical state, reliability model, logical-probabilistic method, circuit-functional integrity, failure-free operation, probability of failure-free operation.

Введение

В настоящее время лазерные технологии являются актуальными и практически важными для всестороннего развития человечества. Химические лазеры (ХЛ) – это разновидность газовых лазеров, в которых источником энергии служат химические реакции между компонентами активной среды. Несмотря на уникальность конструкции ХЛ, последние относятся к техническим объектам с традиционным жизненным циклом, главной стадией которого является стадия эксплуатации [1, С. 143], [2, С. 86].

Целью подготовки настоящей научной статьи является описание ХЛ как объекта технической эксплуатации используя концептуальные основы эксплуатации современных технических объектов, относящихся к сложным техническим системам. Для достижения поставленной цели, по мнению авторов, необходимо решение следующих задач:

1. Анализ основ конструкции, режимов работы, и принципов функционирования ХЛ, а также областей его применения с формированием технического облика последнего. Разработка модели и классификация видов технического состояния ХЛ, с последующей характеристикой его надёжности как основного свойства объекта эксплуатации,

2. Разработка модели надёжности, видов состояний и схемы переходов ХЛ из состояния в состояние с характеристикой методов определения показателей его надёжности.

Структурно настоящая научная статья состоит из двух частей. В первой части сформирован технический облик современного ХЛ, кратко сформулированы концептуальные основы определения и классификации технического

состояния последнего. Вторая часть посвящена разработке модели надёжности и методического инструментария по оцениванию количественных показателей надёжности ХЛ.

Техническое состояние химического лазера

Любой технический объект, в том числе и ХЛ, имея свою конструкцию и функциональное предназначение, является объектом технической эксплуатации. Под технической эксплуатацией ХЛ понимается стадия жизненного цикла последнего, включающая в себя процессы подготовки газового лазера к применению, технически грамотное применение его по назначению, техническое обслуживание и ремонт, а также хранение и транспортирование. Таким образом, ХЛ в целом или отдельные его элементы конструкции, являются объектами технической эксплуатации, имеющие потребность в осуществлении комплекса мероприятий по технической эксплуатации [3, С. 128], [4, С. 96].

Конструкция ХЛ как объекта технической эксплуатации включает в себя совокупность взаимосвязанных между собой состоящего из непрозрачного и полупрозрачного зеркал оптического резонатора, в котором устанавливается импульсная лампа, активной среды в виде смеси газов, а также генератора накачки (рисунок 1).

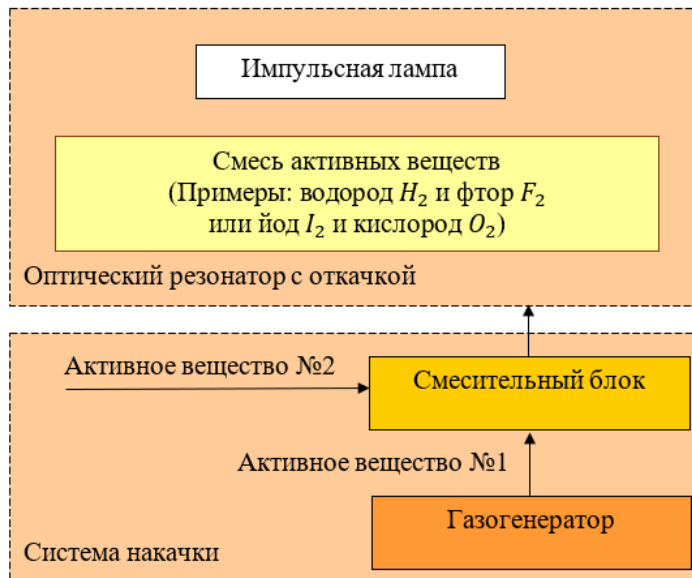


Рисунок 1 - Обобщённая структурная схема ХЛ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.1>

ХЛ может работать в непрерывном (стационарном) и импульсном (нестационарном). Большинство лазеров работают в импульсном режиме, когда работают все элементы конструкции лазера. В непрерывном (стационарном) режиме работы отключается импульсная лампа и лазер работает без осуществления импульсной модуляции излучения на выходе [5, С. 76], [6, С. 134].

