



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2021 №9



RIGOL

Possibilities and More

Цифровой осциллограф DS8000-R серия

2 устройства в стандартной стойке высотой 1U

Возможность получения
до **512** измерительных
каналов



**Самая высокая производительность на
сегодняшний день в решении сложнейших задач
на встраиваемых системах.**

- Максимальная частота дискретизации 10 Гбит / с
- Высокая плотность, большое количество каналов
- Максимальная глубина записи: до 500 М точек в штатной комплектации приборов
- Анализатор частотного спектра в реальном времени
- Максимальная скорость захвата осциллограмм: до 600 000 осц/сек
- Анализатор цифровых протоколов для общей последовательности шин
- Независимая цветовая персистенция для БПФ

На правах рекламы

О компании RIGOL Technologies:

RIGOL Technologies динамично развивающаяся компания в области измерительной и испытательной техники. Наша премиальная линейка продуктов включает в себя цифровые запоминающие осциллографы, цифровые осциллографы смешанных сигналов, анализаторы спектра, функциональные генераторы сигналов произвольной формы, программируемые источники питания и нагрузки, цифровые мультиметры, системы сбора данных и прикладное программное обеспечение.

Наши решения сочетают в себе высокую производительность, безупречное качество и передовые характеристики, при этом привлекают своими ценами.

Продукция RIGOL способствует повышению качества, сокращению сроков и снижению стоимости проведения испытаний, это лучшая инвестиция в ваше производство.



ООО ТД "ЮНИТ СЕРВИС"

Телефоны:

+7-812-983-49-04, +79216447168

адрес электронной почты:

tdus@td-unit servis.ru

Веб-сайт: td-unit servis.ru

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2021 №9 сентябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

С 1958 г. переводится
на английский язык
под названием
«Measurement Techniques»
издательством
Springer Nature
www.springer.com/11018

Издаётся с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГБУ «Российский институт
стандартизации»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- А. В. Лапко, В. А. Лапко, А. В. Бахтина.** Формирование наборов независимых компонент многомерной случайной величины на основе непараметрического алгоритма распознавания образов 3
- И. В. Красавин, А. В. Яшин.** Оценка состояния сложной эргатической системы на примере системы обеспечения единства измерений 10
- А. С. Завгородний.** Метод измерений парциальных мощностей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем 16

■ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Р. А. Степанов, В. Г. Баталов.** Определение размера капель спрея методом вейвлет-анализа интерферометрических изображений 23
- А. Г. Бедрин, А. Н. Жилин, И. Л. Ловчий.** Использование волоконно-оптического датчика для регистрации импульсного тока плазменного разряда 28

■ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Д. Ю. Кутовой, И. А. Яценко, В. Б. Явкин, А. Н. Мухаметов, П. В. Ловцов, Р. И. Ганиев.** Методика и результаты экспериментального определения коэффициента сжимаемости природного газа 35

■ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Е. П. Красноперов, В. В. Гурьев, В. В. Сычугов, Д. С. Яшкин, С. В. Шавкин.** Измерение параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками 41

■ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Клеопин, И. М. Малай.** Современные подходы к обеспечению единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов 47
- А. И. Казьмин.** Многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей электрофизических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий 54

■ МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Г. Никитаев, А. Н. Проничев, О. Б. Тамразова, В. Ю. Сергеев, В. Ю. Сельчук, В. С. Козлов, А. О. Лим.** Модель оценки неоднородности распределения характеристик глобул на изображениях новообразований кожи 62

■ МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

- С. В. Безденежных, О. В. Каминский, К. А. Стальнова, А. В. Галыго, Н. А. Герасимова.** Национальные эталоны единицы коэффициента гармоник Российской Федерации и Республики Беларусь: результаты сличений 68

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

Научные редакторы *Грачева И. Л., Федяева М. В.*
Корректор *Бучная М. В.*
Иллюстрации *Бабаев И. Н.*
Компьютерная верстка *Нотт С. А.*
Реклама, распространение и подписка *Керсова Л. А.*
Тел.: +7(495)430-28-02, kersova@vniims.ru

Сдано в набор: 04.08.2021.
Подписано в печать: 15.09.2021.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 200 экз. Зак. 21-20к.
Свободная цена.
Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

Издание зарегистрировано Роскомнадзором
Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.
Издатель: ФГУП «ВНИИМС».
Адрес редакции и издателя: 119361, Москва,
ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС».
Тел.: +7(495)781-48-70
E-mail: izmt@vniims.ru
Сайт: www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за содержание
рекламных материалов.
Точка зрения редакции может не совпадать с позицией
авторов.
Полное или частичное воспроизведение материалов
допускается с письменного разрешения редакции.
При перепечатке материалов ссылка на журнал
«Измерительная техника» обязательна.
Все поступившие в редакцию материалы подлежат
рецензированию.
Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.
Требования к оформлению статей размещены на сайте
www.izmt.ru
Знаком информационной продукции не маркируется.

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- A. V. Lapko, V. A. Lapko, A. V. Bakhtina.** Formation of sets of independent components of a multidimensional random variable based on a nonparametric pattern recognition algorithm..... 3
- I. V. Krasavin, A. V. Yashin.** Assessing the state of a complex ergatic system on the example of a system for ensuring the uniformity of measurements 10
- A. S. Zavgorodnii.** The global navigation systems satellites signals partial powers measuring method..... 16

■ OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- R. A. Stepanov, V. G. Batalov.** Determination of spray droplet size by wavelet analysis of interferometric images 23
- A. G. Bedrin, A. N. Zhylin, I. L. Lovchy.** Using a fiber optic sensor for registration of pulsed plasma discharge current..... 28

■ MECHANICAL MEASUREMENTS

- D. Yu. Kutovoy, I. A. Yatsenko, V. B. Yavkin, A. N. Mukhametov, P. V. Lovtsov, R. I. Ganiev.** Technique and results of experimental determination of the compressibility factor of the natural gas 35

■ ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- E. P. Krasnoperov, V. V. Guryev, V. V. Sychugov, D. S. Yashkin, S. V. Shavkin.** Measurement of parameters of the superconducting non-insulated coils..... 41

■ RADIO MEASUREMENTS

- A. V. Kleopin, I. M. Malay.** Modern approaches to ensure traceability of fast electrical pulse processes measurements 47
- A. I. Kaz'min.** Multifrequency optimization method of measurement the frequency dependency of electrophysical parameters of dielectric and magnetodielectric coatings 54

■ MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

- V. G. Nikitaev, A. N. Pronichev, O. B. Tamrazova, V. Yu. Sergeev, V. Yu. Selchuk, V. S. Kozlov, A. O. Lim.** Model for estimating the heterogeneity of the distribution of globule characteristics in images of skin neoplasms 62

■ INTERNATIONAL COOPERATION

- S. V. Bedenezhnykh, O. V. Kaminsky, K. A. Stal'nova, A. V. Galygo, N. A. Gerasi-mova.** National standards of the harmonic coefficient unit of the Russian Federation and the Republic of Belarus: results of comparisons 68

Научная статья

УДК 519.7+004.93

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-3-9>

Формирование наборов независимых компонент многомерной случайной величины на основе непараметрического алгоритма распознавания образов

Александр Васильевич Лапко^{1✉}, Василий Александрович Лапко², Анна Владимировна Бахтина³

^{1, 2} Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

¹lapko@icm.krasn.ru ✉

²valapko@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6938-9323>

³anna-denisjuk@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность обхода проблемы декомпозиции области значений случайных величин при проверке различных гипотез. Дан краткий обзор литературы по данной проблеме. Предложена методика формирования наборов независимых компонент многомерной случайной величины, основанная на проверке гипотез о независимости парных сочетаний компонент многомерной случайной величины. В методике использован двухмерный непараметрический алгоритм распознавания образов ядерного типа, соответствующий критерию максимального правдоподобия. В отличие от традиционной методики с применением критерия Пирсона, предложенная методика позволяет обойти проблему декомпозиции области значений случайных величин на многомерные интервалы. Приведены результаты вычислительных экспериментов, выполненных согласно методике формирования наборов независимых случайных величин. С использованием полученной информации построен информационный граф, вершины которого соответствуют компонентам многомерной случайной величины, а рёбра определяют их независимость, при этом вершины полных подграфов соответствуют группам независимых компонент случайной величины. Полученные результаты создают основу синтеза многоуровневой непараметрической системы обработки данных большого объёма, каждый уровень которой соответствует конкретному набору независимых случайных величин.

Ключевые слова: проверка гипотезы, набор независимых случайных величин, многомерная случайная величина, алгоритмы распознавания образов, ядерная оценка плотности вероятности, выбор коэффициентов размытости ядерных функций, коэффициент контрэкссесса, коэффициент асимметрии, информационный граф

Для цитирования: Лапко А. В., Лапко В. А., Бахтина А. В. Формирование наборов независимых компонент многомерной случайной величины на основе непараметрического алгоритма распознавания образов // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 3–9.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-3-9>

Formation of sets of independent components of a multidimensional random variable based on a nonparametric pattern recognition algorithm

Aleksandr V. Lapko^{1✉}, Vasiliy A. Lapko², Anna V. Bakhtina³

^{1, 2} Institute of Computational Modelling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

^{1, 2, 3} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

¹lapko@icm.krasn.ru ✉

²valapko@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6938-9323>

³anna-denisjuk@yandex.ru

Abstract. The possibility of circumventing the problem of decomposition of the range of values of random variables when testing various hypotheses is considered. A brief review of the literature on this problem is given. A method for forming sets of independent components of a multidimensional random variable is proposed, based on hypotheses testing about the independence of paired combinations of components of a multidimensional random variable. The method uses a two-dimensional non-parametric algorithm for pattern recognition of the kernel type, corresponding to the criterion of maximum likelihood. In contrast to the traditional method based on the application of the Pearson criterion, the proposed approach avoids the problem of decomposing the range of values of random variables into multidimensional intervals. The results of computational experiments performed according to the method of forming sets of independent random variables are presented. Using the information obtained, an information graph is constructed,

the vertices of which correspond to the components of a multidimensional random variable, and the edges determine their independence. Then the vertices of the complete subgraphs correspond to groups of independent components of a random variable. The obtained results form the basis for the synthesis of a multi-level nonparametric large volume data processing system, each level of which corresponds to a specific set of independent random variables.

Keyword: hypothesis testing, set of independent random variables, multidimensional random variable, pattern recognition algorithms, kernel probability density estimate, bandwidths selection of the kernel functions, antikurtosis coefficient, skewness coefficient, information graph

Введение. Формирование наборов независимых случайных величин является необходимым при уменьшении размерности задач обработки информации и синтеза эффективных алгоритмов принятия решений. Априорная информация о независимости случайных величин позволяет повысить аппроксимационные свойства непараметрической оценки плотности вероятности по сравнению с ядерной статистикой для зависимых переменных [1–3]. Полученные в этих работах результаты подтверждаются при исследовании асимптотических свойств непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности ядерного типа в задаче распознавания образов [4].

Традиционная методика проверки гипотезы о независимости случайных величин основана на χ^2 -критерии Пирсона. Однако его применение включает трудно формализуемый этап разбиения области значений случайных величин на многомерные интервалы и требует больших объемов исходных статистических данных, что связано с переходом от непрерывных к дискретным случайным величинам [5]. Методы дискретизации интервала значений одномерной случайной величины рассмотрены в [6–8]. В [7, 9] приведены формулы дискретизации области значений многомерной случайной величины с нормальным законом распределения, полученные на основе анализа асимптотических свойств гистограммы. В работе [10] обоснована методика оптимальной дискретизации области значений многомерной случайной величины. Эта методика согласуется с формулой выбора количества интервалов дискретизации для одномерной случайной величины с равномерным законом распределения (формула Хайхольда и Гаеде) [11], а её реализация сопряжена с оценением интеграла квадрата многомерной плотности вероятности. При оценивании этого функционала от плотности вероятности получены первые положительные результаты [12, 13]. Поэтому требуется разработать новую методику проверки рассматриваемой гипотезы, обеспечивающей обход проблемы декомпозиции области значений случайных величин. Подобная задача решается при проверке гипотезы о тождественности законов распределения случайных величин на основе непараметрического алгоритма распознавания образов [14–16]. В данных работах показана возможность замены задачи проверки гипотезы о распределениях случайных величин на задачу проверки гипотезы о равенстве ошибки распознавания образов определенному пороговому значению.

Цель настоящей статьи – разработка методики формирования наборов независимых компонент многомерной случайной величины на основе использования непараметрического алгоритма распознавания образов ядерного

типа, соответствующего критерию максимального правдоподобия.

Проверка гипотезы о независимости компонент двухмерной случайной величины. Пусть имеется выборка $V = (x_1^i, x_2^i, i = \overline{1, n})$ объема n , сформированная из независимых наблюдений двухмерной случайной величины $x = (x_1, x_2)$. Наблюдения x извлекаются из генеральных совокупностей, характеризующихся неизвестными плотностями вероятности $p(x_1)p(x_2)$ либо $p(x_1, x_2)$. Необходимо по статистическим данным V проверить гипотезу о независимости случайных величин x_1, x_2

$$H_0: p(x_1, x_2) \equiv p(x_1)p(x_2). \quad (1)$$

Для проверки гипотезы H_0 (1) будем решать двухальтернативную задачу распознавания образов. Классы Ω_1, Ω_2 соответствуют областям определения плотностей вероятностей $p(x_1)p(x_2), p(x_1, x_2)$. В этих условиях байесовское решающее правило, соответствующее критерию максимального правдоподобия, имеет вид

$$m(x): \begin{cases} x \in \Omega_1, & \text{если } p(x_1, x_2) < p(x_1)p(x_2); \\ x \in \Omega_2, & \text{если } p(x_1, x_2) > p(x_1)p(x_2). \end{cases} \quad (2)$$

В отличие от традиционной постановки задачи распознавания образов, при синтезе решающего правила (2) в условиях исходной неопределенности явно отсутствует обучающая выборка. Оценивание плотностей вероятностей $p(x_1)p(x_2), p(x_1, x_2)$ осуществляется по выборке V . Для этого используются непараметрические оценки плотностей вероятностей типа Розенблатта-Парзена [1–3, 17, 18]:

$$\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2) = \frac{1}{n^2 c_1 c_2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_1}\right) \Phi\left(\frac{x_2 - x_2^j}{c_2}\right); \quad (3)$$

$$\bar{p}(x_1, x_2) = \frac{1}{n c_1 c_2} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_1}\right) \Phi\left(\frac{x_2 - x_2^i}{c_2}\right), \quad (4)$$

где c_1, c_2 – коэффициенты размытости ядерных функций $\Phi(u_v), v = 1, 2$.

В статистиках (3), (4) ядерные функции $\Phi(u_v)$ удовлетворяют условиям

$$0 \leq \Phi(u_v) < \infty; \quad \Phi(u_v) = \Phi(-u_v);$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(u_v) du_v = 1; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} u^m \Phi(u_v) du_v < \infty;$$

$$0 \leq m < \infty, \quad v = 1, 2.$$

Значения коэффициентов размытости c_1, c_2 ядерных функций убывают с увеличением объема n выборки статистических данных V .

Непараметрические статистики (3), (4) обладают свойствами асимптотической несмещенности и состоятельности [1, 2, 18]. Установлено, что минимальное значение среднего квадратического отклонения (СКО) $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2)$ от $p(x_1)p(x_2)$ с увеличением объема n исходных статистических данных стремится к нулю пропорционально значению $n^{-4/5}$. Порядок подобной сходимости непараметрической оценки $\bar{p}(x_1, x_2)$ к плотности вероятности $p(x_1, x_2)$ меньше и составляет $n^{-4/6}$. Априорные сведения о независимости случайных величин позволяют повысить порядок сходимости непараметрической оценки плотности вероятности ядерного типа.

С учётом выражений (2)–(4) непараметрическое решающее правило классификации случайных величин $x=(x_1, x_2)$ запишем как

$$\bar{m}(x): \begin{cases} x \in \Omega_1, & \text{если } \bar{p}(x_1, x_2) < \bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2); \\ x \in \Omega_2, & \text{если } \bar{p}(x_1, x_2) > \bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2). \end{cases} \quad (5)$$

В модификации непараметрического алгоритма распознавания образов (5) оптимальные коэффициенты размытости c_1, c_2 ядерных оценок плотностей вероятностей $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2), \bar{p}(x_1, x_2)$ выбираются по результатам анализа их аппроксимационных свойств.

Оптимальное значение коэффициента размытости c_v ядерных функций непараметрической оценки одномерной плотности вероятности для условия минимума СКО $\bar{p}(x_v)$ от $p(x_v)$ определяется формулой [18]:

$$c_v^* = \left[\|\Phi(u)\|^2 / (n \|p^{(2)}(x_v)\|^2) \right]^{1/5}. \quad (6)$$

Здесь $p^{(2)}(x_v)$ – вторая производная плотности вероятности $p(x_v)$ по x_v ;

$$\|\Phi(u)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^2(u) du; \quad \|p^{(2)}(x_v)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (p^{(2)}(x_v))^2 dx_v.$$

После несложных преобразований формулу (6) представим в виде

$$c_v^* = \beta_v \sigma_v n^{-1/5},$$

где σ_v – среднее квадратическое отклонение случайной величины x_v ;

$$\beta_v = \left(\|\Phi(u)\|^2 / (\sigma_v^5 \|p^{(2)}(x_v)\|^2) \right)^{1/5}.$$

Составляющая функционала β_v , определяемая выражением

$$\lambda_v = \sigma_v^5 \|p^{(2)}(x_v)\|^2,$$

является константой для ряда одномодальных плотностей вероятностей. Значение λ_v обусловлено видом плотности вероятности и не зависит от её параметров [19–27].

По данным вычислительных экспериментов для семейств одномерных логнормальных законов распределения авторами настоящей статьи определены оценки параметра

$$\bar{\beta}_v = 1,49 \exp(-0,589 \bar{\alpha}_v^{0,857}) + 0,021,$$

где $\bar{\alpha}_v = \sqrt{\bar{\delta}_v^2 + \bar{\eta}_v^2}$; $\bar{\delta}_v, \bar{\eta}_v$ – оценки коэффициентов соответственно контрэксцесса и асимметрии случайной величины $x_v, v=1, 2$.

Оптимальный коэффициент размытости ядерных функций в статистике $\bar{p}(x_v)$ оценим по формуле

$$\bar{c}_v^* = \bar{\beta}_v \bar{\sigma}_v n^{-1/5}, \quad v=1, 2. \quad (7)$$

Согласно предложенной методике и с учётом результатов исследований [27] для двухмерной случайной величины $x=(x_1, x_2)$ оценки оптимальных коэффициентов размытости ядерной статистики $\bar{p}(x_1, x_2)$ определим выражением

$$\bar{c}_v^* = \bar{\beta} \bar{\sigma}_v n^{-1/6}, \quad v=1, 2. \quad (8)$$

В формуле (8) параметр $\bar{\beta}$ принимает значение

$$\bar{\beta} = 1,498 \exp(-0,524 \bar{\alpha}^{0,809}) + 0,0356,$$

где $\bar{\alpha} = \sqrt{\bar{\delta}_1^2 + \bar{\delta}_2^2 + \bar{\eta}_1^2 + \bar{\eta}_2^2}$.

Полученные оценки функционалов $\beta_v, v=1, 2$, и $\bar{\beta}$ уточняют результаты исследований [27–29].

Оценим вероятности ошибок распознавания образов p_1, p_2 непараметрического решающего правила распознавания образов (5) по статистическим данным V . При этом будем учитывать оценки коэффициентов размытости (7), (8) ядерных статистик $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2), \bar{p}(x_1, x_2)$.

Значения оценок $\bar{p}_t$ вычисляются в режиме «скользящего экзамена» по выборке V в предположении, что её элементы принадлежат классу Ω_t :

$$\bar{p}_t = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1(\delta(j), \bar{\delta}(j)),$$

где $1(\delta(j), \bar{\delta}(j))$ – индикаторная функция; $\delta(j)=t$ – указания типа $x^j=(x_1^j, x_2^j) \in \Omega_t$; $\bar{\delta}(j)$ – «решение» алгоритма (5) о принадлежности ситуации x^j к одному из классов $\Omega_t, t=1, 2$.

При вычислении $\bar{p}_t$ в соответствии с методикой «скользящего экзамена» ситуация $x^j=(x_1^j, x_2^j)$ из выборки V , которая контролируется по алгоритму (5), исключается из процесса формирования статистик (3), (4).

При формировании значений $\bar{p}_t$ индикаторная функция определяется как

$$1(\delta(j), \bar{\delta}(j)) = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta(j) = \bar{\delta}(j); \\ 1, & \text{если } \delta(j) \neq \bar{\delta}(j). \end{cases}$$

Сравним значения $\bar{p}_1, \bar{p}_2$ в предположении, что элементы выборки V принадлежат классам Ω_1, Ω_2 соответственно. Гипотеза H_0 выполняется, если $\bar{p}_1 < \bar{p}_2$. Данное утверждение

справедливо, так как при независимости случайных величин в областях Ω_1, Ω_2 определения оценок плотностей вероятностей $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2), \bar{p}(x_1, x_2)$ выполняется соотношение $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2) > \bar{p}(x_1, x_2)$ с оценкой вероятности ошибки $\bar{p}_1$. В противном случае при $\bar{p}_2 < \bar{p}_1$ случайные величины x_1, x_2 являются зависимыми.

Вероятности байесовских ошибок p_1, p_2 распознавания классов являются линейными функционалами от плотностей вероятностей $p(x_1)p(x_2), p(x_1, x_2)$ соответственно. Так как непараметрические оценки указанных плотностей вероятностей обладают свойствами асимптотической сходимости [4, 18], то предполагается асимптотическая сходимость статистических оценок $\bar{p}_1, \bar{p}_2$ к p_1, p_2 .

При ограниченных объёмах n исходной выборки V возникает задача доверительного оценивания вероятностей ошибок распознавания образов. Для её решения можно использовать традиционную методику доверительного оценивания вероятностей [5] либо критерий Колмогорова-Смирнова [30], при котором отклонение $\bar{D}_{12} = |\bar{p}_1 - \bar{p}_2|$ сравнивается с пороговым значением $D_\beta = \sqrt{-\ln(\beta_0/2)/n}$. Здесь β_0 – вероятность (риск) отвергнуть гипотезу $H_0: p_1 \leq p_2$. Если выполняется соотношение $\bar{D}_{12} < D_\beta$, то гипотеза H_0 справедлива и риск её отвергнуть не превышает значения β_0 . При $\bar{D}_{12} > D_\beta$ гипотеза H_0 отвергается.

Методика формирования наборов компонент многомерной случайной величины. Имеется выборка наблюдений $V = (x_v^i, v=1, k, i=1, n)$ объёмом n , составленная из статистически независимых наблюдений компонент многомерной случайной величины $x = (x_v, v=1, k)$. Вид плотности вероятности $p(x)$ априори неизвестен. Требуется по статистическим данным выборки V , используя предложенный выше критерий проверки гипотез

$$H_{vj}: p(x_v, x_j) \equiv p(x_v)p(x_j) \quad (9)$$

для компонент $x_v, v=1, k, x_j, j=1, k, v > j$, сформировать наборы независимых случайных величин $x(t) = (x_v, v \in I_t), t=1, m$. Здесь I_t – множество номеров компонент, составляющих набор $x(t)$, а количество m наборов компонент случайной величины x неизвестно.

Предлагаемая методика состоит из трёх этапов.

Этап 1. В соответствии с приведёнными выше рекомендациями проверяют гипотезу H_{vj} типа (9) для каждой пары компонент (x_v, x_j) многомерной случайной величины $x = (x_v, v=1, k)$. Количество таких пар соответствует значению $0,5k(k-1)$.

Этап 2. По результатам этапа 1 строят информационный граф $G(X, A)$, где X – множество вершин, соответствующих компонентам случайной величины x ; A – множество рёбер. Если выполняется гипотеза H_{vj} , т. е. компоненты x_v, x_j являются независимыми, то между двумя вершинами x_v, x_j существует ребро.

Этап 3. Анализируют информационный граф $G(X, A)$ и определяют полные подграфы $G(X_t, A_t), t=1, m$. Если компоненты случайной величины x являются независимыми, то каждая пара вершин подграфа $G(X_t, A_t)$ имеет ребро. Обнаруживают полные подграфы с использованием алгоритмов

разрезания исходного графа, основанных на анализе его матрицы смежности [31]. Компоненты $x_v, v \in I_t$, соответствующие вершинам полного подграфа $G(X_t, A_t)$, образуют набор независимых случайных величин. При этом можно обнаружить ряд вариантов разбиения информационного графа.

Анализ результатов вычислительных экспериментов.

Проверим работоспособность предлагаемой методики при анализе данных вычислительного эксперимента. Исследуем эффективность процедуры формирования наборов независимых компонент от объёма n исходных статистических данных и степени зависимости случайных величин.

При организации вычислительных экспериментов статистические данные $V = (x_1^i, \dots, x_4^i, i=1, n)$ компонент x_1, x_2, x_3 многомерной случайной величины $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ принимаются независимыми. Их значения формируются с помощью датчиков с равномерным $p(x_1) = R(3; 1)$ и нормальными законами распределения $p(x_2) = N(3; 1), p(x_3) = N(3; 1)$, где $R(3; 1), N(3; 1)$ – законы распределения случайных величин с математическим ожиданием и СКО, равными соответственно трём и единице. Значения компоненты x_4 находят по одной или другой зависимости, определяемой различными условиями исследования:

$$x_4 = \varphi(x_1) = x_1^2 - 6x_1 + 10 + \varepsilon; \quad (10)$$

$$x_4 = \varphi_4(x_1, x_2) = x_1^2 - x_2^2 + 6(x_2 - x_1) + 20 + \varepsilon. \quad (11)$$

Здесь ε – значения случайной величины с нормальным законом распределения $N(0; 1)$.

Датчики случайных величин x_2, x_3 с нормальными законами распределения формируются на основе выражений

$$x_v = 3 + \left(\sum_{i=1}^r \varepsilon_0^i - 0,5r \right) 6/\sqrt{3r}, \quad v=2, 3,$$

где ε_0^i – значения случайных величин с равномерной плотностью вероятности на интервале $[0; 1]; r=12$.

Методика вычислительных экспериментов реализована в среде программирования Delphi-7. Для генерации случайной величины $\varepsilon_0 \in (0; 1)$ с равномерным законом распределения используется стандартная функция `gandom` и процедура `Randomize`, которая учитывает время дня как основу формирования псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения.

Объём n исходных статистических данных в вычислительных экспериментах составлял 100, 500, 1000. При конкретном объёме n исходных данных параметры $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{D}$ соответствуют зависимостям (10), (11). Значения параметров $\bar{p}_1, \bar{p}_2$ вычисляются 10 раз, а затем усредняются (таблица).

При относительно малых объёмах $n=100$ исходных статистических данных и использовании зависимости (10) значения $\bar{p}_1$ и $\bar{p}_2$ для пар случайных величин $(x_1, x_2), (x_1, x_3), (x_2, x_3), (x_2, x_4)$ и (x_3, x_4) достоверно не различаются. В этих условиях значения $\bar{D}_{12}, \bar{D}_{13}, \bar{D}_{23}, \bar{D}_{24}, \bar{D}_{34}$ меньше порогового $D_\beta = 0,192$ при риске $\beta_0 = 0,05$ отвергнуть гипотезу H_0 . По условиям вычислительного эксперимента эти парные наборы

компонент случайной величины априори являются независимыми. При малых объёмах исходных данных существует неопределённость принятия решений, что следует из анализа результатов проверки исследуемых гипотез. Данный вывод объясняется различием условий сходимости, например непараметрических оценок плотностей вероятности $\bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2)$, $\bar{p}(x_1, x_2)$, что подтверждается результатами исследований работ [1–3].

Если парные сочетания случайных компонент являются зависимыми, то предлагаемая методика в условиях рассматриваемого вычислительного эксперимента однозначно отвергает гипотезу $\bar{H}_0$. Этот вывод справедлив для компонент (x_1, x_4) при использовании в вычислительном эксперименте зависимости (10). В этом случае соблюдается неравенство $\bar{p}_1 > \bar{p}_2$, т. е. выполняется условие $\bar{p}(x_1, x_2) > \bar{p}(x_1)\bar{p}(x_2)$, и решение, которое принимается по правилу (5), является справедливым. Указанное условие достоверно, так как $\bar{D}_{14} < D_\beta$ при $\bar{D}_{14}=0,5$; $D_\beta=0,192$. С усложнением зависимостей между случайными величинами в условиях использования преобразования (11) при $n=100$ отмеченные выше закономерности сохраняются.

С увеличением объёма n исходных статистических данных V повышается эффективность предложенной методики проверки гипотез о независимости случайных величин. При объёме исходных данных $n=500$ гипотеза о независимости парных сочетаний случайных величин (x_1, x_2) , (x_1, x_3) , (x_2, x_3) , (x_3, x_4) выполняется, так как соответствующие им ошибки распознавания образов решающим правилом (5) связаны соотношением $\bar{p}_1 < \bar{p}_2$. Данное соотношение является достоверным для парных сочетаний (x_1, x_3) , (x_3, x_4) при использовании в вычислительном эксперименте зависимости (10) и риске $\beta_0=0,05$ отвергнуть гипотезу $\bar{H}_0$. Зависимость между компонентами (x_1, x_4) более значима при $\bar{D}_{14}=0,616$; $D_\beta=0,086$. При усложнении зависимости между случайными величинами (11) наблюдаются достоверная зависимость между (x_1, x_4) , (x_2, x_4) , а также достоверная независимость компонент (x_1, x_2) , (x_3, x_4) .

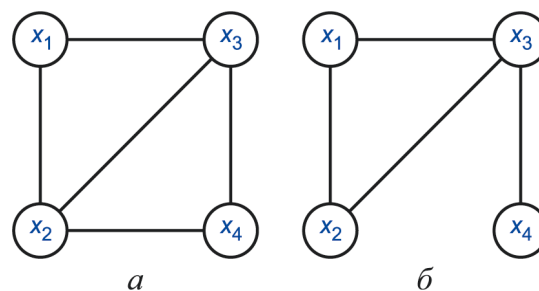
При объёме исходных данных $n=1000$ отмеченные выше закономерности для $n=500$ в основном сохраняются. Применение разработанной методики позволяет обнаружить противоречащие гипотезе $\bar{H}_0$ зависимые признаки с высоким уровнем достоверности при использовании в вычислительном эксперименте преобразований (10), (11). Если априори компоненты случайной величины x независимые, то соблюдается неравенство $\bar{p}_1 < \bar{p}_2$, однако в условиях рассматриваемого вычислительного эксперимента оно может быть достоверным либо недостоверным.

На основании данных таблицы сформируем информационный граф $G(X, A)$, где X – множество вершин, которые соответствуют компонентам $x_v, v=1, 4$ случайной величины x ; A – множество рёбер между вершинами графа. Между двумя вершинами x_i, x_j существует ребро, если соответствующие им компоненты являются независимыми (рисунок).

При использовании преобразования (10) существуют два варианта полных подграфов, которым соответствуют наборы независимых компонент (x_1, x_2, x_3) и (x_2, x_3, x_4) (см. рисунок а). Выбор конкретного варианта определяется

Результаты проверки гипотез о независимости парных сочетаний четырёхмерной случайной величины

n	Параметр	Формула	x_1, x_2	x_1, x_3	x_1, x_4	x_2, x_3	x_2, x_4	x_3, x_4
100	$\bar{p}_1$	(10)	0,51	0,52	0,75	0,59	0,57	0,59
		(11)	0,52	0,56	0,77	0,67	0,76	0,65
	$\bar{p}_2$	(10)	0,49	0,48	0,25	0,41	0,43	0,41
		(11)	0,48	0,44	0,23	0,33	0,24	0,35
	$\bar{D}$	(10)	0,02	0,04	0,50	0,18	0,14	0,18
		(11)	0,04	0,12	0,54	0,34	0,52	0,30
500	$\bar{p}_1$	(10)	0,460	0,432	0,808	0,48	0,498	0,442
		(11)	0,448	0,476	0,706	0,49	0,822	0,430
	$\bar{p}_2$	(10)	0,540	0,568	0,192	0,52	0,502	0,558
		(11)	0,552	0,524	0,294	0,51	0,178	0,570
	$\bar{D}$	(10)	0,080	0,136	0,616	0,04	0,004	0,116
		(11)	0,104	0,048	0,412	0,020	0,644	0,140
1000	$\bar{p}_1$	(10)	0,422	0,462	0,789	0,479	0,473	0,451
		(11)	0,495	0,475	0,725	0,458	0,813	0,480
	$\bar{p}_2$	(10)	0,578	0,538	0,211	0,521	0,527	0,549
		(11)	0,505	0,525	0,275	0,542	0,187	0,520
	$\bar{D}$	(10)	0,156	0,076	0,578	0,042	0,054	0,098
		(11)	0,010	0,050	0,450	0,084	0,626	0,040



Информационные графы $G(X, A)$ при $n=1000$ и использовании преобразований (10), (11) – соответственно а, б

Information graphs $G(X, A)$ for $n=1000$ and using transformation (10), (11) – a, b

методикой последующей обработки исходных данных. Если применяется преобразование (11), то обнаруживается один набор независимых случайных величин (x_1, x_2, x_3) (см. рисунок б). Полученные результаты соответствуют условиям организации вычислительного эксперимента на основании преобразований (10), (11).

Заключение. Предложенная методика формирования наборов независимых компонент многомерной случайной величины допускает её замену на проверку гипотез о независимости их парных сочетаний. Для решения этой задачи используется двухмерный непараметрический алгоритм распознавания образов ядерного типа, соответствующий критерию максимального правдоподобия. Данный подход позволяет обойти проблему декомпозиции значений случайных величин на многомерные интервалы. При оптимизации непараметрического алгоритма распознавания образов целесообразно применять быстрые алгоритмы выбора коэффициентов размытости, что особенно важно при обработке данных большого объёма. По результатам проверки гипотез о независимости двухмерных случайных величин

можно построить информационный граф, вершины которого соответствуют случайным величинам, а рёбра определяют их независимость. Декомпозиция информационного графа на полные подграфы позволяет обнаруживать различные варианты наборов независимых компонент многомерной случайной величины. Выбор конкретного набора определяется принятой процедурой последующей обработки исходных данных.

По результатам вычислительного эксперимента установлено, что предложенная методика особо чувствительна к обнаружению зависимых случайных величин, что свойственно малым и большим объёмам исходных статистических данных. В условиях малых объёмов значений четырёхмерной случайной величины (при $n < 500$) нельзя принять однозначное решение о независимости случайных величин. При $n \geq 500$ в условиях вычислительного эксперимента можно достоверно обнаружить зависимые компоненты четырёхмерной случайной величины. Независимые случайные величины в этих условиях определяются с различной степенью достоверности при ограниченных объёмах исходных статистических данных. Перспективным направлением дальнейших исследований является сравнение предложенной методики с традиционной, основанной на использовании критерия Пирсона при различных формулах дискретизации области значений случайных величин.

Полученные результаты создают основу синтеза многоуровневой непараметрической системы, где каждый уровень соответствует конкретному набору независимых случайных величин. Подобные системы являются эффективными при обработке данных большого объёма.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-41-240001.

Список литературы

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической оценки многомерной плотности вероятности независимых случайных величин // Информатика и системы управления. 2012. Т. 31. № 1. С. 166–174.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка плотности вероятности независимых случайных величин // Информатика и системы управления. 2011. Т. 29. № 3. С. 118–124.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Влияние априорной информации о независимости многомерных случайных величин на свойства их непараметрической оценки плотности вероятности // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 48. № 2.1. С. 164–167.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической решающей функции при наличии априорных сведений о независимости признаков классифицируемых объектов // Автометрия. 2012. Т. 48. № 4. С. 112–119.
5. Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. М: Физматлит, 2002. 496 с.
6. Sturges H. A., *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, pp. 65–66.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
7. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New York, Wiley, 1992, 317 p.
8. Hacine-Gharbi A., Ravier P., Harba R., Mohamadi T., *Pattern Recognition Letters*, 2012, vol. 33, no. 10, pp. 1302–1308.
<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.02.022>
9. Devroye L., Lugosi G., *Test*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1007/BF02603004>
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 16–20.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-16-20>
11. Heinhold I., Gaede K., *Ingenieur statistic*, München-Wien, Springer Verlag, 1964, 352 p.
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическое оценивание квадратического функционала многомодальной плотности вероятности // Метрология. 2019. № 3. С. 17–29.
<https://doi.org/10.32446/0132-4713.2019-3-17-29>
13. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание параметров формулы оптимальной дискретизации области значений двумерной случайной величины // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 9–13.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-5-9-13>
14. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // Автометрия. 2010. Т. 46. № 6. С. 47–53.
15. Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение эмпирической и теоретической функций распределения случайной величины на основе непараметрического классификатора // Автометрия. 2012. Т. 48. № 1. С. 45–49.
16. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотез о распределениях многомерных спектральных данных с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 2. С. 238–244. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-238-244>
17. Parzen E., *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076.
18. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14. №1. С. 156–161.
19. Silverman B. W., *Density estimation for statistics and data analysis*, London, Chapman & Hall, 1986, 175 p.
20. Sheather S., Jones M., *Journal of Royal Statistical Society Series B*, 1991, vol. 53, no. 3, pp. 683–690.
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01857.x>
21. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597. <https://doi.org/10.1214/088342304000000297>
22. Terrell G. R., Scott, D. W., *Journal of the American Statistical Association*, 1985, vol. 80, pp. 209–214.
23. Jones M. C., Marron J. S., Sheather S. J., *Journal of the American Statistical Association*, 1996, vol. 91, pp. 401–407.
24. Scott D. W., *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2015, 384 p.
25. Лапко А. В., Лапко В. А. Модифицированный алгоритм быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных оценок

многомерных плотностей вероятностей // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 9–13.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-9-13>

26. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание интеграла от квадрата производных симметричных плотностей вероятностей одномерных случайных величин // Метрология. 2020. № 1. С. 15–27. <https://doi.org/10.32446/0132-4713.2020-1-15-27>

27. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание нелинейного функционала от плотности вероятности при оптимизации непараметрических решающих функций // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 14–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-14-20>

28. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый алгоритм выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической оценке плотности вероятности // Измерительная техника. 2018. № 6. С. 16–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-6-16-20>

29. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый алгоритм выбора коэффициентов размытости в многомерных ядерных оценках плотности вероятности // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 19–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-19-23>

30. Шаракианэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М.: Высшая школа, 1977. 248 с.

31. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

References

1. Lapko A. V., Lapko V. A., *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 166–174. (In Russ.)

2. Lapko A. V., Lapko V. A., *Informatika i sistemy upravleniya*, 2011, vol. 29, no. 3, pp. 118–124. (In Russ.)

3. Lapko A. V., Lapko V. A., *Sistemy upravleniya i informationnyye tekhnologii*, 2012, vol. 48, no. 2.1, pp. 164–167. (In Russ.)

4. Lapko A. V., Lapko V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 416–422. <https://doi.org/10.3103/S8756699012040139>

5. Pugachev V. S., *Probability theory and mathematical statistics*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 496 p. (In Russ.)

6. Sturges H. A., *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, pp. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>

7. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New York, Wiley, 1992, 317 p.

8. Hacine-Gharbi A., Ravier P., Harba R., Mohamadi T., *Pattern Recognition Letters*, 2012, vol. 33, no. 10, pp. 1302–1308. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.02.022>

9. Devroye L., Lugosi G., *Test*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1007/BF02603004>

10. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01579-0>

11. Heinholt I., Gaede K., *Ingenieur statistic*, München-Wien, Springer Verlag, 1964, 352 p.

12. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 769–775. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01693-z>

13. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 427–433. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1447-9>

14. Lapko A. V., Lapko V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 545–550. <https://doi.org/10.3103/S8756699011060069>

15. Lapko A. V., Lapko V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 37–41. <https://doi.org/10.3103/S8756699012010050>

16. Lapko A. V., Lapko V. A., *Computer Optics*, 2019; vol. 43, no. 2, pp. 238–244. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-238-244>

17. Parzen E., *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>

18. Epanechnikov V. A., *Theory of Probability & Its Applications*, 1969, vol. 14, no. 1, pp. 156–161. <https://doi.org/10.1137/1114019>

19. Silverman B. W., *Density estimation for statistics and data analysis*, London, Chapman & Hall, 1986, 175 p.

20. Sheather S., Jones M., *Journal of Royal Statistical Society Series B*, 1991, vol. 53, no. 3, pp. 683–690. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01857.x>

21. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597. <https://doi.org/10.1214/088342304000000297>

22. Terrell G. R., Scott, D. W., *Journal of the American Statistical Association*, 1985, vol. 80, pp. 209–214.

23. Jones M. C., Marron J. S., Sheather S. J., *Journal of the American Statistical Association*, 1996, vol. 91, pp. 401–407.

24. Scott D. W., *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2015, 384 p.

25. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 11, pp. 856–861. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01873-w>

26. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 171–176. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01768-2>

27. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 13–20. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01889-2>

28. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 540–545. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1463-9>

29. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 10, pp. 979–986. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01536-x>

30. Sharakshaneh A. S., Zheleznov I. G., Ivnikskij V. A., *Complex system*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 248 p. (In Russ.)

31. Christofides N., *Graph theory: an algorithmic approach*, London, Academic Press, 1975, 424 p.

Статья поступила в редакцию 17.02.2021; принята к публикации 18.05.2021.

Научная статья

УДК 004.032

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-10-15>

Оценка состояния сложной эргатической системы на примере системы обеспечения единства измерений

Илья Владимирович Красавин^{1✉}, Андрей Валерьевич Яшин²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, ¹i.krasavin@vniims.ru✉, ²Ayashin1@mail.ru

Аннотация. Оценка состояния системы обеспечения единства измерений является актуальной и необходима для мониторинга и прогнозирования состояния. Предложен подход к разработке методологии мониторинга и прогнозирования состояния системы обеспечения единства измерений, обеспечивающий учёт взаимного влияния подсистем друг на друга. Подход основан на методе анализа иерархий. Рассмотрена декомпозиция системы обеспечения единства измерений для дальнейшей обработки последовательности суждений лица (группы лиц), принимающего решение. Суждения основаны на парных сравнениях элементов декомпозиции. Описана методика обработки суждений группы экспертов в целях получения обобщённого суждения по парным сравнениям. Полученные результаты могут применяться при мониторинге состояния системы обеспечения единства измерений и прогнозировании измерительных потребностей экономики и общества.

Ключевые слова: система обеспечения единства измерений, мониторинг состояния, анализ иерархий

Для цитирования: Красавин И. В., Яшин А. В. Оценка состояния сложной эргатической системы на примере системы обеспечения единства измерений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 10–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-10-15>

Assessing the state of a complex ergatic system on the example of a system for ensuring the uniformity of measurements

Ilya V. Krasavin^{1✉}, Andrey V. Yashin²

^{1, 2} Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russia, ¹i.krasavin@vniims.ru✉, ²Ayashin1@mail.ru

Abstract. Assessment of the state of the system of ensuring the uniformity of measurements is an urgent task, the solution of which is necessary for monitoring and forecasting its state. The paper proposes an approach to the development of a methodology for monitoring the state of the system to ensure the uniformity of measurements and forecasting its state, which takes into account the mutual influence of subsystems on each other. The approach is based on the hierarchy analysis method. The decomposition of the system of ensuring the uniformity of measurements for further processing of the sequence of judgments of the person (group of persons) making the decision is considered. The judgments are based on paired comparisons of the decomposition elements. The method of processing the judgments of a group of experts in order to obtain a generalized judgment on paired comparisons is described. The obtained results can be used as part of monitoring the state of the system for ensuring the uniformity of measurements and forecasting the measurement needs of the economy and society.

