

DOI: 10.18721/JPM.10406

УДК 621.373.826

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ШУМА НА ФОНЕ ДРУГИХ ВИДОВ ШУМА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**А.И. Бодров, В.С. Зоркин,
Е.Г. Чуляева, А.Я. Паюров, В.В. Кюн**

АО «Плазма»,

г. Рязань, Российская Федерация

Исследованы причины ограничения и снижения стабильности характеристик источников когерентного оптического излучения. С помощью установок для измерения нестабильности частоты и мощности лазерного излучения были получены экспериментальные данные, анализ которых выявил существенное влияние шумов лазерного излучения на стабильность его параметров. Эти шумы были изучены с использованием автокорреляционной функции и дисперсии Аллана. При этом удалось классифицировать шумы и тем самым установить пути повышения качества изготовления лазеров. Проведенные исследования позволили детерминировать причины снижения рабочих характеристик лазеров, не выходя за пределы приемо-сдаточных и периодических испытаний.

Ключевые слова: шум; частотно-стабилизированный лазер; дисперсия Аллана; автокорреляционная функция; нестабильность частоты

Ссылка при цитировании: Бодров А.И., Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Паюров А.Я., Кюн В.В. Определение гармонических составляющих шума на фоне других видов шума лазерного излучения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 4. С. 82–91. DOI: 10.18721/JPM.10406

DETERMINATION OF HARMONIC NOISE COMPONENTS AGAINST THE BACKGROUND OF OTHER TYPES OF LASER NOISE

**A.I. Bodrov, V.S. Zorkin,
E.G. Chulyaeva, A.Ya. Payurov, V.V. Kyun**

Joint-stock company "Plasma",

Ryazan, Russian Federation

The reasons for limitation and degradation of consistency of performance of coherent optical emission sources have been investigated. The experimental data were obtained using measuring assembly for frequency and power laser-emission instability. The data treatment revealed the significant influence of laser-radiation noise on its parameter stability. The noise was examined by application of an autocorrelation function and the Allan variance. This technique made possible to classify the noise under types; these were flicker, interference noise and the one caused by the directivity-axis position instability. By doing so, this provided to ascertain the ways for quality improvement of laser production. The conducted studies allowed determination of the reasons for degradation of consistency of the laser performance without coming outside the limits of acceptance and periodical tests.

Key words: noise; frequency stabilized laser; Allan variance; autocorrelation function; power instability

Citation: A.I. Bodrov, V.S. Zorkin, E.G. Chulyaeva, A.Ya. Payurov, V.V. Kyun, Determination of harmonic noise components against the background of other types of laser noise, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10 (4) (2017) 82–91. DOI: 10.18721/JPM.10406

Введение

Стабильность частоты лазерного излучения и воспроизводимость значения этой частоты были предметами исследования в течение более чем тридцати лет, тем не менее, интерес к этой проблеме не ослабевает. Так, в стандартах частоты стабилизация частоты осуществляется по реперным точкам спектрального резонанса и по реперной точке его вершины [1].

Метод нахождения предельной стабильности частоты в данной работе выражен среднеквадратичным двухвыборочным отклонением, т. е. девиацией Аллана, и определяется соотношением

$$\frac{\sigma(2, \tau_0)}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\nu_{i+1}^{-\tau_0} - \nu_i^{-\tau_0}}{2} \right)^2} \geq \frac{\gamma}{\nu\mu} \sqrt{\tau_0}, \quad (1)$$

где τ_0 – время усреднения; N – общее количество пар отсчетов; $\bar{\nu}$ – среднее и текущее значения несущей частоты; γ – ширина реперной линии; μ – отношение сигнал/шум.

Наиболее распространенные методы измерения параметров лазерного излучения включают в себя, в частности, измерение пространственных и энергетических характеристик пучка. Для измерения таких характеристик разработаны автоматизированные устройства, например установки, описанные в работах [2, 3]. Определение характеристик частотно-стабилизированных лазеров требует разработки ряда специальных установок и методик измерения.