Наиболее полную картину взаимосвязей между областями применения, режимами работы и конструкцией ХЛ можно получить в результате анализа его технического облика. Под техническим обликом ХЛ понимается комплексная качественная и количественная характеристика, отражающая общие признаки, показатели и технические свойства последнего [7, С. 49], [8, С. 101].

Технический облик, являясь категорией системологии, отражает не только общую структуру ХЛ, но и взаимосвязи элементов конструкции последнего во множестве присущих им взаимосвязанных свойств, режимов работы и выполняемых лазером функций [9, С. 28], [10, С. 196], [11, С. 182]. Технический облик ХЛ можно представить в виде изображённой на рисунке 2 схемы взаимосвязей между областями применения последнего, режимами его работы, а также взаимосвязанными между собой элементами конструкции ХЛ, именуемыми программно-аппаратными средствами.

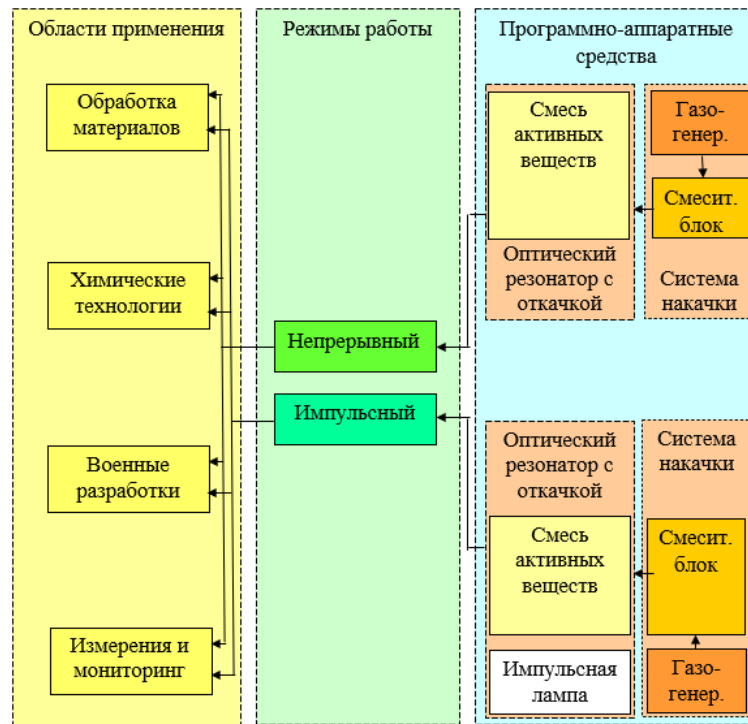


Рисунок 2 - Технический облик современного ХЛ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.2>

На рисунке 2 показаны области применения ХЛ, обусловленные тем, что для него не требуется электропитания. ХЛ применяется в промышленности при обработке материалов, преимущественно стали, в военных разработках и химических технологиях, а также для решения задач мониторинга окружающей среды и в измерительной технике. Как видно из рисунка 2, в любой области применения могут быть использованы как непрерывный, так и импульсный режимы работы ХЛ. Импульсный режим работы ХЛ обеспечивается четырьмя его элементами конструкции: оптическим резонатором с откачкой, импульсной лампой, смесительным блоком и газогенератором. Непрерывный режим – только тремя: оптическим резонатором, смесительным блоком и газогенератором.

Из анализа рисунка 2 следует:

- в любых областях применения ХЛ может работать как в непрерывном, так и импульсном режимах;
- наибольшее количество элементов конструкции ХЛ задействовано в основном режиме его работы – в импульсном режиме.

Описанное выше представление о техническом облике ХЛ составлено на основании имеющейся в [10, С. 196] и [11, С. 182] информации о новейших областях применения последнего в современных отраслях человеческой деятельности. Ранее попытки решения подобной задачи предпринимались [12, С. 4749], но с учётом упрощённой конструкции ХЛ и более узкой области его применения.