Keywords: system for ensuring the uniformity of measurements, state monitoring, hierarchy analysis

Введение. Основные направления и приоритеты развития системы обеспечения единства измерений (далее – Системы) определены в Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г., которая утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 737-р. Одним из основных направлений и приоритетов развития Системы является создание механизма прогнозирования потребностей экономики и общества в измерениях, а отсутствие этого механизма отнесено к системным проблемам обеспечения единства измерений в России. Актуальность данной задачи была подтверждена Федеральным законом от 27 декабря 2019 г. № 496-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений».

В часть 2 статьи 21 (определяющей задачи Минпромторга России и Росстандарта) данного закона внесён дополнительный пункт 7, где указаны следующие задачи: организация мониторинга состояния Системы; прогнозирование измерительных потребностей экономики и общества. Решение этих задач обеспечивает формирование необходимых управленческих решений для перевода Системы в требуемое целевое состояние.

Согласно ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения» обеспечение единства измерений подразумевает деятельность, направленную на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, норм и средств, необходимых для достижения

состояния измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы. Совокупность субъектов, норм, средств и видов деятельности, предназначенная для обеспечения единства измерений, образует Систему.

Система – это сложная эволюционирующая эргатическая система, состояние которой оценивается по текущему состоянию в целом и по состоянию подсистем. К особенностям Системы как объекта исследований относят следующее: функционирование в условиях стремительно изменяющейся внешней среды, которая оказывает влияние на структуру Системы и выполняемые функции; невозможность построения «классической» математической модели, обладающей полнотой в части возможности оценки состояния; необходимость использования вербального описания ряда свойств; иерархичность.

Общей методологией решения подобных задач является системный подход. В методическом аппарате оценки состояния Системы необходимо учитывать взаимодействие между подсистемами и возможность преобразования вербального описания показателей в численные значения с целью дальнейшей обработки для принятия решений. Одним из методов, позволяющих реализовать указанные требования, является метод анализа иерархий [1–3].

Цель настоящей работы – формирование такой методологии оценки состояния Системы, которая при решении

задач мониторинга состояния обеспечивает учёт взаимного влияния элементов (подсистем) друг на друга.

Построение иерархической модели Системы. Метод анализа иерархий – математический инструмент системного подхода к решению проблем принятия решений. Сущность метода состоит в декомпозиции проблемы на более простые составляющие с дальнейшей обработкой методом парных сравнений последовательности суждений лица, принимающего решение. В результате можно получить относительную степень (интенсивность) взаимодействия элементов иерархии. Метод анализа иерархий включает процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетности критериев и нахождения альтернативных решений [4]. К основным этапам метода анализа иерархий относятся следующие:

- построение качественной модели проблемы в виде иерархии, включающей цель, альтернативные варианты достижения цели и критерии для оценки качества альтернатив;

- определение приоритетов всех элементов иерархии с использованием метода парных сравнений;

- синтез глобальных приоритетов альтернатив путём линейной свёртки приоритетов элементов иерархии;

- проверка суждений на согласованность;

- принятие решения на основе полученных результатов.

Рассмотрим применение метода анализа иерархий для оценки состояния Системы. Первым этапом метода анализа иерархии является декомпозиция задачи оценки состояния Системы. На первом (высшем) уровне находится общая



Рис. 1. Иерархическая модель оценки состояния системы обеспечения единства измерений (Системы): СИ – средства измерений; ЮЛ/ИП – юридические лица/индивидуальные предприниматели; ОЕИ – обеспечение единства измерений

Fig. 1. Hierarchical model for assessing the state of the system for ensuring the uniformity of measurements (System): SI – measuring instruments; LE/SP – legal entities/individual entrepreneurs; EUM – ensuring the uniformity of measurements

Таблица 1

Шкала относительной важности $I_{ОВ}$

$I_{ОВ}$	Определение (пояснение)
1	Равная важность (равный вклад двух видов деятельности в цель)
3	Умеренное превосходство (опыт и суждение дают лёгкое превосходство одному виду деятельности над другим)
5	Существенное или сильное превосходство (опыт и суждение дают существенное превосходство одному виду деятельности над другим)
7	Значительное превосходство (одному виду деятельности дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным)
9	Очень сильное превосходство (очевидность превосходства одного вида деятельности над другим подтверждается наиболее сильно)
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями (применяются в компромиссном случае)
$I_{ОВ}^{-1}$	При сравнении первого вида деятельности со вторым получено значение $I_{ОВ}$, тогда результатом сравнения второго вида деятельности с первым будет значение $I_{ОВ}^{-1}$

цель – оценка состояния, на следующем уровне – цели функционирования Системы: результаты измерений выражены в узаконенных единицах величин или в значениях, допустимых для принятых шкал измерений; показатели точности измерений не выходят за установленные границы [5–7].

На достижение данных целей направлены формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений (Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»): утверждение типов стандартных образцов или средств измерений (СИ); поверка СИ; метрологическая экспертиза; федеральный государственный метрологический надзор; аттестация методик (методов) измерений; аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

В составе Системы можно выделить следующие подсистемы: научную (фундаментальную и прикладную); правовую; организационную; нормативно-методическую; техническую. Таким образом, в первом приближении можно построить иерархическую модель, характеризующую состояние Системы (рис. 1). В полученной иерархии каждый элемент уровня зависит от всех расположенных ниже элементов, т. е. элемент вышестоящего уровня является критерием для элементов нижестоящего уровня, а элементы нижестоящего уровня – альтернативами для элементов вышестоящего уровня.

Определение приоритетов элементов иерархии с использованием метода парных сравнений. Следующим этапом является разработка и установление приоритетов критериев, а также построение и оценка альтернатив по каждому из критериев с целью выявления доминанты. Для этого элементы иерархии попарно сравнивают с использованием субъективных суждений. Субъективные суждения численно оценивают по шкале измерений относительной важности (ОВ) суждений и находят веса (интенсивности) каждого критерия. Для сравнения ОВ критериев на втором уровне по отношению к общей цели на первом уровне строят матрицу парных сравнений каждой альтернативы второго

Таблица 2

Пример согласованности случайных матриц

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ИС _p	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

уровня по отношению к цели первого уровня. Подобные матрицы строят для парных сравнений каждой альтернативы на третьем и четвертом уровнях по отношению к критериям второго и третьего уровней соответственно.

В перечень матриц парных сравнений ОВ критериев для иерархии, представленной на рис. 1, входят матрица парных сравнений для критерия «Состояние Системы» альтернатив второго уровня, две матрицы парных сравнений для критериев второго уровня и альтернатив третьего уровня, шесть матриц сравнения для критериев третьего уровня и альтернатив четвертого уровня.

Клетки матриц заполняют оценками или суждениями об интенсивности ОВ $I_{ОВ}$ сравниваемых отдельных подсистем (предметов) по отношению к верхней цели или верхнему критерию. В рассматриваемом случае оценки должны быть получены в результате субъективных, но продуманных суждений группы экспертов по данной проблеме. При этом целесообразно использовать шкалу измерения таких суждений, приведенную в табл. 1. Эффективность данной шкалы подтверждена большим количеством приложений, а правомочность доказана теоретически при сравнении со многими шкалами [4, 8–10].

По результатам сбора суждений экспертов строят матрицы парных сравнений размерностью $n \times n$:

$$W = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}.$$

Затем рассчитывают вектор локальных приоритетов $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, где

$$x_i = \sqrt[n]{\frac{w_i}{w_1} \frac{w_i}{w_2} \dots \frac{w_i}{w_n}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\frac{w_i}{w_1} \frac{w_i}{w_2} \dots \frac{w_i}{w_n}}.$$

Далее рассчитывают собственное значение $\lambda_{\max}$ матрицы W , индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС для контроля согласованности матрицы W по следующим формулам:

$$\lambda_{\max} = XY^T; Y = \left(\sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_1}, \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_2}, \dots, \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_n} \right);$$

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1); ОС = ИС / ИС_p,$$

где $ИС_p$ – показательное значение индекса согласованности матрицы размерностью n , заполненной при случайном моделировании (табл. 2).

При этом значение ОС не должно превышать 10 %, в противном случае необходимо исследовать задачу более детально и проверить суждения.

Примеры заполнения матриц парных сравнений для критериев К1 «Состояние Системы», К2 «Выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений» и К3 «Утверждение типов стандартных образцов или СИ» представлены в табл. 3–5. В табл. 3 приведены обозначения целей функционирования системы: Ц1 – выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным

шкалам измерений; Ц2 – нахождение показателей точности измерений в установленных границах.

В табл. 4 введены следующие обозначения форм государственного регулирования в области обеспечения единства измерений: Ф1 – утверждение типов стандартных образцов или СИ; Ф2 – поверка СИ; Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

Таблица 3

Матрица парных сравнений для критерия К1 альтернатив второго уровня

К1	Ц1	Ц2
Ц1	1	5 ⁻¹
Ц2	5	1

Таблица 4

Матрица парных сравнений для критерия К2 альтернатив третьего уровня

К2	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6
Ф1	1	7 ⁻¹	3 ⁻¹	7 ⁻¹	1	7 ⁻¹
Ф2	7	1	3 ⁻¹	5 ⁻¹	7 ⁻¹	1
Ф3	3	3	1	7	3 ⁻¹	3
Ф4	7	5	7 ⁻¹	1	7 ⁻¹	1
Ф5	1	7	3	7	1	7 ⁻¹
Ф6	7	1	3 ⁻¹	1	7	1

Таблица 5

Матрица парных сравнений для критерия К3 альтернатив четвертого уровня

К3	П1	П2	П3	П4	П5
П1	1	1	3 ⁻¹	3 ⁻¹	5 ⁻¹
П2	1	1	3 ⁻¹	1	5 ⁻¹
П3	3	3	1	3 ⁻¹	5 ⁻¹
П5	3	1	3	1	3 ⁻¹
П6	5	5	5	3	1

Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений (ЮЛ, ИП – юридические лица и индивидуальные предприниматели).

В табл. 5 приведены обозначения следующих подсистем Системы: П1 – научная (фундаментальная и прикладная); П2 – правовая; П3 – организационная; П4 – нормативно-методическая; П5 – техническая.

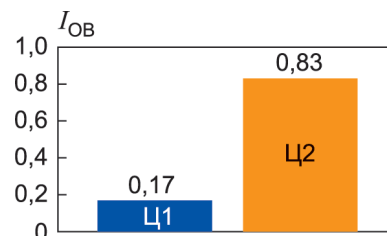


Рис. 2. Вектор приоритетов для критерия К1 «Состояние Системы»: Ц1 – выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений; Ц2 – нахождение показателей точности измерений в установленных границах

Fig. 2. Hierarchical model for assessing the state of the system for ensuring the unity of measurements priority vector for the criterion K1 “State of the system for ensuring the unity of measurements”:

C1 – expression of measurement results in legalized units of quantities or in values according to established measurement scales; C2 – finding measurement accuracy indicators within the established boundaries

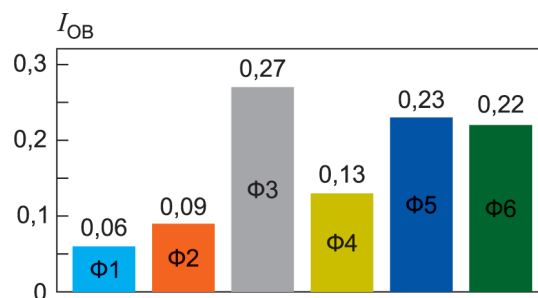


Рис. 3. Вектор приоритетов для критерия К2 «Выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений»:

Ф1 – утверждение типов стандартных образцов или СИ; Ф2 – поверка СИ; Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области ОЕИ; СИ, ЮЛ, ИП, ОЕИ – см. подписочную подпись к рис. 1

Fig. 3. Priority vector for the K2 criterion “Expression of measurement results in legalized units of quantities or in values according to established measurement scales”:

F1 – approval of types of standard samples or SI; F2 – SI verification; F3 – metrological examination; F4 – federal state metrological supervision; F5 – certification of measurement methods; F6 – accreditation of legal entities/sole proprietor for the performance of works and (or) the provision of services in the field of system for ensuring the uniformity of measurements

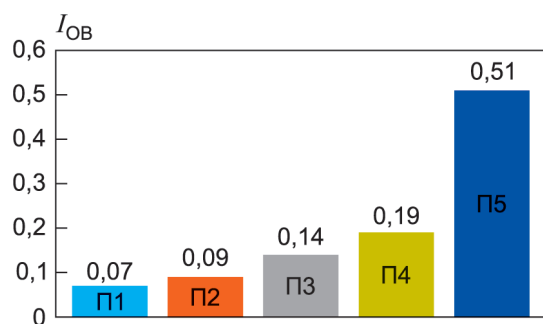


Рис. 4. Вектор приоритетов для критерия К3 «Утверждение типов стандартных образцов или СИ»; подсистемы системы обеспечения единства измерений:

П1 – научная (фундаментальная и прикладная); П2 – правовая; П3 – организационная; П4 – нормативно-методическая; П5 – техническая

Fig. 4. Priority vector for the criterion K3 "Approval of types of standard samples or SI"; subsystems of the system for ensuring the uniformity of measurements:

S1 – scientific (fundamental and applied); S2 – legal; S3 – organizational; S4 – normative and methodological; S5 – technical

Поскольку матрицы парных сравнений для критериев К1, К2, К3 заполнены в качестве примера, то для них не вычисляли индексы согласованности, однако рассчитали векторы приоритетов (рис. 2–4). Данные расчёты проводят для каждого уровня иерархии по всем матрицам парных сравнений, затем вычисляют глобальный вектор приоритетов. Полученные собственные векторы (один для каждого критерия) взвешивают с помощью соответствующей компоненты собственного вектора объединённого критерия, результаты суммируют и нормализуют. Таким образом, на основании опроса ряда экспертов для каждого критерия на различных уровнях и для общей цели можно получить обобщённые векторы приоритетов. В качестве экспертов могут выступить руководители региональных метрологических центров и национальных метрологических институтов. Для обеспечения корректности опроса экспертов целесообразно провести семинар, посвящённый особенностям заполнения опросных листов-анкет. Проведение опроса позволяет выявить подсистемы, оказывающие наибольшее влияние на состояние Системы с учётом взаимосвязей между подсистемами, что при дальнейшем их описании позволит получить достоверное представление о состоянии системы.

Заключение. Предложенный подход к разработке методологии мониторинга и прогнозирования состояния системы обеспечения единства измерений, обеспечивающий учёт взаимного влияния подсистем друг на друга и основанный на методе анализа иерархий, позволяет преобразовать субъективные суждения эксперта (группы экспертов) об относительной важности элементов (подсистем) системы в числовые значения для дальнейшей обработки и анализа и решить задачу комплексной оценки системы с учётом взаимодействия разнородных подсистем.

Изложенный подход может служить основой в дальнейших работах по мониторингу состояния системы обеспечения единства измерений.

Список литературы

1. Сухарев М. Г. Методы прогнозирования: Учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа, 2009. 208 с.
2. Трофимова Л. А., Трофимов В. В. Методы принятия управленческих решений. М.: Юрайт, 2014. 336 с.
3. Терелянский П. В. Непараметрическая экспертиза объектов сложной структуры. М.: Дашков и Ко, 2009. 221 с.
4. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1991. 226 с.
5. Krasavin I. V., Yashin A. V., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA 2020)*, 16–17 October 2020, Moscow, Russia, 2020, vol. 1027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>
6. Bryant Stephen, Joseph Kearns, *Public Administration Review*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 144–150. <https://doi.org/10.2307/975536>
7. Saaty T. L., Peniwati K., *Group Decision Making*, RWS Publications, Pittsburgh, 2008.
8. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: Пер. с англ. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.
9. Saaty T. L., Thomas L., Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors – the analytic hierarchy/network process, *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences RACSAM, Series A, Mathematics*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251–318.
10. Красавин И. В. Методология разработки концепции строительства системы метрологического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации // Материалы 40 Научно-технической конференции молодых учёных-военных метрологов «Актуальные вопросы военной метрологии», Мытищи, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, 2015.

References

1. Sukharev M. G., *Forecasting methods*, Textbook, Moscow, Russian State University of Oil and Gas Publ., 2009, 208 p. (In Russ.)
2. Trofimova L. A., Trofimov V. V., *Methods of making managerial decisions*, Moscow, Yurayt Publ., 2014, 336 p. (In Russ.)
3. Terelyansky P. V., *Nonparametric examination of objects of complex structure*, Moscow, Dashkov and Co. Publ., 2009, 221 p. (In Russ.)
4. Thomas L. Saaty, Kevin P. Kearns, *Analytical Planning. The Organization of Systems*, Pergamon Press, 1985, 226 p.
5. Krasavin I. V., Yashin A. V., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA 2020)*, 16–17 October 2020, Moscow, Russia, 2020, vol. 1027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>

6. Bryant Stephen, Joseph Kearns, *Public Administration Review*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 144–150.
<https://doi.org/10.2307/975536>

7. Saaty T. L., Peniwati K., *Group Decision Making*, RWS Publications, Pittsburgh, 2008.

8. Saaty T. L., *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process: the organization and prioritization of complexity*, RWS Publications, Pittsburgh, 2001. 370 p.

9. Saaty T. L., Thomas L., Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central

in mathematics for the measurement of intangible factors – the analytic hierarchy/network process, *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences RACSAM, Series A, Mathematics*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251–318.

10. Krasavin I. V., Methodology for developing the concept of building a metrological support system for the Armed Forces of the Russian Federation, *Materials of the 40th scientific and technical conference of young scientists-military metrologists "Actual issues of military metrology"*, Moscow region, FSBI "State Scientific and Research Center" of the Ministry of Defense of Russia, 2015.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; принята к публикации 02.06.2021.

Научная статья

УДК 621.3.088

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-16-22>

Метод измерений парциальных мощностей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Алексей Сергеевич Завгородний

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия, zavgor@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы принятия потребителями различных комбинаций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и контроля параметров каждого из сигналов отдельно. Существующие методы контроля парциальных характеристик сигналов основаны на корреляционной обработке, что приводит к потере измерительной информации и усреднению сигнала. Для устранения указанных недостатков разработан метод измерений парциальных мощностей навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением. Исходными данными для разработанного метода являются результаты измерений спектральной плотности мощности суммы сигналов, а также информация о форме парциальных спектральных плотностей мощности. Исследована математическая модель суммы сигналов с перекрывающимися спектрами. Показано, что мощности сигналов соотносятся как весовые коэффициенты при парциальных спектральных плотностях мощности. Составлена и решена методом Тихонова система уравнений относительно весовых коэффициентов. Практически исследованы метрологические характеристики метода. Результаты исследований можно использовать при решении задач контроля технического состояния навигационных космических аппаратов.

Ключевые слова: метод измерений, мощность сигналов, ГЛОНАСС, спектральная плотность мощности, сигналы с кодовым разделением

Для цитирования: Завгородний А. С. Метод измерений парциальных мощностей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 16–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-16-22>

The global navigation systems satellites signals partial powers measuring method

Aleksei S. Zavgorodnii

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia, zavgor@vniiftri.ru

Abstract. Different consumers of global navigation satellite systems signals are able to receive different combinations of them. For this reason, it is important to monitor the signal parameters separately. The existing partial signals characteristics measuring methods are based on correlation processing, which leads to the loss of measurement information and signal averaging. A method for measuring the partial powers of navigation signals with frequency and code division was developed. The initial data are the total spectral power density measurements results, as well as information on the shape of the partial spectral power densities. A mathematical model of the sum of signals with overlapping spectra was investigated. It was shown that the signal powers were related as coefficients at partial spectral power densities. A system of equations for the coefficients is compiled, its solution is presented by the Tikhonov method. A practical study of the metrological characteristics of the method has been carried out. The research results will be used during monitoring the navigation spacecraft technical condition.

Keywords: signal power measuring method, GLONASS, power spectral density, code division signals

Введение. Мощность радиосигнала – одна из основных радиотехнических характеристик. Для сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) эта характеристика нормирована в соответствующих интерфейсных контрольных документах^{1, 2}. Для ГЛОНАСС в диапазоне частот L1

¹ Интерфейсный контрольный документ, редакция 5.1 [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения: 01.06.2021).

² Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС – общее описание системы с кодовым разделением сигналов, редакция 1.0. [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения: 01.06.2021).

мощность сигналов с частотным разделением в приземном слое должна составлять не менее 161 дБВт, для перспективных сигналов с кодовым разделением –158,5 дБВт при приеме линейно-поляризованной антенной с коэффициентом усиления 3 дБ. Для оценки радиотехнических параметров сигналов ГНСС в 2015 г. во ВНИИФТРИ создан специализированный метрологический комплекс оценки энергетических характеристик навигационных сигналов (МК ОЭХ) и с этого времени регулярно измеряются характеристики сигналов навигационных космических аппаратов (НКА).

Развитие ГЛОНАСС в настоящее время идет по пути усложнения структуры сигнала. Перспективные НКА будут излучать сигналы с кодовым и частотным разделением одновременно.

Несущие частоты этих сигналов выбраны настолько близко друг к другу, что занимаемые полосы частот могут перекрываться. Более того, на каждой несущей частоте НКА излучает сигналы для гражданских и специальных потребителей³, т. е. в сравнительно узком диапазоне частот, в одной и той же полосе сосредоточены спектры нескольких сигналов. Разделение сигналов с перекрывающимися спектрами классической фильтрацией невозможно, средства измерений спектра и мощности могут измерять только суммарные характеристики этой группы сигналов (полосовую мощность, огибающую общей спектральной плотности мощности и т. д.). Для измерений параметров каждого сигнала отдельно требуется дополнительная обработка.

Цель статьи – разработка метода, позволяющего оценить парциальные мощности сигналов с перекрывающимися спектрами.

Математическая модель. Предполагается, что в диапазонах частот L1, L2 одновременно будут излучаться сигналы с частотным и кодовым разделением. Поскольку ситуация для обоих диапазонов идентичная, далее рассмотрим один диапазон частот L1. Пусть в диапазоне частот L1 в полосе Π излучаются четыре навигационных сигнала. Два из них – сигналы стандартной точности с частотным и кодовым разделением, структура которых известна и описана в открытых источниках. Структура двух других не приводится в открытой печати. (Далее будет показано, что эта информация для оценки энергетических характеристик навигационных сигналов не требуется.)

Навигационные сигналы s , излучаемые НКА, можно считать ортогональными в радиотехническом смысле [1], т. е. на достаточно большом интервале времени T (интервал T должен быть не меньше периодов повторения дальномерного кода сигналов s_i, s_j) для навигационных сигналов выполняется следующее условие:

$$\int_T s_i(t)s_j(t)dt \approx 0, \quad i \neq j,$$

где t – время (переменная интегрирования размерностью секунды).

Средняя мощность суммы двух ортогональных сигналов рассчитывается как

$$\begin{aligned} P_{12} &= \frac{1}{T} \int_T (s_1(t) + s_2(t))^2 dt = \\ &= \frac{1}{T} \left[\int_T (s_1(t))^2 dt + 2 \int_T s_1(t)s_2(t)dt + \int_T (s_2(t))^2 dt \right] = P_1 + P_2, \end{aligned}$$

где P_1, P_2 – мощности ортогональных сигналов.

Аналогично можно показать, что суммарная мощность четырёх сигналов также является алгебраической суммой их мощностей. Суммарную мощность P_Σ сигналов в полосе

Π и огибающую спектральной плотности мощности (СПМ) S_Σ суммы сигналов можно непосредственно измерить анализатором сигналов. Эти величины связаны соотношением

$$P_\Sigma = \int_\Pi S_\Sigma(\omega) d\omega,$$

где ω – циклическая частота (переменная интегрирования размерностью радиан в секунду).

Также P_Σ можно выразить как сумму мощностей P_i ортогональных сигналов, каждая из которых – интеграл от собственной парциальной СПМ сигнала:

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^4 P_i = \sum_{i=1}^4 \left[\int_\Pi S_i(\omega) d\omega \right] = \int_\Pi \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega,$$

где S_i – СПМ четырёх навигационных сигналов s_i .

Следовательно, огибающую СПМ всех ортогональных сигналов в полосе Π можно найти как сумму их СПМ:

$$P_\Sigma = \int_\Pi S_\Sigma(\omega) d\omega = \int_\Pi \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega; \quad (1)$$

$$S_\Sigma(\omega) = \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega.$$

СПМ S_i сигнала зависит от временной реализации сигнала, т. е. от вида модуляции. Навигационные сигналы представляют собой сигналы с фазовой манипуляцией различного вида и сложности (как сигналы с частотным разделением, так и перспективные сигналы с кодовым, а также сигналы с цифровым смещением частоты – так называемые ВОС-сигналы (binary offset carrier modulated) [2]). Это означает, что S_i можно выразить как

$$S_i(\omega) = \left| \int_T s_i(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = \left| \int_T A_i \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (2)$$

где A_i – амплитуда сигнала (постоянна для сигналов с классической фазовой модуляцией); φ_i – слагаемое фазы сигнала, определяющее вид модуляции.

Интеграл в (2) представляет собой прямое преобразование Фурье от временной реализации сигнала и называется его спектральной плотностью или спектром. Поскольку амплитуда – величина постоянная и строго положительная, то её можно вынести за знак интеграла и модуля:

$$\begin{aligned} S_i(\omega) &= \left| A_i \int_T \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = \\ &= A_i^2 \left| \int_T \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = A_i^2 f_i(\omega). \end{aligned}$$

Таким образом, СПМ представим как произведение константы и некоторой функции частоты, которую найдём как квадрат от прямого преобразования Фурье сигнала с единичной амплитудой. Если известна СПМ f_i (а значит, и результат интегрирования СПМ в полосе Π), то задача

³ Интерфейсный контрольный документ для сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L1, редакция 1.0. [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения 01.06.2021).

измерений мощности P_i сигнала сводится к определению константы A_i^2 , это следует из соотношения (1):

$$P_i = \int_{\Omega} S_i(\omega) d\omega = \int_{\Omega} A_i^2 f_i(\omega) d\omega = A_i^2 \int_{\Omega} f_i(\omega) d\omega.$$

Для смеси навигационных сигналов различной мощности запишем

$$P_{\Sigma} = \int \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega = \int \sum_{i=1}^4 A_i^2 f_i(\omega) d\omega \Rightarrow S_{\Sigma}(\omega) = \sum_{i=1}^4 A_i^2 f_i(\omega).$$

Форма f_i СГМ навигационных сигналов стандартной точности определяется исходя из их структуры согласно (2), однако к определению f_i возможен и другой подход. Во ВНИИФТРИ для калибровки навигационной аппаратуры потребителя широко применяют имитаторы навигационных сигналов [3]. Настройки имитаторов позволяют воспроизводить различные комбинации сигналов ГНСС. Для исследования характеристик сигналов имитатор настраивают на воспроизведение сигналов одного НКА, затем сигналы включаются по одному (остальные выключены). Таким образом, с помощью анализатора сигналов измеряют и записывают усредненную форму $S_i(\omega)$ для каждого навигационного сигнала отдельно. После сравнения результатов записи с теоретическими оценками на основании (2) для сигналов стандартной точности рассчитывают поправочные коэффициенты для амплитуд, т. е. получают оценки формы f_i для всех навигационных сигналов.

Анализатор сигналов позволяет измерить суммарную мощность P_{Σ} всех сигналов в полосе, а также получить огибающую СПМ S_{Σ} (рис. 1). С учётом сказанного выше запишем

$$S_{\Sigma}(\omega) = A_1^2 f_1(\omega) + A_2^2 f_2(\omega) + A_3^2 f_3(\omega) + A_4^2 f_4(\omega). \quad (3)$$

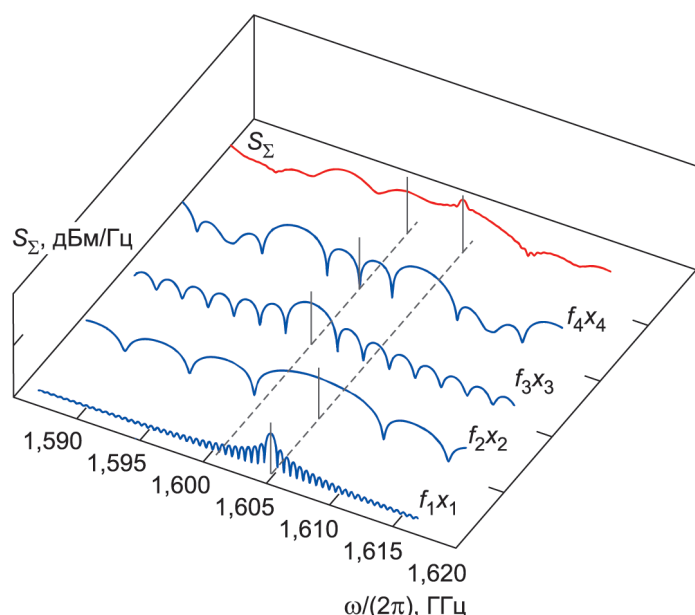


Рис. 1. Математическая модель $S_{\Sigma}(\omega)$

Fig. 1. Math model of $S_{\Sigma}(\omega)$

Для удобства обозначим набор неизвестных квадратов амплитуд как $x_j = A_j^2$.

Мощности сигналов в общем случае различны, набор констант x_i неизвестен. Для нахождения четырёх неизвестных x_i необходимо составить четыре уравнения, связывающие x_i друг с другом и с измеренными P_Σ или S_Σ . Равенство (3) должно выполняться на любой частоте в пределах полосы Π . При подстановке в (3) четырёх различных значений частоты ω получим требуемую для решения задачи систему. В качестве частот ω_j для подстановки в (3) выберем: несущую частоту сигнала с частотным разделением; несущую частоту сигнала с кодовым разделением; частоту первого локального минимума в спектре сигнала стандартной точности с частотным разделением; частоту первого локального минимума в спектре сигнала стандартной точности с кодовым разделением. Выбор частот обусловлен особенностями формы f_i сигналов. С точки зрения решения задачи целесообразно рассматривать (3) в точках экстремумов, а не на пологих участках. В результате подстановки частоты ω_j получим систему линейных алгебраических уравнений из четырёх строк:

[illegible]

Запишем классическую систему линейных алгебраических уравнений в матричном виде:

$$F\mathbf{X}=\mathbf{S}, \quad (4)$$

где F – квадратная матрица коэффициентов $f_l(\omega_j)$; $\mathbf{X}$ – вектор-столбец неизвестных x_i ; $\mathbf{S}$ – вектор-столбец значений огибающей СПМ S_ζ на частотах ω_j . Решение (4) находят в виде [4]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{S}.$$

Однако радиотехнические шумы в тракте передачи сигнала, а также ненулевая погрешность измерений СПМ анализатором сигналов приводят к искажению формы СПМ S_{Σ} , следовательно, делают задачу (4) плохо обусловленной. Найти решение такой задачи можно с применением метода регуляризации по Тихонову [5]. В этом случае необходимо решить систему вида (подобную системе линейных алгебраических уравнений (4)):

$$(F + \alpha E)\mathbf{X} = \mathbf{S},$$

где α – параметр регуляризации; E – единичная матрица того же размера, что и F .

Оценку решения найдём в виде

$$\mathbf{X}_0 = (F + \alpha E)^{-1} \mathbf{S}$$

и рассчитаем так называемую «невязку» r , которая представляет собой норму (модуль в евклидовом смысле) разности

исходного вектора правой части $\mathbf{S}$ и рассчитанного по найденному решению $\mathbf{S}_0 = \mathbf{F}\mathbf{X}_0$:

$$\mathbf{r} = \|\mathbf{F}\mathbf{X}_0 - \mathbf{S}\|.$$

При этом параметр регуляризации α уменьшают до тех пор, пока не будет найден минимум невязки $\mathbf{r}$. Следует отметить, что оценённая по Тихонову невязка показывает расхождение измеренной S_Σ и результатов расчёта только в четырех точках – на выбранных частотах ω_j . Целесообразно использовать другой критерий – минимум среднего квадратического отклонения выборки разностей функции $S_\Sigma(\omega)$ и суммы четырёх зависимостей с весовыми коэффициентами x_i в пределах полосы Π .

После нахождения x_i значения парциальных мощностей рассчитаем по формуле

$$P_i = x_i \int_{\Pi} f_i(\omega) d\omega.$$

Эксперимент. Предложенный метод измерений опробован в ходе нескольких экспериментов. Рассмотрим схему эксперимента. Генератор, воспроизводящий навигационные сигналы с частотным и кодовым разделением одновременно, соединим кабелем непосредственно с анализатором сигналов. На первом этапе измерим мощность каждого навигационного сигнала отдельно, затем все сигналы включим одновременно. С помощью анализатора сигналов измерим суммарную мощность P_Σ сигналов в полосе и общую огибающую СПМ S_Σ в диапазоне частот L1.

Произведём измерения при различных комбинациях мощностей навигационных сигналов и на разных литерных частотах (–7; –2; 6). Результаты измерений мощности с применением предложенного метода, а также полученные погрешности метода приведены в табл. 1. Пример $S_\Sigma(\omega)$ и суммы $f_i(\omega)$ с рассчитанными весовыми коэффициентами x_i показан на рис. 2. Здесь и далее в таблицах введены следующие обозначения: $P_{\text{и}}$ – результат прямых измерений мощности сигнала анализатором; $P'_{\text{и}}$ – результат оценки мощности предложенным методом; $\Delta_{\text{м}} = P_{\text{и}}/P'_{\text{и}}$ – методическая составляющая погрешности измерений.

Методическая погрешность при работе на –2 литерной частоте существенно превысила предыдущие результаты. При детальном рассмотрении спектров отдельных сигналов (см. рис. 1) установлено, что при работе на –2 литерной частоте, во-первых, достигается полное перекрытие занимаемых полос сигналов, во-вторых, локальный минимум спектра сигнала стандартной точности с частотным разделением приходится очень близко к несущей частоте сигналов с кодовым разделением. Иными словами, два уравнения системы (4) становятся практически линейно зависимыми, а значит, обусловленность системы уравнений (4) резко ухудшается, как следствие – растёт методическая погрешность. Выходом из этой ситуации является выбор опорных частот ω_j таким образом, чтобы, с одной стороны, они находились достаточно далеко друг от друга для обеспечения линейной независимости строк (4), а с другой стороны – частоты по-прежнему должны находиться в точках экстремумов f_i .

В целях дальнейших исследований метрологических характеристик разработанного метода был проведён ряд экспериментов. Далее приведены результаты трёх наиболее показательных экспериментов.

В первом эксперименте при выборе нового набора частот ω_j погрешность удалось уменьшить до 0,9 дБ (табл. 2), сигналы с частотным разделением излучаются на –2 литерной частоте. Поскольку достигнутый результат оптимистичен, можно ожидать дальнейшего уменьшения погрешности путём оптимального выбора ω_j . Этот вопрос требует более глубокого анализа и проработки.

Цель второго эксперимента – изучить работу алгоритма, если один из четырёх сигналов в полосе отсутствует (не излучается). Сигналы с частотным разделением излучаются на 3 литерной частоте, сигнал с СПМ P_4 не генерируется (см. табл. 2).

Следует отметить, что в результате решения системы (4) рассчитываются четыре неизвестные величины x_i .

Таблица 1

Мощность навигационных сигналов на различных литерных частотах

Номер сигнала	$P_{\text{и}}$, дБм	$P'_{\text{и}}$, дБм	$\Delta_{\text{м}}$, дБ
–7 литерная частота			
P_1	–43,17	–43,30	0,13
P_2	–47,60	–47,20	–0,40
P_3	–45,12	–45,10	–0,02
P_4	–40,95	–41,20	0,25
6 литерная частота			
P_1	–48,80	–48,88	0,08
P_2	–53,40	–53,45	0,05
P_3	–47,20	–47,18	–0,02
P_4	–53,70	–53,61	–0,09
–2 литерная частота			
P_1	–47,50	–47,46	–0,04
P_2	–47,65	–49,67	2,02
P_3	–47,55	–46,10	–1,45
P_4	–48,20	–48,60	0,40

S_Σ , дБм/Гц

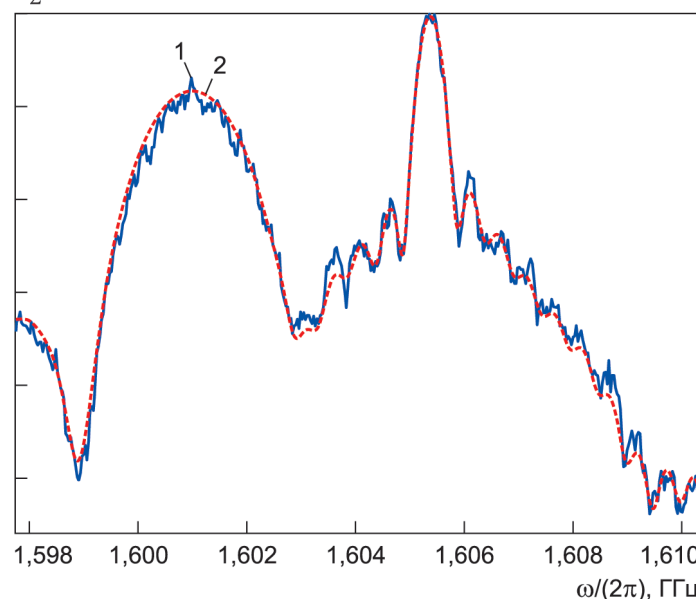


Рис. 2. Измеренная (1) и расчётная (2) суммарные спектральные плотности мощности S_Σ сигналов

Fig. 2. Measured and calculated signals total spectral power densities. Solid line – measured S_Σ , dotted line – calculation result

Таблица 2

Результаты измерений мощности навигационных сигналов в различных условиях

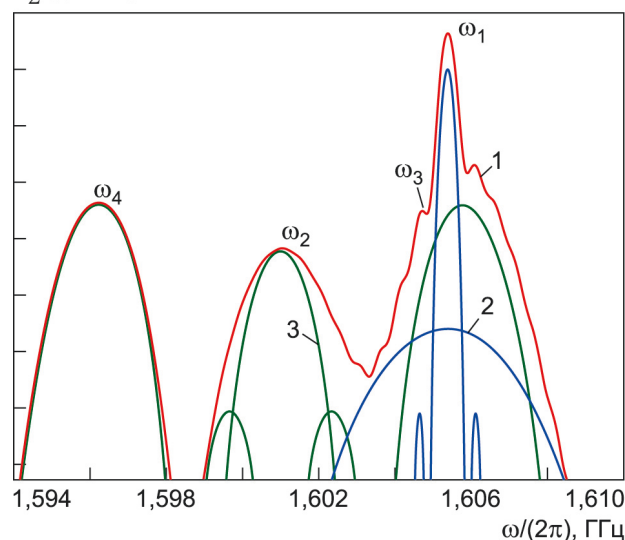
№ п/п	Условия эксперимента	СПМ	P_i , дБм	P'_i , дБм	Δ_m , дБ
1	Альтернативный выбор набора частот ω_j , сигналы с частотным разделением излучаются на –2 литерной частоте	P_1	–47,50	–46,4	0,90
		P_2	–47,65	–47,9	0,25
		P_3	–47,55	–48,2	0,65
		P_4	–48,20	–48,9	0,70
2	Сигналы с частотным разделением излучаются на 3 литерной частоте, сигнал с СПМ P_4 не генерируется	P_1	–47,50	–47,6	0,10
		P_2	–47,65	–48,1	0,45
		P_3	–47,55	–47,4	0,15
		P_4	–	–68,9	–
3	Сигналы с частотным разделением излучаются на 2 литерной частоте, сигналы с кодовым разделением отсутствуют	P_1	–35,5	–35,3	0,2
		P_2	–35,5	–35,8	0,3
		P_3	–	–62,2	–
		P_4	–	–62,2	–

Так как в результатах измерений анализатора присутствуют аддитивные шумы, то нельзя получить результат $x_i=0$ в отсутствие i -го сигнала. В итоге динамический запас метода составил не менее 20 дБ (два порядка). Это означает, что потенциально метод способен различить сигналы с разницей по мощности 0–17 дБ. Результаты наблюдений НКА показывают, что реальные отличия по мощности навигационных сигналов одного диапазона частот обычно составляют доли единицы децибел и не превосходят 0,5 и 3,5 дБ соответственно для ГЛОНАСС и GPS.

Также проведён третий эксперимент с реальным сигналом с выхода крупноапертурной антенной системы из состава МК ОЭХ-М. В настоящее время в составе орбитальной группировки ГЛОНАСС отсутствуют НКА, излучающие одновременно сигналы с кодовым и частотным разделением, однако метод должен оценивать парциальные мощности навигационных сигналов в любом сочетании, пусть даже в отсутствие сигналов с кодовым разделением. Суммарная мощность P_1+P_2 навигационных сигналов в полосе измерена с помощью анализатора сигналов. Мощность P_1 сигнала измерена согласно [6], разность суммарной мощности P_1+P_2 и мощности P_1 в силу ортогональности сигналов принята за мощность P_2 . Результаты измерений этого эксперимента приведены в табл. 2, сигналы с частотным разделением излучаются на 2 литерной частоте.

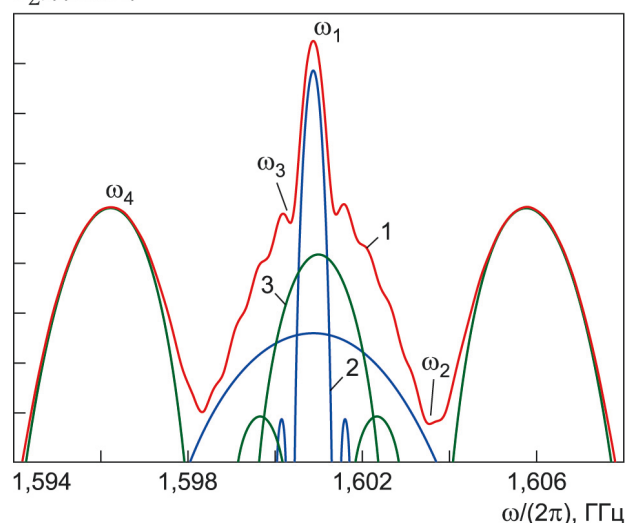
Сигналы с кодовым разделением отсутствовали. Однако алгоритм не мог не оценить их мощности, как это было показано в предыдущем эксперименте. Приведённые оценки меньше результатов измерений приблизительно на 27 дБ (почти на три порядка), при выбранном динамическом запасе 20 дБ эти значения можно считать пренебрежительно малыми (шумом измерений).