Для обеспечения необходимой точности современных измерений налагаются высокие требования на стабильность характеристик источников когерентного излучения. Ввиду этого, являются актуальными исследования причин ограничения и снижения стабильности характеристик данных источников.

Цели настоящей работы – анализ типов шума в излучении стабилизированных лазеров и выявление причин их возникновения.

Наличие периодических составляющих в спектре шума лазерной эмиссии приводит к снижению стабильности характеристик лазера, вплоть до выхода прибора из строя.

Методическая часть

В настоящей работе анализ непериодических составляющих шума проведен по методу Аллана [4, 5]. Поскольку анализ шумов производился во временной области, наиболее результативным оказалось использование вариации Аллана: $\sigma_y^2(\tau_0)$, или ВА (обозначение Национального института стандартов и технологий), а также квадратного корня из вариации Аллана.

Эти характеристики позволяют определять наличие фликкер-шума, белого шума и варианты этих видов шума. Например, если построить зависимость вариации Аллана от времени усреднения измерительной аппаратуры, то эти виды шума можно различить. Однако использование указанного метода не позволяет различать гармонические составляющие в спектре лазерных шумов. Эти составляющие можно детерминировать лишь путем построения автокорреляционной функции.

Рассмотрим спектр лазерного излучения, содержащий гармоническую составляющую [6], спектральная плотность которого следует выражению:

$$S_x(f) = \frac{x^2}{2} \delta(f - f_0), \quad (2)$$

где $\delta(f - f_0)$ – дельта-функция; f_0 – частота гармонического сигнала; f – циклическая возмущающая частота; x – амплитуда гармонического сигнала.

Спектр содержит две гармоники вида

$$F(f) = 0, 5x\delta(f - f_0)e^{j\varphi} + 0, 5x\delta(f - f_0)e^{-j\varphi}$$

на частотах f_0 и $-f_0$ соответственно.

Мы рассматриваем только первую составляющую из двух приведенных.

Автокорреляционная функция может быть выражена следующим образом [7]:

$$k_y(\tau) = \frac{2x^2 \sin^2\left(\frac{f_0\tau}{2}\right)}{f_0^2\tau^2} \cos f_0\tau, \quad (3)$$

где τ – лаг.

В рассматриваемом случае автокорреляционная функция гармонического сигнала также представляет собой периодическую функцию с периодом входного сигнала, ам-

плитуда которого равна половине квадрата амплитуды выходного сигнала. Автокорреляционная функция не зависит от фазового сдвига входного сигнала.

В настоящей работе выявление шумов лазерного излучения производилось в рамках проведения измерений характеристик, наиболее важных для стабилизированных лазеров; это нестабильность оптической частоты и нестабильность мощности лазерного излучения [8].

Методика измерения нестабильности оптической частоты [9]. Поскольку для частотно-стабилизированных лазеров основная характеристика — стабильность оптической частоты, при выпуске лазеров производится измерение длины волны и нестабильности частоты на каждом выпускаемом приборе. При этом используется специальное оборудование для измерения нестабильности частоты и длины волны промышленно-выпускаемых частотно-стабилизированных лазеров. Структурная схема данной установки приведена на рис. 1.

Измерения осуществляются во временной области и заключаются в определении частоты биений между исследуемым и опорным лазерами с помощью частотомера и устройства автоматической регистрации сигнала биений. Полученные в результате измерений данные анализируются и статисти-

чески обрабатываются. В качестве эталонного в данной установке используется гелий-неоновый лазер, стабилизированный по частоте насыщенного поглощения в йодной ячейке. Стабилизация частоты опорного лазера осуществляется по частоте третьей гармоники сигнала модуляции излучения. Выходное управляющее напряжение системы стабилизации опорного лазера, полученное в результате преобразования сигнала ошибки, поступает на пьезокорректор, на котором установлено одно из зеркал резонатора гелий-неонового лазера с йодной ячейкой (He-Ne/I₂). В режиме сканирования на осциллографе наблюдаются все пики лазерного излучения от *A* до *N* по четыре группы пиков. Каждому пику поглощения йодной ячейки соответствует аттестованное значение длины волны лазерного излучения. Аттестация опорного лазера производится в международных организациях путем сравнения с эталонными аналогичными йодными лазерами.