Каждый технический объект, в том числе и ХЛ, может быть охарактеризован видом технического состояния (ТС), в котором он постоянно или временно находится [12, С. 4750], [13, С. 2363], [14, С. 526]. Под ТС ХЛ понимается совокупность признаков, например, параметров, установленных для ХЛ технической документацией, значения которых подвержены изменению в процессе технической эксплуатации последнего. Конкретный вид ТС ХЛ определяется степенью соответствия признаков требованиям, установленным технической документацией. Пусть ХЛ характеризуется совокупностью количественных и качественных признаков, среди которых признаки или параметры вида $Y_i(t)$, $i = 1, \dots, I$ определяют способность выполнять лазером заданные функции, а признаки или параметры вида $Y_j(t)$, $j = I + 1, \dots, J$ не влияют на указанные функции, но заданы в технической документации. На каждый параметр ХЛ $Y_{i(j)}(t)$ задается область допустимых значений $[Y_{i(j)}^{\text{доп min}}, Y_{i(j)}^{\text{доп max}}]$, позволяющая определить вид ТС лазера.

Исправным является вид ТС, при котором ХЛ соответствует всем требованиям технической документации, при этом выполняются условия вида $Y_i(t) \in [Y_i^{\text{доп min}}, Y_i^{\text{доп max}}]$, $Y_j(t) \in [Y_j^{\text{доп min}}, Y_j^{\text{доп max}}]$, где $i = 1, \dots, I$; $j = I + 1, \dots, J$.

Неисправным является вид ТС, при котором ХЛ не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. К неисправным видам ТС относятся:

- работоспособный вид ТС – это неисправный вид ТС, при котором ХЛ способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. Необходимые и достаточные условия данного вида ТС следующие: $Y_i(t) \in [Y_i^{\text{доп min}}, Y_i^{\text{доп max}}]$, $Y_j(t) \notin [Y_j^{\text{доп min}}, Y_j^{\text{доп max}}]$, где $i = 1, \dots, I$; $j = I + 1, \dots, J$.

- неработоспособный вид ТС – это неисправный вид ТС, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять ХЛ заданные функции, не соответствует требованиям технической документации, например $Y_i(t) \notin [Y_i^{\text{доп min}}, Y_i^{\text{доп max}}]$, $Y_j(t) \notin [Y_j^{\text{доп min}}, Y_j^{\text{доп max}}]$, $i = 1, \dots, I$; $j = I + 1, \dots, J$.

Предельное состояние – это состояние, при котором дальнейшее использование ХЛ по назначению недопустимо, например, из соображений безопасности, или восстановление его исправного или работоспособного видов ТС невозможно или нецелесообразно. Признаки предельного состояния устанавливаются требованиями технической документации на конкретный ХЛ.

Схема переходов ХЛ из одних видов ТС в другие представлена на рисунке 3. На рисунке показаны все возможные с точки зрения технической эксплуатации виды ТС ХЛ, необходимые и достаточные условия нахождения ХЛ в том или ином виде ТС, а также указаны типы событий, свершение которых переводит лазер из одного вида ТС в другой при условии отсутствия процессов восстановления работоспособности или исправности последнего. Для удобства построения диагностических моделей ХЛ исправный и неработоспособный работоспособный виды ТС ХЛ объединены в группу технических состояний №1, а неработоспособный вид ТС и предельное состояние объединены в группу технических состояний №2. Переходы ХЛ в различные состояния определяются возникновением повреждений, отказов, а также наличием фактов устаревания, физического износа и (или) практически полного расхода ресурса. Под повреждением понимается событие, заключающееся в нарушении исправного состояния ХЛ при сохранении его работоспособности. Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния ХЛ.