S_Σ , дБм/Гц



а

S_Σ , дБм/Гц



б

Рис. 3. Выбор опорных частот ω_1 – ω_4 метода на 6 (а) и –2 (б) литерных частотах:

1 – суммарная СПМ S_Σ сигналов; 2, 3 – формы спектров f_i сигналов соответственно с частотным и кодовым разделением

Fig. 3. Method reference frequencies selection for different channel frequencies (at the top for 6 channel, at the bottom for –2 channel). Curve 1 – total spectral power density of signals, lines 2 – signals spectra forms f_i with frequency division, lines 3 – f_i signals with code division

Анализ результатов. В настоящее время предложены несколько методов измерений парциальных мощностей навигационных сигналов [7, 8]. Большинство из них основано на корреляционной обработке или на длительном накоплении сигнала. Основные недостатки таких методов – необходимость знания структуры навигационных сигналов и трудности обработки больших выборок данных. Разработанный метод свободен от указанных недостатков. При необходимости с использованием имитатора можно получить форму спектра любого навигационного сигнала. Есть определённые сложности при вычислении абсолютных значений

мощности сигналов, но эта проблема решается калибровкой измерительного устройства. На вход измерителя при калибровке необходимо подать сумму навигационных сигналов известной и равной мощности, выполнить измерения с применением предложенного алгоритма, а разницу между измеренными значениями записать в виде калибровочных коэффициентов для каждого типа сигналов P_1-P_4 . Эту процедуру потребуется провести однократно. Вычислительные затраты на решение системы линейных алгебраических уравнений из четырёх строк выгодно отличаются от расчёта корреляционных интегралов или накопления тысяч отсчётов сигнала во временной области.

Также к достоинствам предложенного метода следует отнести сравнительную дешевизну его реализации. Во-первых, метод не требует специализированных и дорогостоящих опций измерительного оборудования или уникального программного обеспечения. Измерения $S_{\Sigma}(\omega)$ – прямое назначение анализаторов спектра, эта процедура хорошо известна и отработана. Практически все представленные на рынке анализаторы позволяют сохранять результаты измерений в электронном виде. Во-вторых, полоса измерений Π должна содержать основные лепестки спектров навигационных сигналов. Для ГЛОНАСС это 20–25 МГц. Такие полосы доступны для анализа даже с помощью бюджетных анализаторов сигналов.

В ходе экспериментов было установлено, что методическая погрешность зависит от выбора частот ω_j . При подстановке набора ω_j в уравнение (3) получается система уравнений, а также на этих частотах рассчитывается невязка по Тихонову, которая является критерием точности решения. На этапе разработки математической модели принято решение выбирать те частоты, на которых f_j имеют особенности и экстремумы (см. рис. 2). Формы $f_j(\omega)$ сильно отличаются, хотя максимумы могут совпадать (для сигналов с частотным разделением), локальные минимумы находятся на разных частотах. На оси частот можно найти такие участки, где спектральная мощность одного сигнала существенно превышает остальные – именно там предполагается располагать опорные частоты. Иными словами планируется выбирать частоты таким образом, чтобы матрица F в (4) приобретала диагональный вид или хотя бы стремилась к нему. Предложенный подход оправдал себя при работе на крайних литерах (6; –7), когда перекрытие полос сигналов стандартной точности минимально. Однако при полном перекрытии полос пришлось выбирать частоты ω_j по-другому (см. рис. 3). Если руководствоваться принятым правилом, то частоты ω_1, ω_2 практически сливаются. В дальнейшем предстоит продолжение исследования метода и разработка критериев оптимального выбора частот ω_j для всех литерных частот ГЛОНАСС, а также различных сочетаний мощностей навигационных сигналов.

К недостаткам метода следует отнести чувствительность метода к форме измеренной огибающей $S_{\Sigma}(\omega)$. Искажение $S_{\Sigma}(\omega)$, особенно на частотах ω_j , приведёт к срыву решения системы (4). В случае узкополосной помехи достаточно выбрать ω_j на «чистых» участках полосы Π . По этой

причине на результаты измерений не повлияли особенности формы спектра реального сигнала, вызванные действием заградительного фильтра в передающем тракте НКА (вырезающего полосу частот в диапазоне L1), достаточно не выбирать опорные частоты ω_j в полосе заграждения этого фильтра. Однако если антенная система одновременно принимает сигналы хотя бы двух НКА, сигналы которых сравнимы по ширине занимаемых полос и по мощности, то $S_{\Sigma}(\omega)$ в пределах полосы Π будет искажена на всех частотах. Поэтому необходимо сформулировать требования к качеству анализируемого сигнала: в рассматриваемой полосе частот Π не должно быть сигналов других НКА, широкополосных помех и нежелательных излучений НКА. Исходя из результатов эксперимента по определению динамических характеристик метода, мощность помех должна быть меньше 0,01 мощности навигационных сигналов в этой полосе. При работе в тракте это условие легко выполняется, однако добиться пространственной селекции одного НКА и вместе с этим ослабить уровень приземных помех позволяют только направленные антенные системы.

При опробовании метода в лаборатории получены результаты для уровней мощности сигналов от –54 до –40 дБм. Однако типичные уровни мощности сигналов ГНСС на выходе антенн комплекса МК ОЭХ-М находятся в пределах –40...–30 дБм (см. описание проведённых экспериментов в табл. 2), т. е. на порядок больше модельных значений. Увеличение отношения сигнал-шум при работе с измерительной аппаратурой однозначно приводит к улучшению метрологических характеристик при измерениях. Как только перспективные НКА будут выведены на орбиту и включены в состав орбитальной группировки, предложенный метод будет опробован на реальном сигнале.

Заключение. Во ВНИИФТРИ предложен и опробован метод измерений парциальных мощностей излучаемых НКА одновременно навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением. Пределы методической погрешности измерений мощности составили от $\pm(0,1...0,25)$ дБ в условиях минимального перекрытия занимаемых сигналами полос до $\pm 0,9$ дБ при полном перекрытии.

Список литературы

1. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Ярлыков М. С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. М.: Радиотехника, 2017.
3. Печерица Д. С., Федотов В. Н. Калибровка имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 60–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-60-64>
4. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. 10-е изд., испр. М.: Айрис-пресс, 2011. 608 с.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.

6. Завгородний А. С., Печерица Д. С. Метод измерения мощности ортогональных составляющих сигналов ГНСС // Тез. докл. VII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. С. 152–155.

7. Донченко С. И., Денисенко О. В., Харисов В. Н., Пельтин А. В., Павлов В. С., Карутин С. Н. Технология мониторинга сигналов КА ГНСС с использованием метода временного накопления // Вестник метролога. 2019. № 4. С. 4–11.

8. Власов И. Б., Гаверилов А. И., Кушнир А. А., Пельтин А. В., Семенов Д. В., Мыкольников Я. В. Оценка параметров радионавигационных сигналов, результаты ОКР «Метрология» // Тез. докл. VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. С. 200–202.

References

1. Perov A. I., Kharisov V. N., *GLONASS: principles of construction and functioning* [GLONASS: Printsipy Postroeniya i Funktsionirovaniya], Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)

2. Yarlykov M. S., *Meander noise-like signals (BOS signals) and their varieties in satellite radio navigation systems* [Meandrovye

shumopodobnye signaly (BOC-signaly) i ikh raznovidnosti v sputnikovykh radionavigatsionnykh sistemakh], Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. (In Russ.)

3. Pecheritsa D. S., Fedotov V. N., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 824–830.
<https://doi.org/10.1007/s11018-018-1509-z>

4. Pis'mennyj D. T., *Lecture notes in higher mathematics: full course* [Konspekt lekcij po vysshej matematike: polnyj kurs], Moscow, Ajris-press Publ., 2011, 608 p. (In Russ.)

5. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya., *Methods for solving ill-posed problems* [Metody resheniya nekorrektnykh zadach], Moscow, Nauka Publ., 1979. (In Russ.)

6. Zavgorodnii A. S., Pecheritsa D. S., *Metrologiya vremeni i prostranstva*, Proceedings of VII symposium, Mendeleevo, FSUE “VNIIFTRI”, 2014, pp. 152–155. (In Russ.)

7. Donchenko S. I., Denisenko O. V., Harisov V. N., Pel'tin A. V., Pavlov V. S., Karutin S. N., *Vestnik Metrologa*, 2019, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.)

8. Vlasov I. B., Gavrilov A. I., Kushnir A. A., Pel'tin A. V., Seменов D. V., Mykol'nikov Y. V., *Metrologiya vremeni i prostranstva*, Proceedings of VIII symposium, Mendeleevo, FSUE “VNIIFTRI”, 2016, pp. 200–202. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 22.06.2021; принята к публикации 29.06.2021.

Определение размера капель спрея методом вейвлет-анализа интерферометрических изображений

Родион Александрович Степанов^{1✉}, Владимир Геннадьевич Баталов²

^{1, 2} Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹rodion@icmm.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8098-0720>

²vbatalov@icmm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7941-1141>

Аннотация. Освещены вопросы оптимизации процессов сгорания топлива в зависимости от распыляющей способности форсунок ракетных и авиационных двигателей. На примере факела топливной форсунки рассмотрена задача определения размера капель спрея оптически прозрачной жидкости IPI-методом, основанным на анализе интерферометрических изображений частиц. Предложен метод анализа IPI-образа капли с применением непрерывного вейвлет-преобразования. Пространственное распределение вейвлет-коэффициентов использовано для введения интегральной меры, аналогичной спектральной плотности сигнала. Достоверность оценённых размеров капель проверена по результатам обработки бликовых изображений, которые получены прямым оптическим GPT-методом по сфокусированным изображениям капель. Сфокусированные и интерферометрические изображения капель сняты одновременно. Размеры капель, полученные IPI-методом и обработанные с помощью вейвлет- и фурье-преобразований, сравнены с данными GPT-метода. Показано, что применение вейвлет-преобразования существенно уменьшает частоту возникновения систематической погрешности определения размера, наиболее характерной для крупных капель. Установлено, что вызывающие систематическую погрешность ложные максимумы в спектре Фурье обусловлены появлением искажений на границе интерферометрического образа капли. Показано, что отделить эти искажения от основного максимума в окрестности центра капли можно с помощью вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: спрей, размер капли, форсунка, параметры распыла, метод анализа интерферометрических изображений частиц, прямой оптический метод, анализ бликовых частиц, вейвлет-преобразование, фурье-преобразование

Для цитирования: Степанов Р. А., Баталов В. Г. Определение размера капель спрея методом вейвлет-анализа интерферометрических изображений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 23–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-23-27>

Determination of spray droplet size by wavelet analysis of interferometric images

Rodion A. Stepanov^{1✉}, Vladimir G. Batalov²

^{1, 2} Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

¹rodion@icmm.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8098-0720>

²vbatalov@icmm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7941-1141>

Abstract. The problem of size droplet determining by the Interferometric Particle Imaging (IPI) in a spray of an optically transparent liquid is considered. The measurements were carried out using the example of a fuel injector flame. A new method for analyzing the IPI image of a droplet using a continuous wavelet transform is proposed. The spatial distribution of wavelet coefficients is used to introduce an integral measure similar to the spectral density of the signal. As a reliable estimate of the droplet size, we considered the results by the Glare Point Technique (GPT), which were applied simultaneously. A comparative analysis of the sizes obtained using GPT and IPI showed that the application of the wavelet transform to IPI images, in comparison with the Fourier method, significantly reduces the frequency of occurrence of a systematic error in determining the size, which is most specific for large droplets. It was found that the false maxima in the Fourier spectrum causing these errors are due to the appearance of distortions at the boundary of the interferometric image of the droplet. The wavelet transform allows one to separate these distortions from the main maximum in the vicinity of the droplet center.

Keywords: spray, droplet size, nozzle, spray parameters, interferometric particle imaging, direct optical method, glare point technique, wavelet transform, Fourier transform

Введение. Процессы распыления жидкостей используются во многих отраслях производства в медицинской, топливной и энергетической промышленности. Образование спреев – сложный многофазный процесс, обычно осуществляемый с помощью форсунок. От распыляющей способности форсунок во многом зависит эффективность работы различных технических устройств, в частности авиадвигателей. В настоящее время в производственных условиях для определения расходных характеристик и равномерности распыла форсунок ракетных и авиационных двигателей применяется методика, описанная в [1] и основанная на сборе распыляемой жидкости секционными заборниками. По количеству жидкости в секциях судят о пространственном распределении расхода топлива. Это надёжный способ определения расходных характеристик потока, полная замена которому вряд ли когда-нибудь будет найдена. Однако для понимания и оптимизации процессов сгорания топлива необходимо знать не только расходные характеристики распыла, но и функции распределения (дисперсии) капель топлива по размерам и скоростям. По таким распределениям можно вычислять различные эффективные интегральные характеристики, например, зауэровский диаметр. Для получения функций распределения в настоящее время широко используются высокоинформативные неинвазивные полевые оптические методы [2].

Полевые оптические методы позволяют одновременно захватывать большую область факела распыла и обладают достаточно высоким разрешением, что позволяет исследовать спреи с относительно высокой плотностью капель воды [3]. В процессе распыла форсункой капли под действием поверхностного натяжения быстро превращаются в сферические

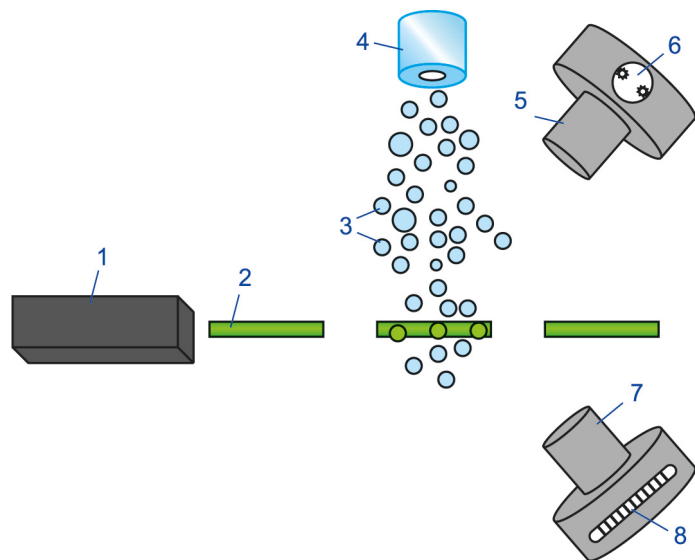


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 – импульсный лазерный нож; 2 – световые импульсы; 3 – факел распыла; 4 – форсунка; 5, 7 – цифровые камеры; 6, 8 – соответственно схематические изображения GPT- и IPI-образов капли

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – pulse laser blade; 2 – light pulses; 3 – spray flow; 4 – nozzle; 5, 7 – CCD cameras; 6, 8 – droplet GPT-primitive and IPI-primitive

объекты. В связи с этим для изучения параметров распыла прозрачных сред широко применяются оптические методы, основанные на анализе интерферометрических изображений частиц (interferometric particle imaging, IPI) [4] и распределения бликов (glare point technique, GPT) [5]. В этих методах капли освещаются светом лазера. Свет лазера, отражённый и преломленный каплей жидкости, образует на капле два почти диаметрально противоположных блика (точечных источника света). Расстояние между бликами равно диаметру капли с некоторым коэффициентом, зависящим от геометрических параметров оптической схемы (угла освещения и т. д.). Камера на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС), синхронизированная с лазером, регистрирует свет от этих бликов. Отличие методов IPI и GPT состоит в том, что в методе GPT камерой регистрируются сфокусированные изображения капель, которые в матрице камеры имеют вид парных бликов, а в методе IPI камера расфокусирована и регистрируются образы, являющиеся результатом интерференции света от точечных источников. В методе GPT диаметры d капель вычисляются непосредственно по расстоянию между бликами, а в методе IPI по периоду интерференционной картины:

$$d = 2\lambda g / [mhp n (\cos\theta/2 + 1)], \quad (1)$$

где λ – длина волны света (в данном случае $\lambda = 0,514$ мкм); g – относительное смещение камеры, обеспечивающее расфокусировку изображений капель; m – оптическое увеличение; h – размер пиксела матрицы; p – период интерференционной картины в пикселах; n – показатель преломления окружающей каплю среды (для воздуха $n \approx 1$); θ – угол наблюдения (в данном случае $\theta = 70^\circ$).

В процессе измерений определяемой величиной является период p , вычисляемый без применения специальных методов субпиксельной интерполяции с точностью до одного пиксела.

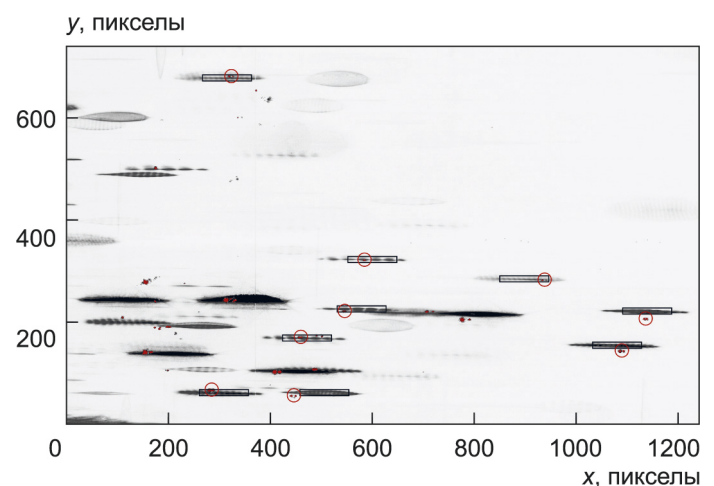


Рис. 2. Совмещённые IPI- и GPT-изображения показаны чёрным и красным цветом соответственно; прямоугольниками и кружками выделены «валидные» образы, соответствующие одной капле

Fig. 2. Combine IPI and GPT images shown in black and red, respectively. Rectangles and circles mark “valid” images corresponding to the same droplet

Относительную погрешность метода IPI можно уменьшить выбором оптического увеличения при настройке экспериментальной установки. Методы IPI и GPT с оценкой погрешностей описаны в работах [3, 6].

В [7] показано, что с увеличением пространственной плотности капель применение методов IPI, GPT к одному спрею может приводить к разным результатам распределения капель по размерам. Определение размеров по IPI-образам крупных капель плотных спреев проблематично, а применение GPT-метода даёт более надёжные результаты [8], но требует значительно большего пространственного разрешения по сравнению с методом IPI, что не всегда технически достижимо. К достоинствам IPI-метода относится и продвинутое программное обеспечение [6].

Цель настоящей работы – повысить точность IPI-метода за счёт обработки изображений с помощью вейвлет-преобразования вместо традиционного преобразования Фурье. Вейвлеты уже давно успешно применяются для анализа пространственно-временной структуры сигналов различной физической природы [9], в том числе для технических измерений [10]. Основное преимущество использования вейвлетов состоит в возможности оценки масштаба некоторой структуры, локализованной в физическом пространстве.

Измерительная установка. Для выяснения причины возникновения погрешностей, описанных в [7] при применении IPI-метода, и проверки нового метода необходимо иметь независимую от IPI, более надёжную оценку размера капли. Для этого параллельно с получением IPI-образов капель снимали их GPT-изображения. На рис. 1 приведена схема измерительной установки для определения размеров капель спреями GPT- и IPI-методами. Форсунка 4 распыляет дистиллированную воду и создаёт характерный факел 3. Импульсный лазер 1 короткими (длительностью около 10 нс) импульсами (вспышками) 2 светового излучения, развёрнутого в виде вертикальной плоскости толщиной примерно 1 мм, освещает факел. Цифровые камеры (4000×2672 пикселей) 5, 7, синхронизированные с лазером, расположены симметрично относительно освещённого сечения факела, настроены на одновременную экспозицию и фиксируют расфокусированные 8 и сфокусированные 6 образы капель. Симметричное расположение камер обеспечивает наблюдение одинаковой области факела распыла, что позволяет сопоставить GPT- и IPI-образы одних и тех же капель и таким образом сравнить результаты, полученные обоими способами. Далее в качестве проверочных использовали данные о размерах капель, полученные методом GPT.

Обработка IPI изображений с применением вейвлет- и фурье-преобразования. На предварительном этапе обработки IPI-изображений с помощью вейвлет-преобразования находили изолированные объекты, соответствующие

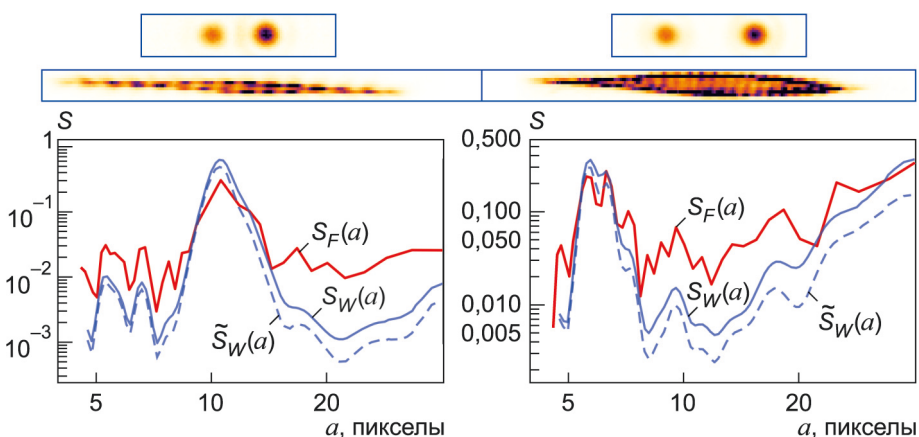


Рис. 3. GPT- и IPI-образы (соответственно сверху и снизу) капель и спектры с однозначным (слева) и неоднозначным (справа) положением максимума – спектр Фурье $S_F(a)$ и вейвлеты $S_W(a)$, $\tilde{S}_W(a)$

Fig. 3. GPT and IPI droplet images. Fourier $S_F(a)$ and wavelet spectra: $S_W(a)$ and $\tilde{S}_W(a)$. The left panel shows an example with an unambiguous maximum position, and the right panel shows an example with an ambiguous one

IPI-образам капель, которые затем сопоставляли с GPT-образами. Для этих целей применяли скользящий гауссовский фильтр:

$$\tilde{f}(x, y) = \int f(x', y') g(x' - x, y - y') dx' dy',$$

где $f(x, y)$ – двумерное распределение интенсивности яркости IPI-изображения; $g(x, y) = \exp(-[(x/\sigma_x)^2 + (y/\sigma_y)^2]/2)$ – гауссиана с параметрами σ_x, σ_y .

Для выделения капель на IPI-изображениях находили положения локальных максимумов $\sigma_{x_m}, \sigma_{y_m}$ в распределении $\tilde{f}(x, y)$, интенсивность которых выше некоторого порога δ . Значения $\delta, \sigma_{x_m}, \sigma_{y_m}$ подбирали эмпирически такими, чтобы отношение сигнал/шум составляло не менее трёх. Капли на GPT-изображениях выделяли методом, предложенным в [7]. Результат обработки двух совмещённых изображений, полученных на описанной выше установке, показан на рис. 2. Парные блики подобрали для GPT-образов примерно 50 % всех видимых объектов.

Основной этап обработки состоял в вычислении размеров капель. Как и в [7], размер капель по GPT-образам определяли по расстоянию между положениями максимумов пары бликов. Далее проводили спектральный анализ IPI-образов с применением вейвлет- и фурье-преобразований для нахождения периода интерференционной картины, который обратно пропорционален размеру капель [8]. Определяли коэффициенты фурье- и вейвлет-преобразований по формулам соответственно

$$\hat{f}(a) = \int_G f(x, y) \exp(2\pi i x/a) dx dy;$$

$$w(a, x, y) = \int_G f(x', y') \psi([x - x']/a, [y - y']/a) dx' dy',$$

где a – период волны; G – область IPI-образа капли; $\psi(x, y) = \exp(-[x^2 + y^2]/2 + 2\pi i x)$ – двумерная версия вейвлета Морле.

На основе полученных разложений для каждого отдельного IPI-образа вычисляли соответственно вейвлет- и фурье-спектры:

$$S_W(a) = \int_G |w(a, x, y)|^2 dx dy; \quad (2)$$

$$S_F(a) = |\hat{f}(a)|^2. \quad (3)$$

Положение максимума функций $S(a)$ определяет период интерференционной картины a^* , т. е. $S(a^*) = \max_a S(a)$. При необходимости линейные размеры капель можно рассчитывать по выражению (1) при $p = a^*$. Однако сравнивать значения a^* , полученные по формулам (2), (3), можно и в пикселах. В настоящей работе требуется выделить случаи, в которых применение фурье-преобразования приводит к значительной систематической погрешности определения максимума спектра.

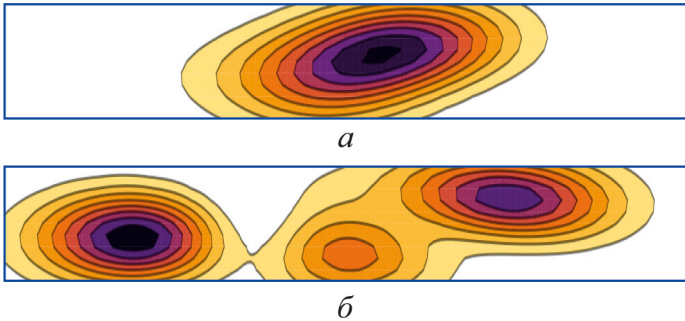


Рис. 4. Распределение вейвлет-коэффициентов на двух масштабах для капли, показанной на рис. 3 справа, при $a = 5,7$; $40,0$ – соответственно a , b

Fig. 4. Distribution of wavelet coefficients at two scales $a = 5,7$; $40,0$ (respectively a , b) for the droplet shown on the right panel in Fig. 3

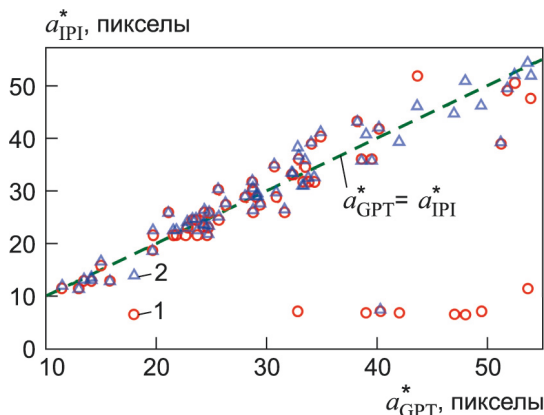


Рис. 5. Распределение капель по размерам, определённым методами обработки IPI-образов с использованием спектров Фурье (1) и вейвлетов (2)

Fig. 5. Distribution of droplets by their sizes, determined by different methods of IPI image processing: Fourier transform (1), wavelet transform (2)

На рис. 3 представлены типичные GPT- и IPI-образы капель. На рис. 3 слева все спектры имеют один выраженный максимум при $a^* = 11$ пикселей, при котором размеры, определённые методами GPT и IPI, близки. На рис. 3 справа значения локальных минимумов спектра находятся в окрестности $a^* = 6,3$ пикселей, что близко к правой границе спектра. Для фурье-спектра $S_F(a)$ значение на правой границе, хоть и незначительно, но все-таки больше: $S_F(6,3) \approx 0,26$, а $S_F(40) \approx 0,33$, а значит, метод IPI даёт ложный размер. Несмотря на то, что для вейвлет-спектра $S_W(a)$ «ложный» и «истинный» максимумы совпадают в пределах погрешности ($S_W(5,7) \approx S_W(39) \approx 0,36$), такой результат нельзя считать удовлетворительным.

Установить источник подобных погрешностей можно, если рассмотреть распределение вейвлет-коэффициентов в масштабах, где наблюдаются два максимума в спектре. Для правильного масштаба вейвлет-преобразования (рис. 4, a) максимум привязан к центру IPI-образа, а ложная составляющая доминирует на краях. Повысить вклад вейвлет-коэффициентов на масштабах, соответствующих правильному размеру капли, в интегральный спектр (2) можно за счёт локализации IPI-образа:

$$\tilde{S}_W(a) = \int_G |w(a, x, y)|^2 g(x - x_0, y - y_0) dx dy,$$

где (x_0, y_0) – координаты центра капли.

«Ложный» вклад в правой части спектра $\tilde{S}_W(a)$ (см. рис. 3) эффективно подавляется.

Сравнение и обсуждение результатов спектрального анализа. Авторы настоящей статьи не нашли в литературе примеров использования вейвлет-спектра IPI-образов по аналогии с фурье-спектром. Вейвлет-преобразование имеет ряд достоинств. Первое полезное свойство вейвлетов – возможность непрерывного изменения масштаба вейвлета, что позволяет более точно определять максимум по сравнению с дискретным набором периодов для фурье-коэффициентов. Дискретность особенно явно проявляется при больших значениях a , когда увеличивается расстояние между вершинами ломаной кривой фурье-спектра. При этом вейвлет-спектр остаётся гладким. Второе преимущество – пространственная локализация спектра. Авторами настоящей статьи предложено использовать именно это преимущество, которое даёт основное уточнение результатов обработки IPI-образов.

Результат обработки 10 последовательных кадров, на которых было выделено 63 капли, приведён на рис. 5. Для большинства капель IPI-размеры соответствуют GPT-размерам. Исключение составляют девять капель, для которых метод IPI с использованием преобразования Фурье дал систематическую погрешность. Вейвлет-преобразование также дало ошибочный результат, но только в одном из этих случаев. Эффект «ложного» максимума в большей степени касается капель относительно больших размеров.

Закключение. Разработка и верификация метода оценки размера капель по их IPI-образам выполнена в рамках общей методологии [7], включающей применение вейвлет-анализа как основного инструмента обработки и интерпретации

изображений, которые получены оптическими полевыми методами. Предложенная схема измерений позволила идентифицировать IPI- и GPT-образы, которые соответствуют одной и той же капле. Была выделена группа капель, для которых определение размера с применением преобразования Фурье даёт систематическую погрешность. Проанализировав распределения вейвлет-коэффициентов IPI-образов, установили, что данная погрешность возникает из-за неоднородной периодичности IPI-образа. Этот вывод послужил основанием для введения новой интегральной вейвлет-характеристики, которая в большинстве случаев дает корректную оценку размера капли.

Финансирование. Фундаментальные аспекты вейвлет-анализа разрабатывались в рамках государственного задания темы (номер гос. регистрации АААА-А19-119012290101-5). Исследование по практическому применению вейвлетов для IPI-метода выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00574.

Список литературы

1. Леонтьев С. Н., Новиков А. О., Ягодников Д. А. Использование цифровой измерительной техники для гидравлических испытаний форсунок // Наука и Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10. С. 161–170.
2. Tropea C., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011, vol. 43, pp. 399–426. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160721>
3. Баталов В. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. Оптические измерения размеров капель в реальных потоках // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). С. 40–47. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-3-40-47>
4. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 12, L. 13. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/101>
5. Van de Hulst H. and Wang R., *Applied optics*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004755>
6. Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
7. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 103, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.01.005>

8. Qieni L., Xiaoxue Y., Baozhen G., Tingting C., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, pp. 1038–1048. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001038>

9. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлет-анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. 176 с.

10. Филяк М. М., Четверикова А. Г., Каныгина О. Н., Анисина И. Н. Вейвлет-анализ изображений поверхности керамических материалов как метод измерения размеров её структурных элементов // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 50–54. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-50-54>

References

1. Leont'ev S. N., Novikov A. O., Yagodnikov D. A., *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 10 pp. 161–170. (In Russ.)
2. Tropea C., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011, vol. 43, pp. 399–426. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160721>
3. Batalov V. G., Stepanov R. A., Sukhanovsky A. N., *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 3 (37), pp. 40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-3-40-47>
4. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 12, L. 13. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/101>
5. Van de Hulst H. and Wang R., *Applied optics*, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004755>
6. Lozhkin Y. A., Bilsky A. V., Markovich D. M., *Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1134/S086986431101001X>
7. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 103, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.01.005>
8. Qieni L., Xiaoxue Y., Baozhen G., Tingting C., *Opt. Express*, 2018 vol. 26, pp. 1038–1048. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001038>
9. Koronovskij A. A., Hramov A. E., *Nepreryvnyj veyvletnyj analiz i ego prilozheniya*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 176 p. (In Russ.)
10. Filyak M. M., Chetverikova A. G., Kanygina O. N., Anisina I. N., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 130–134. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01761-9>

Статья поступила в редакцию 11.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Научная статья

УДК 535.5, 53.082.5

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-28-34>

Использование волоконно-оптического датчика для регистрации импульсного тока плазменного разряда

Александр Геннадьевич Бедрин¹, Александр Николаевич Жилин², Игорь Леонидович Ловчий³✉

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия

¹46@niioep.ru, <http://orcid/0000-0003-2638-966X>

²46@niioep.ru, <http://orcid/0000-0002-5666-0169>

³lovchy@niioep.ru✉, <http://orcid/0000-0002-8743-5407>

Аннотация. Рассмотрена проблема повышения точности регистрации формы импульса быстро изменяющегося тока мощного плазменного излучателя в условиях мощных электромагнитных наводок. Для регистрации сильнооточных импульсных разрядов предложено использовать поляризметрический волоконно-оптический датчик тока на основе световода типа Spun. С использованием указанного датчика тока реализована методика регистрации сильнооточных импульсных разрядов плазменного излучателя в режиме временного профилирования импульса тока двух высоковольтных ёмкостных накопителей с общей энергией до 1800 кДж. Описаны разрядная камера, схемы питания и формирования плазменного разряда. Приведены конструкция и принцип работы макетного образца двухпроходного поляризметрического волоконно-оптического датчика со световодом типа Spun и фарадеевским компенсатором взаимной оптической анизотропии. Представлены общая схема измерений токов, схема калибровки датчика и описан опыт использования макетного образца датчика для измерения мощных импульсных токов. Обсуждены особенности предварительной калибровки датчика. Результаты измерения тока оптическим и традиционными методами регистрации на основе пояса Роговского и датчиков Холла сравнены между собой и отмечено заметное увеличение точности воспроизведения формы импульса тока оптическим методом регистрации. Рассмотрены возможные варианты модернизации волоконно-оптического датчика для расширения диапазона регистрации тока.

Ключевые слова: магнетоплазменный разряд, пояс Роговского, датчик Холла, поляризметрический волоконно-оптический датчик тока, световод типа Spun

Для цитирования: Бедрин А. Г., Жилин А. Н., Ловчий И. Л. Использование волоконно-оптического датчика для регистрации импульсного тока плазменного разряда // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 28–34. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-28-34>

Using a fiber optic sensor for registration of pulsed plasma discharge current

Alexander G. Bedrin¹, Alexander N. Zhylin², Igor L. Lovchy³✉

^{1, 2, 3} Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

¹46@niioep.ru, <http://orcid/0000-0003-2638-966X>

²46@niioep.ru, <http://orcid/0000-0002-5666-0169>

³lovchy@niioep.ru✉, <http://orcid/0000-0002-8743-5407>

Abstract. The problem of increasing the accuracy of recording the pulse shape of a rapidly changing current of a powerful plasma emitter under conditions of powerful electromagnetic interference is considered. To register high-current pulsed discharges, it is proposed to use a polarimetric fiber-optic current sensor based on a Spun-type fiber. Using the indicated current sensor, a technique for recording high-current pulsed discharges of a plasma emitter in the mode of time profiling of the current pulse of two high-voltage capacitive storage devices with a total energy of up to 1800 kJ is realized. The discharge chamber, power supply circuits, and the formation of a plasma discharge are described. The design and principle of operation of a prototype of a two-pass polarimetric fiber-optic sensor with a Spun-type fiber and a Faraday compensator of mutual optical anisotropy are presented. The general scheme of current measurements, the sensor calibration scheme is presented, and the experience of using a prototype sensor for measuring high-power pulse currents is described. The features of the preliminary calibration of the sensor are discussed. The results of measuring the current by optical and traditional recording methods based on the Rogowski coil and Hall sensors are compared with each other, and a noticeable increase in the accuracy of reproducing the current pulse shape by the optical recording method is noted. Possible options for upgrading a fiber-optic sensor to expand the range of current recording are considered.

Keywords: magnetoplasma discharge, Rogowski coil, Hall sensor, polarimetric fiber optic current sensor, spun fiber

Введение. Для регистрации формы импульса быстро изменяющегося тока мощного плазменного излучателя в условиях мощных электромагнитных наводок требуются специальные гальванически развязанные помехозащищённые сенсоры (датчики тока). Однако точность регистрации формы импульсов тока с использованием традиционных датчиков тока невысока – полная погрешность может достигать 10 %. Значительно (до уровня 1–2 %) повысить точность регистрации формы импульса тока мощного плазменного излучателя можно с применением волоконно-оптических датчиков тока (ВОДТ). ВОДТ обладают рядом достоинств: отсутствие явлений насыщения и гистерезиса; сверхмалая инерционность; идеальная гальваническая развязка; возможность измерения токов в проводниках сложной конструкции; универсальность при измерениях переменных и постоянных токов; малые массогабаритные параметры. Поэтому такие датчики целесообразно использовать в системах регистрации высоковольтных импульсных токовых процессов, в частности, при измерении мощных импульсных токов разряда магнитоплазменного компрессора [1] – плазменного излучателя стенда моделирования радиации высотного высокотемпературного техногенного источника [2]. Моделирование заданного спектрально-энергетического и временного распределений излучения плазменного источника осуществляется управляемым разнесением во времени разрядов высоковольтных ёмкостных накопителей в единой разрядной камере с регулируемым составом и давлением газовой среды. В состав системы регистрации стенда наряду с традиционными датчиками тока – поясом Роговского (ПР) и датчиком Холла – входит двухпроходный поляриметрический ВОДТ [3] на основе световода типа Spun (далее – spun-световода) с фарадеевским компенсатором взаимной оптической анизотропии. За рубежом наблюдается стабильный рост промышленного и научного применения ВОДТ [4–6].

Цель настоящей статьи – описание опыта использования поляриметрического волоконно-оптического датчика в системе регистрации мощных импульсных токов и сравнение результатов измерения тока оптическим и традиционными электромагнитными датчиками.

Стенд моделирования высокотемпературных процессов. На рис. 1 представлены основания разрядной камеры с электродами до и после (врезка) серии электрических разрядов. Разряд магнитоплазменного компрессора формировался в верхней части постаментов между центральным электродом 1 и цилиндрическим токопроводящим корпусом 2. В качестве силовых подводящих (отводящих) проводников использовали высоковольтные коаксиальные кабели, внутренние жилы которых распределяли по периметру основания камеры, а экранирующие проводники подсоединяли к центральному электроду. После высокоэнергетического разряда наблюдаются сильная электрическая эрозия поверхности электродов и запыление продуктами эрозии стен и окон камеры (см. рис. 1). Фактически для адекватной регистрации спектра плазменного излучателя окна камеры необходимо очищать после каждого опыта. Это приводит к необходимости длительных подготовительных этапов при

проведении экспериментов с плазменным излучателем, а значит стимулирует использование в стендовом диагностическом комплексе аппаратуры, способной обеспечить за один опыт точную и помехоустойчивую регистрацию электрических и оптических параметров. Параметры электропитания излучателя с накопителями ЕНЭ-78 и ИНЭ-2М [2] приведены в таблице. Накопитель ЕНЭ-78, характеризующийся вкладом в разряд большой пиковой мощности, применяют при предварительной настройке системы регистрации. Накопитель ИНЭ-2М состоит из трёх секций и позволяет реализовывать разрядные токи амплитудой до 1,3 МА и длительностью до 5 мс. Управление временными параметрами тока разряда осуществляется контролируемой задержкой моментов запуска секций накопителя, установкой в секциях дополнительных формирующих элементов и вариацией параметров нагрузки в разрядной камере.

Для адекватной регистрации временной формы импульса тока традиционным измерителем – ПР – на его выходе должна быть интегрирующая цепь с постоянной времени, более чем в 20 раз превышающей длительность регистрируемого тока [7]. Поэтому при переходе питания излучателя от накопителя ЕНЭ-78 к накопителю ИНЭ-2М параметры интегрирующей цепи увеличивали в 30 раз, что сопровождалось пропорциональным падением абсолютной чувствительности используемого стендового ПР и увеличением

Параметры ёмкостных накопителей энергии двух типов

Параметр	ЕНЭ-78	Секции ИНЭ-2М		
Ёмкость, мФ	0,25	48	48	12
Зарядное напряжение, кВ	25	5	5	10
Максимальная запасаемая энергия, кДж	78	1800		
Период/длительность, мкс	58	500–5000		
Максимальный ток, кА	580	1300		

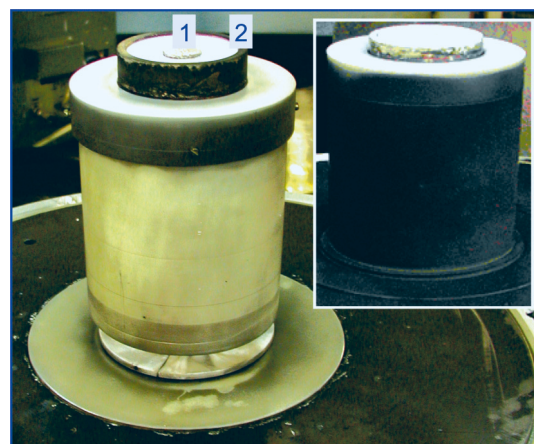


Рис. 1. Основания разрядной камеры с электродами до и после (врезка) серии электрических разрядов: 1 – центральный электрод; 2 – цилиндрический токопроводящий корпус

Fig. 1. Bases of the discharge chamber with electrodes before (left) and after (right) a series of electrical discharges: 1 – central electrode; 2 – cylindrical conductive body

шумовой составляющей от коммутационных электромагнитных помех в форме регистрируемого импульса тока. На рис. 2 представлена схема разреза разрядной камеры, расположения измерительных контуров и токоведущих проводников – волоконного контура ВОДТ 4, обратных токопроводов 3 и петли короткого замыкания 1. Конструктивно гибкое исполнение стендового ПР 5, вызванное необходимостью его размещения в небольшом пространстве между высоковольтными токоведущими проводниками, обусловило недостаточно тщательное экранирование его измерительной цепи от внешних электромагнитных помех. Экранирование стендового ПР существенно хуже, чем экранирование корпусного образцового ПР (ОПР) 2, однако габаритные размеры последнего не позволяют использовать его непосредственно в экспериментах с плазменным источником. ОПР применяют только при калибровке стендового ПР в режиме короткого замыкания накопителя энергии.

ВОДТ на основе spun-световода. Физический механизм измерения тока ВОДТ основан на магнитооптическом эффекте Фарадея – вращении плоскости поляризации света в магнитном поле проводника с током, описываемом формулой

$$\alpha_F = V \int_L H_l dl = VNi,$$

где α_F – угол поворота плоскости поляризации света, прошедшего по замкнутому световодному контуру длиной L вокруг проводника с током i ; H_l – составляющая магнитного поля проводника с током вдоль направления распространения света; V – константа Верде оптического материала

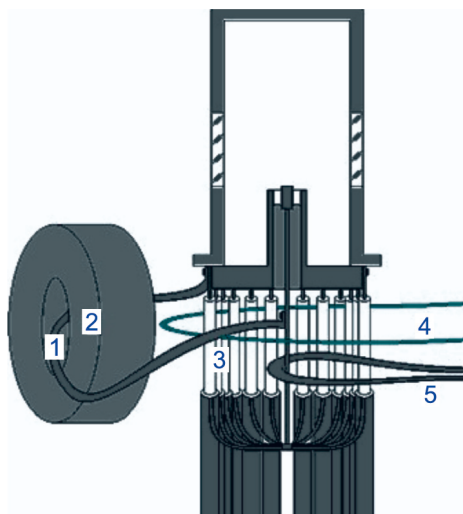


Рис. 2. Схема разреза разрядной камеры, расположения измерительных контуров и токоведущих проводников:

1 – петля короткого замыкания; 2, 5 – корпусный образцовый и стендовый ПР соответственно; 3 – обратные токопроводы; 4 – волоконный контур ВОДТ

Fig. 2. Schematic representation of the section of the discharge chamber, arrangement of measuring circuits and current-carrying conductors:

1 – short circuit loop; 2, 5 – case model and bench RC, respectively; 3 – return conductors; 4 – fiber circuit of the FOCS

световода; N – число витков световодного контура вокруг проводника с током.