Стабилизация частоты лазера He-Ne/I₂ осуществляется по пику, частота которого имеет наиболее близкое значение к частоте излучения испытываемого лазера.

Относительную нестабильность частоты определяют за время измерения *t* при времени усреднения τ_0 . В зависимости от величины параметров *t* и τ_0 , нестабиль-

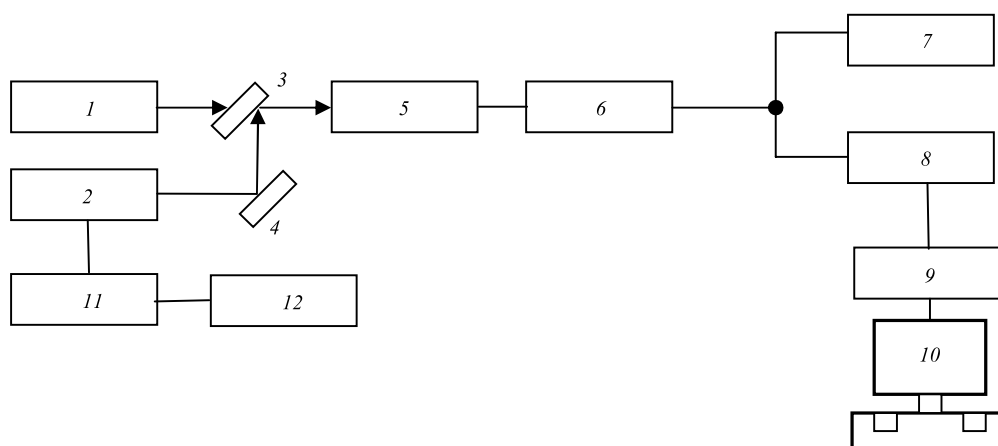


Рис. 1. Схема оптического гетеродинамирования для определения нестабильности частоты и номинального значения длины волны (по среднеквадратичному отклонению):

- 1 — испытываемый He-Ne лазер; 2 — опорный лазер ${}^3\text{He}-{}^{20}\text{Ne}/{}^{127}\text{I}_2$; 3, 4 — поворотные зеркала; 5 — лавинный фотодиод; 6 — усилитель (диапазон частот 0 — 400 МГц); 7 — анализатор спектра; 8 — частотомер; 9 — устройство регистрации сигнала биений; 10 — персональный компьютер; 11 — система стабилизации опорного лазера; 12 — осциллограф

ность частоты генератора подразделяют на кратковременную ($\tau_0 < \tau_{ch}$) и долговременную ($\tau_0 > \tau_{ch}$), где τ_{ch} – характерное время ухода частоты генератора. Этот параметр специфичен для каждого генератора. Нестабильность частоты определяется через среднеквадратическое относительное отклонение как

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot v} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v}_i)^2}{N}}, \quad (4)$$

где $\Delta v / v$ – нестабильность частоты излучения испытуемого лазера; v_i – среднее значение измеряемой частоты биений; N – число отсчетов с частотомера; v_i – номинальное значение частоты.

Значение v_i справедливо в случае, если флуктуации частоты лазерного излучения носят случайный характер. Однако эти изменения частоты со временем не всегда носят случайный характер; на фоне случайных флуктуаций частоты они могут быть выражены неявно.

Методика измерения относительной нестабильности мощности [10]. Измерение относительной нестабильности мощности проводилось методом 3.2, описанным в ГОСТ 25786–83, путем прямого измерения нестабильности напряжения.

Пример зарегистрированных данных с помощью приведенной методики представлен в работе [11].