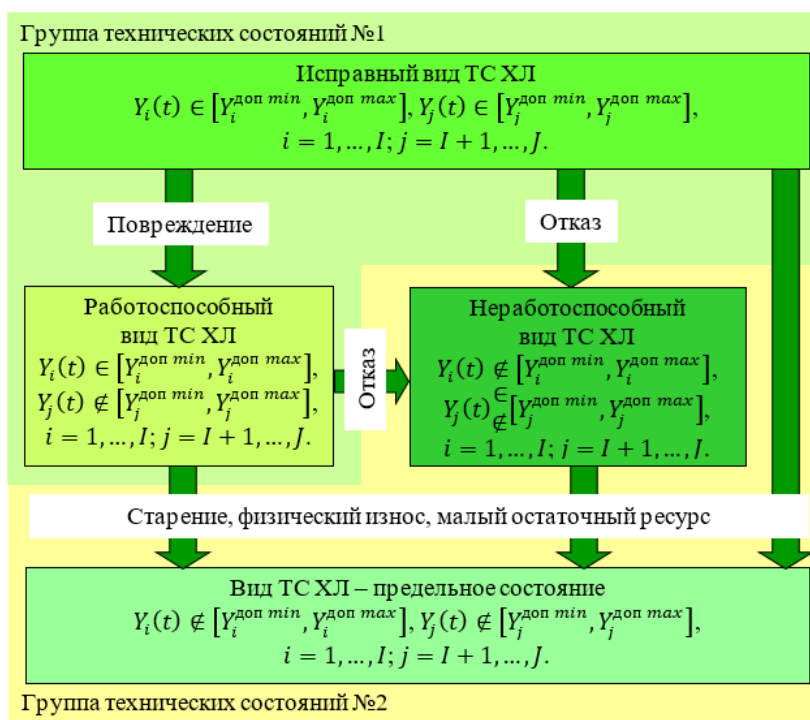


Рисунок 3 - Схема переходов ХЛ из одних видов ТС в другие
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.3>

Из анализа рисунка 3 следует:

- ХЛ, как объект технической эксплуатации, может находиться в одном из перечисленных выше видов ТС;
- нахождение ХЛ в любом из видов ТС осуществляется при наличии необходимых и достаточных условий;
- переход ХЛ из одного вида ТС в другое осуществляется вследствие свершения таких событий, как возникновение повреждений, отказов, устаревания, физического износа и (или) практически полного расхода ресурса;
- группа технических состояний №1 включает в себя виды ТС, находясь в которых ХЛ является работоспособным, а группа технических состояний №2 включает в себя виды ТС, находясь в которых ХЛ работоспособным не считается.

Таким образом, на протяжении всей стадии жизненного цикла ХЛ, связанной с его технической эксплуатацией, лазер может находиться в различных видах ТС, определяемых значением его параметров $Y_{i,j}(t)$, $i = 1, \dots, I$; $j = I + 1, \dots, J$. Типовой перечень параметров ХЛ, которые могут в достаточной степени охарактеризовать ТС последнего, а также их значения (в качестве примера приводится кислород-йодный лазер), приведён в таблице №1.

Таблица 1 - Типовые параметры излучения кислород-йодного лазера и их номинальные значения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.4>

№ п/п	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Длина волны	1.315	Мкм
2	Удельный энергосъём	100...400	Дж/(л·атм)
3	Длительность импульса	$3 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-6}$	с
4	Химический КПД	7...22	%

Надёжность химического лазера

ХЛ, как объект технической эксплуатации, обладает свойством надёжности. Под надёжностью ХЛ понимается свойство последнего сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность ХЛ закладывается на стадии его проектирования, обеспечивается в процессе его разработки и поддерживается на всех этапах эксплуатации последнего. Надёжность – это комплексное свойство, которое включает в себя безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость объектов технической эксплуатации. В настоящей научной статье в связи с наличием ограничений, накладываемых на её объём, свойство надёжности ХЛ рассматривается только в части безотказности. Под безотказностью ХЛ понимается его свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени наработки [15, С. 6646]. Одними из основных количественных показателей безотказности ХЛ, при условии, что в рассматриваемой ситуации последний является невозстанавливаемым объектом, являются его вероятность безотказной работы $R(t)$, интенсивность его отказов $\lambda(t)$ и среднее время наработки лазера до первого отказа T_1 .

Под вероятностью безотказной работы ХЛ будем понимать функцию вида

$$R(t) = 1 - P(t) \quad (1)$$

где $P(t)$ – функция распределения случайной величины времени наработки ХЛ до его первого отказа t .

Считается, что в основной период эксплуатации – в период нормальной эксплуатации любого технического объекта распределение случайного времени t является экспоненциальным при условии постоянства значения интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = const$, поэтому функция распределения $P(t)$ в явном виде записывается следующим образом:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

при этом среднее время наработки ХЛ до первого отказа является величиной, обратно пропорциональной интенсивности отказов

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Модель надёжности ХЛ представляет собой составляемую на основании схемы технического облика ХЛ логико-вероятностную модель (ЛВМ) схемно-функциональной целостности последнего. ЛВМ схемно-функциональной целостности ХЛ представлена на рисунке 4. На рисунке показаны элементы конструкции ХЛ, задействованные как в импульсном режиме работы, так и в непрерывном.

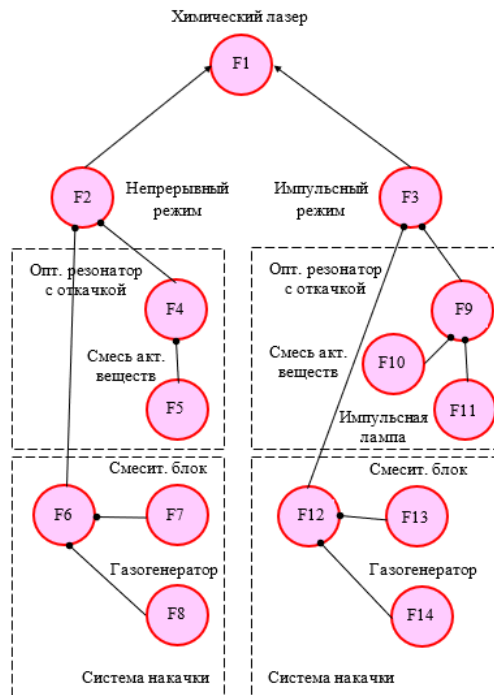


Рисунок 4 - Логико-вероятностная модель схемно-функциональной целостности ХЛ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.5>

Из анализа ЛВМ функциональной целостности ХЛ следует:

- одновременная работа ХЛ в импульсном и непрерывном режимах работы невозможна, что не противоречит принципу работы последнего согласно обобщённой структурной схеме, изображённой на рисунке 1;
- оценка показателя безотказности ХЛ осуществляется в общем виде, с учётом возможности работы последнего как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы;
- существует возможность оценки показателя безотказности ХЛ отдельно для каждого из режимов его работы.

Исходными данными для реализации логико-вероятностного метода являются:

- вероятности безотказной работы каждого элемента конструкции R_n ;
- критерий работоспособности ХЛ.

Выбранный критерий работоспособности ХЛ представляется в виде логической функции работоспособности вида $Y = Y(z_i)$, где z_i – логическая переменная, соответствующая нахождению отдельно взятого элемента конструкции ХЛ в одной из двух описанных выше групп технических состояний. В наиболее общем случае, когда одновременное выполнение ХЛ всех его основных функций исключено, логическая функция имеет вид:

$$Y = (z_1 \wedge \dots \wedge z_l)_1 \vee \dots \vee (z_{l+1} \wedge \dots \wedge z_m)_n \quad (4)$$

Многочлен расчётной вероятностной функции R составляется из вероятностных функций работоспособности R_n и неработоспособности P_n элементов системы

$$R = \sum_{i=1}^n [\prod_n R_n \cdot \prod_n P_n]_i \quad (5)$$

Переходя от решения задачи в общем виде к решению частной задачи в соответствии с выбранными критериями работоспособности ХЛ, получается, что оценка вероятности безотказной работы лазера в непрерывном режиме, которая соответствует вершине F_2 , имеет вид

$$R_2 = R_5 \cdot R_7 \cdot R_8 \quad (6)$$

с учётом разделённых активной среды и оптического резонатора, а также без учёта отказавшего модулятора.

Оценка вероятности безотказной работы ХЛ в импульсном режиме, которая соответствует вершине F_3 , имеет вид

$$R_3 = R_{10} \cdot R_{11} \cdot R_{13} \cdot R_{14} \quad (7)$$

также с учётом разделённых активной среды и оптического резонатора.

Вероятность безотказной работы ХЛ в целом, соответствующая вершине F_1 определяется как сумма вероятностей R_2 и R_3 .

Известны факты [12, С. 4750] наличия попыток решения аналогичной задачи с использованием таких методов как метод перебора состояний и метод путей и сечений. Однако, использование вышеперечисленных методов требует или упрощения структурной схемы ХЛ или выполнения приблизительных расчётов, что негативно сказывается на точности получаемого результата.

Заклучение

1. Впервые на основании анализа новейших областей применения ХЛ сформировано наиболее полное представление о техническом облике последнего с учётом технической реализации в его конструкции современных достижений науки и техники. Из анализа технического облика лазера, представленного на рисунке 2, видно, что в любых областях применения ХЛ может работать как в непрерывном, так и импульсном режимах. Наибольшее количество элементов его конструкции задействовано в основном режиме работы – в импульсном режиме.

2. ХЛ, как объект технической эксплуатации, может находиться в исправном, неисправном работоспособном, неисправном неработоспособном видах технического состояния, а также в предельном состоянии. Нахождение ХЛ в любом из видов технического состояния осуществляется при наличии необходимых и достаточных условий. Переход ХЛ из одного вида технического состояния в другой осуществляется вследствие свершения таких событий, как возникновение повреждений, отказов, устаревания, физического износа и (или) практически полного расхода ресурса.

3. Модель надёжности ХЛ отражает импульсный режим работы последнего, когда работают все его элементы конструкции. Критерием работоспособности ХЛ является работоспособность одновременно всех элементов его конструкции, а при отказе одного из вышеперечисленных элементов ХЛ считается неработоспособным.

4. Впервые оценка показателя безотказности ХЛ осуществляется логико-вероятностным методом с учётом возможности работы последнего как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы. Существует возможность оценки показателя безотказности ХЛ отдельно для каждого из режимов его работы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.6>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.47.6>

Список литературы / References

1. Бурлаков А.В. Техническая диагностика в лазерных системах: методы и приборы / А.В. Бурлаков. — М.: Издательский Дом МЭИ, 2017. — 294 с.
2. Глухов С.А. Лазерные системы и устройства: надёжность и диагностика / С.А. Глухов, В.И. Гриценко, М.О. Лащевский [и др.]. — М.: Лаборатория знаний, 2011. — 248 с.
3. Кожухова Г.А. Надёжность лазерных систем и обзор недостатков / Г.А. Кожухова, И.Н. Шулегина, Ю.А. Фокина. — М.: Ленанд, 2014. — 67 с.
4. Крупов В.М. Надёжность и диагностика лазерных систем / В.М. Крупов, Т.М. Копачкова, С.Ю. Гришин. — М.: Наука, 2012. — 452 с.
5. Кузьмин С.А. Основы технической диагностики в лазерной технике / С.А. Кузьмин, И.В. Мулярев. — СПб.: Наука и техника, 2018. — 437 с.
6. Писарев В.Л. Лазерные системы и их надёжность / В.Л. Писарев, А.Н. Котенков. — М.: Наука и образование, 2018. — 463 с.
7. Полозов А.В. Надёжность лазерных устройств / А.В. Полозов, Р.Р. Тахитдинов. — М.: БИНОМ, 2017. — 319 с.
8. Рябцев В.Н. Управление надёжностью лазерных устройств / В.Н. Рябцев, В.Н. Сарычев, Н.В. Кувшинов. — М.: Рид Групп, 2014. — 220 с.
9. Семенов В.А. Математическое моделирование надёжности лазерных систем / В.А. Семенов, В.А. Торопов, В.В. Куцев. — М.: Издательский Дом НТЛ, 2014. — 302 с.
10. Щукин А.С. Диагностика и надёжность лазерных систем / А.С. Щукин, Д.А. Тюменцев. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 334 с.
11. Onae A. Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-colour mode-locked fiber laser / A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama [et al.] // Opt. Commun. — 2000. — Vol. 183. — P. 181–187.
12. Overstreet K.R. Zeeman effect spectroscopically locked Cs diode laser system for atomic physics / K.R. Overstreet, J. Franklin, J.P. Shaffer // Rev. Sci. Instrum. — 2004. — Vol. 75. — P. 4749–4753.
13. Pienkowski J. Diode laser frequency standard for laser interferometry / J. Pienkowski // XVIII IMEKO World Congress 2006, Metrology for a Sustainable Development (Rio de Janeiro, Brazil). — 2006. — Vol. 3. — P. 2362–2366.
14. Riehle F. Frequency Standards Basics and Applications / F. Riehle. — Wiley-VCH, 2004. — 526 p.
15. Yoshikawa Y. Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor / Y. Yoshikawa, T. Umeki, T. Mukae [et al.] // Appl. Optics. — 2003. — Vol. 42. — P. 6645–6649.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Burlakov A.V. Tehnicheskaja diagnostika v lazernyh sistemah: metody i pribory [Technical diagnostics in laser systems: methods and devices] / A.V. Burlakov. — М.: Publishing House MJeI, 2017. — 294 p. [in Russian]
2. Gluhov S.A. Lazernye sistemy i ustrojstva: nadjozhnost' i diagnostika [Laser systems and devices: reliability and diagnostics] / S.A. Gluhov, V.I. Gricenko, M.O. Lashhevskij [et al.]. — М.: Laboratorija znaniy, 2011. — 248 p. [in Russian]

3. Kozhuhova G.A. Nadjozhnost' lazernykh sistem i obzor nedostatkov [Reliability of laser systems and overview of disadvantages] / G.A. Kozhuhova, I.N. Shulegina, Ju.A. Fokina. — M.: Lenand, 2014. — 67 p. [in Russian]
4. Krupov V.M. Nadjozhnost' i diagnostika lazernykh sistem [Reliability and diagnostics of laser systems] / V.M. Krupov, T.M. Kopachkova, S.Ju. Grishin. — M.: Nauka, 2012. — 452 p. [in Russian]
5. Kuz'min S.A. Osnovy tehnicheckoj diagnostiki v lazernoj tehnike [Fundamentals of technical diagnostics in laser technology] / S.A. Kuz'min, I.V. Muljarev. — SPb.: Nauka i tehnika, 2018. — 437 p. [in Russian]
6. Pisarev V.L. Lazernye sistemy i ih nadjozhnost' [Laser systems and their reliability] / V.L. Pisarev, A.N. Kotenkov. — M.: Nauka i obrazovanie, 2018. — 463 p. [in Russian]
7. Polozov A.V. Nadjozhnost' lazernykh ustrojstv [Reliability of laser devices] / A.V. Polozov, R.R. Tahitdinov. — M.: BINOM, 2017. — 319 p. [in Russian]
8. Rjabcev V.N. Upravlenie nadjozhnost'ju lazernykh ustrojstv [Reliability management of laser devices] / V.N. Rjabcev, V.N. Sarychev, N.V. Kuvshinov. — M.: Rid Grupp, 2014. — 220 p. [in Russian]
9. Semenov V.A. Matematicheskoe modelirovanie nadjozhnosti lazernykh sistem [Mathematical modelling of laser system reliability] / V.A. Semenov, V.A. Toropov, V.V. Kucev. — M.: Publishing House NTL, 2014. — 302 p. [in Russian]
10. Shhukin A.S. Diagnostika i nadjozhnost' lazernykh sistem [Diagnostics and reliability of laser systems] / A.S. Shhukin, D.A. Tjumencev. — M.: FIZMATLIT, 2009. — 334 p. [in Russian]
11. Onae A. Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-colour mode-locked fiber laser / A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama [et al.] // Opt. Commun. — 2000. — Vol. 183. — P. 181–187.
12. Overstreet K.R. Zeeman effect spectroscopically locked Cs diode laser system for atomic physics / K.R. Overstreet, J. Franklin, J.P. Shaffer // Rev. Sci. Instrum. — 2004. — Vol. 75. — P. 4749–4753.
13. Pienkowski J. Diode laser frequency standard for laser interferometry / J. Pienkowski // XVIII IMEKO World Congress 2006, Metrology for a Sustainable Development (Rio de Janeiro, Brazil). — 2006. — Vol. 3. — P. 2362–2366.
14. Riehle F. Frequency Standards Basics and Applications / F. Riehle. — Wiley-VCH, 2004. — 526 p.
15. Yoshikawa Y. Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor / Y. Yoshikawa, T. Umeki, T. Mukae [et al.] // Appl. Optics. — 2003. — Vol. 42. — P. 6645–6649.