Развитие стекловолоконных датчиков, первые образцы которых появились свыше 40 лет назад, начиналось с отжига чувствительного контура из кварцевого волокна или использования в контуре волокна на основе флинтного стекла с малым упруго-оптическим коэффициентом, с применения специальных форм намотки волокна в катушку с попеременным поворотом плоскости витков на 90° . Такие меры предпринимались для нивелирования влияния изгибов волокна в катушке на чувствительность датчика. В современных датчиках в основном используются twist- или spun-световоды, характеризующиеся очень сильными внутренними двулучепреломлениями. Первый тип характеризуется циркулярным двулучепреломлением, вызванным упругим закручиванием изотропного стекловолокна вокруг его оси, второй – линейным, со спиралевидной структурой, обусловленным процессом термической вытяжки волокна из вращающейся заготовки с сильным двулучепреломлением. Сильное упорядоченное двулучепреломление нивелирует влияние внешних упруго-оптических эффектов на эффект Фарадея, однако ограничивает чувствительность магнитооптического датчика, в отличие от чувствительности сенсора с виртуальным идеальным изотропным стекловолокном, в котором существует только циркулярное фарадеевское двулучепреломление. Поэтому на практике под реальный размер чувствительного контура датчика подбирают световод с необходимыми параметрами для обеспечения приемлемых уровней чувствительности и её стабильности, либо корректируют размеры контура под имеющийся световод. В [8] описаны промышленные интерферометрические волоконные сенсоры для измерения токов в диапазоне 1–300 кА с погрешностью менее 0,1 %. В [9] сообщается об отечественной разработке волоконно-оптического датчика для измерения токов в диапазоне 15–250 кА с погрешностью не более 0,5 %. Однако такие датчики до сих пор не нашли широкого применения в отечественной промышленности и технике физического эксперимента. В настоящей статье описан опыт использования макетного образца двухпроходного поляриметрического ВОДТ [3] со spun-световодом и фарадеевским компенсатором взаимной оптической анизотропии для измерения мощных импульсных токов.

Приведём некоторые сведения о spun-световодах. Типичные длина биений L_B двулучепреломления и шаг L_T закрутки волокна при его вытяжке составляют несколько миллиметров, причём $L_T \leq L_B$. Уменьшение длины биений L_B повышает устойчивость отклика датчика к искривлениям волокна в пространстве, увеличение соотношения L_B/L_T – чувствительность датчика. Spun-световод макетного образца ВОДТ имел следующие параметры: $L_B = 4$ мм (на длине волны излучения лазерного диода $\lambda = 660$ нм); $L_T = 3,3$ мм. При указанных параметрах теоретическая относительная чувствительность датчика η при малых токах составляет примерно 87 % максимально возможной (относительно чувствительности датчика с идеальным изотропным волокном) с возможными отклонениями чувствительности не более $\pm 0,5$ % при радиусе изгиба световода в контуре не более 35 мм [3].

Макетный образец датчика состоит из оптико-электронного блока ввода излучения одномодового лазерного диода в световод и регистрации интенсивности ортогонально поляризованных компонентов светового излучения, вернувшегося из контура, оптико-механического блока обратного ввода излучения в световод с вращением состояния поляризации на 90° и переносного компьютера с автономной платой 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB-6351-NI (National Instruments, США) с максимальной частотой опроса каналов 1,25 МГц. Оптике блоки соединяются между собой *spun*-световодом, на концах которого расположены стандартные FC/APC-коннекторы. Компьютер используется для контроля интенсивности излучения (по напряжению со встроенного фотодиода) и тока (по напряжению с нагрузочного сопротивления в цепи питания) лазерного диода, оцифровки и обработки измерительных сигналов с фотодиодов. Интерфейс датчика разработан в среде графического программирования LabVIEW. Питание компьютера, излучателя и приёмников осуществляется от автономного аккумулятора. Общая длина *spun*-световода составляет 20 м, что позволяет разместить металлический шкаф с оптическим датчиком и компьютером за пределами помещения (бункера) с разрядной камерой.

На рис. 3 представлена структура ВОДТ и схема его предварительной калибровки. Датчик работает следующим образом. Излучение лазерного диода 1 коллимируется микрообъективом 2, фильтруется поляризационным светоделительным кубом 3, проходит через поляризационно-нейтральный светоделительный куб 4 (50/50) и микрообъективом 5 фокусируется через оптический коннектор 6 в сердцевину оптического волокна 7. Для калибровки чувствительности датчика световод три раза пропускается через соленоид 8, состоящий из 4476 витков провода, с электропитанием от автотрансформатора через понижающий трансформатор. Максимальное действующее значение тока в соленоиде составляет 6,3 А, что позволяет моделировать при калибровке амплитудное значение тока, проходящего сквозь световодный контур, до 120 кА. Для измерения тока соленоида используется высокоточный низкоомный шунт 9 в цепи его питания, напряжение которого измеряется с помощью АЦП.

Световод образует чувствительный контур вокруг основного токопровода 10 и (или) части обратных токопроводов 11 разрядной камеры. Количество охватываемых обратных токопроводов, зависящее от предполагаемого максимального измеряемого тока, корректировалось в процессе экспериментов.

После прохождения чувствительного контура зондирующее излучение с состоянием поляризации, преобразованное в результате совместного действия интегрального спиралевидного линейного двулучепреломления световода и магнитооптического эффекта Фарадея, через коннектор 12 попадает в автономный блок обратного ввода излучения в волокно, где оно коллимируется микрообъективом 13. Затем излучение дважды проходит через анизотропный двулучепреломляющий кристалл и магнитооптическое стекло, расположенное внутри постоянного цилиндрического магнита, с промежуточным отражением от зеркала (на рис. 3 указанные

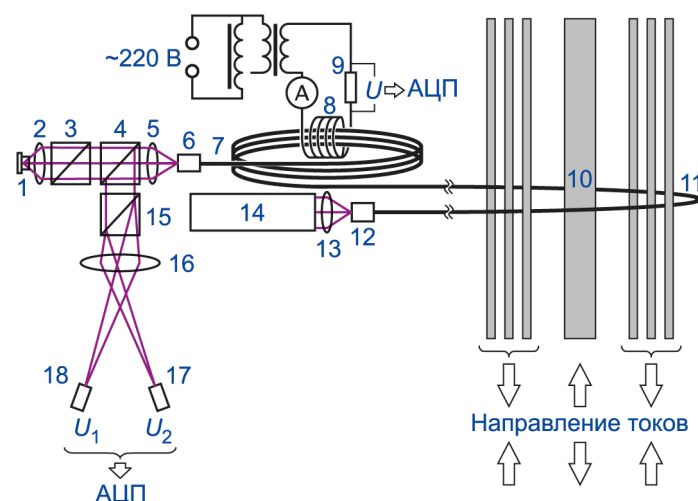


Рис. 3. Структура ВОДТ и схема предварительной калибровки: 1 – излучение; 2, 5, 13 – микрообъективы; 3, 4 – поляризационный и поляризационно-нейтральный (50/50) светоделительные кубы соответственно; 6, 12 – оптические коннекторы; 7 – оптоволокно; 8 – соленоид; 9 – высокоточный низкоомный шунт; 10, 11 – основной и обратные токопроводы разрядной камеры; 14 – условный корпус; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; 15 – поляризационный куб Волластона; 16 – линза; 17, 18 – фотодиоды

Fig. 3. FOCS structure and preliminary calibration scheme: 1 – radiation; 2, 5, 13 – micro lenses; 3, 4 – polarization and polarization-neutral (50/50) beam splitting cubes, respectively; 6, 12 – optical connectors; 7 – optical fiber; 8 – solenoid; 9 – high-precision low-resistance shunt; 10, 11 – main and return conductors of the discharge chamber; 14 – conditional case; ADC – analog-to-digital converter; 15 – Wollaston polarizing cube; 16 – lens; 17, 18 – photodiode

элементы расположены в условном корпусе 14) и микрообъективом 13 вновь фокусируется в световод, при этом состояние поляризации изменяется на ортогональное. Такая операция необходима для стабилизации рабочей точки датчика в процессе измерений, поскольку в этом случае для обратного излучения быстрые и медленные оси линейных двулучепреломлений в световоде меняются местами. При отсутствии тока внутри контура состояние поляризации прошедшего обратно через световод излучения возвращается к линейному, ортогональному состоянию поляризации входящего света независимо от возможных изменений спектральных, температурных и геометрических условий проведения измерений.

При прохождении в обратном направлении через световодный контур действие эффекта Фарадея удваивается. Зондирующее излучение через коннектор 6 выходит из световода, коллимируется микрообъективом 5 и, частично отразившись от диагональной грани поляризационно-нейтрального светоделителя 4, попадает на анализатор. Анализатор – поляризационный куб Волластона 15 – установлен под углом $\pm 45^\circ$ к плоскости поляризации света, в нём излучение делится на два световых пучка с ортогональными линейными поляризациями. Пучки фокусируются линзой 16 на чувствительные площадки фотодиодов 17, 18, работающих в фотодиодном режиме. Напряжения нагрузочных сопротивлений в цепях питания фотодиодов (измерительные сигналы) оцифровываются с помощью АЦП. Часть излучения, прошедшая нейтральный

светоделитель 4, отводится диагональной гранью поляризационного светоделителя 3 в сторону. Таким образом осуществляется оптическая развязка резонатора диодного лазера от внешнего зеркала блока обратного ввода излучения. Подробные описания макетного образца ВОДТ и его работы представлены в [3].

Алгоритм обработки измерительных сигналов и диапазон измерения токов ВОДТ. При виртуальном идеальном изотропном волокне ток i определяется датчиком в соответствии с выражением:

$$i = \arcsin(\Delta U_{12}) / (4NV), \quad (1)$$

где $\Delta U_{12} = (U_1 - U_2) / (U_1 + U_2)$ – относительная разность измерительных сигналов U_1, U_2 фотодиодов.

Использование в алгоритме обработки относительной разности измерительных сигналов позволяет исключить влияние варьирования интенсивности излучения в процессе измерений. Это особенно актуально при измерении больших токов. В этом случае на излучатель (в рассматриваемом приборе – лазерный диод) через поляризационный делитель от световодного контура частично проникает обратное излучение, образуя слабую оптическую связь резонатора лазерного диода с внешним зеркалом. Это приводит к некоторой модуляции по интенсивности излучения лазерного диода, а значит и сигналов U_1, U_2 . Однако относительная разность измерительных сигналов остаётся неизменной.

Для одновиткового контура из идеального изотропного волокна диапазон однозначного измерения токов в соответствии с формулой (1) ограничивается пределами

$$-\frac{\pi/2}{4V} < i < \frac{\pi/2}{4V}.$$

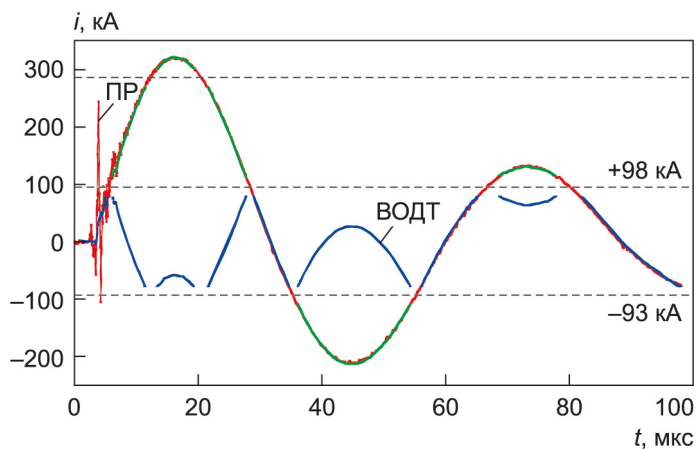


Рис. 4. Результаты регистрации тока излучателя с помощью ПР и ВОДТ при напряжении накопителя ЕНЭ-78 15,1 кВ и охвате чувствительными контурами основного токопровода; зелёным цветом выделены «отражённые» фрагменты

Fig. 4. Results of registration of the emitter current with the help of RC and FOCS at a voltage of the ENE-78 store of 15.1 kV and coverage of the main current lead with sensitive circuits; the “reflected” fragments are highlighted in green

При $V \approx 4,3$ мкрад/А для кварцевого волокна на длине волны $\lambda = 660$ нм диапазон ограничен примерно ± 91 кА. В реальном s-pm-световоде зависимость $i(\Delta U_{12})$ соответствует формуле (1) (с масштабным коэффициентом η) лишь в пределах относительно короткого участка. Далее функциональная зависимость усложняется, при этом диапазон однозначного соответствия величины разности ΔU_{12} силе тока i может измениться. В частности, для используемого в макетном образце датчика s-pm-световода этот диапазон составляет примерно $-93 \dots +98$ кА (несимметричность диапазона по-видимому обусловлена несовпадением направления поляризации входного излучения с направлением одной из осей внутреннего двулучепреломления на входном торце световода или под углом $\pm 45^\circ$ к этому направлению). По краям диапазона точность измерений уменьшается вследствие стремления к нулю отношения приращения разности ΔU_{12} к приращению тока i . Поэтому калибровочная кривая датчика – зависимость относительной разности измерительных сигналов ΔU_{12} от мгновенного значения тока i – строилась в диапазоне ± 80 кА. При этом неопределённость реакции датчика, обусловленная главным образом шумами интенсивности лазерного диода, составляла от ± 100 А при малых токах и до ± 300 А на краях диапазона калибровки при использовании для оцифровки измерительных сигналов автономной платы АЦП. В части экспериментов для увеличения частоты съёма информации измерительные сигналы фотодиодов оцифровывались с помощью цифрового запоминающего осциллографа TDS1002 (Tektronix, США) с максимальной частотой выборки сигналов 1 ГГц и разрядностью оцифровки 8 бит. В этом случае неопределённость результатов измерений увеличивалась примерно на порядок.

Реальный диапазон токов разряда магнитоплазменного компрессора значительно шире диапазона ± 80 кА, поэтому волоконный контур охватывал основной токопровод и (или) часть обратных токоведущих проводников.

Результаты экспериментов. Непосредственно перед проведением очередного цикла экспериментов в диапазоне токов ± 80 кА строилась актуальная калибровочная кривая датчика $\Delta U_{12}(i)$. На основе полинома девятой степени эта кривая преобразовывалась в обратную функциональную зависимость $i(\Delta U_{12})$, используемую в дальнейшем при обработке измерительных сигналов датчика для определения силы тока.

На рис. 4 представлены результаты регистрации тока излучателя с помощью ПР и ВОДТ при напряжении накопителя ЕНЭ-78 15,1 кВ и охвате чувствительными контурами только основного токопровода. Частота выборки сигналов 25 МГц, максимальная амплитуда тока достигала 325 кА. В соответствии с формулой (1) реакция ВОДТ в этом случае неоднозначна. При мнимом отражении «выпадающих» фрагментов относительно уровней $+98$ ($+289$) и -93 кА формы кривых реакций ПР и ВОДТ практически совпадают (зелёным цветом выделены «отражённые» фрагменты) кроме начального участка, где разброс измеренных ПР значений тока существенно больше. Поэтому в дальнейшем в каждом конкретном опыте чувствительный контур ВОДТ охватывал основной токопровод и (или) часть обратных токопроводов для попадания

общего тока, проходящего сквозь световодный контур, в диапазон ± 80 кА. В этом случае ВОДТ служит только для точной регистрации временной формы тока, поскольку адекватность абсолютных значений обусловлена конкретным весовым распределением токов по обратным проводникам.

Абсолютную чувствительность стендового ПР определяли с помощью ОПР из опытов с коротким замыканием цепи накопителя ЕНЭ-78 (с зарядным напряжением $U_{зар} < 7$ кВ, при более высоких напряжениях накопителя режим короткого замыкания нарушался вследствие частичного развития параллельного плазменного разряда). Большие габаритные размеры ОПР не позволяли использовать его в экспериментах с плазменным разрядом. Для режимов питания излучателя от накопителей ЕНЭ-78 чувствительность ПР и ОПР составляла 54 и 16,3 кА/В соответственно.

На рис. 5 приведены результаты измерения тока в режиме короткого замыкания с помощью ПР, ОПР и ВОДТ при напряжении накопителя 7 кВ. Частота выборки сигналов 10 МГц. Увеличение периода колебаний тока по сравнению с предыдущим экспериментом связано с изменением индуктивности разрядной цепи за счёт вставки дополнительного проводника для охвата ОПР. Реакция ВОДТ масштабировалась до уровней показаний ПР и ОПР. На врезке рис. 5 представлен начальный фрагмент результатов измерений в увеличенном масштабе. По соотношению сигнал/шум отклик ВОДТ примерно соответствует ОПР, но существенно превышает стендовый ПР.

Датчики Холла использовали для измерения разрядного тока только при режиме электропитания излучателя от накопителя ИНЭ-2М. Датчики располагались в каждой из трёх секций ёмкостного накопителя и регистрировали ток в одном из 68 кабелей коллектора. Для указанных датчиков типичными параметрами преобразования являются амплитуда выходного сигнала 4 В при первичном токе 1,5–2,5 кА и насыщение выходного сигнала на уровне 10 В. Частотный рабочий диапазон датчиков составляет до 25 кГц. Полный ток в плазменной нагрузке рассчитывался суммированием данных от трёх датчиков Холла с умножением полученного результата на 68. При этом потенциально возможная неравномерность распределения токов по кабелям коллектора служила источником дополнительной погрешности регистрации полного тока.

На рис. 6 представлены расчётная кривая и измеренные с помощью ВОДТ, стендового ПР с чувствительностью 1600 кА/В и датчиков Холла формы тока излучателя для случая электропитания от трёх секций накопителя ИНЭ-2М. Частота опроса АЦП 1,25 МГц. Параметры накопителя: ёмкость первой секции $C = 12$ мФ; зарядное напряжение $U_{зар} = 4,5$ кВ; вторая и третья секции общей ёмкостью $C = 96$ мФ, $U_{зар} = 3,25$ кВ. Задержка запуска второй и третьей секций ИНЭ-2М относительно первой 250 мкс. При расчёте разрядного тока в программе MicroCap вместо нелинейного сопротивления плазменной нагрузки использовалось постоянное сопротивление 5 мОм. Наиболее адекватно форму тока воспроизводит

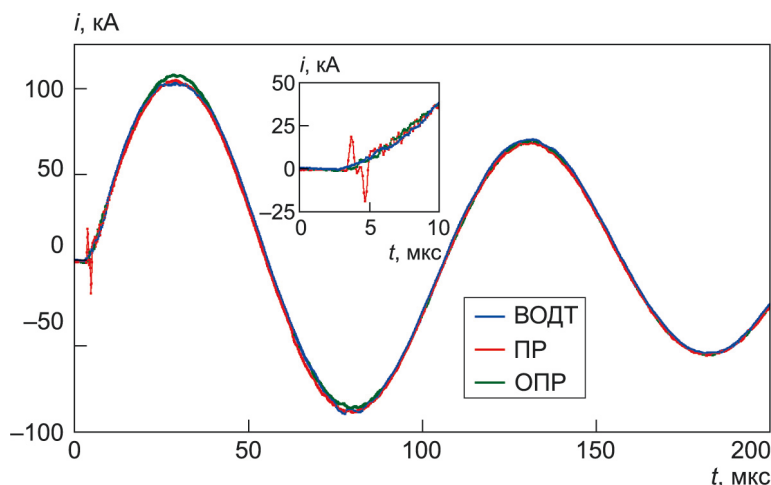


Рис. 5. Результаты регистрации тока в режиме короткого замыкания с помощью ПР, ОПР и ВОДТ при напряжении накопителя 7 кВ

Fig. 5. Results of recording the current in the short-circuit mode using RC, MRC and FOCS at a storage voltage of 7 kV

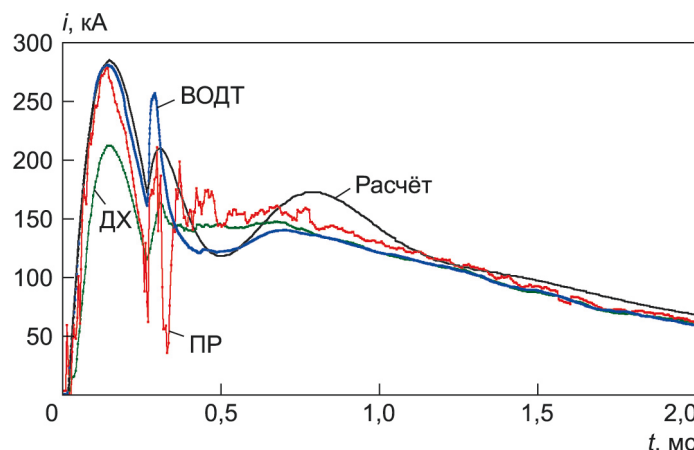


Рис. 6. Расчётная кривая и измеренные с помощью ВОДТ, ПР и датчиков Холла (ДХ) формы тока излучателя для случая электропитания от трёх секций накопителя ИНЭ-2М

Fig. 6. Calculated and measured using FOCS, bench RC and Hall sensors (HS) of the emitter current waveforms for the case of power supply from three sections of the INE-2M store

ВОДТ с качественной «прорисовкой» пика в момент запуска второй и третьей секций накопителя. Соответствующий пик наблюдается также в излучении плазменного разряда при регистрации его с помощью фотоэлектронного умножителя. Указанный пик тока искажается при регистрации измерительным ПР и датчиком Холла из-за чрезвычайно большой шумовой составляющей сигнала и низких амплитудно-частотных характеристик соответственно. С момента времени 0,7 мс от начала разряда формы заднего фронта импульса тока всех датчиков приблизительно совпадают. Отличие расчётной кривой тока от формы, регистрируемой с помощью ВОДТ, связано, по-видимому, с заменой в расчётах реального, сугубо нелинейного реактивного

сопротивления плазмы разряда на его некоторое фиксированное значение.

Заключение. Применение ВОДТ по сравнению с использованием традиционных датчиков тока позволяет значительно повысить точность регистрации формы импульса тока мощного плазменного излучателя. Недостатком используемого макетного образца ВОДТ является принципиальное ограничение диапазона измеряемых токов на уровне около ± 90 кА, приводящее к необходимости частичного охвата обратных токоведущих проводников в процессе эксперимента. Возможный вариант построения оптической системы регистрации для измерения абсолютной величины тока – использование нескольких ВОДТ с порционным охватом всех обратных токопроводов, сумма токов которых априори равна полному току. Другой вариант – применение лазерного диода инфракрасного диапазона спектра. Учитывая примерно квадратичную обратную зависимость константы Верде от длины волны излучения, при переходе на длину волны 1550 нм диапазон измерения тока потенциально может быть расширен более чем в пять раз.

Список литературы

1. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. Плазменно-динамические источники сплошного спектра // Доклады АН СССР. 1978. Т. 239. № 4. С. 831–834.
2. Бедрин А. Г., Жилин А. Н. Стенд моделирования светового излучения высокотемпературного источника // Труды IX Международного симпозиума по радиационной плазмодинамике, декабрь 2012 г., Звенигород, Москва, НИЦ «Инженер», 2012, с. 150–155.
3. Ловчий И. Л. Численное моделирование и исследование поляриметрического датчика тока со световодом типа spun // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 12. С. 25–33.
4. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
5. Willsch M., Menke P., Bosselmann T., Magneto-optic current transformers for applications in power industry, *Proceeding of 2nd Congress of Optical Sensor Technology OPTO 1996*, Germany, Leipzig, 25–27 September, 1996.
6. Nguyen T. X., Ely J. J., Szatkowski G. N., *Proc. SPIE 9480, Fiber Optic Sensors and Applications XII*, 94800X, 13 May 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2179195>

7. Gusarov A., Leysen W., Wuilpart M., Megret P., *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 136, Part A, pp. 477–480. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.03.001>

8. Bohnert K., Philippe G., Hubert B., Guggenbach P., Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry, *IEEE Trans. Ind. Appl. Mag.*, 2005, vol. 43, pp. 180–187.

9. Starostin N. I., Ryabko M. V., Chamorovskii Y. K., Gubin V. P., Sazonov A. I., Morshnev S. K., Korotkov N. M., *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 314–318. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.437.314>

References

1. Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Protasov Yu. S., *DAN SSSR*, 1978, vol. 239, no. 4, pp. 831–834. (In Russ.)
2. Bedrin A. G., Zhylin A. N., *Proceeding of 9th International Symposium on Radiation Plasma Dynamics*, December 2012, Zvenigorod, Moscow, Scientific and Publishing Center “Injener”, 2012, pp. 150–155.
3. Lovchii I. L., *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, no. 12, pp. 755–761. <https://doi.org/10.1364/JOT.77.000755>
4. Schwab Adolf J., *Hochspannungsmesstechnik Meßgeräte und Meßverfahren. Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork, 1981.
5. Willsch M., Menke P., Bosselmann T., Magneto-optic current transformers for applications in power industry, *Proceeding of 2nd Congress of Optical Sensor Technology OPTO 1996*, Germany, Leipzig, 25–27 September, 1996.
6. Nguyen T. X., Ely J. J., Szatkowski G. N., *Proc. SPIE 9480, Fiber Optic Sensors and Applications XII*, 94800X, 13 May 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2179195>
7. Gusarov A., Leysen W., Wuilpart M., Megret P., *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 136, Part A, pp. 477–480. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.03.001>
8. Bohnert K., Philippe G., Hubert B., Guggenbach P., Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry, *IEEE Trans. Ind. Appl. Mag.*, 2005, vol. 43, pp. 180–187.
9. Starostin N. I., Ryabko M. V., Chamorovskii Y. K., Gubin V. P., Sazonov A. I., Morshnev S. K., Korotkov N. M., *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 314–318. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.437.314>

Статья поступила в редакцию 03.06.2021; принята к публикации 21.06.2021.

Методика и результаты экспериментального определения коэффициента сжимаемости природного газа

Денис Юрьевич Кутовой¹, Игорь Александрович Яценко², Владимир Борисович Явкин^{3✉}, Айдар Назимович Мухаметов⁴, Петр Владимирович Ловцов⁵, Раис Ильясович Ганиев⁶

^{1, 5} Газпром Межрегионгаз, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 4, 6} Центр Метрологии «СТП», Казань, Республика Татарстан, Россия

³ Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Республика Татарстан, Россия, vb.yavkin@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3837-6033>

¹U2600002@mrg.gazprom.ru, ²yacenko@ooostp.ru, ⁵U2600012@mrg.gazprom.ru

⁴mukhametov.a@ooostp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9725-9008>

⁶ganiev@ooostp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0817-1491>

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача применимости уравнений состояния для газовой фазы природного газа при температурах ниже 250 К. Для решения поставленной задачи требуются полученные экспериментально с высокой точностью значения коэффициента сжимаемости природного газа. С этой целью разработана методика и экспериментально определён коэффициент сжимаемости природного газа. Предложенная методика основана на том, что для оценки применимости уравнения состояния достаточно получить относительное значение коэффициента сжимаемости и не определять его абсолютное значение. Такой подход не требует сложного оборудования и обеспечивает высокую точность определения коэффициента сжимаемости. Методика апробирована на азоте, аргоне, воздухе и метане. Неопределённость определения коэффициента сжимаемости не превышает 0,1 %. Экспериментально исследованы два различных состава природного газа. Показано, что неопределённость расчёта коэффициента сжимаемости по уравнениям состояния GERG-2004 и AGA8-DC92 составляет не более 0,1 % при температуре 220–250 К и давлении менее 5 МПа.

Ключевые слова: коэффициент сжимаемости, методика, эксперимент, уравнение состояния, неопределённость измерения

Для цитирования: Кутовой Д. Ю., Яценко И. А., Явкин В. Б., Мухаметов А. Н., Ловцов П. В., Ганиев Р. И. Методика и результаты экспериментального определения коэффициента сжимаемости природного газа // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 35–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-35-40>

Technique and results of experimental determination of the compressibility factor of the natural gas

Denis Y. Kutovoy¹, Igor A. Yatsenko², Vladimir B. Yavkin^{3✉}, Aydar N. Mukhametov⁴, Petr V. Lovtsov⁵, Rais I. Ganiev⁶

^{1, 5} Gazprom Mezhrregiongaz, St.-Petersburg, Russia

^{2, 4, 6} Center Metrology "STP", Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

³ Kazan National Research Technical University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, vb.yavkin@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3837-6033>

¹U2600002@mrg.gazprom.ru, ²yacenko@ooostp.ru, ⁵U2600012@mrg.gazprom.ru

⁴mukhametov.a@ooostp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9725-9008>

⁶ganiev@ooostp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0817-1491>

Abstract. The actual problem of the possibility of using the equations of state for the gas phase of natural gas at temperatures below 250 K is considered. To solve it, the compressibility coefficients of natural gas obtained experimentally with high accuracy are required. The technique was developed and experimental study was carried out of compressibility factor aiming expanding temperature range of the state equations GERG-2004 and AGA8-DC92. The proposed technique is based on the fact that to assess the applicability of the equation of state, it is sufficient to obtain the relative value of the compressibility coefficient and not to determine its absolute value. The technique does not require complex equipment and provides high accuracy. The technique was tested on nitrogen, argon, air and methane. Uncertainty of determination of the compressibility factor is not greater than 0.1 %. For two different compositions of natural gas, obtained experimental data were demonstrated that the equations of state GERG-2004 and AGA8-92DC provide uncertainty of the calculation of the compressibility coefficient within 0.1 % in the temperature range from 220 K to 250 K and pressure below 5 MPa.

Keywords: compressibility factor, technique, experiment, equation of state, uncertainty

Введение. Точное определение термодинамических свойств газов и газовых смесей имеет важное значение для многих технологических процессов. Неотъемлемой частью рабочих измерений расхода и количества природного газа является приведение измеренных значений этих параметров к стандартным условиям (давление 101325 Па, температура 273,15 К). В неопределённость результата измерения расхода входит неопределённость приведения к стандартным условиям, т. е. неопределённость методики, базирующейся на уравнении состояния, с помощью которого определяют коэффициент сжимаемости. В настоящее время все включённые в стандарты РФ уравнения состояния, например, AGA8-DC92 (ГОСТ 30319.3-2015 «Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о компонентном составе»), AGA8 Report 1 (ГОСТ 8.662-2009 «Газ природный. Термодинамические свойства газовой фазы. Методы расчётного определения для целей транспортирования и распределения газа на основе фундаментального уравнения состояния AGA8»), GERG-91 (ГОСТ 30319.2-2015 «Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода»), ограничены нижним пределом температуры 250 К. В разработанных сравнительно недавно уравнении состояния GERG-2004 [1] и его расширении GERG-2008 [2] нижняя граница рабочего диапазона составляет 90 К, однако для газовой фазы природных газов из-за отсутствия достаточного количества надёжных экспериментальных данных установлен нижний предел 250 К. Важность уменьшения нижнего предела рабочего диапазона уравнения состояния заключается в том, что в зимний период температура воздуха в северных регионах РФ может опускаться до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (223 К), следовательно, температура транспортируемого природного газа также может приближаться к этим значениям. Отсутствие нормированных значений неопределённости коэффициента сжимаемости может привести к нарушению Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ и приказа Минэнерго № 179 от 24.04.2018 г. В настоящее время при температурах газа менее $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведение объёма газа к стандартным условиям может осуществляться двумя методами, реализованными в средствах обработки измерительной информации (вычислителях, корректорах, контроллерах). В этих методах значение температуры газа принимается равным подстановочному значению 250 К, но во втором методе приведённые к стандартным условиям расход и объём газа рассчитываются по измеренному фактическому значению температуры, а коэффициент сжимаемости – по подстановочному значению. Применение обоих методов приводит к дополнительной систематической неопределённости, которая может в несколько раз превышать основную неопределённость и увеличивается с увеличением давления. При использовании первого метода дополнительная неопределённость достигает почти 10 %, а второго – 3 % при температуре 232 К и давлении 3 МПа.

Предел применимости уравнений состояния не является теоретически обоснованным ограничением, а вызван только отсутствием при температурах ниже 250 К надёжных и точных экспериментально измеренных коэффициентов сжимаемости,

необходимых для определения структуры, коэффициентов и параметров уравнения состояния, а также для его тестирования. Точность и объём экспериментальных данных ограничивают точность уравнения состояния, например, уравнение AGA8-DC92 охватывает диапазон температур 143–673 К, однако требуемая точность достигнута только в диапазоне 250–350 К из-за отсутствия надёжных экспериментальных данных [1]. Это же относится и к уравнениям GERG-2004 и GERG-2008. Согласно [2] и ISO 20765-2 неопределённость не более 0,1 % при расчёте плотности и коэффициента сжимаемости газовой фазы природного газа по уравнению GERG-2004 подтверждена только в интервале температур 250–350 К при давлении не более 30 МПа. Как и всякое уравнение состояния, GERG-2004 основано на надёжных и точных экспериментальных данных. В период 1991–1997 гг. Европейская группа газовых исследований опубликовала технические монографии TM4, TM7 [3, 4], которые содержат перечень (базы данных) высокоточных (погрешность представленных значений не более $\pm 0,1\text{ }%$) значений коэффициента сжимаемости с общим числом данных более 100000. На основе этих данных разработано и протестировано уравнение GERG-2004. Подавляющее большинство данных получено при температурах не ниже 270 К и только небольшая часть при более низких температурах [1, 2]. Уравнение состояния GERG-2008, созданное на базе GERG-2004, отличается от основы тем, что учтены три дополнительных компонента природного газа. В [2] утверждается, что для уравнения GERG-2008 база данных дополнена, но необходимые экспериментальные данные по природным газам получены с высокой точностью только для температур не ниже 250 К. Таким образом, актуальной является задача расширения рабочего диапазона уравнений состояния в сторону более низких температур и для её решения требуются высокоточные экспериментальные значения коэффициента сжимаемости.

Цель работы – разработка методики измерений коэффициента сжимаемости и установки для его экспериментального определения с высокой точностью.

Методика измерений. В настоящее время разработано большое число различных методик экспериментального определения коэффициента сжимаемости, например, методы постоянного и переменного объёма, метод Барнетта, гидростатическое взвешивание и др. [5–7]. Многие из описанных в литературе методов обеспечивают высокую точность определения коэффициента сжимаемости – относительная неопределённость измерения не превышает $\pm 0,05\text{ }%$ [1, 2]. К основным недостаткам этих методов относятся сложность в реализации, использование сложного, порой уникального оборудования, непригодность для измерений при низких температурах (методы с применением ртутных приборов и устройств работают только при температурах выше 235 К).

Основная масса методов определения коэффициента сжимаемости основана на уравнении

$$pV = ZmRT, \quad (1)$$

где p – давление; V – объём пьезометра; Z – коэффициент сжимаемости; m – масса газа в пьезометре; R – индивидуальная газовая постоянная; T – температура.

Для определения коэффициента сжимаемости по уравнению (1) требуется измерить четыре параметра. При этом объём пьезометра определяют при температуре и давлении в помещении, а затем вводят поправки на изменение объёма вследствие механических и температурных деформаций. Достаточно сложно обеспечить высокую точность при измерении массы газа в пьезометре в связи с её малостью по сравнению с массой пьезометра. Масса газа и объём пьезометра могут быть исключены из уравнения измерения, если определять не абсолютное, а относительное значение коэффициента сжимаемости $\zeta = Z/Z_0$, где Z , Z_0 – значение коэффициента сжимаемости при заданных температуре и давлении, и опорное значение, например полученное при температуре 273,15 К, соответственно. В этом случае уравнение измерения, получаемое из (1), имеет вид

$$\zeta = \frac{Z}{Z_0} = \frac{p T_0}{p_0 T} k_p k_T, \quad (2)$$

где k_p , k_T – поправочные коэффициенты, учитывающие изменение объёма при механическом и тепловом воздействиях соответственно; индекс «0» относится к опорным значениям параметров.

Определение относительного коэффициента сжимаемости по уравнению (2) требует измерения четырёх параметров: p , T , p_0 , T_0 , а также вычисления поправок на изменение объёма, вызванное механическими и термическими деформациями. Отсутствие необходимости измерения массы и объёма газа позволяет существенно упростить методику измерений и экспериментальное оборудование.

Установка для экспериментального определения коэффициента сжимаемости. Созданная установка обеспечивает измерения коэффициента сжимаемости при температуре более -50°C и давлении менее 6 МПа. Схема установки приведена на рис. 1. Основой установки служит пьезометр постоянного объёма 1, размещённый в термостате 7 с циркулирующей жидкостью 8. Пьезометр представляет собой толстостенный сосуд, изготовленный из меди для обеспечения однородного распределения температуры по его объёму. Измерения проводили при неизменной массе газа в пьезометре, изменяя температуру жидкости в термостате. Пьезометр заполняли исследуемым газом под давлением; по достижении заданного давления в пьезометре перекрывали вентиль 5 и устанавливали температуру термостата, равную температуре в опорной точке (опорной температуре) $T_0 = 273,15\text{ К}$. После установления стационарного режима в пьезометре измеряли давление газа и температуру жидкости в термостате, затем понижали температуру при неизменной массе газа в пьезометре, и проводили измерения в следующей точке. В каждой точке система сбора информации регистрировала 1500–2000 значений давления и температуры. Относительная стандартная неопределённость типа А не превышала $1 \cdot 10^{-2} \%$ по давлению и $0,5 \cdot 10^{-2} \%$ по температуре. По результатам измерений по уравнению (2) определяли относительный коэффициент сжимаемости ζ .

Для уменьшения влияния паразитных объёмов соединительных капилляров и вентилей их объёмы минимизировали так, что отношение этих объёмов к объёму пьезометра

не превышало 0,03 %, поэтому изменение паразитных объёмов не учитывалось при вычислении поправок на механические и тепловые деформации.

При определении коэффициента сжимаемости по уравнению (2) относительную неопределённость u_ζ оценивали по уравнению

$$u_\zeta = \sqrt{(2\theta_p^2 + \theta_{kp}^2)u_p^2 + (2\theta_T^2 + \theta_{kT}^2)u_T^2},$$

где u_p , u_T – неопределённости измерения давления и температуры; θ_p , θ_T , θ_{kp} , θ_{kT} – коэффициенты влияния.

Применявшееся для измерений оборудование обеспечивало измерение давления с пределами основной допускаемой приведённой погрешности $\pm 0,025 \%$, температуры с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,025^\circ\text{C}$. Неопределённостью измерений по типу А пренебрегали вследствие малости. В этом случае расширенная относительная неопределённость $U_\zeta = 0,04 \%$ при доверительном интервале 0,95.

Тестирование методики. Для оценки точности предложенной методики было проведено тестирование на трёх чистых газах: азоте, аргоне и метане, а также на воздухе в интервале температур 223–273 К и давлений 0,35–5 МПа.

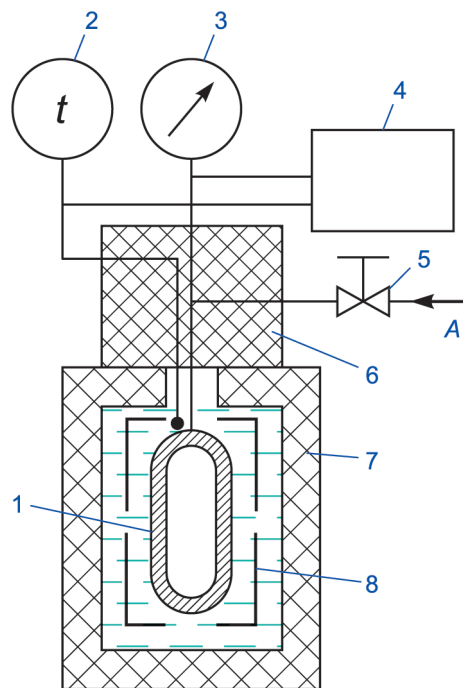


Рис. 1. Схема стенда для определения коэффициента сжимаемости: 1 – пьезометр; 2 – датчик температуры; 3 – датчик давления; 4 – компьютер с устройством сопряжения; 5 – игольчатый вентиль; 6 – теплоизоляция; 7 – термостат; 8 – заполняющая термостат жидкость ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$); А – подача газа из баллона высокого давления

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for determining the compressibility factor:

1 – gas container of constant volume; 2 – temperature sensor; 3 – pressure sensor; 4 – computer with transducer; 5 – needle valve; 6 – heat isolation; 7 – thermostatted liquid bath; 8 – thermostatted liquid ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$); А – high pressure gas inlet

Объёмная доля примесей в чистых газах не превышала 0,001%, в том числе паров воды 0,0007 % (точка росы -60°C), кислорода 0,0005 %, водорода 0,0003 %. Всего по результатам измерений было определено 185 значений ζ . Полученные экспериментальные данные сравнивали с данными, опубликованными в [7–10] и приведёнными в Методике ГСССД МР 134-07 «Расчёт плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости азота, ацетилена, кислорода, диоксида углерода, аммиака, аргона и водорода». Результаты тестирования представлены на рис. 2 в виде зависимости $\delta\zeta(T)$. Относительное отклонение экспериментальных значений ζ от опубликованных данных ζ_d определяли как

$$\delta\zeta = (1 - \zeta/\zeta_d) \cdot 100.$$

Представленные на рис. 2 результаты определения $\delta\zeta$ для всех газов и во всём диапазоне температур и давлений не выходят за пределы $\pm 0,1$ %. Систематическая составляющая $\delta\zeta$ проявляется в том, что $\delta\zeta$ увеличивается с уменьшением температуры, а также зависит от рода газа. Для воздуха и аргона в основном $\delta\zeta > 0$, а для азота $\delta\zeta < 0$. При этом для каждого газа диапазоны изменения $\delta\zeta$ уже $\pm 0,1$ %. Пределы изменения $\delta\zeta$ для воздуха, азота, аргона и метана составляют соответственно $-0,02 \dots 0,07$; $-0,06 \dots 0,02$; $-0,04 \dots 0,04$ и $-0,08 \dots 0,06$ %. Полученные значения $\delta\zeta$ укладываются в диапазон неопределённостей, указанных в литературе [1, 2, 8, 9]. Таким образом, разработанная методика может быть использована для определения коэффициента сжимаемости природного газа.