Данные измерений напряжения, снимаемого при испытаниях с измерительной головки блока приемного устройства, поступают на ПК и регистрируются с помощью программного обеспечения WinDMM300, входящего в комплект мультимера АРРА-207.

Полученную зависимость напряжения от времени $U = f(t)$ разбивают на n равных участков ($n = 10$). Затем для каждого участка определяют максимальное и минимальное значения напряжения U_{max} и U_{min} .

Среднее значение напряжения для каждого участка \bar{U}_i определяют по формуле

$$\bar{U}_i = \frac{U_{i,max} + U_{i,min}}{2}. \quad (5)$$

После этого определяют среднее значение напряжения за время измерения по формуле

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{U}_i}{10}. \quad (6)$$

Для каждого участка определяют максимальное отклонение напряжения $\Delta U_{i,max}$ от среднего значения за время измерения, с помощью формулы

$$\Delta U_{i,max} = |U_i - \bar{U}|_{max}. \quad (7)$$

И, наконец, определяют относительную нестабильность средней мощности (в процентах) по формуле

$$S_p = \frac{100}{\bar{U}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta U_{i,max}^2}{9}}. \quad (8)$$

Пример зарегистрированных данных с помощью приведенной методики представлен в работе [11].

Результаты и их обсуждение

Проведем в качестве примера анализ излучения частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера типа ЛГН-303.

Построим коррелограмму (график автокорреляции) по точкам сигнала нестабильности оптической частоты биений между опорным и испытуемым (ЛГН-303 № 130) лазерами с помощью формулы [10]:

$$K(\tau) = \frac{1}{(p-m)} \sum_1^{p-m} (v_i - \mu)(v_{i+\tau} - \mu), \quad (9)$$

где p – число измерений частоты биений; m – число измерений частоты биений, отстоящих на лаг τ от первого столбца; μ – среднее значение частоты биений.

На рис. 2 представлена коррелограмма прибора, позволяющая оценить период гармонической составляющей в оптическом излучении лазера. Период составляет более 20 с и увеличивается в дальнейшем с ростом времени усреднения. Это соответствует наличию в спектре лазерного излучения интерференционных шумов. Последние возникают вследствие взаимодействия стоячей

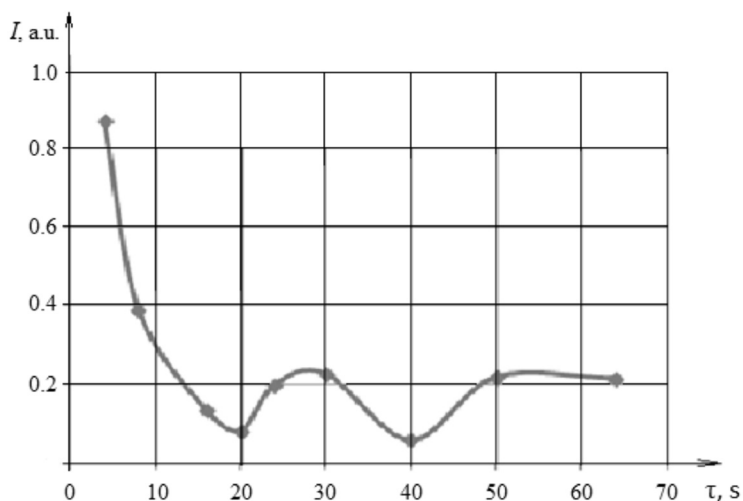


Рис. 2. Автокорреляционная функция стабильности частоты в зависимости от лага

волны резонатора с паразитным излучением той же поляризации. Паразитное излучение объясняется переотражением основного излучения лазера от оптических элементов внутрь резонатора [12]. Ввиду того, что в конструкцию частотно-стабилизированных лазеров входит большое число внешних оптических элементов, к точности их изготовления и установки предъявляются высокие требования. Основными источниками паразитных переотражений в лазерах типа ЛГН-303 являются следующие дефекты их изготовления:

- некачественное просветление оптических элементов;

- недостаточная клиновидность подложек зеркал;

- неточная установка анизотропных кристаллов.