Определение коэффициента сжимаемости природного газа. Природный газ представляет собой смесь большого количества различных углеводородов, а также азота,

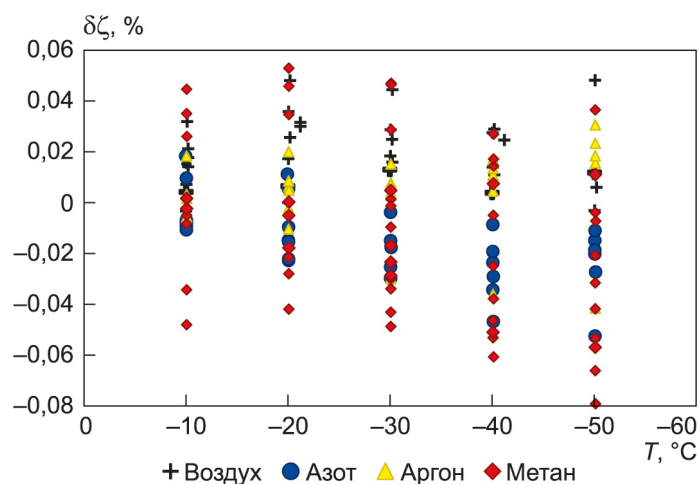


Рис. 2. Результаты тестирования методики: относительное отклонение $\delta\zeta$ экспериментальных значений коэффициентов сжимаемости различных газов от опубликованных в [7–10] данных

Fig. 2. Results of testing of the technique: relative deviation $\delta\zeta$ between experimental values of compressibility factor of various gases and data published in [7–10]

диоксида углерода, водорода и других газов, поэтому коэффициент сжимаемости природного газа зависит не только от давления и температуры, но также и от состава. Коэффициент сжимаемости природного газа обычно определяют для нескольких составов (например, см. [2, 6, 11]). В настоящей

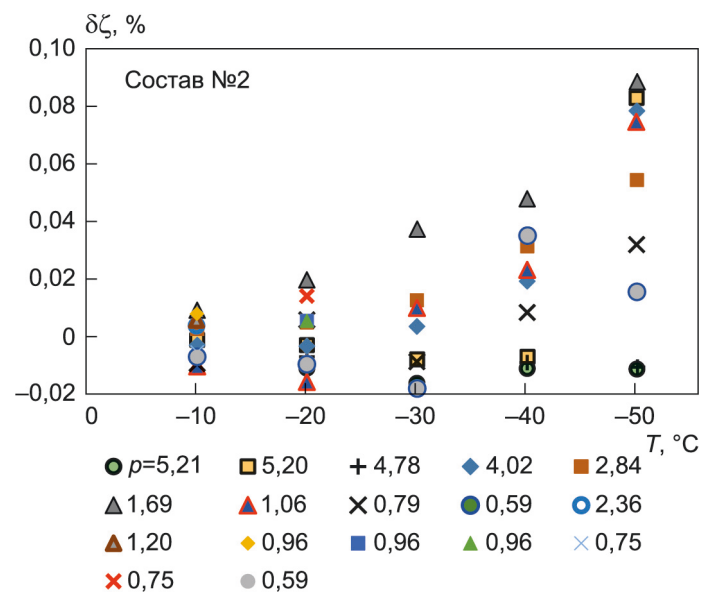
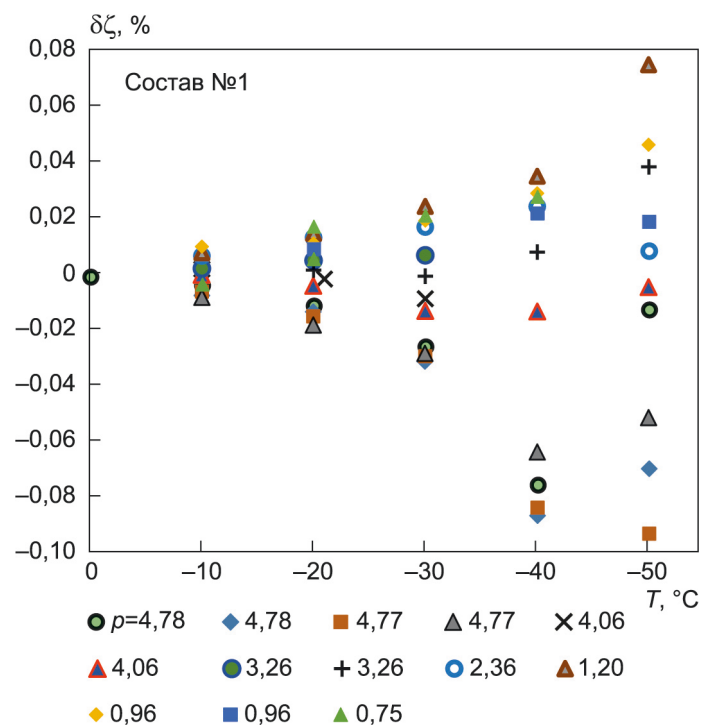


Рис. 3. Относительное отклонение $\delta\zeta$ рассчитанных по уравнению GERG-2004 значений коэффициентов сжимаемости природного газа составов №№ 1, 2 от экспериментальных значений (параметр – давление p_0)

Fig. 3. Relative deviation of $\delta\zeta$ between computed by equation GERG-2004 values of compressibility factors for compositions no. 1, 2 and experimental data (parameter is pressure p_0)

Таблица 1

Таблица 2

Состав исследованных природных газов

Компонент	Состав № 1	Состав № 2
Метан	0,94210	0,918173
Этан	0,02012	0,029500
Пропан	0,00504	0,010000
Изо-Бутан	0,00154	0,001010
Н-Бутан	0,00159	0,001000
Н-Пентан	0	0,000202
Изо-Пентан	0	0,000205
Азот	0,019463	0,014900
Диоксид углерода	0,010132	0,020000
Гелий	0	0,002500
Водород	0	0,002510

Диапазоны применимости уравнений состояния природного газа

Уравнение	Стандарт	p , МПа, не более	T , К	Погрешность, %
ГСССД 113-03	–	15	263–500	$\delta p \leq \pm 0,2$
ГСССД 118-05	–	5	200–400	$\delta p \leq \pm (0,1 \dots 0,6)$
NX-19	ГОСТ 30319.2-96	12	250–340	$\delta Z \leq \pm (0,12 \dots 1,09)$
GERG-91	ГОСТ 30319.2-2015	12	250–340	$\delta Z \leq \pm (0,11 \dots 2,10)$
AGA8-92DC	ГОСТ 30319.3-2015	12	250–340	$\delta Z \leq \pm (0,1 \dots 1,3)$
AGA8 Repot 1 Detail	ГОСТ 8.662-2009	30	250–350	$\delta Z \leq \pm 0,1$
GERG-2004	ISO 20765-2:2015	14	250–350	$\delta p, \delta Z \leq \pm 0,1$

работе относительные значения коэффициента сжимаемости определяли для двух смесей углеводородов, составы которых приведены в табл. 1.

Полученные экспериментальные данные использовали для тестирования различных уравнений состояния при температурах, выходящих за пределы, установленные для этих уравнений. Пределы применимости и погрешности уравнений состояния приведены в табл. 2, где указаны следующие нормативные документы: ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости», ГСССД МР 118-05 «Расчёт плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости умеренно-сжатых газовых смесей»; ГСССД МР 113-03 «Определение плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости влажного нефтяного газа в диапазоне температур 263...500 К при давлениях до 15 МПа»; ISO 20765-2:2015 «Natural gas. Calculation of thermodynamic properties. Part 2. Single-phase properties (gas, liquid and dense fluid) for extended ranges of application».

По уравнениям состояния рассчитывали значения ζ при тех же температурах и давлениях, что были в экспериментах, и определяли отклонения $\delta\zeta$ расчётных результатов от экспериментальных. Зависимости $\delta\zeta(T)$ для уравнения GERG-004 и составов газа №№ 1, 2 представлены на рис. 3. Получены отклонения $\delta\zeta < \pm 0,1\%$. Такой же сравнительный анализ выполнили для других уравнений состояния. Установили, что для уравнения состояния AGA8-DC92 в исследованном диапазоне температур и давлений отклонение $\delta\zeta < \pm 0,1\%$. Для уравнения состояния умеренно-сжатых газовых смесей ГСССД МР 118-05 и уравнения состояния влажного нефтяного газа ГСССД МР 113-03 отклонение $\delta\zeta < \pm 0,2\%$. Для уравнений состояния NX-19, GERG-91, построенных на неполном компонентном составе природного газа, расчётные значения ζ существенно отличаются от экспериментальных данных, поэтому $\delta\zeta$ может достигать 1–2 %. Таким образом, из шести исследованных уравнений состояния только два обеспечивают отклонение от экспериментальных данных, не превышающее 0,1 % при понижении температуры до 220 К.

Результаты настоящего исследования качественно согласуются с данными [1], где сравнивали расчёты по уравнению GERG-2004 с экспериментальными данными [6, 11] для газовых смесей NIST1 и NIST2 (близких по компонентному составу к газам, добываемым на территории РФ). В [1] показано, что при давлениях менее 10 МПа наибольшее отклонение расчётных значений от экспериментальных по плотности газа наблюдается при температуре 250 К и давлении 0,6 МПа и составляет не более 0,07 и 0,05 % при сравнении с данными [6] и [11] соответственно. В настоящей работе эксперименты проводились на близких по составу смесях, а отклонения, полученные при температуре 250 К, не превышают 0,02 %.

Заключение. Разработанная методика определения относительного коэффициента сжимаемости газов не требует измерений массы и объёма газа. Тестирование методики с использованием воздуха, азота, аргона и метана показало, что неопределённость определения относительного коэффициента сжимаемости не превышает $\pm 0,1\%$ в диапазоне температур $-50 \dots 0$ °С и давлений менее 5 МПа. По разработанной методике были определены относительные коэффициенты сжимаемости природного газа двух различных составов при указанных выше диапазоне температур и давлении. Полученные данные использованы для оценки адекватности шести различных уравнений состояния при температурах ниже 250 К: уравнения GERG-2004 и AGA8-92 DC обеспечивают неопределённость не более 0,1 %, уравнение состояния для умеренно-сжатых газовых смесей и уравнение состояния влажного нефтяного газа – не более $\pm 0,2\%$, а для уравнений состояния NX-19 и GERG-91 неопределённость может достигать 1–2 %.

Список литературы

1. TM-15 / The GERG-2004 Wide-range equation of state for natural gases and other mixtures, edited by O. Kunz, R. Klimeck, and W. Wagner, 2007, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM15.pdf> (accessed: 22.01.2021).
2. Kunz O., Wagner W., *J. Chem. Eng. Data*, 2012, vol. 57, pp. 3032–3091. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je300655b>
3. TM-4 / The GERG databank of high accuracy compressibility factor measurements, edited by M. Jaeschke and A. E. Humphreys, 1991, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM4.pdf> (accessed: 22.01.2021).

4. TM-7 / Supplement to the GERG databank of high-accuracy compression factor measurements, edited by M. Jaeschke, H. M. Hinze and A. E. Humphreys, 1997, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM7.pdf> (accessed: 22.01.2021).

5. Циклис Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. Изд. 4-е, пер. и доп. М.: Химия, 1976 г., 423 с.

6. Hwang C.-A., Simon P. P., Hou H., Hall K. R., Holste J. C., Marsh K. N., *J. Chem. Thermodynamics*, 1997, vol. 29, pp. 1455–1472. <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0258>

7. Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А. Термодинамические свойства азота. М.: Издательство стандартов, 1977, 352 с.

8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972. 721 с.

9. Сычев В. В., Вассерман А. А., Загорученко В. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А. Термодинамические свойства метана: ГСССД. Серия монографии. М.: Издательство стандартов, 1979. 348 с.

10. Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А. Термодинамические свойства воздуха: ГСССД. Серия монографии. М.: Издательство стандартов, 1978. 276 с.

11. Magee J. W., Haynes W. M., Hiza M. J., *J. Chem. Thermodynamics*, 1997, vol. 29, pp. 1439–1454. <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0259>

References

1. TM-15 / The GERG-2004 Wide-range equation of state for natural gases and other mixtures, edited by O. Kunz, R. Klimeck, and W. Wagner, 2007, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM15.pdf> (accessed: 22.01.2021).

2. Kunz O., Wagner W., *J. Chem. Eng. Data*, 2012, vol. 57, pp. 3032–3091. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je300655b>

3. TM-4 / The GERG databank of high accuracy compressibility factor measurements, edited by M. Jaeschke and A. E. Humphreys, 1991, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM4.pdf> (accessed: 22.01.2021).

4. TM-7 / Supplement to the GERG databank of high-accuracy compression factor measurements, edited by M. Jaeschke, H. M. Hinze and A. E. Humphreys, 1997, available at: <http://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM7.pdf> (accessed: 22.01.2021).

5. Cyclis D. S., *Technique of physicochemical research at high and ultrahigh pressures*, edition 4th, Moscow, Chimiya Publ., 1976, 423 p. (In Russ.)

6. Hwang C.-A., Simon P. P., Hou H., Hall K. R., Holste J. C., Marsh K. N., *J. Chem. Thermodynamics*, 1997, vol. 29, pp. 1455–1472. <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0258>

7. Sytchev V. V., Vasserman A. A., Kozlov A. D., Spiridonov G. A., Tsimarny B. A., *Thermodynamic properties of nitrogen*, Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1977, 352 p. (In Russ.)

8. Vargaftic N. B., *Handbook on thermophysical properties of gases and liquids*, Moscow, Phismathgis Publ., 1972, 721 p. (In Russ.)

9. Sytchev V. V., Vasserman A. A., Zagoroutchenko V. A., Kozlov A. D., Spiridonov G. A., Tsimarny B. A., *Thermodynamic properties of methane*, GSSSD, Monograph series, Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1979, 348 p. (In Russ.)

10. Sytchev V. V., Vasserman A. A., Kozlov A. D., Spiridonov G. A., Tsimarny B. A., *Thermodynamic properties of air*, GSSSD, Monograph series, Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1979, 276 p. (In Russ.)

11. Magee J. W., Haynes W. M., Hiza M. J., *J. Chem. Thermodynamics*, 1997, vol. 29, pp. 1439–1454. <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0259>

Статья поступила в редакцию 19.04.2021; принята к публикации 18.05.2021.

Измерение параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками

Евгений Павлович Красноперов^{1✉}, Валентин Васильевич Гурьев², Василий Владимирович Сычугов³, Дмитрий Сергеевич Яшкин⁴, Сергей Викторович Шавкин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹krasnoперov_ep@nrcki.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-9237-1535>

²gurev_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4946-2559>

³sychugov_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1150-1447>

⁴yashkin_ds@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3620-5564>

⁵shavkin_sv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5032>

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема определения электрических параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками. Описаны процедуры измерений параметров неизолированных сверхпроводящих обмоток, в частности, индуктивность измерена по напряжению при линейном вводе тока с заданной скоростью. Показана невозможность определения индуктивности в обмотке с неизолированным сверхпроводником в нормальном состоянии. Отмечено, что в сверхпроводящем состоянии, при токах ниже критического значения, индуктивность обмотки сравнима с индуктивностью для изолированного провода. Приведены результаты измерений индуктивности, радиального сопротивления, статической вольт-амперной и магнитной характеристик двух ленточных катушек с неизолированными сверхпроводящими обмотками, одна из которых имела спаянное соединение. Проведено сравнение параметров изолированных и неизолированных сверхпроводящих обмоток и сформулированы условия измерений последних. Результаты исследования применимы при разработке и эксплуатации сверхпроводящих устройств с неизолированными обмотками, такими как катушки, магнитные накопители, обмотки статоров электрических машин и др.

Ключевые слова: электрические параметры, сверхпроводящие неизолированные обмотки

Для цитирования: Красноперов Е. П., Гурьев В. В., Сычугов В. В., Яшкин Д. С., Шавкин С. В. Измерение параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 41–46. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-41-46>

Measurement of parameters of the superconducting non-insulated coils

Evgeniy P. Krasnoперov^{1✉}, Valentin V. Guryev², Vasyli V. Sychugov³, Dmitri S. Yashkin⁴, Sergei V. Shavkin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

¹krasnoперov_ep@nrcki.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-9237-1535>

²gurev_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4946-2559>

³sychugov_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1150-1447>

⁴yashkin_ds@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3620-5564>

⁵shavkin_sv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5032>

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

Abstract. The electrical characteristics of superconducting coils with non-insulated windings are studied. The procedures for measuring the parameters of uninsulated superconducting windings are described. In particular, the inductance is measured by voltage with a linear current input at a given rate. Attention is focused on the impossibility of correctly determining the inductance in a winding with an uninsulated superconductor in a normal state. It is noted that in a superconducting state at currents below the critical value, the inductance of the winding is comparable to the inductance with an insulated wire. The results of measurements of inductance, radial resistance, static current-voltage and magnetic characteristics of two tape coils with non-insulated superconducting windings, one of which had a soldered connection, are presented. Conditions for measuring the parameters of non-insulated superconducting windings are formulated when they are compared with insulated windings.

Keywords: electrical parameters, superconducting bare windings

Введение. Традиционно в сверхпроводящих соленоидах применяются провода с изолированными сверхпроводящими обмотками (ИСО). Электрические параметры систем с ИСО, такие как индуктивность, сопротивление, индекс вольт-амперной характеристики (ВАХ) и др., рассчитываются с приемлемой точностью [1]. С развитием технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводящих материалов (далее – сверхпроводников) системы с ИСО стали использоваться для создания магнитных полей в области температур 20–50 К. Магнитные системы обычно охлаждают, размещая их в криожидкости или в охлаждённых газах (гелии, водороде, неоне, азоте). В последние годы активно развиваются методы косвенного охлаждения [2]. При косвенном охлаждении магнитная система помещается в вакуумную камеру и охлаждается криокулером с помощью теплопроводящих материалов. При косвенном охлаждении изоляция провода обмотки существенно снижает скорость охлаждения. Эффективность косвенного охлаждения – одна из причин широкого распространения неизолированных сверхпроводящих обмоток (НИСО) [3, 4].

У современной сверхпроводящей ленты многослойная структура. На подложку из сплава хастеллой или нержавеющей стали (в случае сверхпроводящей ленты Курчатовского института) наносится буферный оксидный слой, на котором формируется текстурированный сверхпроводящий слой Re(Y)BaCuO . Снаружи на ленту наносится защитное покрытие из серебра и стабилизирующий слой меди [5]. Если соленоид изготовлен из такой изолированной ленты, то его электродинамика подобна электродинамике классического низкотемпературного сверхпроводящего соленоида. В частности, измерения ВАХ короткого куска ленты в разных магнитных полях и ориентациях поля к плоскости ленты, а также при различных температурах позволяют достаточно надёжно спрогнозировать свойства магнитной системы с ИСО [5, 6].

Системы с НИСО требуют специального рассмотрения, поскольку ряд их параметров, например, индуктивность, не могут быть корректно определены в нормальном состоянии. Из-за отсутствия изоляции ток в НИСО может перетекать между соседними слоями. Междуслойное (межвитковое) сопротивление называют радиальным или контактным для соленоида с галетной обмоткой [10]. Значение этого контактного сопротивления определяет динамику НИСО. Динамику НИСО сложно прогнозировать, поскольку контактное сопротивление зависит от механических усилий при намотке соленоида, от температурных и поперечных деформаций обмотки (при протекании тока) и поперечной электропроводности самой ленты.

Серьёзным недостатком сверхпроводящих лент является низкая скорость распространения нормальной зоны и, как следствие, высокая плотность выделения тепловой энергии при переходе в нормальное состояние. В НИСО электрический контакт между витками обеспечивает высокую поперечную теплопроводность. В результате тепловая энергия может распространяться как в продольном (вдоль ленты), так и в поперечном (радиальном) направлении. Высокая поперечная теплопроводность радикально снижает плотность выделяемой

тепловой энергии, значительно повышает стабильность сверхпроводящего состояния и снижает вероятность разрушения обмотки при случайном локальном нагреве [7]. Устойчивость к тепловым возмущениям дополнительно стимулирует интерес к системам с НИСО.

Для многих конструкций, например магнитных накопителей энергии, требуется знать индуктивность системы сложной геометрии. Для галетной ленточной системы даже с изолированной обмоткой расчёты индуктивности весьма приближённые. Знание индуктивности ещё более актуально для НИСО, толщина ленты которых может изменяться из-за дополнительных стабилизирующих слоёв [8].

Цель работы – изучение электрических характеристик катушек с неизолированными обмотками для определения таких параметров сверхпроводящей обмотки, как индуктивность, радиальное сопротивление, статическая ВАХ и магнитная характеристика.

Конструкции катушек. Авторы настоящей статьи изготовили и исследовали две катушки галетного типа из неизолированной сверхпроводящей ленты. Катушки использовали в многосекционном соленоиде магнитного охлаждения [5]. Для спайки катушек необходимы галеты одинаковых размеров (внутренний и наружный диаметры соответственно 88 и 120 мм). Каждая катушка представляла собой двойную галету, намотанную на оксидированный алюминиевый каркас. Катушки наматывались с натяжением ленты около 40 Н. Катушка № 1 намотана единым куском ленты длиной 84 м, шириной 4 мм и толщиной 0,10 мм. Для достижения требуемого внешнего диаметра 120 мм, а также улучшения охлаждения и стабильности катушки, на каждой галете между наружными слоями обмотки помещали медную ленту толщиной 0,05 мм длиной 20 м. В катушке № 2 использовали ленту толщиной 0,16 мм, шириной 4 мм. Эту катушку наматывали двумя кусками ленты длиной 31 и 29 м, спаянными между собой дополнительным сверхпроводниковым отрезком длиной 8 см и толщиной 0,1 мм. Припаиваемый отрезок переворачивали, чтобы пайка проводилась сверхпроводящими сторонами, и подложки располагались снаружи. Пайку осуществляли с помощью ленточного паяльника [9] непосредственно на обмотке.

Основные измерения проводили в жидком азоте ($T = 77 \text{ К}$). Катушку № 1 также изучали при $T = 20 \text{ К}$ в криокулере с использованием косвенного охлаждения. В этом случае тепловую энергию от обмотки отводили алюминиевыми оксидированными дисками.

Описание эквивалентной схемы галетной катушки. В катушке с неизолированной обмоткой в нормальном состоянии ($T > T_{\text{кр}}$, где $T_{\text{кр}}$ – критическая температура) не определены азимутальный (круговой) ток I_a и, соответственно, индуктивность L . В сверхпроводящем состоянии ($T < T_{\text{кр}}$), при токах ниже критического, ток течёт по сверхпроводнику с нулевым сопротивлением, имея только азимутальную составляющую. В этом случае индуктивность L обмотки будет такой же, как для изолированного провода.

В пределе низких частот (т. е. когда скорость ввода тока значительно ниже скорости релаксации – установления

равновесия в системе) катушку с НИСО можно описать эквивалентной схемой (рис. 1). Радиальное межвитковое сопротивление R_p возникает из-за отсутствия изоляции между витками. От управляемого источника питания на катушку подается ток I_n , который в обмотке имеет две составляющие: $I_n = I_a + I_p$. Круговой ток I_a течёт по сверхпроводящему слою. Именно этот ток создает магнитное поле в катушке. Радиальная составляющая тока I_p возникает из-за отсутствия изоляции между слоями. Радиальное сопротивление R_p включает сопротивление контактов между слоями и поперечное сопротивление собственно сверхпроводящей ленты. Когда круговой ток I_a достигает критической величины $I_{кр}$, сверхпроводник переходит в резистивное состояние, которое обычно описывают степенной ВАХ:

$$U(I_a) = U_0 (I_a / I_{кр})^N,$$

где напряжение U_0 определяет выбор критического тока $I_{кр}$ (ток считается критическим при напряжении U_0); N – крутизна ВАХ.

В резистивном состоянии в индуктивной цепи возникает добавочное нелинейное сопротивление $R_n = U(I_a) / I_a$ [10]. Пока значение R_n мало ($R_n \ll R_p$), его допустимо использовать для описания НИСО. При больших значениях R_n из-за роста радиального тока зависимость магнитного поля от тока становится нелинейной (об этом ниже), и определение индуктивности как изолированного сверхпроводника проблематично из-за неопределённости R_p . Если обмотка имеет паяные соединения, как в случае катушки № 2, то в сверхпроводящей цепи возникает постоянное сопротивление спая $R_{сп}$. На рис. 1 $R_{сп} = R_n$.

Измерение статической вольт-амперной характеристики. Измерение ВАХ служит для определения критического тока, выше которого могут произойти необратимые процессы нагрева и переход сверхпроводника в нормальное состояние. На коротком образце ленты найденный по ВАХ критический ток зависит от магнитного поля и его ориентации. Если магнитное поле перпендикулярно плоскости ленты, то критический ток при $T = 77$ К в три раза меньше, чем когда поле лежит в плоскости ленты [5]. ВАХ ленточной катушки является интегральной характеристикой, поскольку в обмотке изменяется и поле, и его ориентация к плоскости ленты. Принципиальная особенность измерения статической ВАХ катушки с НИСО состоит в том, что из-за радиальной составляющей тока требуется корректировать круговой ток I_a , текущий в сверхпроводящем слое.

Параметры ВАХ – критический ток и сопротивление индуктивной (сверхпроводящей) цепи – необходимо знать для корректного определения элементов эквивалентной схемы, изображенной на рис. 1. Для статической ВАХ в НИСО напряжение и токи измеряли после завершения релаксационных процессов перетекания токов следующим образом. Поступающий в катушку ток I_n фиксировали и измеряли напряжение U обмотки катушки. Поскольку $I_n = \text{const}$, то напряжение экспоненциально падало из-за снижения радиального (нормального) тока с характерным временем релаксации τ .

При времени $t \gg \tau$ значение $U(t \rightarrow \infty)$ представляло собой точку ВАХ для статического режима заданного тока.

На рис. 2 показана релаксация напряжения катушки № 1 при фиксации входного тока с последовательным увеличением его значений. При малых фиксированных токах $I \ll I_{кр}$, напряжение обмотки стремится к нулю. Это указывает на то, что $R_n = 0$; $R_{сп} = 0$, и весь ток течёт бездиссипативно по сверхпроводящему слою, т. е. $I_a = I_n$. Если напряжение стремится к конечному значению, значит в обмотке наступает резистивное состояние. Таким образом, статическая ВАХ катушки представляет собой зависимость напряжения $U(t \rightarrow \infty)$ при фиксированных токах I .

Статические ВАХ обеих катушек показаны на рис. 3. В рамках приведены релаксационные функции напряжения в логарифмическом масштабе $\log U(t)$, из которых путём аппроксимации определялись значения U при $t \rightarrow \infty$.

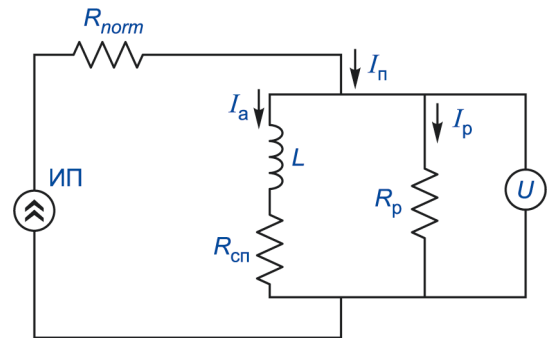


Рис. 1. Эквивалентная схема катушки с неизолированной сверхпроводящей обмоткой: ИП – управляемый источник питания

Fig. 1. Equivalent circuit of the bare superconducting coil: SP – controlled power supply

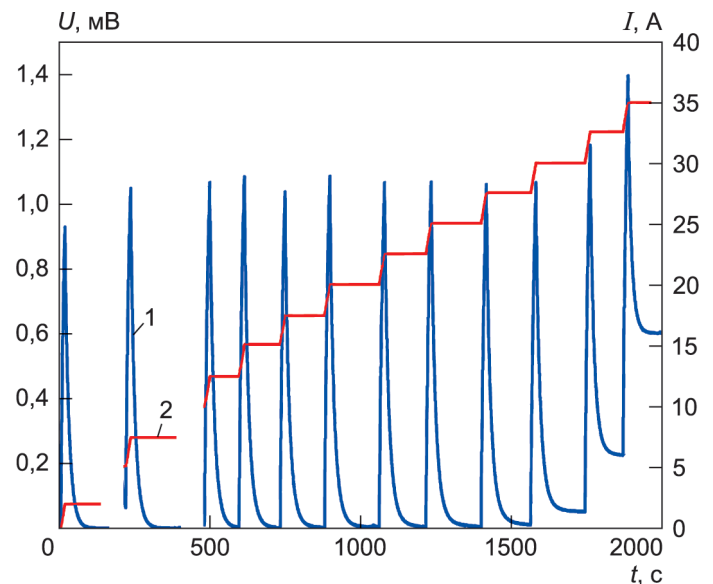


Рис. 2. Релаксация напряжения катушки № 1 при фиксации входного тока (1) и зависимость тока от времени (2)

Fig. 2. Relaxation of the voltage of the coil No. 1 when fixing the input current (1) and the dependence of the current on time (2)

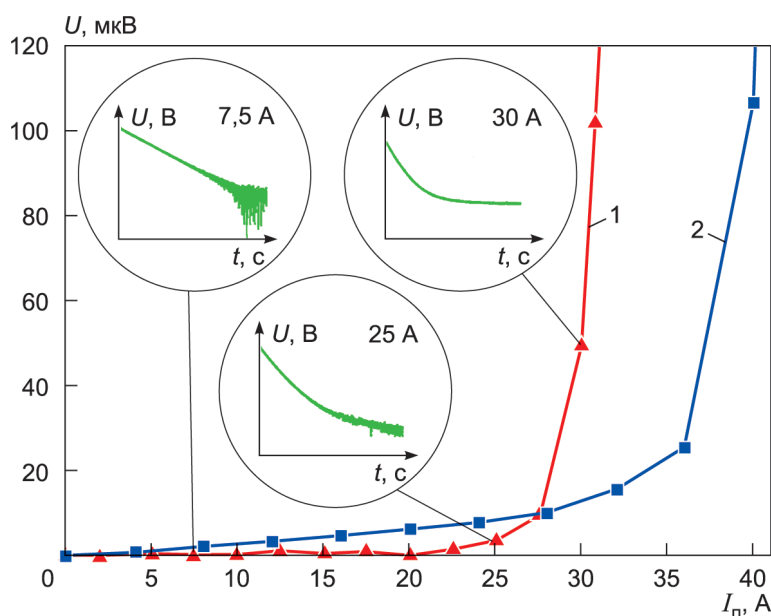


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики катушки № 1 и спаянной катушки № 2 при $T = 77$ К – соответственно 1, 2; на врезках показаны релаксации напряжения $\log U(t)$ при выбранных токах

Fig. 3. Current-voltage characteristics with $T = 77$ K of coil No. 1 (1) and soldered coil No. 2 (2); the insets shown voltage relaxation $\log U(t)$ at the selected currents

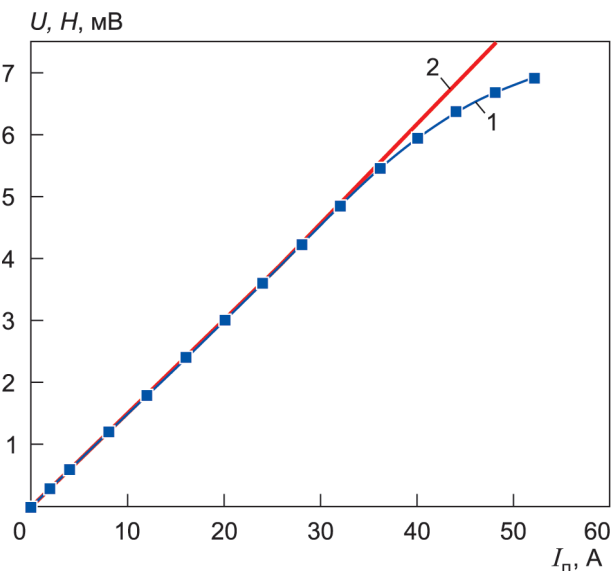


Рис. 4. Магнитное поле в центре катушки с НИСО № 2 в зависимости от фиксированного внешнего тока I_{ext} (1) и магнитная характеристика $H(I)$ ИСО (2)

Fig. 4. The magnetic field in the center of the bare superconducting coil No. 2 depending on the fixed external current I_{ext} (1) and the magnetic characteristic $H(I)$ of the insulated winding (2)

В катушке № 1 появление остаточного напряжения связано с движением флюксидов при приближении к критическому току. В случае паяного соединения сверхпроводника для катушки № 2 напряжение отлично от нуля при всех токах и резко возрастает при токах выше критического. Сопротивление спая, оцененное на линейном

участке ВАХ спаянной катушки № 2, составляло $R_{сп} = dU/dI = 0,33$ мкОм.

Отметим, что получаемые таким способом ВАХ катушек с НИСО, не вполне сопоставимы с ВАХ катушек с ИСО. Дело в том, что в эксперименте измеряется ток от источника I_n , а ток в катушке совпадает с ним только если $U = 0$. При наличии напряжения в катушке течёт радиальный ток $I_p = U/R_p$. Поскольку для ВАХ требуется ток в сверхпроводнике $I_a = I_n - I_p$, то для истинной ВАХ измеряемый ток на рис. 3 следует уменьшить на величину радиальной составляющей тока. Вблизи $I_{кр}$ поправки невелики. Так для ВАХ катушки № 2 на рис. 3 при максимальном $U = 0,55$ мВ и $R_p = 0,55$ мОм ток $I_a = 43$ А, что на 1 А меньше тока источника I_n . Как известно, ВАХ является степенной функцией с большим индексом $U \sim (I/I_{кр})^N$, где $N = 10 \dots 20$ [1], поэтому для сопоставления ВАХ катушек с ИСО и НИСО при больших токах разницу $(I_n - I_p)$ необходимо учитывать.

Радиальный ток, возникающий из-за отсутствия изоляции, влияет на магнитную характеристику катушки, т. е. на зависимость поля от протекающего тока $H(I)$. И в нормальных, и в сверхпроводящих катушках с изоляцией $H(I)$ – линейная функция. В катушках с НИСО это не так. На рис. 4 изображена магнитная характеристика катушки с НИСО. Вблизи $I = 40$ А наблюдается отклонение от линейной зависимости. Из ВАХ на рис. 3 следует, что это значение близко к критическому току. В катушке с НИСО при $I > I_{кр}$ в сверхпроводящем слое резко увеличивается сопротивление, которое снижает кольцевой ток на величину радиального тока, что уменьшает магнитное поле. В результате магнитная характеристика становится нелинейной при закритических токах.

Измерение индуктивности катушек с НИСО. Для измерения индуктивности в обмотку катушки вводим с постоянной скоростью $v = dI_n/dt = \text{const}$ ток I_n от источника питания. Примем условие, что круговой ток I_a меньше критического, поскольку это отвечает корректному определению индуктивности НИСО.

Из равенства напряжений индуктивной L и резистивной R_p ветвей схемы рис. 1

$$U = I_p R_p = L dI_a/dt + I_a R_{сп}$$

получим следующее дифференциальное уравнение для кругового тока I_a :

$$dI_a/dt + I_a/\tau - v\tau R_p/L = 0, \quad (1)$$

где v – скорость ввода тока; $\tau = L/(R_p + R_{сп})$ – характерное время релаксации тока.

Уравнение (1) имеет решение

$$I_a = R_p / (R_p + R_{сп}) v \{ t - \tau [1 - \exp(-t/\tau)] \}.$$

Соответственно, напряжение на катушке зависит от времени

$$U = v\tau R_p R_{сп} / (R_p + R_{сп}) + v\tau L R_p^2 [1 - \exp(-t/\tau)] / (R_p + R_{сп})^2. \quad (2)$$

Катушка № 1 намотана единым куском (без спая), и $R_{\text{сп}}=0$. Поэтому для неё

$$U = \nu L [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (3)$$

Таблица 1

Параметры катушки № 1			
T , К	ν , А/с	L , мГн	R_p , мОм
20	0,067	13	0,118
77	0,087	13	0,330

На рис. 5 показана зависимость напряжения катушки № 1 при линейном вводе тока с постоянной скоростью $\nu=0,067$ А/с. Аппроксимируя зависимость $U(t)$ выражением (3), получаем значения L , τ и радиальные сопротивления, вычисленные как $R_p=L/\tau$. В табл. 1 приведены значения параметров катушки № 1 при двух значениях температуры.

Из табл. 1 следует, что с изменением температуры индуктивность не изменяется, а радиальное сопротивление после охлаждения уменьшается примерно в три раза.

Для спаянной катушки № 2 сопротивление спая $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм выше определено из ВАХ. Сопротивление спая $R_{\text{сп}}$, как показано ниже, оказывается на три порядка меньше радиального сопротивления $R_{\text{сп}} \ll R_p$, и напряжение с высокой точностью можно описать выражением

$$U = \nu t R_{\text{сп}} + \nu L [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (4)$$

Это выражение отличается от (3) линейно возрастающим слагаемым, которое возникает из-за наличия сопротивления спая в цепи сверхпроводника.

На рис. 6 символами показана зависимость $U(t)$ при $T=77$ К, в которой вычтена линейная составляющая – напряжение спая $U_{\text{сп}}=\nu t R_{\text{сп}}$. Кривой 1 изображена аппроксимирующая функция (3). Линией 2 показан ввод тока с постоянной скоростью ν .

В табл. 2 приведены результаты измерений с использованием как исходной, так и скорректированной на сопротивление спая зависимости $U(t)$. Без учёта напряжения спая значение индуктивности завышено на 0,4 %.

Радиальное сопротивление $R_p=0,54$ мОм на три порядка больше сопротивления спая, что оправдывает пренебрежение последним в выражении (2).

Описанная процедура измерения параметров НИСО справедлива до токов ниже критических $I_{\text{кр}}$. При больших токах напряжение катушки степенным образом зависит от протекающего тока, и уравнения становятся нелинейными, с весьма сложным алгоритмом решения. Кроме того, при больших значениях R_n возникают значительные радиальные токи, что требует определить понятие индуктивности.

Закключение. В НИСО из-за низкого радиального сопротивления между витками их индуктивность надёжно определяется только при температурах ниже сверхпроводящего перехода. Если в пределе низких частот входной ток заметно ниже критического тока сверхпроводника, то ток в обмотке имеет только азимутальную составляющую. В этом случае индуктивность НИСО такая же, какая была бы в ИСО.

Экспериментально индуктивность НИСО и межвитковое сопротивление определяются путём изменения напряжения катушки при линейном вводе тока с заданной скоростью.

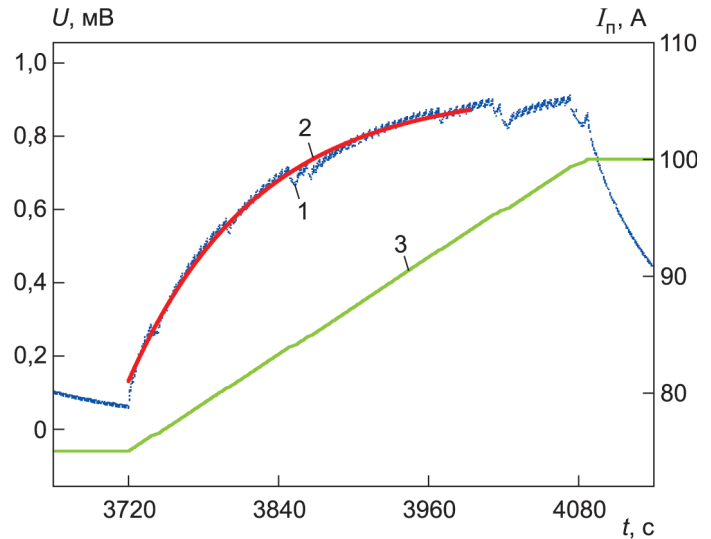


Рис. 5. Зависимость напряжения на катушке № 1 при линейном подъёме тока и значениях $T=20$ К, $\nu=0,067$ А/с и её аппроксимация функцией (3) (соответственно 1, 2); зависимость тока от времени (3)

Fig. 5. Dependence of the voltage on the coil No. 1 with a linear rise in current and values $T=20$ К, $\nu=0,067$ А/с and its approximation by function (3) (respectively 1, 2); time dependence of current (3)

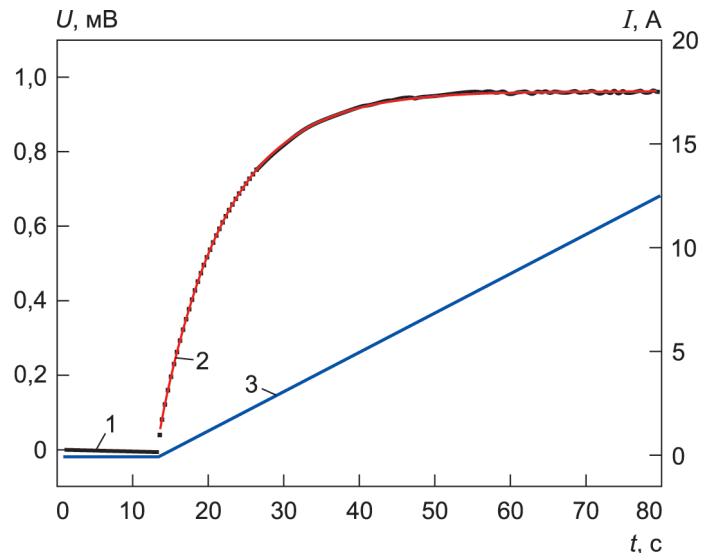


Рис. 6. Скорректированное при $T=77$ К напряжение катушки № 2 $U=U_{\text{н}}-\nu t R_{\text{сп}}$ и его аппроксимация выражением (3) (соответственно 1, 2); ввод тока с постоянной скоростью $\nu=0,19$ А/с; $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм (3)

Fig. 6. The corrected at $T=77$ К voltage of the coil No. 2 $U=U_{\text{н}}-\nu t R_{\text{сп}}$ and its approximation by expression (3) (respectively 1, 2); constant speed current injection $\nu=0,19$ А/с; $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм (3)

Таблица 2

Параметры катушки № 2 при $T=77$ К и скорости ввода тока $\nu=0,19$ А/с

$U(t)$	τ , с	L , мГн	R_p , мОм
Исходная	9,16	4,94	0,539
Коррекция	9,10	4,92	0,541

Данным методом измерены индуктивности и межвитковые сопротивления двух катушек при 77 и 20 К. Выяснено, что с уменьшением температуры индуктивность не изменяется, а контактное сопротивление уменьшается в три раза.

При фиксации тока измерено напряжение обмотки после завершения релаксационных процессов. Полученная зависимость напряжения от тока $U(I)$ представляла собой статическую ВАХ. При больших токах, вблизи перехода в нормальное состояние, статическая ВАХ катушки отличалась от истинной, поскольку из-за межвиткового (контактного) сопротивления возникала радиальная составляющая тока.

При возникновении радиальной составляющей магнитная характеристика $H(I)$ катушки с НИСО становилась нелинейной в отличие от катушки с изолированной обмоткой.

Благодарности. Авторы признательны В. Е. Крылову и И. В. Куликову за предоставленную сверхпроводящую ленту.

Список литературы

1. Morandi A., Gholizad B., Fabbri M., *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, no. 1, 015014. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/015014>
2. Parkinson B. J., Slade R., Mallett M. J. D., Chamritski V., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, 4400405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2235893>
3. Hahn S., Park D. K., Bascunan J., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1592–1595. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093492>
4. Choi S., Jo H. C., Hwang Y. J., Hahn S., Ko T. K., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, no. 3, 4904004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2175892>
5. Krasnoperov E. P., Guryev V. V., Shavkin S. V., Krylov V. E., Sychugov V. V., Korotkov V. S., Ovcharov A. V., Volkov P. V., *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 104–109. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.12>
6. Cubero A., Nunez-Chico A. B., Navarro R., Angurel L. A., Martines E., *Cryogenics*, 2019, vol. 108, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103070>
7. Kim W. S., Trillaud F., Ang I. C., Hahn S. Y., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 2478–2481. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898159>

8. Zimmermann A. W., Sharkh S. M., *Energy Reports*, 2020, vol. 6, supplement 5, pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>

9. Пат. № 2723142 РФ / А. А. Картамышев, Е. П. Краснoperov, Ю. Д. Куроедов, В. В. Сычугов, В. С. Шавкин // Изобретения. Полезные модели. 2020. № 16.

10. Wang X., Hahn S., Kim Y., Bascunan J., Voccio J., Lee H., Iwasa Y., *Superconductor Science and Technology*, 2013, vol. 26, no. 3, 035012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/3/035012>

References

1. Morandi A., Gholizad B., Fabbri M., *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, no. 1, 015014. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/015014>
2. Parkinson B. J., Slade R., Mallett M. J. D., Chamritski V., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, 4400405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2235893>
3. Hahn S., Park D. K., Bascunan J., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1592–1595. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093492>
4. Choi S., Jo H. C., Hwang Y. J., Hahn S., Ko T. K., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, no. 3, 4904004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2175892>
5. Krasnoperov E. P., Guryev V. V., Shavkin S. V., Krylov V. E., Sychugov V. V., Korotkov V. S., Ovcharov A. V., Volkov P. V., *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 104–109. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.12>
6. Cubero A., Nunez-Chico A. B., Navarro R., Angurel L. A., Martines E., *Cryogenics*, 2019, vol. 108, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103070>
7. Kim W. S., Trillaud F., Ang I. C., Hahn S. Y., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 2478–2481. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898159>
8. Zimmermann A. W., Sharkh S. M., *Energy Reports*, 2020, vol. 6, supplement 5, pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>
9. Kartamyshev A. A., Krasnoperov E. P., Kuroedov Yu. D., Sychugov V. V., Shavkin V. S., RF Patent no. 2723142, *Byull. Izobreten., no. 16* (2020)
10. Wang X., Hahn S., Kim Y., Bascunan J., Voccio J., Lee H., Iwasa Y., *Superconductor Science and Technology*, 2013, vol. 26, no. 3, 035012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/3/035012>

Статья поступила в редакцию 09.02.2021; принята к публикации 09.04.2021.

Современные подходы к обеспечению единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов

Андрей Владимирович Клеопин^{1✉}, Иван Михайлович Малай²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

¹kleopin@vniiftri.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

Аннотация. Показана необходимость совершенствования на основе электрооптической стробоскопической измерительной установки Государственного первичного специального эталона единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182-2010. Предложены подходы к обеспечению единства импульсных измерений, направленные на развитие новой системы прослеживаемости измерений параметров импульсных сигналов к единицам Международной системы единиц, а также на независимое воспроизведение эталонных сверхширокополосных электрических импульсов. Рассмотренные подходы можно использовать в работах по совершенствованию ГЭТ 182-2010. Сформулированы основные задачи дальнейших исследований, направленных на создание отечественной электрооптической стробоскопической измерительной установки.

Ключевые слова: метрология формы сигналов, эталон, сверхкороткий импульс, электрооптическое стробирование, осциллограф, фемтосекундный лазер

Для цитирования: Клеопин А. В., Малай И. М. Современные подходы к обеспечению единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 47–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-47-53>

Modern approaches to ensure traceability of fast electrical pulse processes measurements

Andrey V. Kleopin^{1✉}, Ivan M. Malay²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow Region, Russia

¹kleopin@vniiftri.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

Abstract. The necessity of improving the State primary special standard for a unit of pulsed electric voltage GET 182-2010 is substantiated on the basis of an electro-optical sampling system. Approaches to ensure the uniformity of pulse measurements are proposed, aimed at developing a new system of measurements traceability of pulsed signals parameters to the units of the International System of Units, as well as ensuring independent reproduction of reference ultra-wideband electrical pulses. The considered approaches can be used to work on GET 182-2010 improvement. The main tasks of further research in the direction of creating a domestic electro-optical sampling system are formulated.

Keywords: waveform metrology, standard, ultra-short electrical pulse, electro-optic sampling, oscilloscope, femtosecond laser

Введение. С 1990-х гг. бурно развивается производство потребительской электронной техники: компьютеров, мобильных телефонов, смартфонов. Значительно увеличилась полоса пропускания высокоскоростных систем передачи данных, связывающих подобные устройства, а применяемые типы модуляции стали сложнее. Опережающее развитие транспортных сетей, построенных для передачи данных с применением оптоволоконной техники, обеспечило условия для увеличения полосы пропускания и скорости передачи данных по электрическим кабельным линиям и радиоканалу. К настоящему времени символьная скорость передачи

данных по электрическим кабельным линиям и радиоканалу достигла 100 Гбит/с. Сверхкороткие электрические импульсы широко используются в радиотехнических системах и комплексах, применяемых в авиации, медицине, сфере обороны и безопасности. Поэтому актуальны измерения на высоких частотах параметров формы импульсных и цифровых сигналов, а также радиосигналов с цифровой модуляцией.

В Российской Федерации эксплуатируются Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182-2010, а также вторичные

эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от 40 пс (Государственная поверочная схема для средств измерений импульсного электрического напряжения, утверждённая приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 г. № 3463). Отечественные эталоны построены с применением традиционных электронных генераторов перепада на основе линий лавинно-пролётных и туннельных диодов, что ограничивает возможность модернизации эталонов и не в полном объёме позволяет решать перспективные измерительные задачи. Современные цифровые и стробоскопические осциллографы с полосой пропускания выше 26 ГГц при испытаниях в России проверяются на соответствие по параметрам модуля амплитудно-частотной характеристики без оценки фазочастотной, переходной и (или) импульсной характеристик, что приводит к зависимости от зарубежной системы калибровки.

Полосы пропускания осциллографов – рабочих средств измерений (СИ) – расширились от 20 ГГц в 1988 г. до 110 ГГц к настоящему времени (Infiniium UXR-Series Oscilloscopes. Data Sheet. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06242/data-sheets/5992-3132.pdf>). Для оценки амплитуды вектора ошибки в радиосигналах с цифровой модуляцией разработана новая группа радиотехнических СИ – анализаторы векторных сигналов.

Таким образом, для обеспечения единства измерений импульсных электрических процессов, а также поверки и испытаний новых сверхширокополосных осциллографов и генераторов сверхкоротких импульсов существует острая необходимость совершенствования первичного эталона единицы импульсного электрического напряжения. Традиционные подходы к совершенствованию аппаратуры эталона – это либо разработка наиболее широкополосного осциллографа (время нарастания переходной характеристики 4 пс), либо создание генератора (длительность фронта менее 7 пс). Данные подходы нельзя использовать, так как в разработках генераторов импульсов и осциллографов применяется электронная компонентная база одного технологического уровня с сопоставимым быстродействием. Возникла проблема: для оценки параметров переходной характеристики осциллографов требуются генераторы импульсов с более коротким фронтом, в то же время, для определения длительности фронта импульсов, воспроизводимых генераторами, требуются более широкополосные осциллографы. Из этого следует, что для определения переходной характеристики и (или) импульсной характеристики осциллографа с полосой пропускания 26–110 ГГц и выше нужно искать другие подходы, основанные на другом физическом принципе, в которых не использовались бы электронный стробоскопический смеситель или электронный аналого-цифровой преобразователь осциллографа. Таким образом, метрологические институты столкнулись с проблемой создания исходного эталона для обеспечения единства измерений быстропротекающих электрических переходных процессов.

Активные исследования в этой области проводились в национальных метрологических институтах США, Германии, Великобритании, Франции, Кореи, Китая и др. [1–3].

В настоящее время в национальных метрологических институтах NPL, LNE и KRISS создаются, а в NIST, PTB и NIM эксплуатируются электрооптические стробоскопические измерительные установки (далее ЭОС-установки), обеспечивающие измерение параметров сверхкоротких электрических импульсов длительностью менее 3,5 пс, что позволяет оценивать импульсную характеристику осциллографов с полосой пропускания до 100–110 ГГц. В 2018–2019 гг. проведены первые международные сличения исходных ЭОС-установок, эксплуатируемых NIST, PTB и NIM (BIRMM). Результаты сличений опубликованы в 2020 г. [4].

Цель исследования – определить основные направления исследований по совершенствованию системы обеспечения единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов.

Подходы к обеспечению единства импульсных измерений. Рассмотрим пять подходов:

создание первой отечественной ЭОС-установки, что обеспечит возможность совершенствования Государственного первичного эталона (ГПЭ) единицы импульсного электрического напряжения (ЭОС-установка будет являться его основной составной частью);

обеспечение прослеживаемости к единицам международной системы единиц в будущих работах по совершенствованию ГПЭ, совершенствованию нормативно-технической документации и государственной поверочной схемы в области осциллографии, так как в настоящее время прослеживаемость обеспечивается не в полном объёме;

применение методов восстановления и регуляризации сигналов, как при исследовании метрологических характеристик ЭОС-установки, так и при эксплуатации ГПЭ и нижестоящих эталонов единицы импульсного напряжения (вторичных и первого разряда);

применение подхода «Метрология формы сигналов» для нормирования метрологических характеристик ГПЭ, нижестоящих эталонов импульсного напряжения, осциллографов, генераторов перепада и генераторов импульсов, а также в перспективе анализаторов оптических компонентов, генераторов гармоник и нелинейных векторных анализаторов цепей;

использование и развитие методов измерений на подложке и по излучению, что не только необходимо для создания ЭОС-установки, но и актуально в рамках общей тенденции развития радиотехнических измерений, а также позволит получить научно-технический задел для реализации и совершенствования других радиотехнических эталонов и СИ.

Электрооптическая стробоскопическая измерительная установка. ЭОС-установки созданы и эксплуатируются в США, Германии и Китае. В настоящее время исследования, направленные на создание ЭОС-установок, проводятся в Великобритании, Франции и Кореи, но пока не начаты в России.

Современные импульсные лазеры могут генерировать импульсы длительностью 0,1 пс и менее. Для стробирования (выборки) электрических сигналов используются фотопроводящие ключи с пико- и субпикосекундными временами отклика [5]. Электрооптическое стробирование основано на линейном электрооптическом эффекте (эффект Поккельса)

в некоторых кристаллах (низкотемпературном арсениде галлия LT-GaAs, танталате лития LiTaO_3 и др.) [6]. Линейно поляризованный оптический луч, распространяющийся сквозь кристалл, меняет свою поляризацию. Это изменение является функцией приложенного электрического поля и регистрируется поляриметрическими методами.

Структурная схема ЭОС-установки, поясняющая её принцип действия, приведена на рис. 1.

Фемтосекундный лазер $\Phi\text{Л}$ генерирует последовательность оптических импульсов длительностью менее 100 фс. Оптический луч разделяется на два: возбуждающий луч, который действует на вход фотодетектора $\Phi\text{Д}$, и зондирующий луч. Фотодетектор генерирует электрический импульс на коаксиальном выходе. Длительность оптического импульса на порядок меньше, чем время отклика фотодетектора, из-за чего генерируемый фотодетектором электрический импульс равен импульсной характеристике фотодетектора. Эти импульсы распространяются через сверхвысокочастотный пробник ПСВЧ (коаксиально-микрополосковое согласующее устройство) к копланарной микрополосковой линии (coplanar waveguide), изготовленной на фотопроводящей пластине $\Phi\text{П}$ с подложкой из LiTaO_3 . Линейно поляризованный зондирующий луч проходит через перестраиваемую линию задержки, после чего фокусируется под прямым углом на поверхности микрополосковой линии. Поляризация зондирующего луча изменяется пропорционально действующему электрическому полю между токопроводящими проводниками копланарной линии в соответствующий момент времени. Представление электрического импульса во времени осуществляется стробоскопическим методом за счёт приращения задержки между возбуждающим и зондирующим лазерным импульсом.

В качестве начального шага к созданию отечественной ЭОС-установки целесообразно провести эксперименты по воспроизведению сверхкоротких электрических импульсов с помощью макета, состоящего из фемтосекундного лазера и широкополосного фотодетектора. Исследование формы импульсов на данном этапе можно осуществлять с использованием аппаратуры существующего ГЭТ 182-2010.

К основным задачам дальнейших исследований в направлении создания отечественной ЭОС-установки относятся:

исследования по выбору полупроводникового материала для подложки фотопроводящего ключа (LT-GaAs, LiTaO_3 или др.);

электродинамическое моделирование копланарной микрополосковой линии с согласованной нагрузкой для фотопроводящего ключа;

изготовление и экспериментальные исследования набора фотопроводящих ключей с различными (варьируемыми относительно теоретического расчёта) соотношениями ширины полос металлизации копланарной линии и диэлектрического зазора между ними с целью отбора образца с оптимальным согласованием линии и нагрузки в диапазоне частот до 110 ГГц;

расчёт и измерения на подложке комплексных коэффициентов передачи и отражения коаксиально-микрополоскового согласующего устройства между фотопроводящим ключом и выходом коаксиального радиочастотного соединителя размерами 1,042 мм;

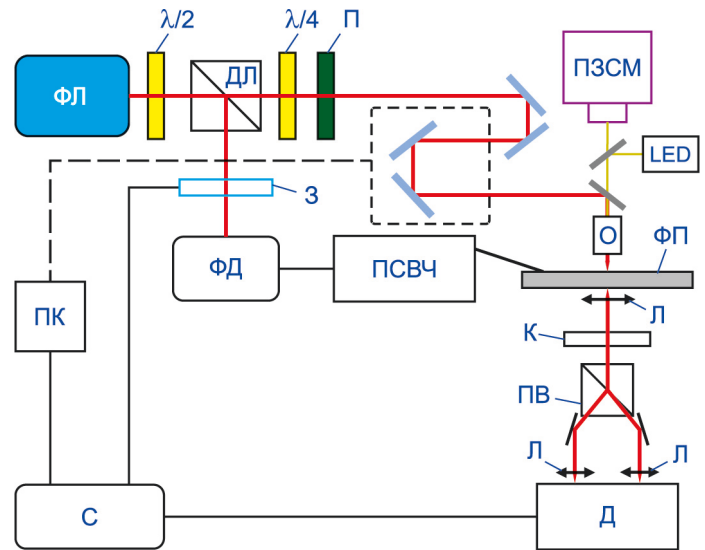


Рис. 1. Структурная схема ЭОС-установки:

$\Phi\text{Л}$ – фемтосекундный лазер; $\lambda/2$, $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая пластины соответственно; ДЛ – делитель луча; П – поляризатор; З – затвор; $\Phi\text{Д}$ – фотодетектор 100 ГГц; ПВЧ – сверхвысокочастотный пробник; ПЗСМ – микроскоп с матрицей светочувствительных фотодиодов, выполненной по технологии приборов с зарядовой связью; LED – светодиод подсветки для микроскопа; О – объектив; $\Phi\text{П}$ – фотопроводящая пластина с подложкой из LiTaO_3 ; Л – линза; К – компенсатор; ПВ – призма Волластона; Д – детектор; С – синхронизация; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the EOS system: FL – femtosecond laser; $\lambda/2$, $\lambda/4$ – half-wave and quarter-wave plates, respectively; BD – beam divider; P – polarizer; S – shutter; PD – 100 GHz photodetector; PUHF – ultra-high-frequency probe; CCDM – microscope with an array of photosensitive photodiodes, made according to the technology of devices with a charge-coupled device; LED – light-emitting diode for illumination for a microscope; O – object-glass; PP – photoconductive plate with a LiTaO_3 substrate; L – lens; C – compensator; PW – Wollaston prism; D – detector; SC – synchronization; PC – personal computer

выбор оптимального варианта конструкции ЭОС-установки на основе оптических, оптоэлектронных и радиоэлектронных компонентов, обоснование требований к узлам оптической и оптоволоконной техники;

разработка специального алгоритма, реализующего управление перестраиваемой оптической линией задержки для обеспечения стробоскопического режима и масштабирования выборки отсчётов электрического импульса, исследования по обеспечению синхронизации ЭОС-установки и прослеживаемости временной шкалы к эталонам единицы времени;

исследование функционального макета ЭОС-установки в целом, сравнение результатов измерений амплитудно-частотной характеристики фотоприёмника с результатами, полученными методом частотной калибровки синусоидальным сигналом.

Прослеживаемость к единицам Международной системы единиц. Коэффициент масштабирования ЭОС-установки можно определить посредством сравнения с сигналом, измеренным при возбуждении фотоприёмника оптическим излучением с огибающей прямоугольной формы и известными

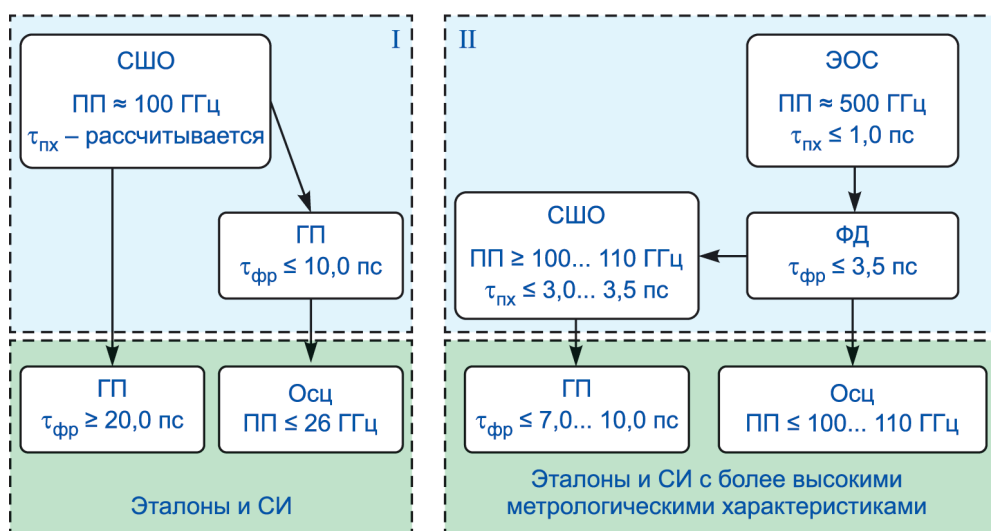


Рис. 2. Существующая I и перспективная II схемы исходных эталонов единицы импульсного электрического напряжения:

СШО – сверхширокополосный осциллограф; ГП – генератор перепада; Осц – осциллографы; ЭОС – ЭОС-установка; ФД – фотодетектор; ПП – полоса пропускания; $\tau_{\text{пх}}$ – время нарастания переходной характеристики; $\tau_{\text{фр}}$ – длительность фронта импульсов

Fig. 2. Diagrams of existing I and proposed II original electrical pulse signal standards:

UWO – ultra-wideband oscilloscope; SG – step generator; Osc – oscilloscopes; EOS – EOS system; PD – photodetector BW – bandwidth; τ_t – the rise time of the transient response; τ_p – pulse rise time

амплитудой и частотой следования. Авторы настоящей статьи проанализировали зарубежные исследования существующих ЭОС-установок. Согласно [7] предпочтительным по отношению к вышеописанному варианту определения коэффициента масштабирования ЭОС-установки является вариант измерений импульсной характеристики фотодетектора только как функции от времени без указания каких-либо единиц измерения значений функции.

Амплитудно-частотную характеристику фотодетектора также можно определить традиционным методом частотной калибровки синусоидальным сигналом. При этом обеспечивается прослеживаемость к единице средней мощности электромагнитных колебаний, а также корректная оценка фазочастотной характеристики фотодетектора. Временная шкала ЭОС-установки непосредственно прослеживается к единице времени. Кроме этого, с помощью лазерного интерферометра параметры ЭОС-установки можно прослеживать к единице длины и рассчитывать временную шкалу с использованием константы скорости света [8]. Таким образом, за счёт прослеживаемости ЭОС-установки к единицам времени (частоты) и средней мощности электромагнитных колебаний, будет обеспечиваться прослеживаемость осциллографов, генераторов перепада и генераторов импульсов к соответствующим эталонам единиц величин.

На рис. 2 приведена используемая в настоящее время упрощённая схема I построения аппаратуры ГЭТ 182-2010. Данная схема имеет следующие основные недостатки:

динамические характеристики сверхширокополосного стробоскопического осциллографа известны только по результатам зарубежной калибровки, при этом с применением

отечественных эталонов и СИ определяется только модуль амплитудно-частотной характеристики осциллографа, а фазочастотная, импульсная и переходная характеристики осциллографа рассчитываются по приближенным формулам; полоса пропускания эталонов и СИ, поверяемых и аттестуемых с использованием исходного эталона, ограничена значением 26 ГГц, длительность фронта импульсов, воспроизводимых эталонами и СИ, не менее 20 пс, что не удовлетворяет современным требованиям.

Создание отечественной ЭОС-установки для совершенствования ГЭТ 182-2010 позволит устранить вышеуказанные недостатки. На рис. 2 представлена также перспективная схема II построения модернизированного ГЭТ 182-2010.

Восстановление и регуляризация электрических сигналов.

В контексте сверхширокополосных измерений на ЭОС-установке

чрезвычайно актуальна задача расчёта входного сигнала из искаженных экспериментальных данных. Для определения с помощью ЭОС-установки импульсной характеристики фотоприёмника необходимо учесть все частотно-зависимые потери пробника, копланарной микрополосковой линии и места их соединения. Одна из методик частотной коррективки, применяемая для ЭОС-установки NIST (США), подробно представлена в [7].

Анализ неопределённостей измерений на подложке эволюционировал со временем, и сейчас существуют различные методы учёта неопределённостей калибровок при измерении [9], а также методы учёта эффекта взаимного влияния пробников [10]. Результат корректировки строго определён только в той частотной области, в которой коаксиальные соединители функционируют в одномодовом режиме. При использовании новых коаксиальных соединителей диаметром 0,8 мм верхняя граница частотного диапазона расширяется до 145 ГГц.

Радиочастотные элементы измерительной ЭОС-системы, а также проверяемые широкополосные осциллографы описываются моделью линейного динамического звена. Подобные системы характеризуются импульсной характеристикой – откликом на входную δ -функцию. Выходной сигнал $u_{\text{вых}}(t)$ представляет собой свёртку (обозначена «*») двух функций – входного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ и импульсной характеристики системы $h(t)$. Операция свёртки описывается интегралом Дюамеля [11]:

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вх}}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(t) h(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где τ – независимая переменная времени.

Если на входе исследуемого звена действует детерминированный сигнал $u_{\text{вх}}(t)$, заданный обратным преобразованием Фурье как $U_{\text{вх}}(\omega)e^{j\omega t}$ (где ω – угловая частота), а также если известен комплексный коэффициент передачи $H(j\omega)$ системы, то выходной сигнал представляется как

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) U_{\text{вх}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

Восстановление формы входных сигналов – обратная задача, в которой по известным выходному сигналу и характеристике системы необходимо определить входное воздействие, т. е. привести сигнал ко входу. Существует два основных подхода к восстановлению формы сигналов: решение уравнения обратной свёртки во временной области или деление на частотный коэффициент передачи в частотной области (инверсная фильтрация). Однако на практике из-за влияния шумов и неопределённости измерений задача восстановления приводит к уравнениям, обладающим свойством некорректности по Адамару (нарушается хотя бы одно из условий корректности: решение существует, оно единственно и устойчиво), и не может быть решена классическими методами [11]. Например, некорректность решения возникает в частотной области, когда частотная передаточная функция стремится к нулю и деление даёт бесконечно большой разброс решений. Методы решения задач восстановления описаны в теории регуляризации [12, 13].

Метрология формы сигналов. Формы сигналов при существующем обеспечении единства измерений электрических импульсных процессов описываются параметрически. Для нормирования характеристик эталонов и СИ импульсно-осциллографической группы, а также выражения погрешностей измерений параметров сигналов традиционно используются скалярные параметры: время нарастания переходной характеристики; длительность фронта (спада); выброс; неравномерность; скос вершины и др. (ГОСТ 22737-90 «Осциллографы электронно-лучевые. Общие технические требования и методы испытаний»; IEEE Std 181-2011 «IEEE standard for transitions, pulses, and related waveforms»). Данные параметры рассчитываются из экспериментально полученных функциональных зависимостей, представляющих форму сигнала во временной области. Традиционный подход обладает существенным недостатком – отсутствует чёткая однозначная связь между погрешностями амплитудно-временных и амплитудно-частотных измерений, поэтому нет общего подхода к определению характеристик современных multifunctional радиоизмерительных приборов, работающих одновременно во временной и частотной областях. На рис. 3 схематически представлено нормирование границ погрешности измерений, которое применяется в настоящее время для радиотехнических СИ при амплитудно-частотных и при амплитудно-временных измерениях.

Метрология формы сигналов – это перспективный подход к нормированию метрологических характеристики эталонов и СИ, а также к описанию электрических сигналов. При таком подходе измеряется функция сигнала от времени. На практике функция представляется массивом дискретных, эквидистантных по времени отсчётов. Из полученной функциональной

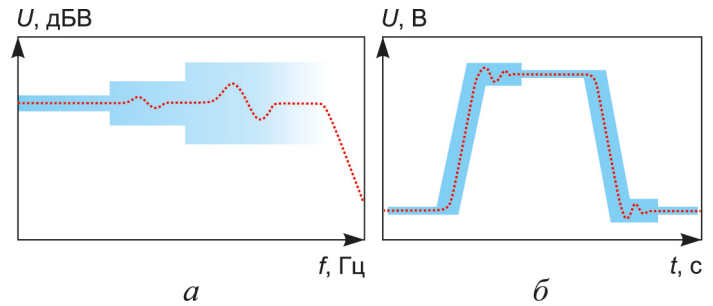


Рис. 3. Границы погрешности измерений для генераторов сигналов, анализаторов спектра, анализаторов цепей и др. (а), для осциллографов, генераторов импульсов и др. (б)

Fig. 3. Typical measurement uncertainties for signal generators, spectrum analyzers, VNAs etc. (a), for oscilloscopes, pulse generators etc. (b)

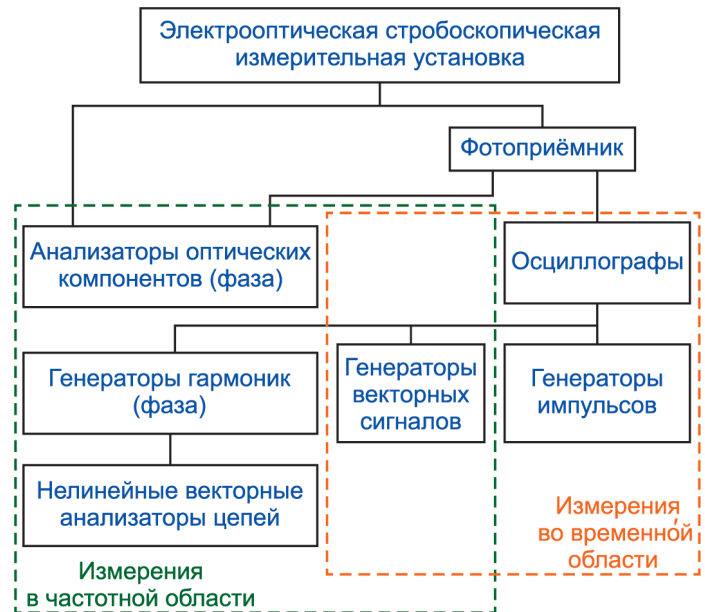


Рис. 4. Схема прослеживаемости амплитудно-временных и амплитудно-частотных измерений от ЭОС-установки

Fig. 4. Frequency response related and transient response related measurements traceability mutuality

зависимости (формы) выводится традиционное параметрическое описание сигнала или характеристики СИ. Важнейшая задача в метрологии формы сигналов – обеспечение единства прослеживаемости в единицах Международной системы единиц при представлении сигнала, как во временной, так и в частотной области, а также исследование соотношений между ними и способов преобразования номинальных значений и неопределённостей измерений из одной области в другую.

Использование ЭОС-установки в составе ГЭТ 182-2010 совместно с метрологией формы сигналов обеспечивает не только описание ультракороткого испытательного импульса сверхширокополосных осциллографов, но и применение новых эффективных способов воспроизведения эталонных сигналов для оценки фазочастотной характеристики анализаторов оптических компонентов, генераторов гармоник и нелинейных векторных

анализаторов цепей [14, 15]. На рис. 4 представлена схема прослеживаемости таких измерений от ЭОС-установки.

Прослеживаемость измерений, как в частотной, так и во временной областях имеет особое значение для современных анализаторов и генераторов векторных сигналов. Указанные группы СИ оперируют импульсно-модулированными радиосигналами, для оценки параметров которых одновременно требуются как узкополосные методы измерений в частотной области с широким динамическим диапазоном и низкой погрешностью, так и методы измерений во временной области, обладающие широкополосностью, быстродействием и широкими возможностями по синхронизации с цифровыми и кодовыми последовательностями.

Бесконтактные импульсные измерения. В настоящее время вместо модульной структуры радиоэлектронной аппаратуры с межблочными соединениями коаксиальными линиями или волноводами часто используются интегральные компоненты. Поэтому импульсные измерения в радиотехнике проводятся непосредственно на подложке без использования каких-либо соединителей. Кроме того, беспроводные системы связи нового поколения, работающие в миллиметровом диапазоне частот, требуют развития новых бесконтактных методов измерений – по электромагнитному излучению. У цифровых антенных решёток высокая степень интеграции и нет радиочастотных входных разъёмов, поэтому потребуется проводить измерения на подложке совместно с измерениями поля в пространстве [16].

При развитии таких измерений появятся новые пробники, радиофотонные измерительные преобразователи, а также измерительные зонды, встроенные в пробники. Для оценки параметров (или калибровки) указанных СИ требуются измерительные ЭОС-системы, с помощью которых обеспечивается воспроизведение связанных по параметрам лазерных и электрических импульсов, а также измерение формы электрических импульсов непосредственно в необходимой точке на копланарной микрополосковой линии.

Закключение. Согласно проведённому анализу подходов основным направлением развития системы обеспечения единства изменений быстропротекающих импульсных процессов в Российской Федерации является создание ЭОС-установки с последующим совершенствованием государственного первичного эталона единицы импульсного электрического напряжения.

В работах по совершенствованию ГЭТ 182-2010, а также при совершенствовании методической, нормативно-технической документации и переработке государственной поверочной схемы в области осциллографии, отдельное внимание необходимо уделить обеспечению прослеживаемости импульсных измерений к государственным эталонам единицы частоты и времени и единицы средней мощности электромагнитных колебаний. При создании и исследовании метрологических характеристик ЭОС-установки потребуется применение методов восстановления и регуляризации сигналов, методов частотной корректировки потерь в микрополосковых линиях, методов учёта неопределённости калибровок и методов учёта эффекта взаимного влияния пробников. Использование вышеперечисленных методов также потребуется при передаче единицы импульсного напряжения нижестоящим эталонам, имеющим в своем составе новые

пробники, радиофотонные измерительные преобразователи, а также измерительные зонды, встроенные в пробники.

Важными направлениями исследований, связанными с созданием ЭОС-установки, также являются развитие метрологии формы сигналов и методов измерений на подложке и по электромагнитному излучению.

Список литературы

1. Hale P. D., Williams D. F., Dienstfrey A., Wang J. et al., Traceability of high-speed electrical waveforms at NIST, NPL, and PTB, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 522–523. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251033>
2. Tian W., Allal D., Boudebs G., Charles M., Ndiaye O., Vincent P., Development of an Electro-Optic Sampling System at LNE, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 654–655. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251099>
3. Feng Z., Zhao K., Li B., Yang Z., Song Z., Cui X., Pulse waveform characterization by electro-optic sampling at NIM, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191721>
4. Bieler M., Struszewski P., Feldman A., Jargon J. et al., International comparison on ultrafast waveform metrology, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191926>
5. Shank C., Laubereau A., etc., *Ultrashort laser pulses: Generation and applications*, ed. Wolfgang Kaiser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 494 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0070977>
6. Valdmanis J., Mourou G., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>
7. Hale P., Williams D., Dienstfrey A., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 5, S135. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aad1cd>
8. Stone J., *NCSLI Measure*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1080/19315775.2009.11721483>
9. Williams D., Wang J., Arz U., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 12, pp. 2391–2401. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.819211>
10. Williams D., Schmuckle F., Doerner R., Phung G., Arz U., Heinrich W., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, vol. 62, no. 8, pp. 1748–1761. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2331623>
11. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наукова думка, 1986. 543 с.
12. Dienstfrey A., Hale P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1769–1778. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2297631>
13. Клеопин А. В. Методики восстановления формы сверхкоротких импульсов, используемые при исследовании импульсного электромагнитного излучения // Вестник метролога. 2011. № 1. С. 10–12.

14. Reader H., Williams D., Hale P., Clement T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 515–521. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914630>

15. Ridler N., Salter M., *Metrologia*, 2002, vol. 39, no. 3, 295, <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/3/6>

16. Swindlehurst A., Ayanoglu E., Heydari P., Capolino F., *IEEE Communication Magazine*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453>

References

1. Hale P. D., Williams D. F., Dienstfrey A., Wang J. et al., Traceability of high-speed electrical waveforms at NIST, NPL, and PTB, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 522–523. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251033>

2. Tian W., Allal D., Boudebs G., Charles M., Ndiaye O., Vincent P., Development of an Electro-Optic Sampling System at LNE, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 654–655. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251099>

3. Feng Z., Zhao K., Li B., Yang Z., Song Z., Cui X., Pulse waveform characterization by electro-optic sampling at NIM, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191721>

4. Bieler M., Struszewski P., Feldman A., Jargon J. et al., International comparison on ultrafast waveform metrology, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191926>

5. Shank C., Laubereau A., etc., *Ultrashort laser pulses: Generation and applications*, ed. Wolfgang Kaiser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 494 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0070977>

6. Valdmanis J., Mourou G., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>

7. Hale P., Williams D., Dienstfrey A., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 5, S135. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aad1cd>

8. Stone J., *NCSLI Measure*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1080/19315775.2009.11721483>

9. Williams D., Wang J., Arz U., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 12, pp. 2391–2401. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.819211>

10. Williams D., Schmuckle F., Doerner R., Phung G., Arz U., Heinrich W., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, vol. 62, no. 8, pp. 1748–1761. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2331623>

11. Verlan' A. F., Sizikov V. S., *Integral'nye uravneniya: metody, algoritmy, programmy. Spravochnoe posobie [Integral equations: methods, algorithms, programs. Reference manual]*, Kiev, Naukova dumka, 1986, 543 p. (In Russ.)

12. Dienstfrey A., Hale P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1769–1778. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2297631>

13. Kleopin A. V., *Metodiki vosstanovleniya formy sverkhkorkotkikh impul'sov, ispol'zuemye pri issledovanii impul'snogo elektromagnitnogo izlucheniya [Ultrashort pulse shape reconstruction techniques used in the study of pulsed electromagnetic radiation]*, *Vestnik metrologa*, 2011, no. 1, pp. 10–12. (In Russ.)

14. Reader H., Williams D., Hale P., Clement T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 515–521. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914630>

15. Ridler N., Salter M., *Metrologia*, 2002, vol. 39, no. 3, 295. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/3/6>

16. Swindlehurst A., Ayanoglu E., Heydari P., Capolino F., *IEEE Communication Magazine*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453>

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; принята к публикации 26.04.2021.

Научная статья

УДК 537.86:621.317.335.3

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-9-54-61>

Многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей электрофизических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий

Александр Игоревич Казьмин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, alek-kazmin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7682-2420>

Аннотация. Освещены вопросы экспериментального определения электродинамических параметров существующих и новых синтезируемых материалов и покрытий, применяемых в диапазоне сверхвысоких частот. Рассмотрены проблемы измерений радиоволновыми методами электрофизических и геометрических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий, расположенных на металлической подложке. Предложен оригинальный радиоволновый метод совместных измерений частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также толщины плоскостойких образцов диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металлической подложке. Определение электрофизических и геометрических параметров покрытия сведено к минимизации целевой функции, построенной по невязке между экспериментальными и вычисленными теоретическими значениями коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны сверхвысококачастотного диапазона на сетке дискретных частот. Представлена имитационная модель измерений, реализованная на основе системы электродинамического моделирования CST Microwave studio (Simulia, USA) и системы Matlab. Приведены результаты имитационного моделирования по определению частотных зависимостей электрофизических параметров и толщины образца радиопоглощающего покрытия на металлической подложке. Получены погрешности оценок комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в полосе частот 9–13,5 ГГц, составляющие не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 при среднем квадратическом отклонении уровня шума 0,006. Предложенный метод может быть востребован в различных наукоёмких сферах – микроэлектронной, аэрокосмической, машиностроительной и др.

Ключевые слова: поверхностная электромагнитная волна, диэлектрическое покрытие, магнитодиэлектрическое покрытие, комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная магнитная проницаемость, частотная дисперсия, обратная задача, имитационная модель, коэффициент ослабления поля

Для цитирования: Казьмин А. И. Многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей электрофизических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 54–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-54-61>

Multifrequency optimization method of measurement the frequency dependency of electrophysical parameters of dielectric and magnetodielectric coatings

Aleksandr I. Kaz'min

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia, alek-kazmin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7682-2420>

Abstract. The issues of experimental determination of electrodynamic parameters of existing and new synthesized materials and coatings used in the microwave range are highlighted. Problems arising from measurements of the electrophysical and geometric parameters of dielectric and magnetodielectric coatings, taking into account their placement on a metal substrate, by radio wave methods are considered. We present the new radio wave method of joint measurements of the frequency dependence of the complex permittivity, the frequency dependence of the complex magnetic permeability, and the thickness of plane-layered samples of dielectric and magnetodielectric coatings on a metal substrate. Determination of electrophysical and geometric parameters of the coating in the proposed method is reduced to minimizing the objective function constructed based on the discrepancy between the experimental and design theoretical values of the attenuation coefficients of surface electromagnetic wave fields on a grid of discrete frequencies. The simulation model of measurements is shown, implemented on the basis of the electrodynamic modeling system CST Microwave studio (Simulia corporation, USA) and the Matlab system. The results of simulation are presented to determine the frequency dependences of the electrophysical parameters and the thickness of a sample of a radio-absorbing coating on a metal substrate. Errors in the estimates of permittivity and permeability in the measurement frequency band 9–13.5 GHz, which are no more than 10 % with a confidence level of 0.95 with a mean square deviation of the noise level of 0.006, have been obtained. The proposed method can be in demand in various science-intensive areas – microelectronic, aerospace, mechanical engineering, etc.

Keywords: surface electromagnetic waves, dielectric coating, magnetodielectric coating, complex permittivity, complex permeability, frequency dispersion, inverse problem, simulation model, attenuation coefficient of surface electromagnetic waves

Введение. Диэлектрические и магнитоэлектрические покрытия, предназначенные для работы в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, широко применяются в различных наукоёмких сферах [1–4]. Отдельное важнейшее научное направление – проектирование и разработка радиопоглощающих покрытий, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности вооружения и военной техники [2–4].

Эффективность покрытий различных типов определяется соответствием электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП) материала покрытия заданным значениям как на этапе проектирования, так и в ходе эксплуатации. При этом ЭФГП покрытия необходимо оценивать в условиях, приближённых к реальному практическому применению, т. е. в соответствующем частотном диапазоне и при учёте размещения покрытия на металлической подложке. Поэтому актуальной научной задачей является разработка новых методов определения ЭФГП диэлектрических и магнитоэлектрических покрытий, применяемых в СВЧ-диапазоне.

При измерениях ЭФГП материалов и покрытий широко распространены методы свободного пространства, основанные на оценке комплексных коэффициентов отражения $\hat{R}(f, \hat{\epsilon}_n, \hat{\mu}_n, t_n)$ и прохождения $\hat{T}(f, \hat{\epsilon}_n, \hat{\mu}_n, t_n)$ зондирующего сигнала частотой f и последующем пересчёте данных коэффициентов в значения комплексных диэлектрической $\hat{\epsilon}_n$ и магнитной $\hat{\mu}_n$ проницаемостей, а также толщины покрытия t_n [4–7]. При этом для диэлектрических покрытий, магнитная проницаемость которых равна единице, достаточно измерения только коэффициента отражения [6, 8]. Однако для определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей магнитоэлектрических покрытий требуется совместное измерение коэффициентов отражения и прохождения [6, 7]. Таким образом, методы свободного пространства [4–8] оказываются непригодными для оценки ЭФГП магнитоэлектрических покрытий, размещённых на металлической подложке.

В методах [5, 6] на геометрические размеры магнитоэлектрических образцов материалов с проницаемостью $\hat{\mu}_n \neq 1$ накладывается ограничение: их оптическая толщина $b = t_n \sqrt{\hat{\epsilon}_n \hat{\mu}_n}$ должна составлять менее четверти минимальной длины волны. Кроме того, представленные в [3–8] подходы позволяют определять только эквивалентные значения ЭФГП, полученные путём усреднения на исследуемой площади покрытия, что приводит к уменьшению локальности контроля.

В [9, 10] на основе эффектов взаимодействия поверхностных электромагнитных волн СВЧ-диапазона с объектом контроля развиты базовые принципы определения ЭФГП диэлектрических и магнитоэлектрических покрытий. В качестве информативного параметра используется действительная часть комплексного коэффициента ослабления, которая определяется по результатам косвенных измерений напряжённости электрического поля поверхностной электромагнитной волны методом зонда [9–11]:

$$\alpha'(f_k, \xi_n) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \ln \left[\frac{E_j}{E_{j+1}} \right], \quad (1)$$

где f_k – текущая частота измерения; $\xi_n = \{\epsilon'_n, \epsilon''_n, \mu'_n, \mu''_n, t_n\}$ – вектор ЭФГП покрытия; r – количество точек измерения;

s – расстояние между точками измерений; E_j, E_{j+1} – напряжённости электрического поля поверхностных электромагнитных волн, измеренные по нормали к поверхности покрытия в точках измерений $y, (y+s)$.

При измерениях ЭФГП материалов покрытий с диэлектрическими и магнитными потерями следует также учитывать и мнимую часть комплексного коэффициента ослабления $\alpha''(f_k, \xi_n)$. Она связана с коэффициентом затухания поверхностной электромагнитной волны вдоль покрытия (в направлении распространения поверхностной электромагнитной волны) α_3 зависимостью [10]:

$$\alpha''(f_k, \xi_n) = \sqrt{\frac{\alpha_3^4 - \alpha_3^2 \alpha'^2(f_k, \xi_n) - k_0^2 \alpha_3^2}{\alpha'^2(f_k, \xi_n) - \alpha_3^2}}, \quad (2)$$

где $k_0 = 2\pi f_k / c$ – волновое число свободного пространства; c – скорость электромагнитных волн в свободном пространстве.

Перспективно дальнейшее развитие представленных подходов для определения ЭФГП покрытий различных типов, в которых комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости обладают частотной дисперсией.

Цель статьи – разработка многочастотного оптимизационного метода измерения частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также толщины диэлектрических и магнитоэлектрических покрытий на металлической подложке. Метод должен обеспечивать повышение точности и достоверности оценки указанных характеристик.