Проанализируем излучения частотно-стабилизированного лазера ЛГН-303 и пассивно стабилизированного волноводного CO_2 -лазера, на основе данных, полученных при измерениях нестабильности их мощностей. Построим зависимости дисперсии Аллана и автокорреляционных функций для вышеупомянутых приборов.

Полученная зависимость дисперсии Аллана для лазера ЛГН-303 от времени усреднения представлена на рис. 3. Можно сделать вывод, что в спектре излучения лазера присутствует фликкер-шум

для всех типов частотно-стабилизированных лазеров [13]. Ввиду того, что постоянная составляющая системы автоподстройки частоты (АПЧ) составляет более 0,8 с, а шумы в области – менее 0,1 с, данный шум активного элемента не контролируется системой АПЧ. В области постоянной времени АПЧ наблюдается наименьшая дисперсия Аллана, в дальнейшем же при увеличении времени усреднения нестабильность возрастает. Наличие в лазерном излучении шума данного типа объясняется неоднородностью электродной системы активного элемента, в частности шероховатостью катодного электрода.

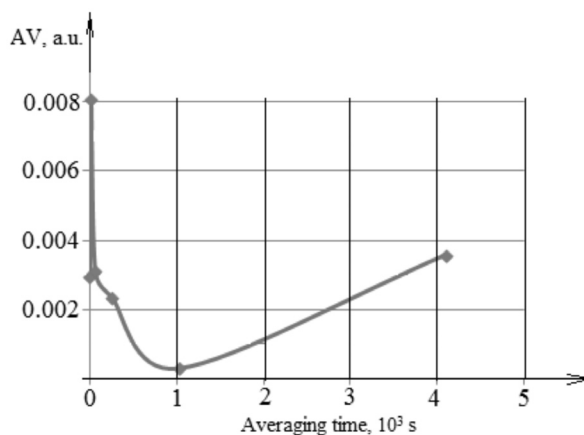


Рис. 3. Дисперсия Аллана в зависимости от времени усреднения для лазера ЛГН-303

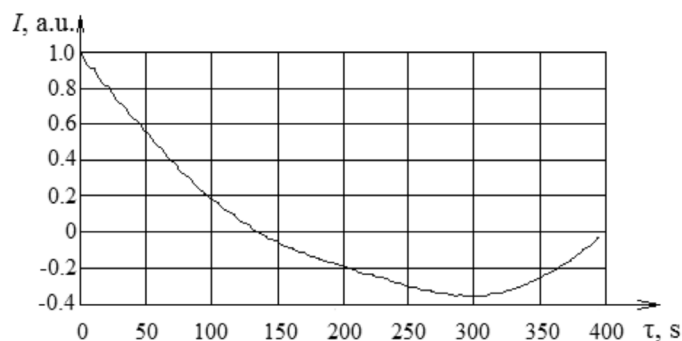


Рис. 4. Автокорреляционная функция стабильности мощности в зависимости от лага для лазера ЛГН-303

Построим график зависимости автокорреляционной функции для лазера ЛГН-303 от лага (рис. 4).

Смешанная форма гармонического сигнала и шума имеет вид спадающей функции с гармонической составляющей. Как видно из рис. 4, гармоническая составляющая почти незаметна на фоне белого шума. Тем не менее, можно определить период гармонической составляющей в спектре шума стабильности мощности; этот период составляет примерно 10 с. Такое значение соответствует тепловым колебаниям, вызванным нестабильностью положения оси диаграммы направленности (ОДН). Указанная нестабильность определяется наличием локальных напряженностей в шейке юстировочных узлов, а также выбором материала этих узлов.

К другому типу газовых лазеров относятся волноводные CO_2 -лазеры [14, 15]. Данные приборы отличает возможность

работы в различных режимах генерации: одномодовом, одночастотном, селективном и неселективном, на фиксированной длине волны, с перестройкой длины волны в области 9 – 11 мкм, с дискретным переключением в пределах заданного набора длин волн. Несмотря на все многообразие возможных типов колебаний, в волноводных резонаторах CO_2 -лазеров их набор ограничивается низшей волноводной модой EH_{11} или суперпозицией двух – трех мод нечетного типа с распределением, эквивалентным моде EH_{11} . Это ограничение связано с жесткой конкуренцией пространственно-связанных типов колебаний при однородном уширении линии усиления в волноводном CO_2 -лазере.

Экспериментальная зависимость мощности излучения CO_2 -лазера (серия LCD – Laser (based on) Carbon Dioxide, т. е. лазер на двуокиси углерода) от времени представлена на рис. 5.

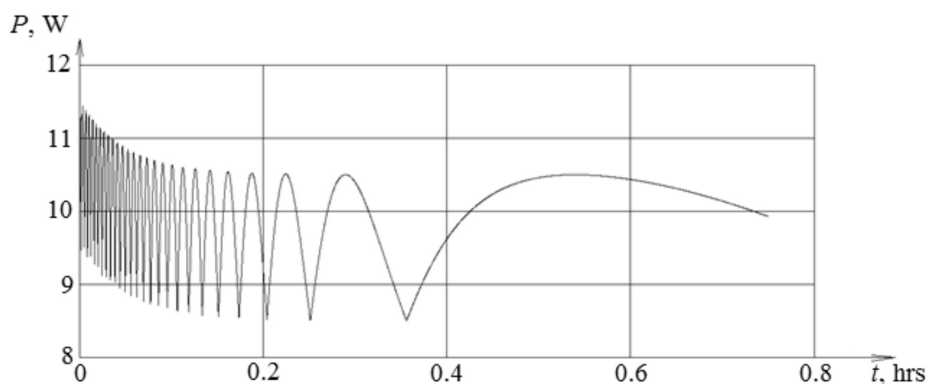


Рис. 5. Зависимость мощности излучения CO_2 -лазера от времени

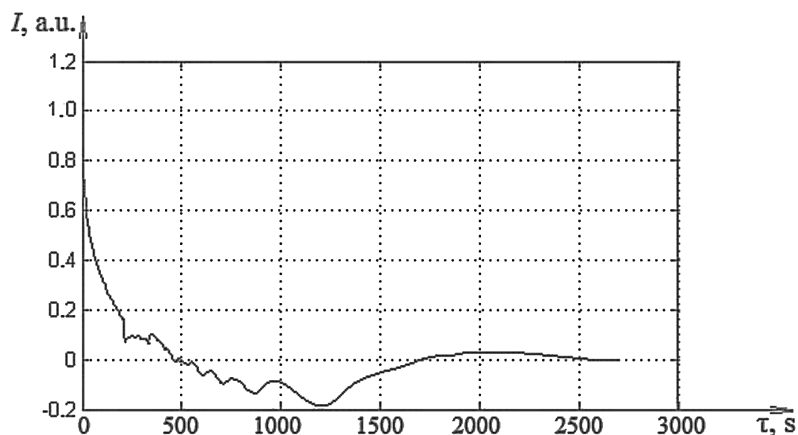


Рис. 6. Автокорреляционная функция мощности излучения CO_2 -лазера в зависимости от лага

Автокорреляционная функция для данных, полученных для CO_2 -лазера, представлена на рис. 6.

Необходимо отметить, что наряду с процессом установления теплового равновесия, в волноводном лазере наблюдается эффект автостабилизации мощности излучения. Эффект связан с влиянием изменения мощности излучения на мощность тепловыделения в резонаторе и, соответственно, на температуру несущих элементов последнего.

Оценка периода гармонической составляющей дает примерное значение в диапазоне 25 – 30 мин. Скорее всего, для данного случая характерны дрейфовые псевдогармонические колебания мощности излучения. Как видно из рис. 6, на интер-

валах временных сдвигов (лагов) до 500 с поведение мощности излучения достаточно жестко детерминировано.

Заключение

В статье приведены результаты работы с газоразрядными лазерами по исследованию шумов лазерного излучения. Показано, что обработка результатов измерений, относящихся к стабильности мощности и частоты по параметру Аллана, наряду с автокорреляционной функцией, однозначно характеризует виды шума. Помимо четкой детерминации шумов в лазерном излучении, показана возможность выявления причин их возникновения и, следовательно, дальнейшего устранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губин М.А., Киреев А.Н., Пнев А.Б., Тюриков Д.А., Шелестов Д.А., Шелковников А.С. Методы долговременной стабильности частоты лазеров с газовыми ячейками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2011. № 5-2. С. 199–213.
2. Хирд Г. Измерение лазерных параметров. М.: Мир, 1970. 540 с.
3. Котюк А.Ф. Измерение спектрально-частотных и корреляционных параметров и характеристик лазерного излучения. М.: Радио и связь, 1982. 271 с.
4. Аллан Д.У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91) С. 3–28.
5. Fang B., Guo X. Modified Allan variance analysis on random errors of MINs // Telkomnika. Telecommunication, Computing, Electronics and Control. 2013. Vol. 11. No. 3. Pp. 1227–1235.
6. Воробьев П.Г., Гуров В.С., Кондрахин А.А., Чуляева Е.Г. Гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер – мера длины в интерферометрах. М.: Горячая Линия – Телеком, 2015. 108 с.
7. Воробьев П.Г. Частотно-стабилизированные лазеры для точных измерений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического ун-та. 2012. № 39-2 С. 26–33.
8. Багаев С.И., Чеботаев В.И. Лазерные стандарты частоты // Успехи физических наук. 1986. Т. 148. № 1. С. 143–178.

9. Власов А., Хилов С. Частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры для интерферометрии // Фотоника. 2007. № 5. С. 7–9.

10. Гуров В.С., Зоркин В.С., Гомозкова Е.Ю., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Паюров А.Я., Огнев Б.И., Чуляева Е.Г. Информационные лазерные технологии в промышленности и системах связи. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. 92 с.

11. Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Применение корреляционного анализа в задачах фильтрации // Труды XIX Междунар.науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск: Томский политехнический университет (ТПУ). 2013. С. 377–378.

12. Laferrière J., Lietart G., Taws R., Wolszczak S.

Reference guide to fiber optic testing. Sec. ed. Vol. 1. Saint-Etienne: JDSU, 2011. 159 p.

13. Rutman J. Characterization of frequency: a transfer function approach and its application to measurements via filtering of phase noise // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1974. Vol. 23. No. 1. Pp. 40–48.

14. Айрапетян В.С. Внерезонаторная параметрическая генерация с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2009. № 3. С. 20–24.

15. Григорьянц А.Г., Васильцов В.В., Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 6. С. 5–33.

Статья поступила в редакцию 24.10.2017, принята к публикации 04.11.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОДРОВ Александр Иванович – технический директор АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
sales@plasmalabs.ru

ЗОРКИН Владимир Сергеевич – инженер I категории АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
vladimir.zorkin@mail.ru

ЧУЛЯЕВА Елена Георгиевна – доктор технических наук, старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
grp@plasmalabs.ru

ПАЮРОВ Александр Яковлевич – старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
mera@plasmalabs.ru

КЮН Валерий Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор центра АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
kvazar@plasmalabs.ru

REFERENCES

[1] M.A. Gubin, A.N. Kireyev, A.B. Pnev, D.A. Tyurikov, D.A. Shelestov, A.S. Shelkovnikov, Metody dolgovremennoy stabilnosti chastoty lazerov s gazovymi yacheykami [Principles of long-term frequency stability of the lasers stabilized on the gas cell], Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, Ser. "Priborostroyeniye". (5-2) (2011) 199–123.

[2] H.G. Heard, Laser parameter measurement,

Handbook, J. Wiley & Sons, Inc., New-York, London, Sydney, 1965.

[3] A.F. Kotyuk, Izmereniye spektralno-chastotnykh i korrelyatsionnykh parametrov i kharakteristik lazernogo izlucheniya [Measurement of spectral-frequency and correlation parameters and characteristics of laser radiation]. Moscow, Radio i Svyaz, 1982.

[4] **D.U. Allan**, Variatsii Allana: Istoriya sozdaniya, preimushchestva i nedostatki, osnovnyye oblasti primeneniya [Allan variance: An origin, advantages and disadvantages, substation application areas], Giroskopiya i navigatsiya. No. 4 (91) (2015) 3–28.

[5] **B. Fang, X. Guo**, Modified Allan variance analysis on random errors of MINs, *Telkomnika*. 11 (3) (2013) 1227–1235.

[6] **P.G. Vorobyev, V.S. Gurov, A.A. Kondrakhin, E.G. Chulyayeva**, Geliy-neonovyy chastotno-stabilizirovanny laser – mera dliny v interferometrakh [He-Ne frequency-stable laser is a long measure in the interferometers], *Hot Line – Telekom*, 2015.

[7] **P.G. Vorobyev**, Chastotno-stabilizirovannyye lazery dlya tochnykh izmereniy [Frequency-stable lasers for engineering measurements], *Vestnik of RSRTU*. No. 39-2 (2012) 26–33.

[8] **S.I. Bagayev, V.I. Chebotayev**, Lazer frequency standarts, *Soviet Physics – Uspekhi*. 29 (1) (1986) 82–103.

[9] **A. Vlasov, S. Khilov**, Chastotno-stabilizirovannyye geliy-neonovyye lazery dlya interferometrii [Frequency-stable He-Ne lasers for interferometry], *Fotonika*. (5) (2007) 7–9.

[10] **V.S. Gurov, V.S. Zorkin, E.Yu. Gomozkova, et al.**, Informatsionnyye lazernyye tekhnologii v promyshlennosti i sistemakh svyazi [Informational laser technologies in industry and

telecommunications], Ryazan State Radioeng. Un-ty, 2016.

[11] **V.A. Fayerman, V.S. Avramchuk**, Primeneniye korrelyatsionnogo analiza v zadachakh filtratsii [Correlation analysis application in the filtering problems], *Proc. of the 19th Research-to-Practice Conf. “Current Equipment and Technologies”*, Tomsk Polytechnical University (2013) 377–378.

[12] **Laferrière J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S.**, Reference guide to fiber optic testing, 2nd ed., Vol. 1, JDSU, Saint-Etienne, 2011, P. 159.

[13] **J. Rutman**, Characterization of frequency: a transfer function approach and its application to measurements via filtering of phase noise, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 23 (1) (1974) 40–48.

[14] **V.S. Ayrapetyan**, Vnerezonatornaya parametricheskaya generatsiya s plavnoy i (ili) diskretnoy perestroykoy chastoty izlucheniya [Extracavity parametrical generation with continuous and/or discrete emission frequency tuning], *Vestnik NGU, Ser. Fizika*. (3) (2009) 20–24.

[15] **A.G. Grigoryants, V.V. Vasiltsov, A.G. Grigoryants, V.V. Vasiltsov**, Prostranstvennaya struktura izlucheniya moshchnykh volnovodnykh i volokonnykh lazerov dlya tekhnologii [Emission spatial structure of high-power waveguide and optical fiber lasers for industrial engineering], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. “Mashinostroyeniye”*. (6) (2012) 5–33.

Received 24.10.2017, accepted 04.11.2017.

THE AUTHORS

BODROV Alexander I.

Joint-stock company “Plasma”

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
sales@plasmalabs.ru

ZORKIN Vladimir S.

Joint-stock company “Plasma”

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
vladimir.zorkin@mail.ru

CHULYAIEVA Elena G.

Joint-stock company “Plasma”

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
grp@plasmalabs.ru

PAYUROV Alexander Ya.

Joint-stock company “Plasma”

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
mera@plasmalabs.ru

KYUN Valeriy V.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation

kvazar@plasmalabs.ru