Электродинамическая модель определения ЭФГП диэлектрических и магнитоэлектрических покрытий. Базовая идея методов [9, 10] с использованием поверхностных электромагнитных волн для определения вектора ЭФГП ξ_n исследуемых образцов покрытий заключается в решении обратной задачи, которая сводится к минимизации целевой функции. Указанная целевая функция строится как невязка между вектор-столбцами экспериментальных $\mathbf{A}_3$ и рассчитанных $\mathbf{A}_T$ значений комплексных коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны на сетке дискретных частот $f_k, k = 1, 2, \dots, K$:

$$\hat{\xi}_n = \arg \min_{\xi \in \xi_{\text{доп}}} \rho(\xi_n) = \frac{1}{K} |\mathbf{A}_3 - \mathbf{A}_T|^2; \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_3 = [\alpha'_3(f_1, \xi_n), \alpha'_3(f_2, \xi_n), \dots, \alpha'_3(f_K, \xi_n)]^T;$$

$$\mathbf{A}_T = [\dot{\alpha}_T(f_1, \xi_n), \dot{\alpha}_T(f_2, \xi_n), \dots, \dot{\alpha}_T(f_K, \xi_n)]^T,$$

где $\rho(\xi_n)$ – расстояние между векторами $\mathbf{A}_3, \mathbf{A}_T$ коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны в области допустимых значений $\xi \in \xi_{\text{доп}}$; $\alpha'_3(f_k, \xi_n)$ – экспериментальные действительные части коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны; $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_n)$ – теоретические комплексные коэффициенты ослабления поля поверхностной электромагнитной волны.

Рассмотрим особенности реализации метода для случая совместного измерения частотных зависимостей комплексных

диэлектрической и магнитной проницаемостей и толщины плоскостойких образцов магнитодиэлектрических покрытий на металлической подложке.

На рис. 1 приведены структурная и эквивалентная схемы однослойного магнитодиэлектрического покрытия с частотной дисперсией комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей на металлической подложке. С учётом дисперсии данных параметров в векторе ЭФГП ξ_n обозначим их в виде функций частот $\xi_n = \{\varepsilon'_n(f_k), \varepsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k), t_n\}$.

Частотную дисперсию комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей можно учесть путём параметризации искомых параметров [10]. Для учёта частотной дисперсии в материалах любых типов, в общем случае, выражения для действительной и мнимой частей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей целесообразно представить в виде параметрических функций частоты

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_n(f_k) &= \sum_{l_1}^{m_1} a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'} f_k^{l_1}; \quad \varepsilon''_n(f_k) = \sum_{l_2}^{m_2} a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''} f_k^{l_2}; \\ \mu'_n(f_k) &= \sum_{l_3}^{m_3} a_{m_3-l_3}^{\mu'} f_k^{l_3}; \quad \mu''_n(f_k) = \sum_{l_4}^{m_4} a_{m_4-l_4}^{\mu''} f_k^{l_4}; \\ l_1 &= 0, \dots, m_1; \quad l_2 = 0, \dots, m_2; \quad l_3 = 0, \dots, m_3; \quad l_4 = 0, \dots, m_4, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'}$, $a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''}$, $a_{m_3-l_3}^{\mu'}$, $a_{m_4-l_4}^{\mu''}$ – параметры полиномов комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, соответственно; m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – число членов в соответствующем полиноме.

Исходя из вида дисперсионной частотной зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, число членов в полиномах (4) выбирается так, чтобы обеспечить минимум функционала (3). С учётом этого в целевую

функцию (3) введём (как дополнительные параметры при её минимизации) число членов m_1 , m_2 , m_3 , m_4 в полиномах, аппроксимирующих комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости (4).

Параметры полиномов (4) и толщину покрытия t_n объединим в вектор $\xi'_n = \{a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'}, a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''}, a_{m_3-l_3}^{\mu'}, a_{m_4-l_4}^{\mu''}, t_n\}$ и осуществим переход от вектора ξ_n к вектору ξ'_n :

$$\begin{aligned} \xi_n &= \{\varepsilon'_n(f_k), \varepsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k), t_n\} \rightarrow \\ &\rightarrow \xi'_n = \{a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'}, a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''}, a_{m_3-l_3}^{\mu'}, a_{m_4-l_4}^{\mu''}, t_n\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Данный переход позволяет осуществлять минимизацию целевой функции (3) путем варьирования не конкретных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, а параметрических коэффициентов $a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'}$, $a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''}$, $a_{m_3-l_3}^{\mu'}$, $a_{m_4-l_4}^{\mu''}$ вектора ξ'_n . Таким образом, в результате минимизации целевой функции (3) определяются коэффициенты полиномов (4) и, соответственно, конкретный вид частотных дисперсионных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого покрытия в исследуемой полосе частот $\Delta f = f_k - f_1$.

Согласно (2) мнимую часть комплексного коэффициента ослабления можно определить по результатам косвенных измерений коэффициента затухания поверхностной электромагнитной волны α_z вдоль поверхности покрытия [10]. Однако при этом теряется главная особенность использования поверхностных электромагнитных волн – локальность контроля. В [10] проведены исследования, показавшие, что мнимую часть $\alpha''(f_k, \xi'_n)$ комплексного коэффициента ослабления можно учесть путём её включения в целевую функцию (3) в качестве дополнительного параметра при минимизации целевой функции. Функциональную зависимость мнимой части

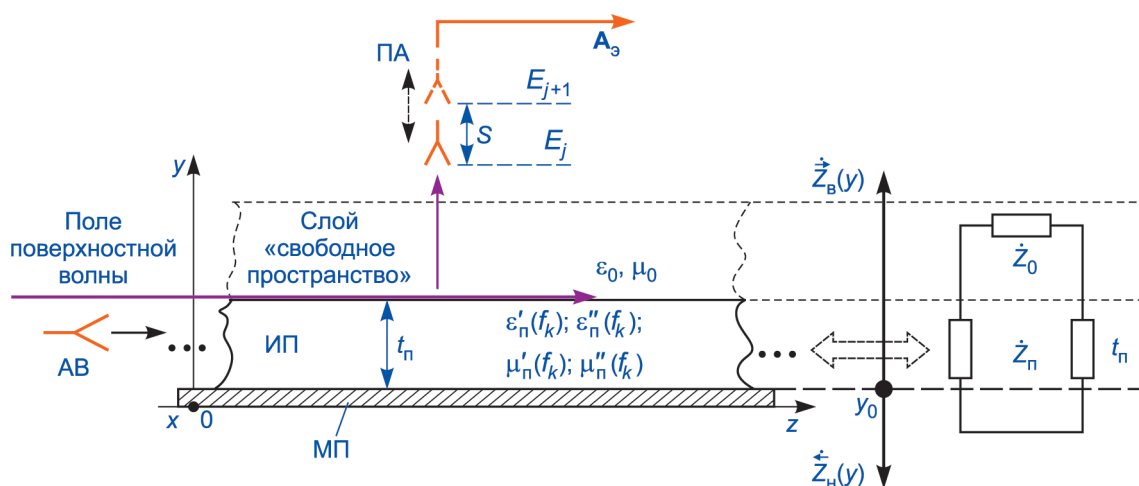


Рис. 1. Структурная и эквивалентная схемы магнитодиэлектрического покрытия с частотной дисперсией электрофизических параметров: АВ – антенна возбуждения поверхностных электромагнитных волн, МП – металлическая подложка, ИП – исследуемое покрытие, ПА – приемная антенна (измерительный зонд)

Fig. 1. Structural and equivalent circuits of a magnetodielectric coating with frequency dispersion of electrophysical parameters: AEMW – antenna excitation of surface electromagnetic wave, MS – metal substrate, CS – coating under study, RA – receiving antenna (measuring probe)

$\alpha''(f_k, \xi'_n)$ комплексного коэффициента ослабления представим, как и комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости, в виде параметрической функции, задаваемой следующим полиномом:

$$\alpha''(f_k, \xi'_n) = \sum_{i=0}^n a_{n-i} f_k^i, \quad i=0, \dots, n, \quad (6)$$

где a_{n-i} – параметры, которые фактически представляют собой коэффициенты регрессии функциональной зависимости мнимой части коэффициента ослабления; n – число членов полинома.

Параметры a_{n-i} объединим в вектор параметрических коэффициентов полинома $\Phi_\alpha = \{a_{n-i}\}$, $i=0, \dots, n$. Для удобства программной реализации минимизации целевой функции (3) число членов m_1, m_2, m_3, m_4 полиномов, аппроксимирующих комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости (4), и число n членов полинома мнимой части коэффициента ослабления (6) представим в виде вектора $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, m_3, m_4, n\}$.

Согласно условию (5), с учётом вектора $\mathbf{M}$ и представления мнимой части комплексного коэффициента ослабления в виде полинома (6) целевая функция для оценки параметров покрытий с частотной дисперсией комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей примет следующий вид:

$$\xi'_n = \underset{\xi'_n \in \xi'_{\text{доп}}; \Phi_\alpha \in \Phi_{\text{доп}}; \mathbf{M}_\alpha \in \mathbf{M}_{\text{доп}}}{\text{argmin}} \rho(\xi'_n, \Phi_\alpha, \mathbf{M}) = |\mathbf{A}'_3 - \mathbf{A}'_T|^2 / K; \quad (7)$$

$$\mathbf{A}'_3 = [\alpha'_3(f_1) - j\alpha''(f_1, \Phi_\alpha), \alpha'_3(f_2) - j\alpha''(f_2, \Phi_\alpha), \dots, \alpha'_3(f_K) - j\alpha''(f_K, \Phi_\alpha)]^T;$$

$$\mathbf{A}'_T = [\dot{\alpha}_T(f_1, \xi'_n), \dot{\alpha}_T(f_2, \xi'_n), \dots, \dot{\alpha}_T(f_K, \xi'_n)]^T;$$

где $\rho(\xi'_n, \Phi_\alpha, \mathbf{M})$ – расстояние между экспериментальными $\mathbf{A}'_3$ и рассчитанными $\mathbf{A}'_T$ значениями коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны в области допустимых значений векторов $\xi'_n \in \xi'_{\text{доп}}, \Phi_\alpha \in \Phi_{\text{доп}}, \mathbf{M}_\alpha \in \mathbf{M}_{\text{доп}}$.

Для реализации быстродействующего вычислительного алгоритма, минимизирующего целевую функцию (7), вектор теоретических комплексных коэффициентов ослабления $\mathbf{A}'_T$ находят из решения дисперсионного уравнения на основе метода поперечного резонанса. Уравнение поперечного резонанса имеет вид [12–14]:

$$\dot{Z}_B(y) + \dot{Z}_H(y) = 0 \quad \text{при } \forall y, \quad (8)$$

где $\dot{Z}_B(y), \dot{Z}_H(y)$ – эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно произвольного опорного сечения y_0 (для удобства математических преобразований выбрано сечение y_0 между слоем покрытия и металлической подложкой, см. рис. 1).

В качестве примера рассмотрим реализацию метода с использованием поверхностных электромагнитных волн Е-типа. При этом подход к оценке ЭФГП с помощью поверхностных

электромагнитных волн Н-типа аналогичен. Ограничимся исследованием покрытий толщиной не менее 0,2 мм, намного большей толщины поверхностного слоя металла, т. е. примем $\dot{Z}_H(y) \approx 0$. Характеристическое сопротивление $\dot{Z}_B(y)$ определим по рекуррентной формуле [12–15]:

$$\dot{Z}_B \equiv \dot{Z}(n_0) = \dot{Z}_n \frac{\dot{Z}_0 + j\dot{Z}_n \text{tg}(\dot{q}t_n)}{\dot{Z}_n + j\dot{Z}_0 \text{tg}(\dot{q}t_n)}, \quad (9)$$

$$\dot{Z}_0 = -j \frac{\dot{\alpha}(f_k, \xi'_n)}{\omega_k \varepsilon_0};$$

$$\dot{Z}_n = \dot{q} / \{ \omega_k \varepsilon_0 [\varepsilon'_n(f_k) - j\varepsilon''_n(f_k)] \},$$

где $\dot{Z}(n_0)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление слоя покрытия и слоя над ним (слой «свободное пространство»); $\dot{Z}_0, \dot{Z}_n$ – характеристические сопротивления на границе раздела между слоем покрытия и свободным пространством и в слое покрытия, соответственно; $\dot{\alpha}(f_k, \xi'_n)$ – комплексный коэффициент ослабления поверхностной электромагнитной волны; $\omega_k = 2\pi f_k$ – круговая частота; ε_0 – диэлектрическая постоянная; $\dot{q} = \sqrt{k_n^2 - k_0^2 - \dot{\alpha}^2(f_k, \xi'_n) + \beta^2}$ – комплексное поперечное волновое число поверхностной электромагнитной волны в слое покрытия; $k_n = 2\pi f \sqrt{[\varepsilon'_n(f_k) - j\varepsilon''_n(f_k)][\mu'_n(f_k) - j\mu''_n(f_k)]} / c$, – комплексное волновое число в слое покрытия; $\varepsilon'_n(f_k) - j\varepsilon''_n(f_k)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость покрытия; $\mu'_n(f_k) - j\mu''_n(f_k)$ – комплексная магнитная проницаемость покрытия; $\beta = m\pi/d_n$ – волновое число, характеризующее распределение поля поверхностных электромагнитных волн по ширине покрытия d_n .

Итоговое дисперсионное уравнение представим в виде

$$D[\dot{\alpha}(f_k, \xi'_n); f_k] = 0 \equiv \dot{Z}(n_0) = 0. \quad (10)$$

Дисперсионное уравнение (10) позволяет для заданных составляющих вектора ξ'_n и толщины t_n однозначно определять теоретические значения комплексных коэффициентов ослабления поверхностных электромагнитных волн $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi'_n)$ вектора $\mathbf{A}'_T$ целевой функции (7).

Таким образом, разработанный многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей $\varepsilon'_n(f_k), \varepsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k)$, а также толщины покрытий t_n на металлической подложке состоит из следующей последовательности действий:

определение экспериментальных действительных частей $\alpha'(f_k, \xi'_n)$ комплексных коэффициентов ослабления поверхностных электромагнитных волн на сетке дискретных частот $f_k, k=1..K$ методом зонда;

параметризация частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в соответствии с дисперсионными моделями (4) и переход от вектора ξ_n к вектору ξ'_n (5);

представление мнимой части комплексного коэффициента ослабления в виде (6), составление дисперсионного уравнения (10) и целевой функции (7);

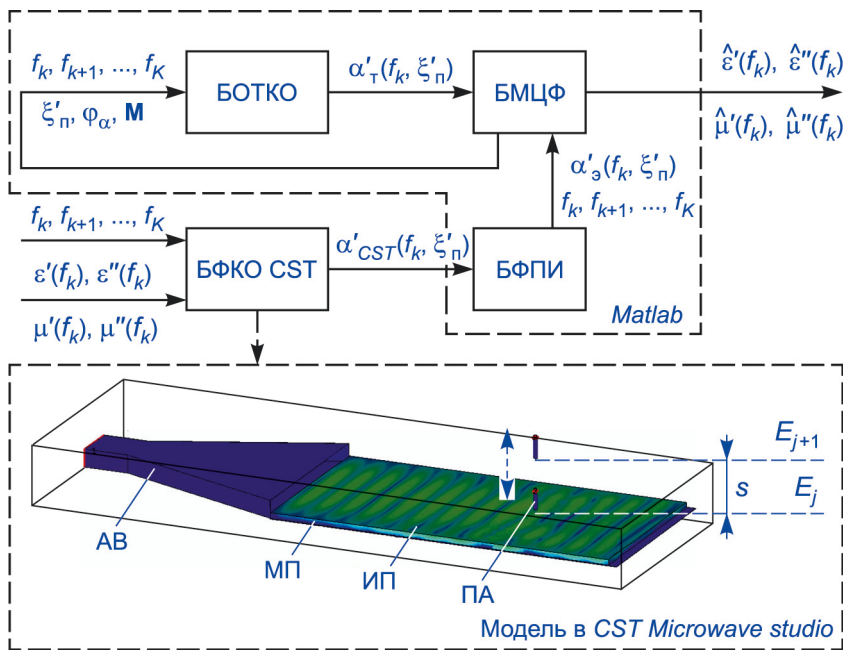


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели: *БОТКО* – блок определения теоретических коэффициентов ослабления, *БМЦФ* – блок минимизации целевой функции, *БФКО CST* – блок формирования коэффициентов ослабления системой CST Microwave studio, *БФПИ* – блок формирования погрешностей измерений коэффициентов ослабления

Fig. 2. A Block diagram of the simulation model: *UDCAC* – a units for determining the theoretical values of complex attenuation coefficients, *UMOF* – a unit for minimizing the objective function, *UFAC CST* – a unit for forming attenuation coefficients by the CST Microwave studio system; *UGE* – a units for generating errors in attenuation coefficients measurements

решение оптимизационной задачи по минимизации целевой функции (7) путём варьирования составляющих векторов ξ'_n, φ_α и $\mathbf{M}$.

формирование на основе найденных при минимизации целевой функции (7) векторов ξ'_n, φ_α и $\mathbf{M}$ искомым локальных частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей $\epsilon'_n(f_k), \epsilon''_n(f_k), \mu'_n(f_k), \mu''_n(f_k)$ для заданной полосы частот измерений $\Delta f = f_K - f_1$, а также определение толщины t_n исследуемого покрытия.

Поиск минимума целевой функции (7) проводится численно в заданном диапазоне изменения величин компонент векторов $\xi'_n, \varphi_\alpha, \mathbf{M}$ на основе алгоритмов стохастической оптимизации.

Имитационная модель определения электрофизических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий с частотной дисперсией. Для более гибкой оценки потенциальных возможностей метода по определению ЭФГП образцов диэлектрических покрытий, магнитодиэлектрических и радиопоглощающих покрытий, в частности, с учётом различных возможных законов дисперсионных частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, разработана имитационная модель реального измерительного комплекса [9]. Структурная схема имитационной модели приведена на рис. 2.

Такие элементы измерительного комплекса, как антенна возбуждения поверхностных электромагнитных волн *AB*, приёмная антенна (измерительный зонд) *ПА*, а также исследуемое покрытие на металлической подложке *ИП*, реализованы в блоке формирования коэффициентов ослабления *БФКО CST* в виде модели в системе электродинамического моделирования CST Microwave studio (Simulia corporation, USA). Геометрические размеры данных элементов точно соответствуют их размерам в реальном измерительном комплексе. Для оценки адекватности разработанной модели проведено сравнение модельных коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны стандартного образца полиметилметакрилата ($\epsilon \approx 2,7 - j0,081$) размером 200×100 мм и толщиной 1 мм $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_n)$ с теоретическими коэффициентами ослабления $\alpha'_T(f_k, \xi'_n)$, найденными при решении дисперсионного уравнения (10), а также с экспериментальными коэффициентами ослабления $\alpha'_S(f_k, \xi'_n)$, измеренными на реальном измерительном комплексе [9].

Отличие модельных коэффициентов ослабления от теоретических составляет не более 0,08 %. Относительные погрешности оценки диэлектрической проницаемости и толщины полиметилметакрилата, полученные путём решения обратной задачи (7) по частотной зависимости $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_n)$, составляют не более 0,05 %. Таким образом, разработанная в CST Microwave studio модель обеспечивает получение коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны с минимальной методической погрешностью, т. е. коэффициенты ослабления практически соответствуют теоретическим значениям $\alpha'_T(f_k, \xi'_n)$.

Кроме того, при решении обратной задачи (7) оценки ЭФГП получены с минимальными погрешностями.

Отличие экспериментальных коэффициентов ослабления $\alpha'_S(f_k, \xi'_n)$ от модельных значений составляет не более 6 % и обусловлено влиянием шумов (инструментальные погрешности измерительного комплекса и другие погрешности, связанные с процессом эксперимента). Экспериментальные относительные погрешности оценки действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon'_n, \epsilon''_n$, а также толщины t_n составляют не более 7 и 5 % соответственно [9]. Экспериментальные значения коэффициентов ослабления в имитационной модели (см. рис. 2) формировали в блоке формирования погрешностей измерений коэффициентов ослабления *БФПИ* в виде суммы значений модельных коэффициентов ослабления $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_n)$ и функции, имитирующей влияние шума. На точность определения коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны влияет множество случайных факторов. Поэтому погрешность оценки указанных коэффициентов моделировалась аддитивным некоррелированным гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием $m[n(f_k)] = 0$ и заданным уровнем дисперсии σ_k^2 [9, 10]. Экспериментальная проверка на реальном измерительном

комплексе показала, что среднее квадратическое отклонение (СКО) уровня шума при измерениях ЭФГП стандартного образца полиметилметакрилата составляет 0,0015–0,0020 и подчиняется нормальному закону распределения [9].

Таким образом, экспериментальные значения коэффициентов ослабления поверхностной электромагнитной волны $\alpha'_\Sigma(f_k, \xi_n)$ в блоке БФПИ (см. рис. 2) формировали на основе выражения [7–9]:

$$\alpha'_\Sigma(f_k, \xi_n) = \alpha'_{\text{CST}}(f_k, \xi_n) + n(f_k), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (11)$$

где $n(f_k)$ – шум, воздействующий на k -измерение и обусловленный инструментальными погрешностями измерительного комплекса и другими погрешностями при проведении эксперимента.

Блок определения теоретических значений комплексных коэффициентов ослабления БОТКО реализует решение дисперсионного уравнения (10), а блок минимизации целевой функции БМЦФ реализует операцию по решению обратной задачи (7), путём варьирования составляющих векторов ξ'_n , Φ_α и $\mathbf{M}$. Данные блоки реализованы в системе Matlab. При этом решение обратной задачи (7) в блоке БМЦФ осуществляется с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global Search пакета Matlab.

Результаты имитационного моделирования. Для численного эксперимента выбрано радиопоглощающее покрытие, с типичными электрофизическими параметрами [16]. Комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемого образца в диапазоне частот от 9 до 18 ГГц практически постоянная ($\varepsilon' = 20,45$, $\varepsilon'' = 0,73$). Дисперсию комплексной магнитной проницаемости радиопоглощающего покрытия аппроксимировали зависимостями [16]:

$$\left. \begin{aligned} \mu'(f_k) &= 1,56 \exp(-3,867 \cdot 10^{-11} f_k); \\ \mu''(f_k) &= 1,299 \exp(-4,659 \cdot 10^{-11} f_k). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Рассмотрим возможности метода при оценке параметров данного радиопоглощающего покрытия в полосе частот $\Delta f = 9 \dots 13,5$ ГГц. Точные частотные зависимости теоретических значений действительной $\alpha'_T(f_k, \xi_n)$ и мнимой $\alpha''_T(f_k, \xi_n)$ частей комплексного коэффициента ослабления исследуемого радиопоглощающего покрытия в полосе частот измерений $\Delta f = 9 \dots 13,5$ ГГц на основе решения дисперсионного уравнения (10) приведены на рис. 3.

Имитационное моделирование состояло из следующих этапов. По заданным ЭФГП радиопоглощающего покрытия: $\varepsilon' = 20,45$, $\varepsilon'' = 0,73$, $t_n = 0,73$ и дисперсионным зависимостям магнитной проницаемости (12) в блоке БФКО CST формировали частотную зависимость модельного коэффициента ослабления $\alpha'_{\text{CST}}(f_k, \xi_n)$. При этом использовали 19 значений частот из интервала $\Delta f = 9 \dots 13,5$ ГГц с шагом по частоте 0,25 ГГц.

В блоке БФПИ к значениям $\alpha'_{\text{CST}}(f_k, \xi_n)$ на основе модели (11) добавили шум и формировали экспериментальные частотные зависимости коэффициента ослабления $\alpha'_\Sigma(f_k, \xi_n)$ при различных значениях СКО уровня шума.

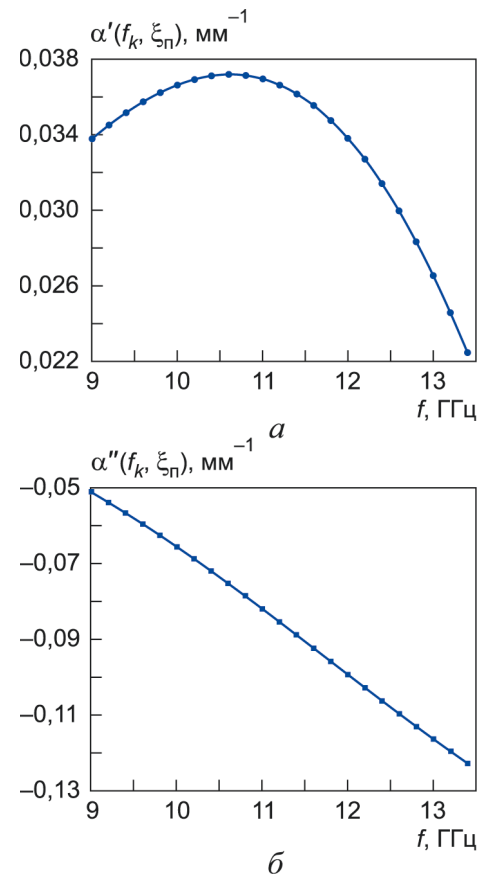


Рис. 3. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного коэффициента ослабления исследуемого радиопоглощающего покрытия

Fig. 3. Frequency dependences of the real (a) and imaginary (b) parts of field attenuation coefficient of the investigated radio-absorbing coating

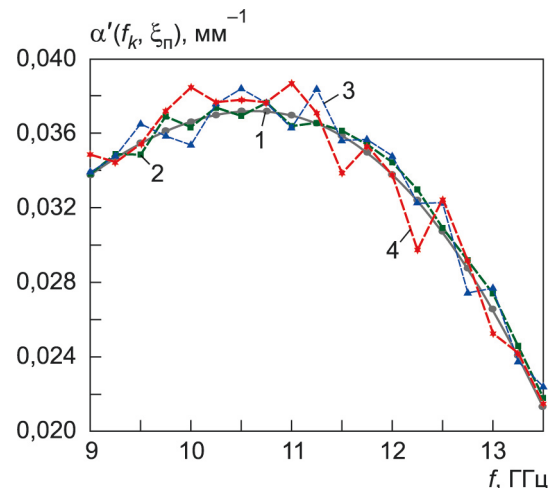


Рис. 4. Частотная зависимость действительной части комплексного коэффициента ослабления при возрастании уровня СКО шума $\sigma = 0$ (1); 0,001 (2); 0,003 (3); 0,006 (4); зависимость 1 сформирована в CST Microwave studio

Fig. 4. Frequency dependence of the real part of the complex attenuation coefficient with increasing mean square deviation noise level $\sigma = 0$ (1); 0,001 (2); 0,003 (3); 0,006 (4); dependence 1 formed in CST Microwave studio

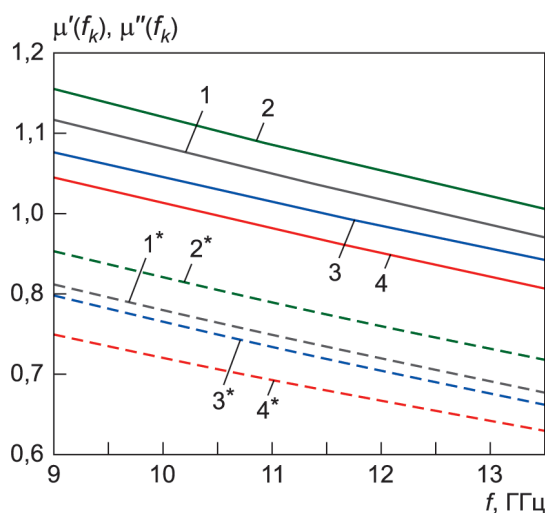


Рис. 5. Частотные зависимости действительной (1–4) и мнимой (1*–4*) частей комплексной магнитной проницаемости при возрастании уровня СКО шума $\sigma=0$ (1, 1*); 0,001 (2, 2*); 0,003 (3, 3*); 0,006 (4, 4*)

Fig. 5. Frequency dependence of the real and imaginary parts of complex permeability with increasing mean square deviation noise level $\sigma=0$ (1, 1*); 0.001 (2, 2*); 0.003 (3, 3*); 0.006 (4, 4*)

На рис. 4 приведена частотная зависимость действительной части комплексного коэффициента ослабления $\alpha'_{CST}(f_k, \xi_n)$, полученная в системе CST Microwave studio (без погрешностей, $\sigma=0$), а также зависимости, сформированные в блоке БФПИ по 200 реализациям уровня шума при значениях СКО σ уровня шума 0,001, 0,003, 0,006.

По полученным экспериментальным (искажённым) частотным зависимостям в блоке БМЦФ осуществлялась операция минимизации целевой функции (7) путём варьирования составляющих векторов ξ'_n , Φ_α и $\mathbf{M}$, определялись искоемые частотные дисперсионные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей $\varepsilon'_n(f_k)$, $\varepsilon''_n(f_k)$, $\mu'_n(f_k)$, $\mu''_n(f_k)$, а также толщина исследуемого покрытия t_n .

С учётом описания частотной дисперсии комплексной магнитной проницаемости исследуемого радиопоглощающего покрытия зависимостями (12), аппроксимации мнимой части коэффициента ослабления (6) полиномом с четырьмя параметрами целевая функция (7) минимизировалась по одиннадцати переменным. Границы верхнего и нижнего диапазона изменения параметров векторов ξ'_n , Φ_α составляли 30 % номинальных значений. Параметры генетического алгоритма, обеспечивающие гарантированное нахождение глобального минимума целевой функции (7): размер популяции 15000; вероятность скрещивания 90 %; вероятность мутации 10 %. Среднее время решения обратной задачи (7) путём минимизации целевой функции – не более 1,5–2 мин на компьютере с процессором типа Intel Core i5, тактовой частотой 2,33 ГГц и оперативной памятью 4 Гб.

На рис. 5 приведены частотные дисперсионные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемости, полученные при решении обратной задачи (7) при возрастающих значениях уровня СКО σ шума измерительных данных (0,001, 0,003, 0,006). Погрешности оценок

действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемостей радиопоглощающего покрытия в исследуемой полосе частот $\Delta f=9...13,5$ ГГц даже при СКО уровня шума 0,006 не превышали 10 %. Экспериментальное значение СКО уровня шума составило 0,015. Погрешности оценки комплексной диэлектрической проницаемости и толщины следующие:

$\delta\varepsilon'_n \approx 0,1\%$; $\delta\varepsilon''_n \approx 1,3\%$; $\delta t_n \approx 2\%$ при $\sigma=0,001$;

$\delta\varepsilon'_n \approx 7\%$; $\delta\varepsilon''_n \approx 4\%$; $\delta t_n \approx 8\%$ при $\sigma=0,003$;

$\delta\varepsilon'_n \approx 10\%$; $\delta\varepsilon''_n \approx 8\%$; $\delta t_n \approx 10\%$ при $\sigma=0,006$.

Таким образом, проведённый численный эксперимент показал, что разработанный метод измерения ЭФГП покрытий с частотной дисперсией эффективно работает при воздействии шума, при уровнях его СКО значительно превышающих уровни СКО на реальном измерительном комплексе.

Заключение. Представленные результаты исследования позволили обосновать многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей и толщины диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металлической подложке. Разработанный метод в отличие от существующих позволил производить совместное определение указанных выше параметров при одностороннем подходе в едином цикле измерения. Для более эффективного применения предложенного метода на практике разработана имитационная модель реального измерительного комплекса, с помощью которой для различных конфигураций измерительных комплексов можно оценить погрешности определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей покрытий с различными законами их дисперсии.

Список литературы

1. Dankov P. I., *J. Phys., Conf. Ser.*, 2020, vol. 1598, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1598/1/012002>
2. Лагарьков А. Н., Погосян М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
3. Сухаревский О. И., Василец В. А., Кукобко С. В., Нечитайло С. В., Сазонов А. З. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами. Харьков: ХУПС, 2009. 468 с.
4. Беляев В. В., Кирьянов О. Е., Понькин В. А. Радиолокационные, антенные и радиофизические измерения. Воронеж: Научная книга, 2013. 319 с.
5. Басков К. М., Политико А. А., Семенов В. Н., Чистяев В. А., Акимов Д. И., Краснолобов И. И. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.12>
6. Семенов В. Н., Чистяев В. А., Политико А. А., Басков К. М. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59>

7. Li Zh., Haigh A., Soutis C., Gibson A., Sloan R., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 37, 39.
<https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>
8. Антропов О. С., Дробахин О. О. Повышение разрешающей способности метода фурье-преобразования коэффициента отражения путём экстраполяции спектра на основе принципа минимума длительности // Дефектоскопия. 2009. № 5. С. 72–80.
9. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн // Измерительная техника. 2020. № 8. С. 51–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-8-51-58>
10. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 51–67. <https://doi.org/10.31857/S0130308220090055>
11. Ваганов Р. Б., Коршунов И. П., Коршунова Е. Н., Олейников А. Д. Экспериментальное исследование структуры поля поверхностной электромагнитной волны в анизотропно проводящей ленте // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 136–142.
12. Valerio G., Jackson D. R., Galli A., *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
13. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн / Под ред. М. Л. Левина: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1. 546 с.
14. Frezza F., Tedeschi N., *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, vol. 32, no. 8, pp. 1485–1501.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.32.001485>
15. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
16. Ufimtsev P. Ya., Ling R. T., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, vol. 49, no. 10, pp. 1445–1452.
<https://doi.org/10.1109/8.954933>
17. Li Zh., Haigh A., Soutis C., Gibson A., Sloan R., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 37, 39.
<https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>
18. Belyaev V. V., Kir'yanov O. E., Pon'kin V. A., *Radiolokatsionnye, antennye i radiofizicheskie izmereniya* [Radar, antenna and radiophysical measurements], Voronezh, Nauchnaya kniga publ., 2013, 319 p. (In Russ.)
19. Baskov K. M., Politiko A. A., Semenenko V. N., Chistyayev V. A., Akimov D. I. and Krasnolobov I. I., *Zhurnal radioelektroniki*, 2019, no. 11. (In Russ.)
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.12>
20. Semenenko V. N., Chistyayev V. A., Politiko A. A., Baskov K. M., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 161–166.
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01601-5>
21. Li Zh., Haigh A., Soutis C., Gibson A., Sloan R., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 37, 39.
<https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>
22. Antropov O. S., Drobakhin O. O., Povyshenie razreshayushchei sposobnosti metoda fur'e-preobrazovaniya koeffitsienta otrazheniya putem ekstrapolyatsii spektra na osnove printsipa minimuma dlitel'nosti [Increasing the resolution of the Fourier transform of the reflection coefficient by extrapolating the spectrum based on the principle of minimum duration] *Defektoskopiya*, 2009, no. 5, pp. 72–80. (In Russ.)
23. Kaz'min A. I., Fedjunin P. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 8, pp. 645–652.
<https://doi.org/10.1007/s11018-020-01834-9>
24. Kaz'min A. I., Fedjunin P. A., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 320–336.
<https://doi.org/10.1134/S1061830921040070>
25. Vaganov R. B., Korshunov I. P., Korshunova E. N., Oleinikov A. D., *Radiotekhnika i elektronika*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 136–142. (In Russ.)
26. Valerio G., Jackson D. R., Galli A., *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
27. Felsen L. B., Marcuvitz N., *Radiation and Scattering of Waves*, vol. 1, Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.
28. Frezza F., Tedeschi N., *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, vol. 32, no. 8, pp. 1485–1501.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.32.001485>
29. Brekhovskikh L. M., *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media], Moscow, Nauka Publ., 1973, 343 p. (In Russ.)
30. Ufimtsev P. Ya., Ling R. T., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, vol. 49, iss. 10, pp. 1445–1452.
<https://doi.org/10.1109/8.954933>

Reference

1. Dankov P. I., *J. Phys., Conf. Ser.*, 2020, vol. 1598, 012002.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1598/1/012002>
2. Lagar'kov A. N., Pogosjan M. A., *Fundamental'nye i prikladnye problemy stels-tehnologii* [Fundamental and applied problems of stealth technologies], *Vestnik RAN*, 2003, vol. 73, no. 9, pp. 779–787. (In Russ.)
3. Sukharevskii O. I., Vasilets V. A., Kukobko S. V., Nechitailo S. V., Sazonov A. Z., *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln vozduzhnymi i*

Статья поступила в редакцию 20.05.2021; принята к публикации 23.06.2021.

Модель оценки неоднородности распределения характеристик глобул на изображениях новообразований кожи

Валентин Григорьевич Никитаев¹✉, Александр Николаевич Проничев², Ольга Борисовна Тамразова³, Василий Юрьевич Сергеев⁴, Владимир Юрьевич Сельчук⁵, Владимир Сергеевич Козлов⁶, Алина Олеговна Лим⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹vgnikitayev@mephi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

⁶vskozlov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1418-6278>

⁷alinalim30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5218-0478>

³ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия, anait_tamrazova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3261-6718>

⁴ Центральная государственная медицинская академия Управления делами Президента Российской Федерации, Москва, Россия, vasesergeevu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8487-137X>

⁵ Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, Москва, Россия, selvu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2306-8959>

Аннотация. Рассмотрена проблема диагностики меланомы кожи по цифровым изображениям опухоли. Кратко описаны клинические алгоритмы выявления меланомы кожи. Дан обзор работ, посвященных автоматизированной оценке асимметрии распределения формы, цвета, площади глобул – важных признаков меланомы. Разработана модель оценки неоднородности распределения характеристик глобул на цифровых изображениях при диагностике новообразований кожи и предложены модели признаков неоднородности указанного распределения. Проведена экспериментальная сравнительная оценка моделей признаков с помощью программной системы, разработанной на языке C++. Определены наиболее информативные признаки неоднородности распределения характеристик глобул. Максимальная (93 %) точность оценки неоднородности распределения характеристик глобул получена для признака «приведенная обратная величина наибольшей частоты появления измеренных площадей глобул». Результаты исследования могут быть полезны при разработке систем поддержки принятия врачебных решений при диагностике меланомы.

Ключевые слова: новообразования кожи, диагностика меланомы, признаки неоднородности, характеристики глобул, цифровая обработка изображений

Для цитирования: Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Тамразова О. Б., Сергеев В. Ю., Сельчук В. Ю., Козлов В. С., Лим А. О. Модель оценки неоднородности распределения характеристик глобул на изображениях новообразований кожи // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 62–67. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-62-67>

Model for estimating the heterogeneity of the distribution of globule characteristics in images of skin neoplasms

Valentin G. Nikitaev¹✉, Alexandr N. Pronichev², Olga B. Tamrazova³, Vasily Yu. Sergeev⁴, Vladimir Yu. Selchuk⁵, Vladimir S. Kozlov⁶, Alina O. Lim⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

¹vgnikitayev@mephi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

⁶vskozlov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1418-6278>

⁷alinalim30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5218-0478>

³ Russian Peoples' Friendship University, Moscow, Russia, anait_tamrazova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3261-6718>

⁴ Central State Medical Academy of the Administrative Department of the President of the Russian Federation, Moscow, Russia, vasesergeevu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8487-137X>

⁵ A. I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia, selvu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2306-8959>

Abstract. The problem of skin melanoma diagnostics from digital images of the tumor is considered. Clinical algorithms for detecting skin melanoma are briefly described. An overview of the works devoted to the automated assessment of the asymmetry of the distribution of shape, color, area of globules – important signs of melanoma – is given. A model for estimating the heterogeneity of the distribution of the characteristics of globules on digital images in the skin neoplasms diagnosis is developed and models of signs of heterogeneity of this distribution are proposed. The comparative evaluation of the proposed models was carried out experimentally using a software system developed in C++. The most informative features are identified. The greatest accuracy 93 % in estimating the heterogeneity of the distribution of the characteristics of globules was shown by the sign “the reduced inverse of the greatest frequency of occurrence of the measured areas of globules”. The results obtained can be applied in the development of systems to support medical decision-making in the diagnosis of melanoma.

Keywords: skin neoplasms, diagnosis of melanoma, signs of heterogeneity, characteristics of globules, digital image processing

Введение. Необходимость ранней диагностики меланомы кожи связана с высокой летальностью – более 70 % всех форм рака кожи, при том, что доля меланомы в группе опухолей кожи составляет всего 13 % [1]. Меланому выявляют с помощью клинических алгоритмов, например ABCD, Menzies [2], Argenziano [3–5], Kittler [6, 7] и др. Такие алгоритмы позволяют дифференцировать новообразования на меланоцитарные и немеланоцитарные, а также на злокачественные и доброкачественные [8]. В дерматологической практике широко распространён алгоритм модифицированного анализа узора «Хаос и признаки», который рассматривает новообразование как совокупность структурных элементов – линий, глобул, точек, кругов, псевдоподий и бесструктурных областей. Одним из этапов диагностики меланомы с использованием этого алгоритма является выявление хаоса на дерматоскопическом изображении новообразования. Хаос – комплексное понятие – описывает несимметричное расположение структурных элементов новообразования и неоднородность распределения цветовых и морфологических характеристик структурных элементов [7]. Примеры изображений, содержащих и не содержащих хаос, представлены на рис. 1.

Глобула представляет собой двумерный объект, цвет которого отличается от цвета новообразования, а размер позволяет определить форму объекта не только как округлую [7, 9]. В алгоритме Киттлера одним из признаков хаоса является неравномерность распределения структурных элементов – глобул – по области новообразования и неоднородность их цвета, формы и площади (рис. 2).

Характеристики площади, формы и цвета глобул, а также распределение глобул по области новообразования используются в качестве диагностических признаков в ряде алгоритмов. Так, в алгоритме Argenziano одним из значимых признаков являются точки и глобулы (более трёх) округлой или овальной формы коричневого или чёрного цвета, асимметрично распределённые на новообразовании [3–5]. Диагностический критерий алгоритмов Menzies и Kittler – чёрные точки и глобулы на периферии новообразования [2, 6, 7]. В работе [10] показано, что для новообразований с глобулами присутствие сильно пигментированных (тёмных) глобул, глобул разного размера или формы, а также асимметричное скопление глобул является прогностическим признаком меланомы.

Перспективными для диагностики новообразований кожи являются методы искусственного интеллекта на базе

искусственных нейронных сетей [11]. В современных исследованиях для обработки больших массивов данных используют высокотехнологичные комплексы, основанные на базах знаний, методах распознавания образов, экспертных системах [12–16]. Несмотря на значительные успехи в применении искусственных нейронных сетей при диагностике заболеваний кожи, нейронная сеть воспринимается врачом как «чёрный ящик», что в значительной мере снижает степень доверия к получаемым результатам (особенно с учётом того, что юридическую ответственность за принятие диагностического решения несёт врач). Более приемлемыми для врача оказываются системы, в которых врач может отслеживать этапы обработки изображения, понимать, на чём базируются предлагаемые системой диагностические заключения, и сопоставлять их с собственными представлениями.

Автоматизированной оценке асимметрии распределения формы, цвета, площади глобул посвящено много работ. Например, в работе [17] асимметрию расположения глобул оценивали путём деления области новообразования на восемь равных частей и расчёта для каждой части количества содержащихся точек и глобул, включая определение процента покрываемой ими площади новообразования. Новообразования классифицировали как симметричные или асимметричные методом Logistic Model Tree, являющимся комбинацией линейной логистической регрессии и решающего дерева. Однако не раскрыты детали процесса обучения модели и не предусмотрено выявление асимметрии глобул по цвету, размеру и форме. В работе [18] асимметрию

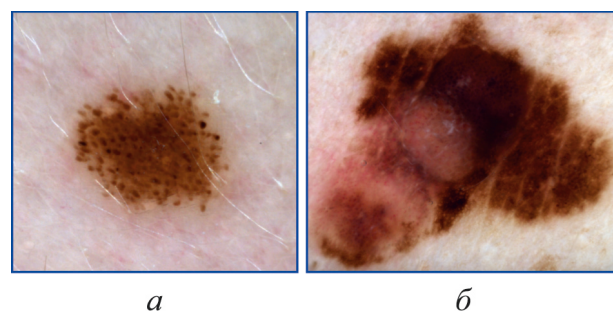


Рис. 1. Изображения новообразования кожи, не содержащее (доброкачественное) и содержащее (злокачественное – меланома) хаос – соответственно а, б

Fig. 1. Images of skin neoplasms: a – benign (not containing “chaos”); b – malignant – melanoma (containing “chaos”)

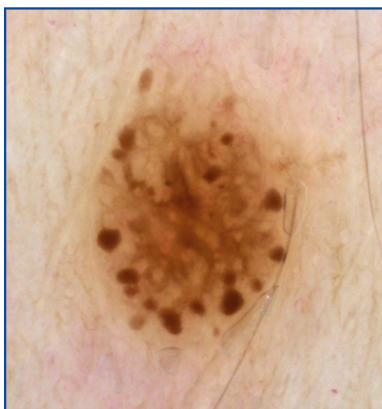


Рис. 2. Изображение доброкачественного новообразования, содержащее глобулы

Fig. 2. Image of a neoplasm containing globules (benign)

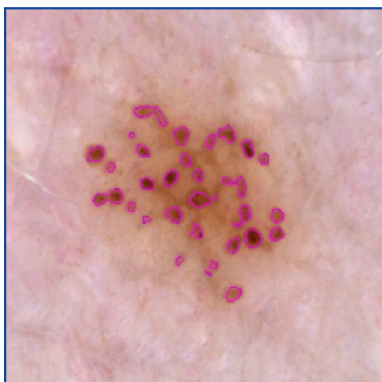


Рис. 3. Изображение доброкачественного новообразования с выделенными глобулами

Fig. 3. Image of a benign neoplasm with highlighted globules

распределения глобул оценивали методом сегментации Statistical Region Merging с разбиением области новообразования на однородные по цвету части. Затем подсчитывали количество тёмных областей внутри каждого из четырёх квадрантов, на которые новообразование делится главными осями инерции. Если количество объектов в квадрантах выходило за пределы ожидаемого диапазона биномиального распределения, то пространственное распределение глобул считали асимметричным. При этом в [18] не раскрыты значения количественных характеристик, использованных для классификации распределения на симметричное и асимметричное и не рассмотрены распределения характеристик цвета, площади и формы глобул.

Дальнейший обзор литературы по данной тематике показал,

что проблема оценки асимметрии формы, цвета, размера и углового распределения глобул недостаточно освещена. В существующих работах оценена только асимметрия пространственного распределения структур по площади новообразования и не исследованы возможности оценки неоднородности таких внутренних характеристик структурных элементов, как форма, размер и цвет. В настоящее время в литературе не существует общепризнанной модели оценки неоднородности характеристик глобул.

Цель настоящей статьи – разработка модели оценки неоднородности распределения характеристик глобул на новообразованиях кожи с учётом их площади, формы, цвета и расположения.

Элементы модели. Вследствие статистической природы распределений характеристик глобул для оценки неоднородности этих распределений авторы настоящей статьи использовали признаки, описывающие гистограммы распределения площади, коэффициента отклонения от окружности, яркости и угла. Признак пространственного распределения глобул применяли как дополнение к гистограммным

признакам. Концептуальная модель оценки неоднородности распределения характеристик глобул на изображениях новообразований кожи состоит из следующих элементов: цифрового изображения; выделения глобул; измерения характеристик глобул; расчета признаков неоднородности распределения характеристик глобул. Рассмотрим элементы модели.

Цифровое изображение. Получено с цифрового дерматоскопа РДС-2 и содержит область новообразования кожи. Формат изображения 2560×1920, глубина кодирования 24 бита (по 8 бит на каждую из компонент R, G, B цветовой модели RGB). Масштаб изображения 0,0052 мм/пиксел.

Выделение глобул. Для того чтобы измерить характеристики глобул, на исходных цифровых изображениях выделили структурные элементы (рис. 3). Подробно методы выделения глобул рассмотрены в работах [19, 20].

Измерение характеристик глобул. К характеристикам глобул, неоднородность распределения которых оценивали, относили площадь, яркость, коэффициент отклонения от окружности и угол наклона линии, соединяющей центр новообразования и центр глобулы. Площадь глобулы рассчитывали как количество принадлежащих ей пикселей, яркость – как среднее значение компоненты «яркости» V цветовой модели HSV для пикселей, принадлежащих глобуле. Коэффициент отклонения от окружности находили как отношение площади глобулы к площади круга с центром в центре масс глобулы и радиусом, равным максимальному расстоянию от центра масс до пиксела глобулы. Угол наклона линии, соединяющей центр новообразования и центр глобулы определяли относительно горизонтальной оси.

Расчёт признаков неоднородности распределения характеристик глобул. Данный расчёт основан на анализе морфологических (площади и коэффициента отклонения от окружности), световой (яркости) и ориентационной (угла) характеристик. Строили гистограммы распределения характеристик глобул, наблюдаемых в новообразовании. Гистограммы нормировали на число глобул в исследуемом новообразовании. Для каждой гистограммы рассчитывали признаки неоднородности.

Признак LCI (the largest column inverse) – приведённая обратная наибольшая частота появления измеренных значений характеристик глобул:

$$LCI = (kM)^{-1},$$

где k – количество столбцов гистограммы; M – высота наибольшего столбца.

Данный признак изменяется в диапазоне $[k^{-1}; 1]$, где единица соответствует равномерному распределению характеристики во всём диапазоне возможных значений, k^{-1} – единичному значению характеристики всех глобул новообразования.

Признак RSDM (ratio of standard deviation to mean) – отношение среднего квадратического отклонения SD характеристики к её среднему значению $\bar{X}$:

$$RSDM = SD / \bar{X}.$$

Значение данного признака тем больше, чем выше разброс значений исследуемой характеристики.

Признак RDM (ratio of difference of max and min to mean) – отношение разности максимального $X_{\max}$ и минимального $X_{\min}$ значения характеристики к среднему значению:

$$RDM = (X_{\max} - X_{\min}) / \bar{X}.$$

Значение данного признака увеличивается с расширением диапазона значений исследуемой характеристики.

Признак SSD (sum of squares of differences) – половина суммы квадратов разностей соседних столбцов гистограммы:

$$SSD = \sum (N_{i+1} - N_i)^2 / 2,$$

где N_i – соответственно высота и номер столбца.

Данный признак изменяется в диапазоне [0; 1], где ноль соответствует равномерному распределению характеристики во всем диапазоне ее возможных значений, а 1 соответствует равенству значений характеристики у всех глобул новообразования.

Признак DMM (ratio of difference of median and mean to mean) – отношение разности медианы M и среднего значения характеристики к среднему значению:

$$DMM = |M - \bar{X}| / \bar{X}.$$

Значение данного признака увеличивается с увеличением несимметричности гистограммы относительно среднего значения.

Кроме гистограммных характеристик для оценки неоднородности пространственного распределения глобул рассчитывали *признак VL* (vector length) – длину приведённой суммы векторов от центра новообразования к центрам глобул. Для этого сначала определяли сумму всех векторов $\mathbf{a}$, проведённых из центра масс новообразования к центрам масс глобул. Затем длину полученного вектора делили на общее количество глобул и модуль вектора $\mathbf{a}_{\max}$ максимальной длины:

$$VL = |\sum \mathbf{a}| / (n |\mathbf{a}_{\max}|).$$

Экспериментальное исследование модели оценки неоднородности распределения характеристик глобул на изображениях новообразований кожи. Цель эксперимента – проверка адекватности предложенной модели. В качестве исходных данных использовали 30 изображений новообразований кожи, предоставленных Российским обществом дерматоскопии. Изображения разделили на группы однородных и неоднородных по расположению глобул в пространстве, площади, коэффициенту отклонения от окружности и яркости. Эксперимент состоял из следующих этапов: выделение глобул на изображениях; измерение характеристик глобул для каждого изображения; построение гистограмм характеристик глобул для каждого изображения; расчёт коэффициентов неоднородности распределения характеристик глобул; выявление пороговых значений коэффициентов неоднородности, оптимально разделяющих группы однородных и неоднородных изображений по каждой характеристике глобул.

Для проведения эксперимента написана программа в среде разработки Qt на языке программирования C++.

Точность разделения набора данных на однородное и неоднородное изображения по признакам неоднородности распределения характеристик глобул

Признак	Угол	Площадь	Форма	Яркость
LCI	0,83	0,93	0,70	0,80
RSDM	0,73	0,73	0,77	0,80
RDM	0,50	0,55	0,70	0,73
SSD	0,80	0,90	0,77	0,73
DMM	0,60	0,70	0,50	0,63

Адекватность модели оценивали путём сравнения результатов компьютерной и экспертной (врачебной) классификации новообразований кожи. Точности Асс классификации определяли по формуле

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN},$$

где TP , FP – количества истинно и ложноположительных результатов классификации соответственно; TN , FN – количества истинно и ложноотрицательных результатов классификации соответственно.

Анализ экспериментальных результатов. Для каждой характеристики глобул рассчитаны коэффициенты неоднородности, найдены их пороговые значения, позволяющие оптимально разделить группы «однородных» и «неоднородных» снимков (таблица).

При классификации распределения глобул по углу и по площади наибольшую точность имеет признак LCI, поскольку учитывает высокий пик гистограммы. Для характеристики по углу это соответствует значительной неоднородности распределения глобул по углу, а для характеристики по площади – равенство площадей большого количества глобул. Признаки RSDM и SSD показали средние точности классификации по углу и площади, признаки RDM и DMM – наименьшую точность.

Точность разделения выборки изображений с однородным и неоднородным распределением глобул по пространственному признаку VL составила 0,8. Точность признака VL близка к точности признака LCI, применённого к гистограмме распределения глобул по углам. При выявлении однородности изображений, на которых глобулы распределены вдоль овала, точность признака VL выше точности признака LCI из-за двух пиков гистограммы средней высоты. В этом случае признак LCI показывал меньшую степень однородности, а признак VL учитывал суммирование векторов, при котором овальная форма распределения глобул так же симметрична, как круглая или кольцеобразная.

Наиболее низкие точности классификации выявлены для характеристик «форма» и «яркость». Точность классификации по форме и яркости признаков LCI, RSDM и SSD выше точности признаков RDM и DMM.

Таким образом, наивысшую точность классификации для всех характеристик имеют признаки LCI, RSDM и SSD, а максимальную (0,93) точность для характеристики «площадь» имеет признак LCI. Признак пространственного распределения глобул VL имеет точность классификации меньше

точности LCI, но более оптимально учитывает симметрию овальных глобул. Признаки RDM и DMM имеют наименьшую точность классификации по всем характеристикам.

Заключение. По результатам исследования установлено, что наиболее адекватно отражает неоднородность распределения характеристик глобул признак LCI для характеристики «площадь». Дальнейшие работы в этой области целесообразно направить на исследование комбинированного показателя, учитывающего все рассмотренные выше признаки с соответствующими весовыми коэффициентами. Значения весовых коэффициентов должны быть сформированы по результатам дополнительных экспериментов и экспертных (врачебных) оценок. Применение предложенных моделей в системах поддержки принятия врачебных решений при диагностике меланомы призвано повысить точность диагностики меланомы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-11-00176).

Список литературы

1. Каприн А. Д., Старинский В. В., Петрова Г. В. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.
2. Menzies S. W., Moloney F. J., Byth K. et al., *JAMA dermatology*, 2013, vol. 149, no. 6, pp. 699–709. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2013.2466>
3. Argenziano G., Soyer P., Chimenti S. et al., *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2003, vol. 48, no. 5, pp. 679–693. <https://doi.org/10.1067/mjd.2003.281>
4. Argenziano G., Catricalà C., Ardigo M. et al, *British Journal of Dermatology*, 2011, vol. 164, no. 4, pp. 785–790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10194.x>
5. Малишевская Н. П., Соколова А. В., Торопова Н. П. Рекомендации по проведению дерматоскопии новообразований кожи, протокол дерматоскопического исследования: Учебное пособие для врачей. Екатеринбург: СВ-96, 2018. 23 с.
6. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H., *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 120–127. <https://doi.org/10.1111/jdv.12483>
7. Жучков М. В., Тарасова М. А., Сонин Д. Б. Нодулярные меланомы кожи. Дерматоскопическая диагностика // Вестник дерматологии и венерологии. 2016. № 6. С. 27–33.
8. Коровин С. И., Литус А. И., Литвиненко Б. В., Кукушкина М. Н., Паливец Ф. Ю. Дерматоскопия меланомы кожи: прикладное значение и перспективы // Клиническая онкология. 2012. № 4. С. 28–32.
9. Жучков М. В., Большакова Е. Е., Сонин Д. Б., Жильцова Е. Е., Шилин Р. Р., Исакова М. С., Родионова С. А. Дерматоскопический алгоритм CASH: вопросы применения в клинической практике // Дерматология. Приложение к журналу Consilium Medicum. 2019. № 1. С. 39–42. <https://doi.org/10.26442/24143537.2019.1.190203>
10. Xu J., Gupta K., Stoecker W.V. et al., *Archives of dermatology*, 2009, vol. 145, no. 11, pp. 1245–1251. <https://doi.org/10.1001/archdermatol.2009.285>

11. Kawahara J., Daneshvar S., Argenziano G., Hamarneh G., *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 538–546. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2824327>
12. Nasir M., Khan M. A., Sharif M., Javed M. Y., Saba T., Ali H., Tariq J., *Current Medical Imaging*, 2020, vol. 16, no. 7, pp. 794–822. <https://doi.org/10.2174/1573405615666191223122401>
13. Jiménez A., Serrano C., Acha B., *14th International Conference Image Analysis and Recognition, ICIAR 2017*, Montreal, QC, Canada, July 5–7, 2017, Springer, 2017, pp. 486–493. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59876-5_54
14. Нукмаев В. Г. Экспертные системы в информационно-измерительных комплексах онкологической диагностики // Измерительная техника. 2015. № 6. С. 67–70.
15. Нукмаев В. Г. Высокотехнологичные информационно-измерительные комплексы онкологической диагностики: проблемы и ключевые положения методологии построения // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 68–70.
16. Нукмаев В. Г. Современные принципы измерений в интеллектуальных системах гистологической диагностики онкологических заболеваний // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 68–70.
17. Jaworek-Korjakowska J., Tadeusiewicz R., *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 15–18 September 2013, Melbourne, Australia, 2013, pp. 1456–1460. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2013.6738299>
18. Fabbrocini G., Cacciapuotì S., Salvatore G. De Fata et al., *AIMS Bioengineering*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 306–320. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2020025>
19. Yoshino S., Tanaka T., Tanaka M., Oka H., Application of morphology for detection of dots in tumor, *SICE 2004 Annual Conference*, IEEE, 4–6 August 2004, Sapporo, Japan, 2004, vol. 1, pp. 591–594.
20. Chatterjee S., Dey D., Munshi S., Studies on a formidable dot and globule related feature extraction technique for detection of melanoma from dermoscopic images, *Proceedings of the computer, communication and electrical technology*, 2017, pp. 337–341.

References

1. Kaprin A. D., Starinskij V. V., Petrova G. V., *Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii v 2018 godu (zabolevaemost' i smernost')*, Moscow, MNI OI im. P. A. Gercena – filial FGBU "NMIC radiologii" Minzdrava Rossii Publ., 2019, 250 p. (In Russ.)
2. Menzies S. W., Moloney F. J., Byth K. et al., *JAMA dermatology*, 2013, vol. 149, no. 6, pp. 699–709. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2013.2466>
3. Argenziano G., Soyer P., Chimenti S. et al., *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2003, vol. 48, no. 5, pp. 679–693. <https://doi.org/10.1067/mjd.2003.281>
4. Argenziano G., Catricalà C., Ardigo M. et al, *British Journal of Dermatology*, 2011, vol. 164, no. 4, pp. 785–790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10194.x>
5. Malishevskaya N. P., Sokolova A. V., Toropova N. P., *Rekomendatsii po provedeniyu dermatoskopii novoobrazovaniy kozhi, protokol dermatoskopicheskogo issledovaniya, Training manual for doctors*, Ekaterinburg, SV-96 Publ., 2018, 23 p. (In Russ.)

6. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H., *Journal of the European Academy of Dermatology and Venerology*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 120–127. <https://doi.org/10.1111/jdv.12483>
7. Zhuchkov M. V., Tarasova M. A., Sonin D. B., Nodulyarnye melanomy kozhi. Dermatoskopicheskaya diagnostika, *Vestnik dermatologii i venerologii*, 2016, no. 6, pp. 27–33. (In Russ.)
8. Korovin S. I., Litus A. I., Litvinenko B. V., Kukushkina M. N., Palivets F. Yu., Dermatopskopiya melanomy kozhi: prikladnoe znachenie i perspektivy, *Klinicheskaya onkologiya*, 2012, no. 4, pp. 28–32. (In Russ.)
9. Zhuchkov M. V., Bolshakova E. E., Sonin D. B., Zhiltsova E. E., Shilin R. R., Isakova M. S., Rodionova S. A., *Dermatologiya. Prilozhenie k zhurnalu Consilium Medicum*, 2019, no. 1, pp. 39–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26442/24143537.2019.1.190203>
10. Xu J., Gupta K., Stoecker W. V. et al., *Archives of dermatology*, 2009, vol. 145, no. 11, pp. 1245–1251. <https://doi.org/10.1001/archdermatol.2009.285>
11. Kawahara J., Daneshvar S., Argenziano G., Hamarneh G., *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 538–546. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2824327>
12. Nasir M., Khan M. A., Sharif M., Javed M. Y., Saba T., Ali H., Tariq J., *Current Medical Imaging*, 2020, vol. 16, no. 7, pp. 794–822. <https://doi.org/10.2174/1573405615666191223122401>
13. Jiménez A., Serrano C., Acha B., *14th International Conference Image Analysis and Recognition, ICIAR 2017*, Montreal, QC, Canada, July 5–7, 2017, Springer, 2017, pp. 486–493. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59876-5_54
14. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 719–723. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0781-4>
15. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 214–218. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0688-0>
16. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 68–70. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0736-9>
17. Jaworek-Korjakowska J., Tadeusiewicz R., *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 15–18 September 2013, Melbourne, Australia, 2013, pp. 1456–1460. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2013.6738299>
18. Fabbrocini G., Cacciapuoti S., Salvatores G. De Fata et al., *AIMS Bioengineering*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 306–320. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2020025>
19. Yoshino S., Tanaka T., Tanaka M., Oka H., Application of morphology for detection of dots in tumor, *SICE 2004 Annual Conference*, IEEE, 4–6 August 2004, Sapporo, Japan, 2004, vol. 1, pp. 591–594.
20. Chatterjee S., Dey D., Munshi S., Studies on a formidable dot and globule related feature extraction technique for detection of melanoma from dermoscopic images, *Proceedings of the computer, communication and electrical technology*, 2017, pp. 337–341.

Статья поступила в редакцию 28.05.2021; принята к публикации 08.07.2021.

Национальные эталоны единицы коэффициента гармоник Российской Федерации и Республики Беларусь: результаты сличений

Сергей Витальевич Безденежных^{1✉}, Олег Викторович Каминский², Ксения Андреевна Стальнова³, Александр Васильевич Галыго⁴, Надежда Андреевна Герасимова⁵

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

¹bsv@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3245-2389>

²kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4160-4997>

³stalnova@vniiftri.ru

^{4, 5} Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь, ⁴galygo@belgim.by, ⁵gerasimova@belgim.by

Аннотация. Представлены результаты дополнительных сличений национальных эталонов единицы коэффициента гармоник Российской Федерации (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений) и Республики Беларусь (Белорусский государственный институт метрологии). В качестве эталона-переносчика использовали серийный измеритель коэффициента гармоник. Отличия воспроизводимой национальными эталонами единицы коэффициента гармоник от опорных значений не превышают расширенной неопределённости для всех измеряемых значений коэффициента гармоник на всех частотах. Таким образом, подтверждены измерительные и калибровочные возможности участвующих в сличениях лабораторий.

Ключевые слова: эталон, коэффициент гармоник, сличения национальных эталонов

Для цитирования: Безденежных С. В., Каминский О. В., Стальнова К. А., Галыго А. В., Герасимова Н. А. Национальные эталоны единицы коэффициента гармоник Российской Федерации и Республики Беларусь: результаты сличений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 68–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-68-72>

National standards of the harmonic coefficient unit of the Russian Federation and the Republic of Belarus: results of comparisons

Sergey V. Bedenezhnykh^{1✉}, Oleg V. Kaminsky², Kseniia A. Stal'nova³, Alexander V. Galygo⁴, Nadezhda A. Gerasimova⁵

^{1, 2, 3} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia

¹bsv@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3245-2389>

²kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4160-4997>

³stalnova@vniiftri.ru

^{4, 5} Belarusian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus, ⁴galygo@belgim.by, ⁵gerasimova@belgim.by

Abstract. The results of additional comparisons of the national standards of the unit of the harmonic coefficient of Russia (VNIIFTRI) and the Republic of Belarus (BelGIM) are presented. A mass-produced harmonic coefficient meter was used as a reference carrier. The differences between the harmonic coefficient unit reproduced by national standards the reference values do not exceed the extended uncertainty for all measured values of the harmonic coefficient and at all frequencies. Thus, the measurement and calibration capabilities of the laboratories participating in the comparisons are confirmed.

Keywords: standard, harmonic coefficient, comparison of national standards

Введение. В 2016–2019 гг. под эгидой международной организации КОOMET проведены международные дополнительные сличения эталонов единицы коэффициента гармоник. В сличениях приняли участие национальные метрологические институты Российской Федерации (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)) в качестве

пилот-лаборатории и Республики Беларусь (Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ)).

Цель сличений – проверка правильности оценки неопределённости измерений и подтверждение измерительных и калибровочных возможностей участвующих в сличениях лабораторий.

Эталон-переносчик. В качестве возимого эталона (эталона-переносчика) использовали калибратор-измеритель

Таблица 1

Источники неопределённости ГЭТ 188-2010

Источник неопределённости	Значение, %	Вероятное распределение
Нелинейность амплитудных характеристик усилителей входного тракта и АЦП b_1	$3,5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$	Равномерное
Неравномерность суммарной амплитудно-частотной характеристики усилителей входного тракта и АЦП b_2	$1,9 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	Равномерное
Погрешность, вызванная неточностью определения частоты первой гармоники b_3	$3 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$	Равномерное
Тепловые шумы усилителей входного тракта и шумы квантования b_4	$2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	Нормальное
Стандартная неопределённость	$5 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2}$	Нормальное
Расширенная неопределённость ($k=2$, $P=0,95$)	$1 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-2}$	—

Таблица 2

Источники неопределённости НЭ РБ 36-18

Источники неопределённости	Значение, %	Вероятное распределение
Неполная компенсация первой гармоники в сигнале высших гармоник b_1	0,01–0,02	Равномерное
Неточность уравнивания средних квадратических значений напряжения первой и напряжения высших гармоник в точке с коэффициентом гармоник 100 % b_2	0,005–0,100	Равномерное
Погрешность встроенного делителя напряжения b_3	0,005–0,150	Равномерное
Остаточные нелинейные искажения сигнала первой гармоники b_4	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	Нормальное
Стандартная неопределённость по типу А u_A	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$	Нормальное
Суммарная стандартная неопределённость	0,01–0,20	Нормальное
Расширенная неопределённость ($k=2$, $P=0,95$)	0,02–0,40	—

нелинейных искажений СК6-20. Принцип его действия состоит в оцифровке входного сигнала с помощью высокоточного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и дальнейшей цифровой обработке с целью определения напряжений гармоник сигнала и вычисления коэффициента гармоник. Этот принцип действия обеспечивает стабильность метрологических характеристик эталона-переносчика, что подтверждено результатами исследований в пилот-лаборатории.

Источники неопределённости. Способы воспроизведения единицы коэффициента гармоник в национальных эталонах отличаются. Основой Государственного первичного эталона единицы коэффициента гармоник в диапазоне от 0,001 до 100 % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот от 10 до 200000 Гц ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ) служит измеритель на основе прецизионного АЦП [1]. Исследуемый сигнал оцифровывается, коэффициент гармоник определяется в результате обработки цифрового эквивалента исследуемого сигнала [2–8].

Основа национального эталона коэффициента гармоник БелГИМ НЭ РБ 36-18 – калибратор установки поверочной для средств измерений коэффициента гармоник РЭКГ (НПП «Радио, приборы и связь», г. Н. Новгород). Принцип действия калибратора установки основан на формировании гармонического сигнала с минимальными искажениями (сигнала первой гармоники), формировании сигнала высших гармоник, суммировании сигнала гармоник с сигналом первой гармоники, уравниванием на выходе сумматора напряжений первой и высших гармоник (по результатам измерений напряжений милливольтметром) и точном делении напряжения гармоник делителем напряжения. Для формирования сигнала гармоник используются аналоговые перемножители.

В связи с этим источники неопределённости национальных эталонов коэффициента гармоник ВНИИФТРИ и БелГИМ разные (табл. 1, 2, где k – коэффициент охвата, P – доверительная вероятность).

Методики измерений. Поскольку способы воспроизведения единицы коэффициента гармоник в национальных эталонах отличаются (основа ГЭТ 188-2010 – измеритель, НЭ РБ 36-18 – калибратор), то во время сличений применяли разные методики измерений.

Методика измерений коэффициента гармоник на ГЭТ 188-2010 состояла в одновременных измерениях коэффициента гармоник эталонным измерителем коэффициента гармоник из состава эталона и эталонном-переносчиком при

их параллельном соединении с выходом калибратора коэффициента гармоник эталонного. Результаты измерений обоих измерителей усреднялись по 10 отсчётам, средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) фиксировались в протоколе в электронном виде.

Методика измерений на НЭ РБ 36-18 состояла в измерениях эталоном-переносчиком коэффициента гармоник сигнала, воспроизводимого национальным эталоном.

Методики измерений при сличениях совпадали с методиками калибровок данных лабораторий. При сличениях использовали значения коэффициента гармоник и значения частот, наиболее часто встречающиеся в поверочной и калибровочной практиках.

Измеряли следующие воспроизводимые эталонами значения коэффициента гармоник: 0,003; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30; 100 % на каждой из частот: 10; 20; 200 Гц и 1; 20; 100; 200 кГц.

Результаты измерений эталона-переносчика усредняли по 10 отсчётам, средние значения и СКО фиксировали в протоколе

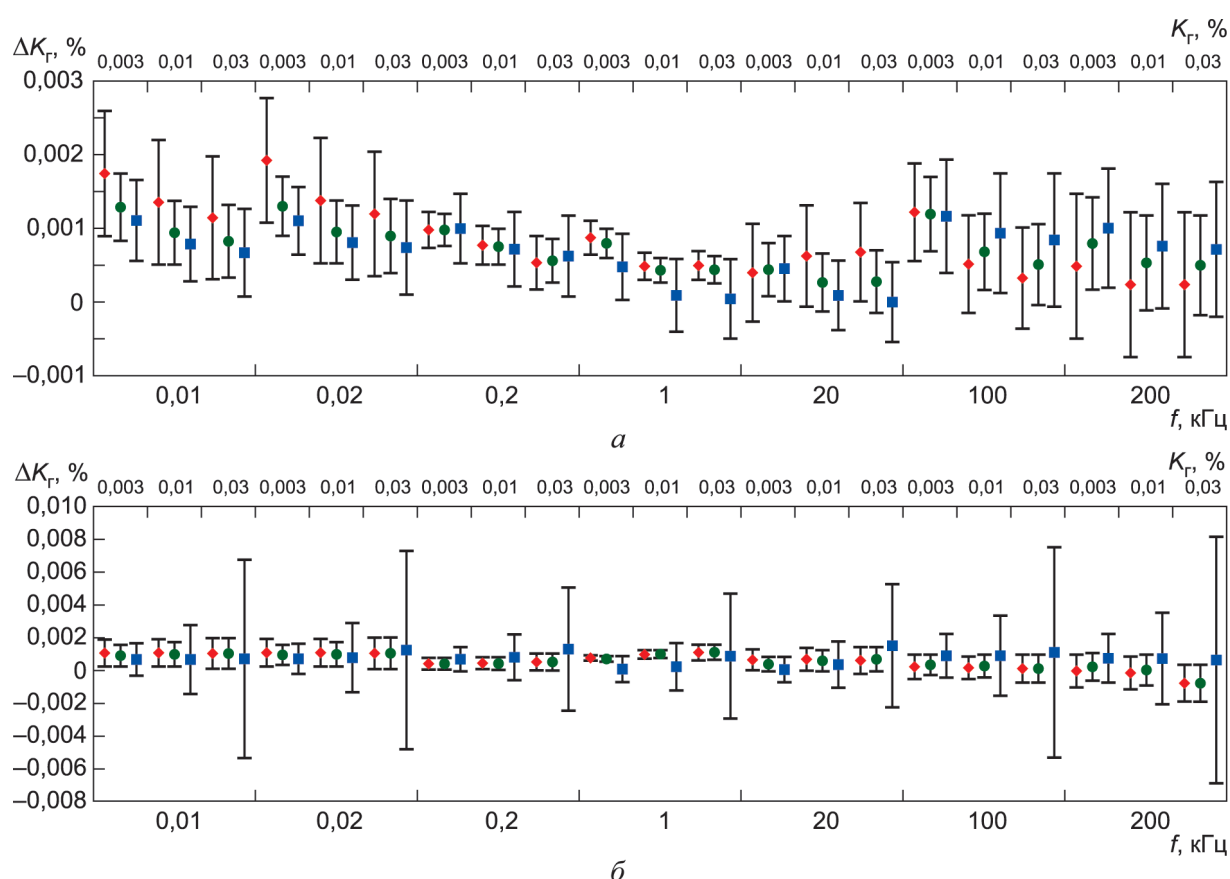


Рис. 1. Разности ΔK_r между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальным эталоном и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком для коэффициента гармоник $K_r = 0.003; 0.01; 0.03$ % (а) и $K_r = 0.1; 0.3; 1$ % (б) и расширенные неопределённости измерений:
 ◆ – ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ); ■ – БелГИМ; ● – опорные значения

Fig. 1. The difference between the values of the harmonic, reproducible national standards and average the traveling standard measurement results for the values of the harmonics 0.003; 0.01; 0.03; 0.1; 0.3; 1 % and expanded uncertainty of measurements:
 ◆ – GET 188-2010 (VNIIFTRI); ■ – BelGIM; ● – reference values

в электронном виде. Метрологическим результатом сличений стали разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальным эталоном, и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком.

Результаты сличений. Всего выполнено три цикла измерений: первый и последний циклы проведены во ВНИИФТРИ, второй – в БелГИМ. Для каждой пары параметров (частота и коэффициент гармоник) вычисляли разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами, и результатами измерений эталоном-переносчиком. Неопределённости результатов измерений вычисляли на основе неисключённой систематической погрешности воспроизведения единицы коэффициента гармоник национальными эталонами и СКО результатов измерений эталонным измерителем (ГЭТ 188-2010) и эталоном-переносчиком. Неисключённая систематическая погрешность представлена участниками сличений, СКО вычисляли по результатам 10 независимых измерений. Кроме того, оценивали значения критерия χ^2 (в соответствии

с рекомендациями COOMET R/GM/19:2016 “Recommendation COOMET. Guideline on COOMET supplementary comparison evaluation”) для числа степеней свободы при двусторонних сличениях $n-1=1$ (n – количество участников сличений). Для всех измеряемых значений коэффициента гармоник на всех частотах значения χ^2 меньше критического значения $\chi_{0.95}^2(1)=3.84$, следовательно, результаты сличений можно считать согласованными.

Основные результаты сличений представлены на рис. 1, 2, где показаны разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами, и результатами измерений эталоном-переносчиком ΔK_r , а также границы расширенной неопределённости измерений ($k=2$) в зависимости от значений коэффициента гармоник K_r и частоты f .

Заключение. Результаты измерений показывают, что отличия воспроизводимой национальными эталонами единицы коэффициента гармоник от опорных значений не превышают расширенной неопределённости для всех измеренных значений коэффициента гармоник на всех частотах.

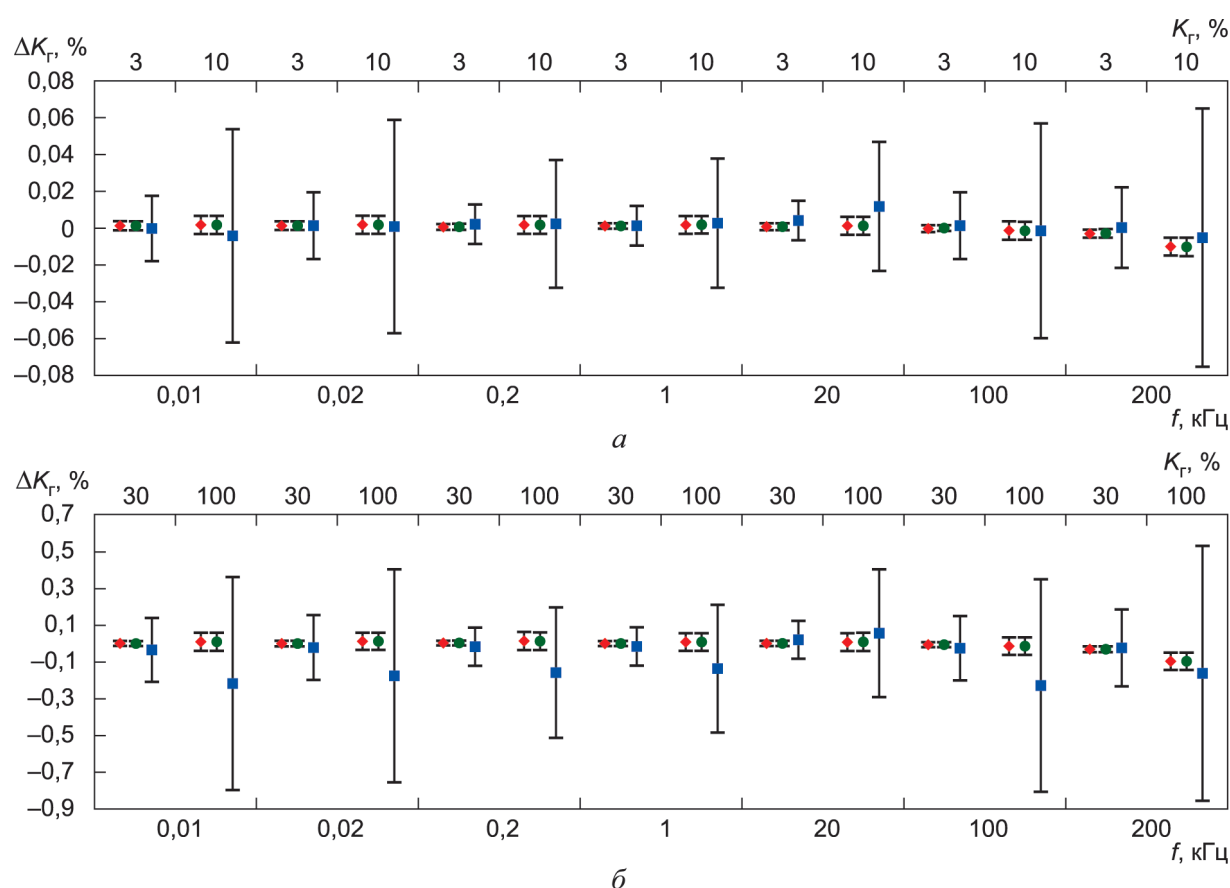


Рис. 2. Разности ΔK_r между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком для $K_r = 3; 10\%$ (а) $K_r = 30; 100\%$ (б) и расширенные неопределённости измерений:

♦ – ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ); ■ – БелГИМ; ● – опорные значения

Fig. 2. The difference between the values of the harmonic, reproducible national standards and the average traveling standard measurement results for the values of the harmonics 3; 10; 30; 100 % and expanded uncertainty of measurements:

♦ – GET 188-2010 (VNIIFTRI); ■ – BelGIM; ● – reference values

Таким образом, подтверждены измерительные и калибровочные возможности участвующих в сличениях лабораторий.

Список литературы

1. Платонов Ф. А., Ахромеева Е. О., Бабарыкин В. А., Пругло А. В., Безденежных С. В., Каминский О. В., Стальнова К. А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне (0,001...100) % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот (10...200000) Гц ГЭТ 188-2010 // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 3–6.
2. Петров Н. Б. Некоторые погрешности аналого-цифрового измерения нелинейных искажений // Измерительная техника. 1979. № 5. С. 51.
3. Горлач А. А., Минц М. Я., Чинков В. Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. Киев: Техніка, 1985.
4. Минц М. Я., Чинков В. Н. Оценка погрешности дискретизации цифровых измерительных приборов, основанных на цифровой обработке мгновенных значений сигналов // Метрология. 1987. № 11. С. 43–49.

5. Минц М. Я., Чинков В. Н. Микропроцессорные измерители нелинейных искажений: алгоритмы цифровой обработки измерительного сигнала и оценка погрешностей // Измерительная техника. 1995. № 4. С. 56–59.

6. Брюханов Ю. А., Лукашевич Ю. А. Нелинейные искажения гармонических сигналов при квантовании // Радиотехника. 2009. № 10. С. 57–60.

7. Брюханов Ю. А., Лукашевич Ю. А. Нелинейные искажения сигналов в сигма-дельта преобразователях // Радиотехника. 2015. № 6. С. 89–94.

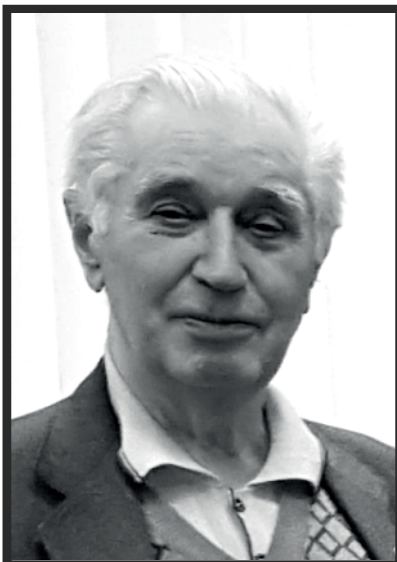
8. Harris F. J., *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>

References

1. Platonov F. A., Akhrameeva E. O., Babarykin V. A., Pruglo A. V., Bezdenzhnykh S. V., Kaminskii O. V., Stal'nova K. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, pp. 203–208.
<https://doi.org/10.1007/s11018-016-0943-z>

2. Petrov B. N., *Measurement Techniques*, 1979, vol. 22, pp. 538–540. <https://doi.org/10.1007/BF00829218>
3. Gorlach A. A., Mints M. Ya., Chinkov V. N., *Digital signal processing in measuring equipment*, Kiev, Technika Publ., 1985. (In Russ.)
4. Mints M. Ya., Chinkov V. N., Estimation of sampling error of digital measuring devices based on digital processing of instantaneous signal values, *Metrologiya*, 1987, no. 11, pp. 43–49. (In Russ.)
5. Mints M. Y., Chinkov V. N., *Measurement Techniques*, 1995, vol. 38, pp. 459–466. <https://doi.org/10.1007/BF00976447>
6. Bryuhanov Ju. A., Lukashevich Ju. A., Nonlinear distortion of harmonic signals in quantization, *Radiotekhnika*, 2009, no. 10, pp. 57–60. (In Russ.)
7. Bryuhanov Ju. A., Lukashevich Ju. A., Nonlinear distortion of signals in sigma-delta converters, *Radiotekhnika*, 2015, no. 6, pp. 89–94. (In Russ.)
8. Harris F. J., *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; принята к публикации 06.07.2021.



МЕХАНИКОВ АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ 15.09.1937–09.07.2021

9 июля 2021 года ушёл из жизни старейший сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), кандидат технических наук Механиков Анатолий Иванович.

Механиков А. И. родился в 1937 г. в Красноярске, в 1959 г. окончил Киевское высшее инженерное радиотехническое училище войск ПВО. Практически вся трудовая деятельность Механикова А. И. была связана с ВНИИФТРИ, куда он пришёл в 1965 г. на должность ведущего инженера, затем стал начальником лаборатории измерений мощности СВЧ, руководителем научно-исследовательского отделения НИО-1. Руководил научным направлением «Метрология в радиоэлектронике». С 1981 по 1986 гг. Механиков А. И. – заместитель директора ВНИИФТРИ по научной работе. С 1986 по 1989 г. занимал пост заместителя Председателя Госстандарта СССР и был членом Международного Комитета мер и весов. С 1989 по 2018 гг. – ведущий научный сотрудник НИО-1.

В 1972 г. Механиков А. И. успешно защитил кандидатскую диссертацию.

Основными направлениями научной деятельности Механикова А. И. были разработка методов синтеза прецизионных устройств СВЧ, метрология в радиоизмерениях, статистическая обработка результатов измерений, управление научными разработками в области метрологии и метрологического обеспечения.

Анатолий Иванович вёл активную научно-педагогическую работу, он автор учебного пособия «Метрология в радиоэлектронике», был научным руководителем по защите кандидатских диссертаций в области радиоизмерений.

В период 1986–1989 гг. Анатолий Иванович возглавлял журналы «Измерительная техника» и «Метрология» в качестве главного редактора, с 1989 г. и до последних дней был членом редакционной коллегии, рецензентом, автором наших изданий. Он внёс неоценимый вклад в развитие изданий.

Механиков А. И. – автор более 100 научных работ, четырёх монографий, награждён нагрудным знаком «За заслуги в стандартизации», медалью «В память 850-летия Москвы».

Механиков Анатолий Иванович – прекрасный специалист, учёный, доброжелательный человек – навсегда останется в нашей памяти.

Коллективы редакции и редколлегии журналов «Измерительная техника» и «Метрология» выражают глубокие соболезнования родным и близким Механикова Анатолия Ивановича.

Измерения для здоровья



ПОДПИСКА – 2022

- на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»
(печатное издание и электронная копия)
- на журнал «Метрология»
(периодичность выхода 4 раза в год)
- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

Подписка через Интернет

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»	«Метрология»
38168 (печатное издание)	013316
013315 (электронная копия)	(электронная копия)

www.ural-press.ru

☎ +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

Агентство по распространению зарубежных изданий

www.arzi.ru

☎ +7 (495) 680-89-87; +7 (495) 631-62-55

✉ secret@arzi.ru

Агентство «Книга-Сервис»

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.pressa-rf.ru

☎ +7 (495) 631-62-54

✉ podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции на номера текущего года и архивные номера 2016–2020 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru