

# ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

№ 3  
 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### Акустические методы

**И.А. Растегаев, И.С. Ясников, И.И. Растегаева, Э.А. Аглетдинов, Д.Л. Мерсон.** Оценка вероятности обнаружения акустико-эмиссионных сигналов методом амплитудной дискриминации при малом соотношении сигнал/шум..... 3

### Электромагнитные методы

**С.М. Кулак, В.Ф. Новиков, В.С. Мальцев.** Контроль механических напряжений несущих стальных двутавровых балок автомобильной эстакады магнитным и тензометрическим методами ..... 13

**Рим Гоззи, Самер Лахвар, Чокри Суани.** Анализ данных зондирования георадаром для точной оценки диаметра подземных коммуникаций ..... 23

### Радиоволновые методы

**А.И. Казьмин.** Методологические принципы определения электрофизических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой с помощью поверхностных электромагнитных волн..... 34

### Общие вопросы дефектоскопии

**Мин Хуэй Вэй, Лися Цзян, Ди Чжан, Бин Ван, Фэн Мяо Ту, Пэн Бо Цзян.** Метод выделения признаков дефектов подшипников, основанный на разложении на вариационные моды с дробным фурье-преобразованием..... 50

Информация..... 66



## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ АМПЛИТУДНОЙ ДИСКРИМИНАЦИИ ПРИ МАЛОМ СООТНОШЕНИИ СИГНАЛ/ШУМ

© 2022 г. И.А. Растегаев<sup>1,\*</sup>, И.С. Ясников<sup>1</sup>, И.И. Растегаева<sup>1</sup>,  
Э.А. Аглетдинов<sup>1</sup>, Д.Л. Мерсон<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет, Россия 445020 Тольятти, ул.Белорусская, 14  
\*E-mail: RastIlgAev@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2022; после доработки 12.02.2022  
Принята к публикации 22.02.2022

Предложен подход к расчету вероятности обнаружения акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов в широком диапазоне соотношения сигнал/шум ( $SNR$ ), результаты которого демонстрируют хорошую сходимость с экспериментальными данными. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является пок кадровый анализ площадей распределения выбросов амплитуды в сигнале и шуме, превышающих порог амплитудной дискриминации, что позволяет выполнять оценки при  $SNR < 6$  дБ. Показано, что положительным эффектом применения предлагаемого подхода является переход от оценки вероятности пропуска сигналов от дефекта к оценке вероятности обнаружения сигнала каждого вида и разной степени трансформации (искажения), что позволяет выполнить объективное сравнение и выбор вариантов оптимальных процедур записи, обработки, фильтрации (шумоподавления) и анализа данных АЭ, а также подобрать настройки для их реализации. Предлагаемый подход инвариантен к способу получения кадров записи АЭ и форме акустических сигналов, поэтому применим для оценки одно- и многомодальной импульсной и непрерывной АЭ, зарегистрированной кадрами в пороговом и беспороговом режимах записи АЭ. Установлены условия, влияющие на расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований, и обозначены пути повышения точности применения предлагаемого подхода. Показано, что амплитудное детектирование сигналов возможно, начиная с уровня порога, превышающего уровень шума на 3 дБ, при наличии выбросов амплитуды в шуме не выше 7,5 дБ среднеквадратического отклонения его распределения. В противном случае качественное и устойчивое детектирование сигнала по амплитудному порогу обеспечено быть не может.

*Ключевые слова:* вероятность обнаружения сигнала, вероятность регистрации ложного сигнала, отношение сигнал/шум, акустическая эмиссия.

**DOI:** 10.31857/S0130308222030010

### ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие наблюдается рост публикаций, посвященных применению метода акустической эмиссии (АЭ) для раннего обнаружения дефектов (повреждений), развитие которых в объектах контроля находится на такой стадии, при которой либо еще возможна эксплуатация объекта до следующего капитального ремонта, либо могут быть применены компенсирующие мероприятия, позволяющие устранить или остановить развитие дефекта, т.е. продлить срок службы оборудования [1—3]. При этом полагается, что развитие дефекта на ранней стадии сопровождается малым масштабом источника АЭ, при котором формируются низкоамплитудные сигналы, сопоставимые с уровнем шума ( $SNR < 6$  дБ, где  $SNR$  — отношение сигнал/шум). Кроме того, существует устойчивый тренд на расширение номенклатуры объектов АЭ контроля и мониторинга от малозумных (сосуды, трубопроводы, подъемные краны и др.) в сторону зашумленных (электротрансформаторы, силовые передачи, подшипники качения и скольжения и др.), в которых велика вероятность одновременной генерации нескольких источников АЭ с сопоставимой амплитудой сигналов. Проблема контроля на границе  $SNR$  неизбежно возникает и в случае существенного затухания АЭ волн в контролируемом объекте, когда нет возможности более близкого расположения преобразователей АЭ в антенных группах. Таким образом, сегодня во многих направлениях применения метода АЭ существует потребность в оценке возможности обнаружения «полезного» сигнала при  $SNR < 6$  дБ.

В основе наиболее распространенного способа детектирования сигналов АЭ лежат алгоритмы, использующие амплитудный порог дискриминации, которые имеют сегодня несколько разновидностей и модификаций, обеспечивающие повышенную вероятность обнаружения сигнала на уровне шума в том числе [4—7]. Также широко практикуется повышение вероятности обнаружения сигнала путем использования прогрессивных методов фильтрации данных АЭ перед применением амплитудного детектора [8, 9]. Вместе с тем, на сегодня нет единого подхода для оценки вероятности пропуска сигнала ( $P_{пс}$ ) или возникновения ложного события ( $P_{лс}$ ) в условиях низкого соот-

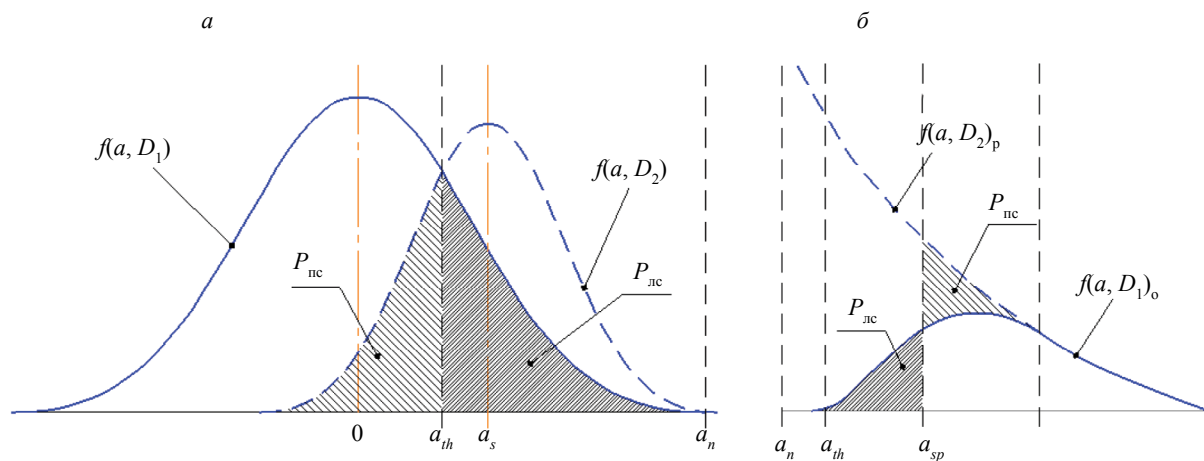


Рис. 1. Схемы оценки  $P_{\text{лс}}$  и  $P_{\text{нс}}$  по распределению амплитуды сигналов на основе вероятностно-статистических подходов принятия диагностических решений (а) и через оценку достоверности контроля АЭ (б).

ношения сигнал/шум ( $SNR < 6$  дБ), который позволил бы выполнить объективное теоретическое сравнение и выбор среди различных вариантов процедур записи, обработки и анализа данных АЭ и настроек для их реализации.

Основными способами оценки  $P_{\text{лс}}$  и  $P_{\text{нс}}$  являются вероятностно-статистические подходы принятия диагностических решений на основе методов: минимального риска, минимального числа ошибок, минимакса, Неймана—Пирсона и наибольшего правдоподобия [10]. Применение обозначенных методов сводится к анализу схемы, представленной на рис. 1а [11, 12], и заключается в поиске оптимального значения уровня амплитудного порога дискриминации ( $a_{\text{th}}$ ), который обеспечивал бы минимальное или заданное число ошибочно зарегистрированных сигналов шума (площадь  $P_{\text{лс}}$ ) или обеспечивал заданную (допустимую) вероятность пропуска сигналов от источника АЭ (площадь  $P_{\text{нс}}$ ), где  $a_s$  — амплитуда сигнала АЭ,  $a_n$  — амплитуда шума;  $f(a, D_1)$  и  $f(a, D_2)$  — функции распределения вероятности наступления событий  $D_1$  и  $D_2$  соответственно, где  $D_1$  — диагностическое событие в виде ложного обнаружения сигнала, а  $D_2$  — правильного обнаружения сигнала соответственно.

Другим известным подходом является оценка вероятностей  $P_{\text{лс}}$  и  $P_{\text{нс}}$  через достоверность контроля путем определения площадей, ограниченных кривыми амплитудного распределения расчетных  $f(a, D_2)_p$  и обнаруженных  $f(a, D_2)_o$  сигналов от источника АЭ, отсеченных линией  $a_{sp}$ , представляющей собой нормировочное значение какого-то ранга (критерия). Одна из схем данного подхода представлена на рис. 1б [14]. При данном подходе кривую  $f(a, D_2)_p$  получают с использованием математических моделей или посредством аппроксимации фактически полученного амплитудного распределения сигналов от дефекта  $f(a, D_2)_o$  [14—16]. Кроме того, существует энтропийный подход [17], при котором достоверность АЭ контроля оценивается не через вероятности наступления диагностических событий, а через энтропийную погрешность оценки их распределений. Однако при малом соотношении сигнал/шум ( $a_s \approx a_n$ ) распределения  $f(a, D_1)$  и  $f(a, D_2)$ , практически сливаются (рис. 2) и известные подходы не позволяют адекватно установить вероятность обнаружения сигнала на уровне шума и, тем более, ниже его. В связи с этим, целью настоящей работы являлась разработка универсального подхода для оценки вероятности обнаружения сигнала АЭ, пригодного для анализа ситуаций, как при  $SNR < 6$  дБ, так и при  $SNR > 6$  дБ.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагаемый подход оценки  $P_{\text{ос}}$  заключается в переходе от расчетных схем рис. 1 к расчетной схеме, представленной на рис. 2, в основе которой заложены следующие отличительные особенности. Во-первых, возможность распознавания сигнала в шуме рассматривается не в рамках анализа распределения амплитуд зарегистрированных сигналов, а в рамках анализа распределений выбросов амплитуды  $a_p$ , имеющихся в каждом записанном кадре записи АЭ (длиной  $t_{\text{rec}}$ ), построенных по отсчетам принадлежащих шуму ( $0-t_1 \cap t_2-t_{\text{rec}}$ ) и шуму+сигналу ( $t_1-t_2$ ). Во-вторых, в рамках такой постановки задачи осуществляется переход от анализа перекрытия площадей распределений

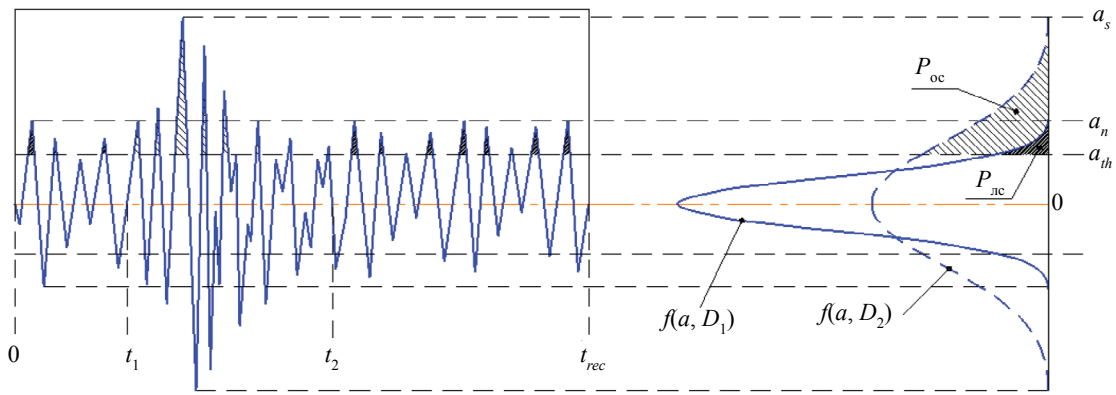


Рис. 2. Схема оценки  $P_{dc}$  и  $P_{oc}$  по распределению выбросов амплитуды в одном кадре записи АЭ.

сигнала и шума относительно порога к оценке площадей распределения сигнала и шума, превышающих порог, т.е. вместо определения вероятности пропуска сигналов от дефекта ( $P_{nc}$ ) находится вероятность обнаружения сигнала ( $P_{oc}$ ) каждого вида. При этом безразлично каким способом получен кадр записи АЭ: пороговым (кадр длиной  $t_{rec}$  записан по пересечению порога) или беспороговым (деление *stream*-записи на кадры длиной  $t_{rec}$ ), но при обязательном выполнении условия Найквиста—Шеннона (Котельникова):  $f_d \geq 2f_{max}$ , где  $f_d$  и  $f_{max}$  — частота дискретизации и максимальная частота диапазона регистрации АЭ соответственно.

Предположим, что на детектор амплитудной дискриминации уровнем ( $a_{th}$ ) поступает временная запись АЭ, в пределах которой имеется сигнал максимальной амплитуды ( $a_s$ ) на фоне шума максимальной амплитуды ( $a_n$ ). В условиях обеспечения широкополосной записи АЭ можно предположить нормальную плотность распределения выбросов амплитуды в шуме. В условиях низкого соотношения *SNR* основную долю сигнала составляет шум, поэтому также можно предположить и в сигнале близкий к нормальному закон распределения выбросов амплитуды, тогда

$$f(a_i)_n = N(\mu_1, \sigma_1^2) \text{ и } f(a_i)_s = N(\mu_2, \sigma_2^2), \tag{1}$$

где  $\mu_1, \sigma_1^2$  и  $\mu_2, \sigma_2^2$  — соответственно математическое ожидание и дисперсия распределения амплитуд шума  $f(a_i)_n$  и сигнала  $f(a_i)_s$ ,  $N$  — обозначает нормальный закон распределения (Гаусса) амплитуд на временной записи АЭ. После построения амплитудного распределения и его нормировки получаем функции  $f(a, D_1)$  и  $f(a, D_2)$  в виде вероятности регистрации отсчета амплитудой  $a_i > a_{th}$ . Тогда вероятность обнаружения  $a_i$ -го отсчета сигнала (число возможных положительных исходов) с применением амплитудных способов детектирования будет определяться разностью площадей  $F(a_i > a_{th})_n$  и  $F(a_i > a_{th})_s$ . Однако, чтобы получить вероятность обнаружения сигнала ( $P_{oc}$ ), необходимо разделить разность положительных исходов на полное количество возможных исходов, т.е. на сумму площадей  $F(a_i > a_{th})_n$  и  $F(a_i > a_{th})_s$ , что запишется как

$$P_{oc} = \frac{F(a_i > a_{th})_s - F(a_i > a_{th})_n}{F(a_i > a_{th})_s + F(a_i > a_{th})_n} = \frac{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da - 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da + 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}. \tag{2}$$

С учетом предположения о нормальной плотности распределения сигнала и шума получаем:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \int_{a_{th}}^{a_s} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} da, \tag{3}$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \int_{a_{th}}^{a_n} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} da. \tag{4}$$

Поскольку распределения  $f(a, D_1)$  и  $f(a, D_2)$  центрированы и нормированы, то  $\mu_1 = \mu_2 = 0$ ,  $F(a)_n = F(a)_s = 1$ . Следует отметить, что благодаря нормировке  $F(a)_n = F(a)_s$  к 1 можно нивелировать зависимость оценки  $P_{oc}$  от длины кадра ( $t_{rec}$ ); от соотношения в нем длительности шума ( $0-t_1 \cap t_2-t_{rec}$ ) к длительности сигнала ( $t_1-t_2$ ), а также от количества однотипных сигналов, имеющих в кадре и следующих друг за другом без перекрытия. С учетом изложенных допущений получаем решение (3) и (4) в виде:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right)}{2}, \quad (5)$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{2}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (2), получаем решение в общем виде:

$$P_{oc} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}. \quad (7)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из (7) видно, что вероятность обнаружения сигнала в шуме ( $P_{oc}$ ), по сути, определяется двумя группами отношений. Первые определяют близость уровня порога  $a_{th}$  к основной части (средне-квадратическому отклонению) распределения значений амплитуды сигнала ( $\sigma_2$ ) и шума ( $\sigma_1$ ). Вторые определяют наличие выбросов в сигнале ( $a_s$ ) и шуме ( $a_n$ ), значительно превышающих основную часть значений распределения амплитуд сигнала ( $\sigma_2$ ) и шума ( $\sigma_1$ ). Рассмотрим влияние каждой группы составляющих на  $P_{oc}$ .

Для оценки влияния отношений первой группы примем, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале ( $a_s$ ) и шуме ( $a_n$ ) ограничена значением близким к  $3\sigma$ , а сами  $\sigma$  на основании свойств нормального распределения представим в виде:  $\sigma_1 = 0,34 \cdot a_n$ ,  $\sigma_2 = 0,34 \cdot a_s$ , тогда из (7) получаем:

$$\begin{aligned} P_{oc1} &= \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)} = \\ &= \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) - 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) + 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)}, \end{aligned}$$

что после упрощения записывается как

$$P_{oc1} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right)}{2 - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right)}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что группа отношений  $a_{th}/\sigma_1$  и  $a_{th}/\sigma_2$  сводится к соотношениям  $a_{th}/a_s$  и  $a_{th}/a_n$ , т.е. взвешивает разницу сигнал/порог—порог/шум. Результаты расчета  $P_{oc1}$  при различных соотношениях сигнал/порог ( $a_s/a_{th}$ ) и порог/шум ( $a_{th}/a_n$ ) в дБ представлены на рис. 3. При этом расчет был ограничен  $a_s/a_{th} = 100$  дБ и  $a_{th}/a_n = 100$  дБ, т.е. максимальный динамический диапазон, возможный в системах АЭ.

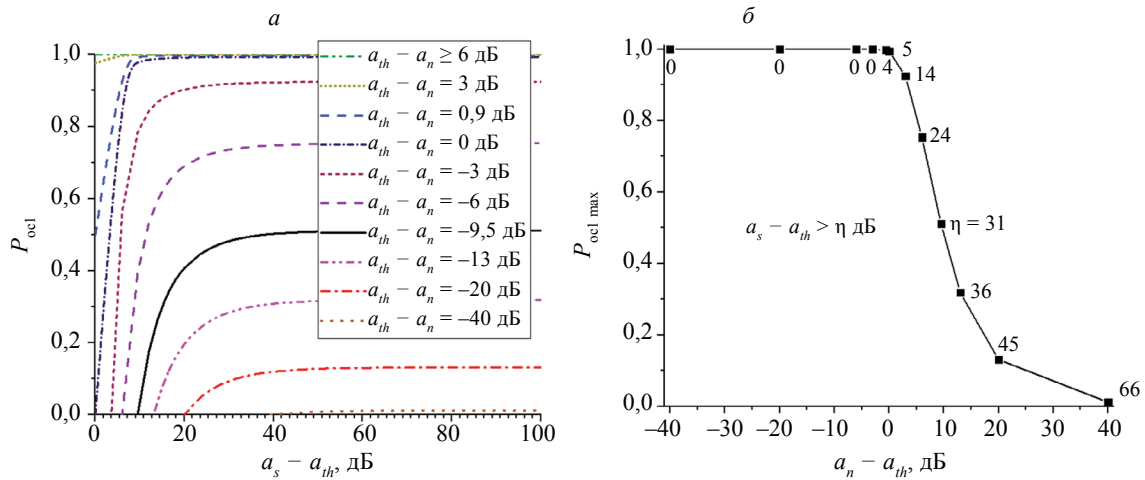


Рис. 3. Зависимости изменения  $P_{oc1}$  от  $a_s/a_{th}$  и  $a_n/a_{th}$  в дБ, где график (б) пересчитан из (а) и показывает значения  $a_s/a_{th}$  и  $a_n/a_{th}$ , при которых  $P_{oc1}$  выходит на насыщение  $P'_{oc1} = 0,95 \cdot P_{oc1 \max}$ . Над точками графика (б) указано минимальное значение  $\eta = a_s - a_{th}$ , при котором  $P_{oc1} = P'_{oc1}$ , а соединяющая их линия показывает общий тренд.

Для рассмотрения влияния на  $P_{oc}$  второй группы соотношений примем условие регистрации кадра рис. 2 при  $a_{th} = 0$ , а также будем считать, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале ( $a_s$ ) и шуме ( $a_n$ ) может значительно превышать значение  $3\sigma$ , т.е.  $a_s \rightarrow \pm \infty$  и  $a_n \rightarrow \pm \infty$ , тогда из (7) получаем:

$$\begin{aligned}
 P_{oc2} &= \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}(0)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}(0)} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)} = \\
 &= 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Из (9) видно, что группа отношений  $a_n/\sigma_1$  и  $a_s/\sigma_2$  оценивает наличие выбросов сверх основной части (среднеквадратического отклонения) распределения значений амплитуды сигнала и шума. Результаты расчета  $P_{oc2}$  по (9) при различных соотношениях  $a_s$  и  $a_n$  по отношению к их  $\sigma$  в дБ представлены на рис. 4. Аналогично предыдущему случаю расчет был ограничен  $a_s/\sigma_2 = 100$  дБ и  $a_n/\sigma_1 = 100$  дБ.

Рис. 3 наглядно демонстрирует последствия сбоев в работе порогового детектора в присутствии шума. Например, видно, что события  $D_1$  и  $D_2$  приближаются к равновероятным ( $P_{oc} \rightarrow 50\%$ ) только при уровне порога  $a_{th} = a_n - 9,5$  дБ и уровне сигнала  $a_s = a_{th} + 31$  дБ. Причем никаким дальнейшим повышением соотношения  $a_s/a_{th}$  нельзя добиться повышения  $P_{oc}$ . Если же порог установлен на уровне  $a_{th} = a_n - 13$  дБ, то при любом  $a_s > a_{th} + 36$  дБ величина  $P_{oc} \rightarrow 30\%$ , т.е. детектирование сигнала является статистически редким событием. При уровне порога ниже

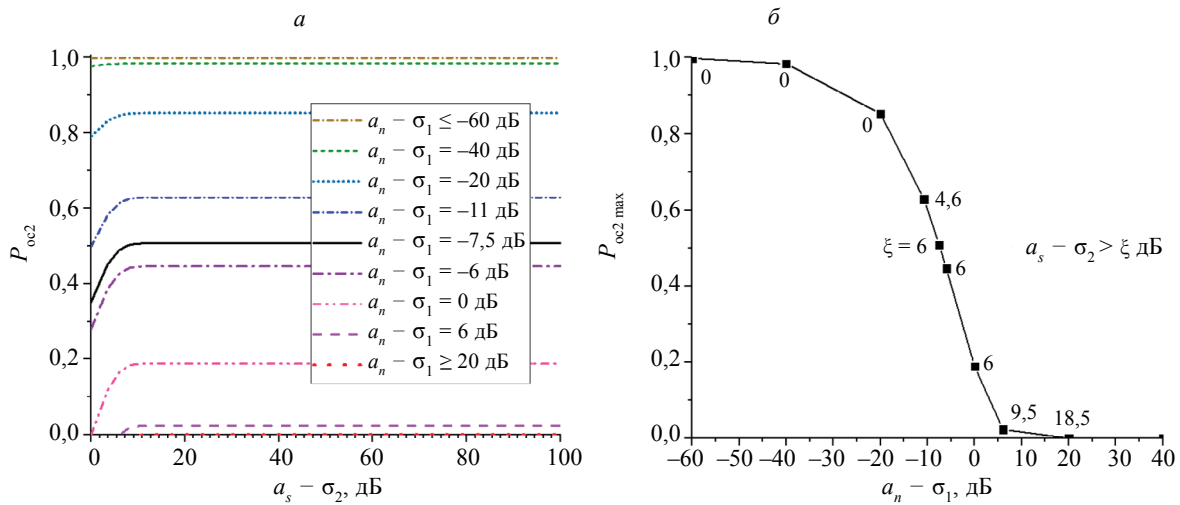


Рис. 4. Зависимости изменения  $P_{oc2}$  от  $a_s/\sigma_2$  и  $a_n/\sigma_1$  в дБ, где график (б) пересчитан из (а) и показывает значения  $a_s/\sigma_2$  и  $a_n/\sigma_1$ , при которых  $P_{oc2}$  выходит на насыщение  $P'_{oc2} = 0,95 \cdot P_{oc2 \max}$ . Над точками графика (б) указано минимальное значение  $\xi = a_s - \sigma_2$ , при котором  $P_{oc2} = P'_{oc2}$ , а соединяющая их линия показывает общий тренд.

шума, начиная с величины  $a_{th} = a_n - 20$  дБ, вероятность обнаружения сигнала становится практически невозможным событием ( $P_{oc} < 10\%$ ) независимо от соотношения  $a_s/a_{th}$ . В любом случае амплитуда минимально детектируемого сигнала нелинейно смещается в сторону больших величин  $a_s/a_{th}$  с увеличением  $a_{th}/a_n$  (рис. 3б). Если же сигнал на уровне порога ( $a_{th} \approx a_s$ ), то вероятность его детектирования выше 50% (т.е. статистическое событие становится скорее возможным, чем нет), начиная с  $a_{th} = a_n + 0,9$  дБ. При  $a_{th} = a_n + 6$  дБ и выше гарантированно выявление сигнала при любом  $a_s/a_{th}$ , что совпадает с экспериментальными оценками других авторов [14].

Рис. 4 дополняет вышесказанное следующим:  $P_{oc}$  начинает превалировать над  $P_{лс}$ , если отдельные выбросы в шуме не превышают  $a_n = \sigma_1 - 7,5$  дБ при  $a_s > \sigma_2 + 6$  дБ и  $a_n = \sigma_1 - 11$  дБ при  $a_s \approx \sigma_2$ , т.е. на участках, где отсутствуют высокоамплитудные выбросы шума или спадает общий уровень шума ниже  $\sigma_1$ , возможно обнаружить сигнал с большей вероятностью, что и используется в способах амплитудного детектирования АЭ после фильтрации [8, 9]. Поэтому предлагаемый подход может быть использован для количественной оценки эффективности фильтрации для  $P_{oc}$ . Указанный подход применим и для случая параллельной регистрации сигналов примерно одинаковой амплитуды от двух источников при низком уровне фонового шума, при котором  $D_1$  — событие регистрации сигнала АЭ от первого источника, а  $D_2$  — от второго. В этом случае предлагаемый подход позволяет провести оценку минимальных граничных условий доминирования одних сигналов над другими, чтобы обеспечивалось заданное значение  $P_{oc}$ .

Для экспериментальной проверки предлагаемого подхода были взяты восемь типов представительных сигналов АЭ (рис. 5), существенно отличающихся амплитудой, длительностью и спектральным составом. Сигналы были вырезаны из реальной *stream*-записи АЭ, полученной при сопровождении испытания на растяжение чистого  $\alpha$ -Fe с помощью аппаратуры «Physical Acoustics Corporation (PAC)» (США). С образца АЭ регистрировалась широкополосным пьезопреобразователем «PICO» в полосе рабочих частот 50—1200 кГц, затем усиливалась на 60 дБ усилителем типа «2/4/6» с последующей оцифровкой и записью платой аналого-цифрового преобразования «РСІ-2» с частотой дискретизации 2 МГц и амплитудным разрешением 16 бит. Из этой же записи АЭ был вырезан фрагмент реального шума, который был записан непосредственно перед началом испытания.

Далее из полученных восьми сигналов был сконструирован временной ряд АЭ, имитирующий тестовую *stream*-запись АЭ, содержащую тысячу событий. Времена появления сигналов в записи генерировались случайно, образуя процесс Пуассона. Последовательность появления записей отобранных сигналов также задавалась случайным законом равномерного распределения, т.е. присутствие каждого из восьми типов сигналов в общем потоке было равновероятно, а временные расстояния между событиями случайны и независимы. При этом для каждого варианта тестовых *stream*-записей, содержащих 1000 сигналов, для каждого специального сигнала было точно известно количество отсчетов и его временное положение. В результате, итоговая тестовая *stream*-запись



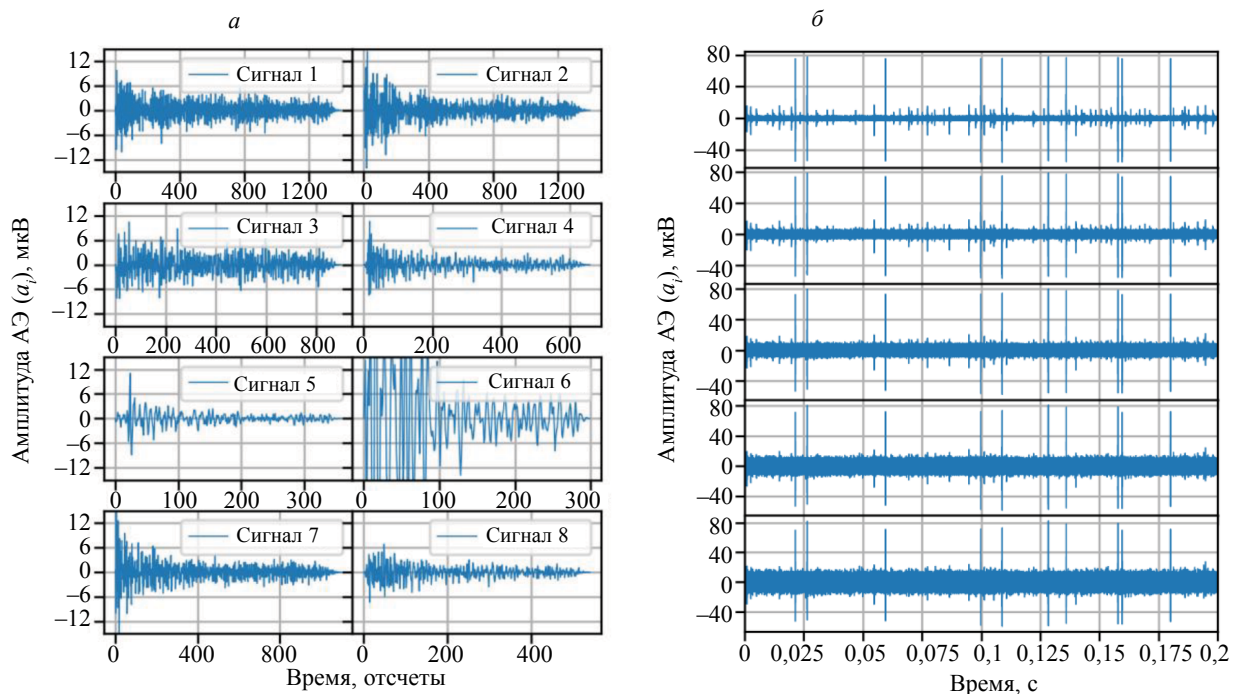


Рис. 5. Общий вид формы сигналов АЭ, отобранных из записи испытания на растяжение чистого  $\alpha$ -Fe для проведения экспериментальных исследований (а), и общий вид фрагментов тестовых *stream*-записей, содержащие 1000 сигналов АЭ (б), показанных на рис. 5а и смешанных с реальным шумом, нормированным для имитации пяти уровней SNR, приведенных в табл. 1.

АЭ имела довольно большое сходство с реальными записями АЭ, регистрируемыми при деформации материалов, поскольку тестовые события существенно отличаются по амплитудным, временным и спектральным характеристикам и имеют неопределенность времени прихода. Последнее заключается в том, что события АЭ могут происходить одно за другим или через относительно большой интервал тишины. Перекрытие сигналов при этом исключалось условиями конструирования тестовой *stream*-записи.

Таблица 1

Значения SNR (в дБ) для восьми сигналов в пяти тестовых *stream*-записях

Запись №	Номер сигнала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6,0	7,2	7,8	4,2	3,7	21,5	6,8	4,3
2	0	1,2	1,8	-1,9	-2,3	15,5	0,8	-1,7
3	-3,5	-2,3	-1,7	-5,4	-5,9	12,0	-2,7	-5,2
4	-6,5	-4,8	-4,2	-7,9	-8,4	9,5	-5,2	-7,7
5	-8,0	-6,7	-6,2	-9,8	-10,3	7,5	-7,2	-9,7

Затем на тестовый сигнал накладывался нормированный шум. Константа, нормирующая амплитуду шума, задавалась таким образом, чтобы симитировать пять различных степеней зашумления, соответствующих разному соотношению SNR. Значения SNR для каждого типа сигнала и каждого уровня шума, рассчитанные по выражению (10), сведены в табл. 1.

$$SNR_{дБ} = 10 \lg \left( \frac{RMS_s}{RMS_n} \right)^2, \quad (10)$$

где  $RMS_s$  и  $RMS_n$  — соответственно среднеквадратичное значение сигнала и шума:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_0^T a_i^2(t)}. \quad (11)$$

Далее пять тестовых *stream*-записей АЭ многократно прогоняли через пороговый амплитудный детектор и определяли количество отсчетов сигналов и шума, превышающих уровень амплитудной дискриминации. При этом использовалось шесть уровней порога, величина которых задавалась соотношением:  $a_{th}/\sigma_1 = 1$  (0 дБ); 0,5 (–6 дБ); 0,1 (–20 дБ); 0,01 (–40 дБ); 2 (+6 дБ); 10 (+20 дБ) и 100 (+40 дБ). Экспериментальное значение  $P_{oc}$  получали по следующему выражению, которое является аналогом выражений (2) и (7):

$$P_{oc} = \frac{\frac{\sum a_s > a_{th}}{\sum a_s} - \frac{\sum a_n > a_{th}}{\sum a_n}}{\frac{\sum a_s > a_{th}}{\sum a_s} + \frac{\sum a_n > a_{th}}{\sum a_n}}, \quad (12)$$

где  $\sum a_s > a_{th}$  и  $\sum a_n > a_{th}$  — соответственно сумма отсчетов сигнала и шума, превышающих уровень порога, а  $\sum a_s$  и  $\sum a_n$  — соответственно общая сумма отсчетов в сигнале и шуме. В вычислительном эксперименте при определении  $\sum a_s > a_{th}$  и  $\sum a_n > a_{th}$  использовалась вся тестовая *stream*-запись, в которой по результатам конструирования время начала и окончания каждого сигнала были известны с точностью до отсчета. Теоретическое значение  $P_{oc}$  определяли по выражению (7) с подстановкой величин  $a_s$ ,  $a_n$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$ , полученных для каждого сигнала по каждой тестовой *stream*-записи АЭ. Результат сопоставления экспериментальных и теоретических значений  $P_{oc}$  по каждому типу сигнала представлен на рис. 6а, который показывает хороший уровень совпадения. При этом несколько заниженные экспериментальные значения  $P_{oc}$  для всех сигналов, кроме 3, 1 и 8, объясняются большим отличием формы их амплитудного распределения от нормального, использовавшегося в модели в качестве приближения, что видно из рис. 6б. Следовательно, точность предлагаемого подхода может быть повышена путем подстановки в выражение (2) функции амплитудного распределения, построенного непосредственно по записи формы реаль-

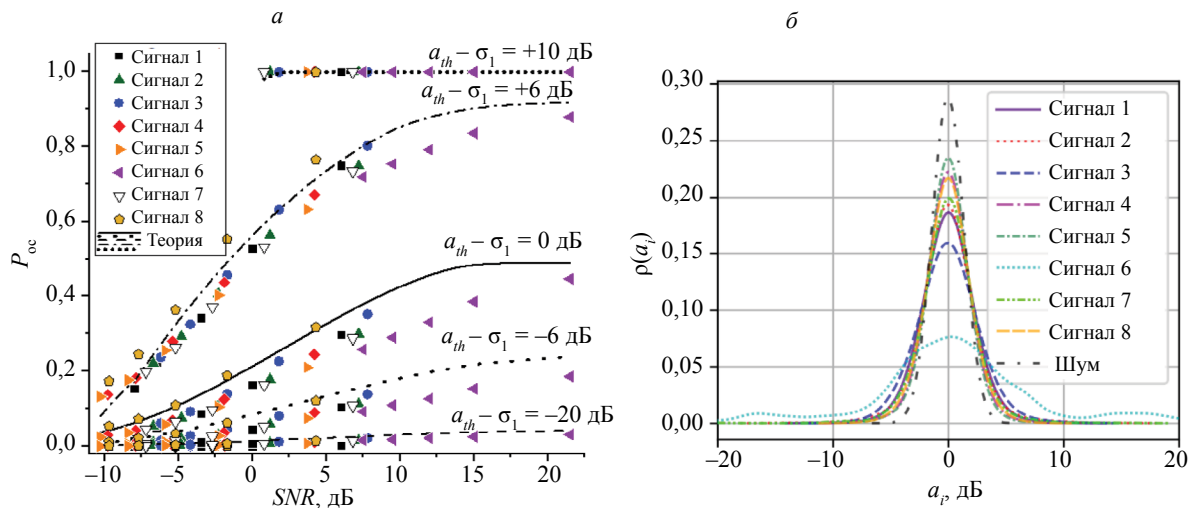


Рис. 6. Результат сопоставления экспериментальных и теоретических значений  $P_{oc}$  по каждому типу сигнала (а) и общий вид распределений выбросов амплитуды  $a_i$  в отсчетах сигналов и шума в первой тестовой *stream*-записи АЭ (б).

ного сигнала, а выражение (7) может быть использовано для выполнения предварительных оценок. Кроме этого, экспериментальная оценка показала необходимость введения правил, устраняющих неопределенность и обеспечивающих сходимость с экспериментальными данными в граничных и приграничных областях соотношений  $a_s$  и/или  $a_n$  к  $a_{th}$ , а именно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } a_{th} > a_s \text{ без расчета принимается } P_{oc} = 0 \\ \text{пусть } 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da - 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = A, \text{ то при } A < 0 \text{ принимается } |A| \\ \text{пусть } 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da + 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = B, \text{ то при } B < 0 \text{ принимается } |B| \\ \text{при } A \text{ или } B < 1 \cdot 10^{-4} \text{ принимается } A \text{ или } B = 1 \cdot 10^{-4} \end{array} \right. \quad (13)$$

### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к оценке вероятности обнаружения сигнала в широком диапазоне SNR на основе анализа распределения амплитуд сигнала и шума в каждом конкретном фрагменте записи АЭ. Указанный подход имеет ряд существенных преимуществ:

1) он универсальный, т.к. позволяет анализировать кадры записи АЭ, зарегистрированные как по превышению порога, так и в беспороговом режиме записи АЭ;

2) он позволяет оценить эффективность применения амплитудного детектора для обнаружения сигналов на уровне шума по каждому их типу (виду) с учетом их трансформации при распространении по объекту или без учета нее, как до, так и после применения процедур фильтрации и шумоподавления записей АЭ. При этом форма сигнала (импульсная или непрерывная АЭ, одно- или многомодальная) не играет особого значения, т.к. в предложенной расчетной схеме она по отсчетам сводится к функции распределения выбросов амплитуды в кадре записи АЭ, что нивелирует влияние как формы сигнала, так и наличия нескольких однотипных неперекрывающихся сигналов в анализируемом фрагменте записи;

3) он применим для оценки  $P_{oc}$  при одновременном действии нескольких источников АЭ, генерирующих волны сопоставимой амплитуды.

Для повышения точности оценки вероятности обнаружения импульсных сигналов их функции распределения выбросов амплитуды следует получать по экспериментальным или модельным данным, а в случае анализа сигналов непрерывного вида может быть достаточно использованного в работе допущения о нормальном распределении. Установлено, что амплитудное детектирование сигналов возможно, начиная с уровня порога  $a_{th} > a_n + 0,9$  дБ, при наличии выбросов амплитуды в шуме не более  $a_n = \sigma_1 - 7,5$  дБ при  $a_s > \sigma_2 + 6$  дБ и  $a_n = \sigma_1 - 11$  дБ при  $a_s \approx \sigma_2$ . В противном случае качественное и устойчивое детектирование сигнала по порогу в амплитудно-временной области анализа АЭ не может быть обеспечено и поэтому следует переходить на использование альтернативных способов обнаружения сигналов в шуме (использование критериев оценки разладки временного ряда [18—20] или изменения спектральных характеристик [21], или др. способов выявления признаков сигнала в шуме).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-19-00585.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hase A. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique // Lubricants. 2020. V. 8. No. 3. P. 37.
2. Stepanova L.N., Chernova V.V., Ramazanov I.S. Acoustic emission testing of early generation of defects in cfrp samples under static and thermal loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No 10. P. 784—794.
3. Choe C., Chen C., Nagao S., Saganuma K. Real-time acoustic emission monitoring of wear-out failure in SiC power electronic devices during power cycling tests // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. V. 36. No. 4. P. 4420—4428.

4. *Rodgers M.* The Use of a Floating Threshold for Online Acoustic Emission Monitoring of Fossil High Energy Piping: Newsletter // Acoustic Emission Consulting. 1994. Ver. 1. 6 p.
5. *Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V.* Estimation of time-of-arrival errors of acoustic-emission signals by the threshold method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 4. P. 273—279.
6. *Stepanova L.N., Kanifadin K.V., Ramazanov I.S., Kabanov S.I., Lebedev E.Y.* Clustering of sources of acoustic-emission signals by the leading-edge rise rate // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 10. P. 685—692.
7. *Гуж В.И., Наконечная О.А.* Алгоритмы численного определения временных характеристик сигналов акустической эмиссии // Математическое и компьютерное моделирование. Серия: Технические науки. 2012. Вып. 6. С. 73—87.
8. *Davydova D.G., Kuz'min A.N., Rizvanov R.G., Aksel'rod E.G.* Identification of acoustic emission sources during testing of technological equipment with a high noise level // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 5. P. 292—302.
9. *Barat V., Borodin Y., Kuzmin A.* Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. 2010. V. 28. P. 109—119.
10. *Костюков В.Н., Науменко А.П.* Оценка риска выбора нормативных величин диагностических признаков // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. No. 4. С. 150—154.
11. *Tang J., Soua S., Mares C., Gan T.-H.* An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades // Renewable Energy. 2016. V. 99. P. 170—179.
12. *Ivanov V.I., Vlasov I.E.* Some problems of nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2002. V. 38. No. 7. P. 547—556.
13. *Khoroshavina S.G.* Probabilistic models for estimating the acoustic-emission test confidence for composite materials in point and bracket versions // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2000. V. 36. No. 3. P. 175—181.
14. *Barat V., Marchenkov A., Ivanov V., Bardakov V., Elizarov S., Machikhin A.* Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing // Applied Science. 2021. V. 11. Is. 20. Art. number 9429. 18 p.
15. *Sause M.G.R., Linscheid F.F., Wiehler M.* An experimentally accessible probability of detection model for acoustic emission measurements // Journal of Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. Is. 2. Art. number 17. 12 p.
16. *Pollock A.A.* A PoD model for acoustic emission — Discussion and status // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1211. P. 1927—1933.
17. *Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I.* Probabilistic-information approach to assessing the reliability of the results of the acoustic-emission method of testing and diagnostics // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 375—382.
18. *Sedlak P., Hirose Y., Khan S.A., Enoki M., Sikula J.* New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // Ultrasonics. 2009. V. 49. P. 254—262.
19. *Van der Baan M., Vaezi Y.* Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection // Geophysical Journal International. 2015. V. 203. P. 1896—1908.
20. *Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A.* New method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // Applied Sciences. 2020. V. 10. No. 1. P. 73.
21. *Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu.* A time-frequency based approach for acoustic emission assessment of sliding wear // Lubricants. 2020. V. 8. No. 5. P. 52.

## КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСУЩИХ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК АВТОМОБИЛЬНОЙ ЭСТАКАДЫ МАГНИТНЫМ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

© 2022 г. С.М. Кулак<sup>1,\*</sup>, В.Ф. Новиков<sup>1,\*\*</sup>, В.С. Мальцев<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: \*[ksm-rabochi@rambler.ru](mailto:ksm-rabochi@rambler.ru); \*\*[vitaly.nowikov2017@yandex.ru](mailto:vitaly.nowikov2017@yandex.ru); \*\*\*[coreboxe@gmail.com](mailto:coreboxe@gmail.com)

Поступила в редакцию 14.12.2021; после доработки 12.02.2022

Принята к публикации 14.02.2022

Исследовано магнитоупругое размагничивание несущих двутавровых балок автомобильной эстакады г. Тюмень в течение одного месяца ее эксплуатации в разных режимах интенсивности движения транспорта. Разработано, изготовлено и апробировано съемное запоминающее тензометрическое устройство для измерения деформации растяжения несущей балки автомобильного моста при ее изгибе, вызванном проездом транспорта. На одной из исследуемых балок установлена зависимость изменения напряженности магнитного поля рассеяния ее локальной остаточной намагниченности (ЛОН) от механической деформации растяжения на поверхности балки при ее изгибе. Полученная зависимость использована для калибровки величины магнитоупругого размагничивания восьми исследуемых стальных балок автомобильной эстакады по уровню испытываемых ими максимальных деформаций за один месяц наблюдения. Она показала, что метод определения магнитоупругой чувствительности (МУЧ) с помощью удара дает достаточно достоверные результаты и может быть использован на металлоконструкциях, которые невозможно нагрузить для калибровки. Проведена оценка пиковых значений механических напряжений осевого растяжения в двутавровых балках эстакады по уровню размагничивания в режиме магнитоупругой памяти, вызванного динамическим воздействием проезжающего транспорта. Способ не нуждается в наклейке дорогостоящих датчиков и следящей аппаратуре и может быть внедрен без существенных капиталовложений.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, стальная эстакада, остаточная намагниченность, динамическое нагружение, магнитоупругое размагничивание стали, магнитоупругая чувствительность стали.

DOI: 10.31857/S0130308222030022

### ВВЕДЕНИЕ

Дорожная инфраструктура крупных городов России требует постоянной модернизации и развития в связи с интенсивно возрастающим потоком автотранспорта [1]. В целях снижения уровня заторных явлений автомобильных дорог Тюменской области и повышения безопасности дорожного движения реализуются мероприятия (проекты) по увеличению их пропускной и несущей способностей с переводом в наиболее высокую категорию надежности и строительству крупных инфраструктурных объектов [2]. Одним из них является эксплуатируемая с 2013 г. пятнадцатипролетная эстакада транспортной развязки улиц Мельникайте — Ставропольская в г. Тюмень общей протяженностью 640 м с двухсторонним четырехполосным движением. Возведение такого сооружения позволило существенно разгрузить прилегающие перекрестки и магистрали, снизить уровень заторных явлений и увеличить пропускную способность всей транспортной системы города в целом. При его постройке в качестве несущих элементов применялись двутавровые шарнирно-опертые балки длиной 42 м, выполненные из стали 15ХСНД (рис. 1), которые на каждом пролете эстакады расположены по ширине в десять параллельных друг другу рядов с интервалом 1,3 м на железобетонных фундаментных основаниях. Каждый такой элемент, согласно [3, 4], рассчитан испытывать нагрузку при упругой деформации растяжения изгибом не более 250 МПа.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) любого такого несущего элемента эстакады определяется характеристиками воздействующих на него нагрузок. Основными являются из постоянных нагрузок собственный вес, а из кратковременных воздействий — проезжающий автотранспорт.

При плоском поперечном изгибе балки от произвольной внешней нагрузки в ее поперечных сечениях возникают перерезывающие силы и изгибающие моменты. К изгибающему моменту в сечении приводят нормальные напряжения  $\sigma$ , действующие перпендикулярно плоскости поперечного сечения (см. рис. 1). Перерезывающая сила является равнодействующей касательных напряжений  $\tau$ , действующих в плоскости сечения. Наиболее опасными точками по нормальным напряжениям будут 1, 2 (см. рис. 1). Опасной точкой по касательным напряжениям будет 3, где действуют максимальные касательные напряжения, а нормальные напряжения равны нулю. Очевидно,

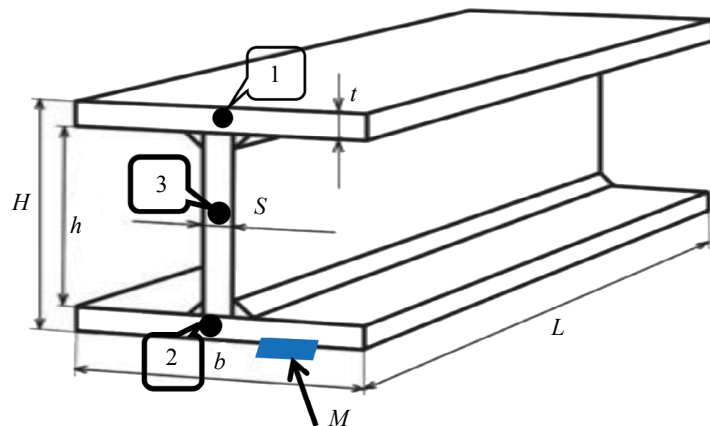


Рис. 1. Несущая двутавровая балка:

$H = 1400$  мм — высота балки;  $h = 1320$  мм — высота стенки балки;  $b = 650$  мм — ширина нижней полки;  $t = 40$  мм — толщина полки;  $S = 25$  мм — толщина стенки;  $L = 42000$  мм — длина балки между соседними опорами;  $M$  — область локального намагничивания ЛОН.

в исследуемой нижней полке балки касательные напряжения будут равны нулю и в дальнейших расчетах учитываться не будут [8, 9].

Для большинства балок в различных конструкциях нормальные напряжения ( $\sigma$ ) являются наибольшими, и по ним проверяется прочность таких элементов. Для балки на двух опорах с распределенной нагрузкой от воздействия собственного веса конструкции [4, 9] эти максимальные напряжения будут равны:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\min}} \sim 10^6 \text{ Па} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где  $M_{\max} \sim 2000$  Н·м — наибольший по модулю изгибающий момент в сечении балки;  $W_{\min} \sim 7 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup> — минимальный момент сопротивления сечения;  $[\sigma]$  — допускаемое нормальное напряжение равное  $k \cdot \sigma_T$  ( $k \sim 5$  — запас прочности,  $\sigma_T \sim 400$  МПа — предел текучести материала (сталь 15ХСНД)). При указанном пределе текучести и запасе прочности рабочие напряжения в балках будут  $\sim 80$  МПа. В этом диапазоне проводились измерения.

Все внешние нагрузки перпендикулярны оси балки, продольный распор балок отсутствует. Конструкция со всех сторон закрыта от воздействия ветровой нагрузки плотной застройкой из высотных зданий. Пренебрегая поперечными горизонтальными опрокидывающими воздействиями на эстакаду, можно считать, что напряженное состояние ее несущих элементов формируется одноосными изгибными деформациями (растяжения, сжатия), вызываемыми действием собственного веса и проезжающим транспортом. Поскольку поток транспорта не постоянен во времени (сутках, днях недели, времени года, полосах движения), то возникает практический интерес в определении максимальных динамических напряжений, испытываемых несущими двутавровыми элементами и оценке степени их влияния на усталостные изменения в материале [10].

Одним из направлений научных исследований по обеспечению безопасности транспортных сооружений, в том числе и мостов (согласно [5, 11]), является исследование изменения напряженно-деформированного состояния в опасных зонах и узлах [12, 13]. При этом следует учитывать возможное изменение напряженного состояния вследствие наличия дефектов и развития повреждений, влияния агрессивных эксплуатационных сред, деструкции материала, перераспределения усилий [14, 15]. В статье [6] и книге [7] рассмотрены аварии пешеходных мостов. Указывается, что за 180 лет в мире случилось большое количество аварий мостовых сооружений, вызванных действием пешеходной нагрузки. Причем эти аварии мостов под действием пешеходной нагрузки практически не анализировались.

Поэтому актуальным является периодическое исследование напряженного состояния двутавровых балок автомобильной эстакады от воздействий проезжающего по ней транспорта и определение максимальных напряжений, испытываемых каждой из них при транспортировке грузов.

Современная компьютерная база и программное обеспечение позволяют с большей надежностью проектировать мостовые конструкции. Проектировщики должны учитывать опасность пере-

грузки пролетных строений и опор мостов, а также и возможный динамический характер этой нагрузки [16]. Однако от приборного контроля напряженно-деформированного состояния их элементов никто не освобождал, особенно в межремонтный и после ремонтный периоды. Полноценный тензометрический и оптический контроль НДС не всегда возможны и дороги, поэтому целесообразно разрабатывать и применять для этого новые приборные экспресс-методы.

Цель работы — исследование возможности применения эффекта магнитоупругого размагничивания стали в качестве экспресс-метода контроля напряженно-деформированного состояния стальных двутавровых балок автомобильной эстакады при их конструировании и эксплуатации.

Задачи:

- 1) исследование магнитоупругого размагничивания нижних полков двутавровых балок автомобильной эстакады, вследствие их деформации, вызванной действием проезжающего транспорта;
- 2) разработка и изготовление съемного тензометрического устройства для измерения деформации двутавровых балок; измерение деформации изгиба нижней полки одной балки после проезда автомобильного транспорта по эстакаде;
- 3) калибровка величины магнитоупругого размагничивания балок эстакады по уровню ее деформации, измеренному тензометрическим устройством;
- 4) оценка напряжений растяжения в несущих балках, создаваемых динамическим воздействием транспорта по величине калиброванного уровня их магнитоупругого размагничивания.

Для исследования напряженно-деформированного состояния двутавровых балок действующей автомобильной эстакады от динамического воздействия проезжающего транспорта применялся метод [17], позволяющий оценивать его уровень по изменению магнитного потока в остаточной намагниченной зоне. Метод [17—23] основан на явлении магнитоупругого эффекта [24, 25], который именуем в своих работах магнитоупругой памятью (магнитоупругим размагничиванием (МУП)), и заключается в необратимом изменении остаточной намагниченности  $M_r$  локального участка стали, вызванном действием механических напряжений  $\sigma$  в ней.

В массивной металлоконструкции после ее локального намагничивания над намагниченным участком появляется магнитное поле рассеяния локальной остаточной намагниченности (ЛОН), напряженность  $H$  которого линейно связана с магнитным моментом локальной намагниченности  $M_r$  ( $H \sim M_r$ ). В работе [26] предложены гиперболическая и экспоненциальная закономерности изменения  $M_r$  стали при приложении механических напряжений  $\sigma$  и проведена проверка их выполнимости.

В работе [27] отмечена высокая временная стабильность уровня локальной остаточной намагниченности конструкционной стали, не подверженной действию внешних усилий и магнитных полей. За 340 дней убыль напряженности магнитного поля рассеяния составила порядка 30—35 % без нагрузки у стали 10 и 7—8 % у стали 09Г2С. Результаты таких исследований показывают возможность применения локального намагничивания при долговременном контроле напряженного состояния стальных конструкций методом МУП.

В работах [28, 29] описан алгоритм определения действовавшего осевого напряжения в стальных конструкциях в режиме памяти. Одним из этапов его реализации является определение магнитоупругой чувствительности (МУЧ) стали к упругим деформациям (напряжениям) ее растяжения по результатам измерения МУЧ к напряжениям поперечного сжатия, вызванного ударным или статическим локальным воздействием на сталь [29]. Определение МУЧ стали к искомым напряжениям повышает точность контроля ее НДС методом МУП.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе исследования МУП проводились на восьми одинаковых и параллельных друг другу балках (см. рис.1) одного из пролетов автомобильной эстакады, каждой из которых присваивались порядковые номера от 1 до 8. Балки с номерами 1—4 приходились на полосы движения транспорта, въезжающего на эстакаду, а с номерами 5—8 — съезжающего. Две крайние балки с обеих сторон пролета, не испытывающие заметного динамического воздействия со стороны потока транспорта, исследованию не подвергались. Весь пролет эстакады опирается на два железобетонных основания, расположенных на расстоянии  $\sim 42$  м друг от друга. Для исследований были выбраны участки нижних полков в центральной части каждой балки, которые испытывают при изгибе наибольшие деформации [9].

Согласно (1), начальные исходные нагрузки (в отсутствие транспорта) на исследуемые участки нижней полки, вызываемые статическим действием собственного веса, малы по сравнению с динамическими, поэтому они не учитывались. Кроме того, для каждой балки определялась маг-

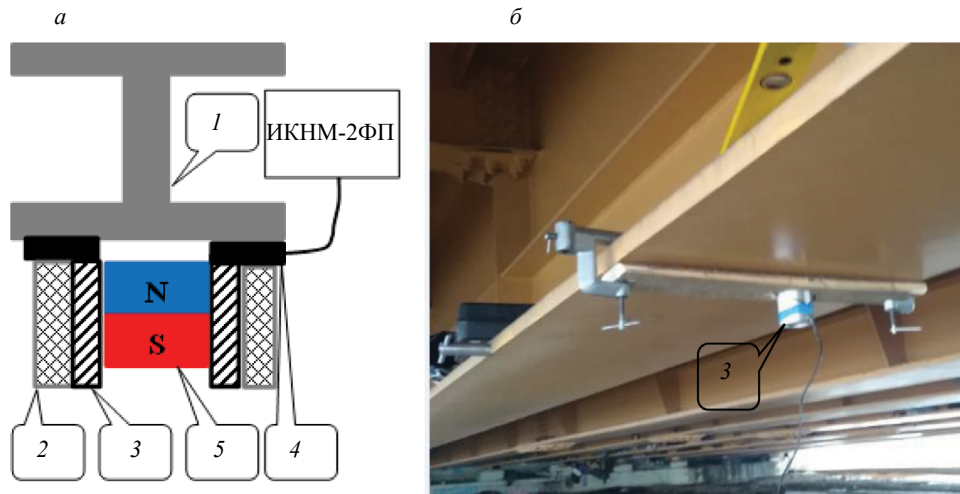


Рис. 2. Схема (а) и фото (б) исследования МУП на двутавровой балке автомобильной эстакады:  
 1 — поперечное сечение двутавровой балки; 2 — пластиковое крепежное кольцо; 3 — направляющий алюминиевый цилиндр;  
 4 — феррозондовые датчики тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния; 5 — дисковый магнит.

нитоупругая чувствительность (МУЧ) ее стали в местах исследования МУП, что позволило в [30] провести расчет напряжений с учетом МУЧ.

В центре нижней полки каждой исследуемой двутавровой балки (1) с помощью клея «Момент» крепилось пластиковое кольцо (2) (рис. 2), которое позволяло надежно размещать на ее поверхности направляющий алюминиевый цилиндр (3). В основании цилиндра диаметрально и встречно друг к другу расположены два феррозондовых датчика (4). Через направляющий цилиндр к поверхности полки доставлялся дисковый магнит (5) в алюминиевом держателе для ее локального намагничивания (ЛН) до состояния близкого к техническому насыщению (в точке  $M$  на рис.1). В этом случае в стали создавалась локально остаточная намагниченность  $M_{r0}$  перпендикулярно поверхности и оси действия напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$ , возникающих при изгибе балки. Затем магнитометром ИКНМ-2ФП, соединенным с двумя феррозондовыми датчиками, измерялась в максимуме тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности  $H_{0\sigma} \sim M_{r0}$ . При таком диаметрально встречном симметричном относительно ЛОН расположении двух феррозондовых датчиков исключалось влияние на нее внешних магнитных полей. Применение направляющего цилиндра (3) и крепежного пластикового кольца (2) позволяло при повторных измерениях помещать феррозондовые датчики точно в местах максимального значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН.

Поскольку магнитный полюс ЛОН имеет замкнутую конфигурацию разнонаправленных магнитных силовых линий — своего рода «кокон», в котором внешнее магнитное поле усиливает сонаправленные поля и уменьшает противоположные поля, делает такой «кокон» в целом мало восприимчивым к не очень большим внешним полям.

После локального намагничивания измерялись исходное  $H_{0\sigma}$  и периодически в течение одного месяца последующее значение тангенциальной составляющей напряженности  $H_{\sigma}$  поля рассеяния ЛОН, рассчитывалось ее соответствующее относительное изменение  $\delta H_{\sigma} = (H_{0\sigma} - H_{\sigma})/H_{0\sigma}$  за каждый период исследований.

Для измерения деформации поверхности исследуемых балок автомобильной эстакады было разработано и изготовлено съемное (накладное) запоминающее тензометрическое устройство (рис. 3).

Тензометрическое устройство (рис. 3а) состоит из датчика деформации (1) и блоков ее измерения (2, 3, 4). Датчик представляет собой полный измерительный мост, собранный из тензорезисторов сопротивлением 350 Ом каждый, на текстолитовой подложке (1) размером 150×40 мм. Полный мост из тензорезисторов размером 10×10 мм размещался в середине подложки. Крайние участки подложки служат для ее крепления на контролируемой конструкции. Такой датчик может механически крепиться на нижней полке двутавровой балки исследуемой эстакады при давлении с помощью струбцин (рис. 3б). Для исключения проскальзывания текстолитовой



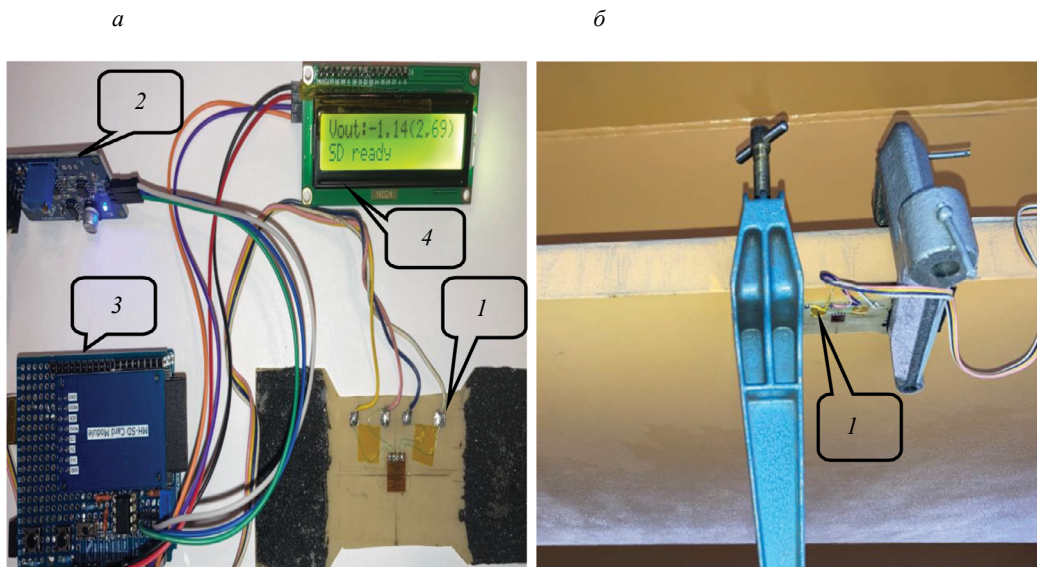


Рис. 3. Тензометрическое устройство (а) и его датчик деформации на объекте исследования (б):  
1 — датчик деформации; 2 — усилитель выходного сигнала датчика; 3 — микроконтроллер; 4 — блок индикации результатов измерения.

подложки датчика деформации в местах прижатия ее струбцинами к балке, на нее наносится абразивный материал. В результате действия на балки эстакады проезжающего автотранспорта будет происходить их изгиб, приводящий к деформации растяжения нижней полки. Вместе с ней аналогичные деформации будет испытывать и закрепленный на ней измерительный датчик деформации. Это вызовет разбаланс его тензометрического измерительного моста на величину  $\Delta U$ , регистрируемую блоком измерения (2, 3, 4 на рис. 3а). Поскольку выходной сигнал такого моста составляет десятые (сотые) доли мВ, то для регистрации, дальнейшего анализа и обработки необходимо его усиление. Для этого в схему блока измерения включен блок (2), построенный на двух операционных усилителях с двухполярным питанием. Усиленный сигнал поступает в блок 10-битного АЦП микроконтроллера atmega328p (3), где аналоговый сигнал преобразуется в цифровой вид с количеством шагов, равным 1024. Затем оцифрованный сигнал поступает в блок индикации и управления (4) с монохромным дисплеем. Результаты измерения разбаланса  $\Delta U$  измерительного тензомоста передаются на карту памяти, где сохраняются в текстовом формате, предназначенном для представления в табличной форме (CSV) и обработки в программе Excel. Питание тензометрического устройства осуществляется с помощью источника постоянного напряжения 5 В или аккумулятора типа «крона».

С помощью машины для механических испытаний ИР 5047-50 проведена калибровка величины разбаланса тензомоста  $\Delta U$  тензометрического устройства. Для этого в датчике деформации (1) (см. рис. 3а) создавались механические напряжения растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  известной величины и регистрировались соответствующие им уровни  $\Delta U$ . Полученная в результате калибровки зависимость  $\Delta U = f(\sigma_{\text{раст}})$  применялась при контроле изменения напряженного состояния несущих балок моста, результаты которого отражены на рис. 4 и 5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 показаны результаты проведенных исследований МУП в виде временной диаграммы изменения параметра  $\delta H_{\sigma}$  восьми двутавровых балок одного из пролетов автомобильной эстакады. Диаграмма состоит из трех частей (1, 2, 3), каждая из которых соответствует очередному этапу измерений, проводимому через разные промежутки времени после локального намагничивания. Здесь 1, 2, 3 — это нумерация этапов измерения напряженности  $H_{\sigma}$  магнитного поля рассеяния ЛОН на каждой из восьми балок. Порядковый номер столбца, отсчитываемый слева направо в каждой из трех частей диаграммы, обозначает номер балки. Высота каждого столбца диаграммы численно равна величине относительного изменения  $\delta H_{\sigma}$  напряженности магнитного поля рассея-

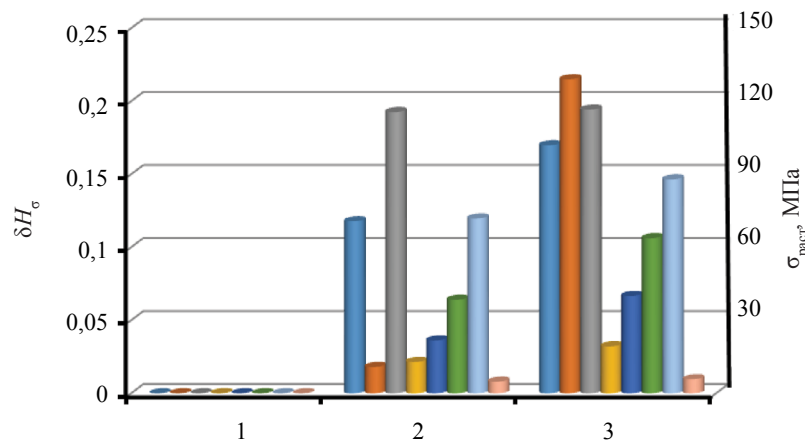


Рис. 4. Диаграмма относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния  $\delta H_{\sigma}$  ЛОН и напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$  на поверхности восьми двутавровых балок (№ 1, 2, ..., 8 слева направо), зарегистрированная через разные интервалы времени его эксплуатации после локального намагничивания: 1 этап — через 0,5 ч (интенсивность движения «нулевая»); 2 этап — через 2 ч (интенсивность движения возрастает); 3 этап — через 36 суток после намагничивания.

ния ЛОН, определенного на соответствующем этапе измерений (1, 2, 3) каждой из балок и величине механических напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$ , полученной по результатам калибровки  $\delta H_{\sigma}$  на одной из балок (рис. 5).

Как видно из рис. 4, за весь период исследований все балки испытывают разного уровня изменение поля рассеяния ЛОН, вызванное динамическим воздействием проезжающего автотранспорта. Причем за два с небольшим часа после локального намагничивания наибольшие нагрузки от проезжающего автотранспорта испытывают балки под въезжающим на эстакаду потоком (№ 1 и 3), а наименьшие — под потоком съезжающего с нее транспорта (№ 8). Спустя 36 суток уровень размагничивания ЛОН всех балок заметно возрастает. Такое отличие в изменениях  $\delta H_{\sigma}$  магнитного параметра локальной остаточной намагниченности балок обусловлено тем, что они испытывают напряжения растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  более высокого уровня от воздействия на них проезжающего транспорта. Чем больше проходит времени между этапами измерений, тем больше вероятность проезда более тяжелого или скоростного транспорта. Если в последующий временной период напряжения  $\sigma_{\text{раст}}$ , которые испытала балка, будут меньше, чем в предшествующий, то напряженность поля  $H_{\sigma}$  рассеяния ЛОН и  $\delta H_{\sigma}$  останутся практически неизменными. Другими словами, ЛОН работает в режиме запоминания максимальных напряжений и не реагирует на аналогичные или меньшие по

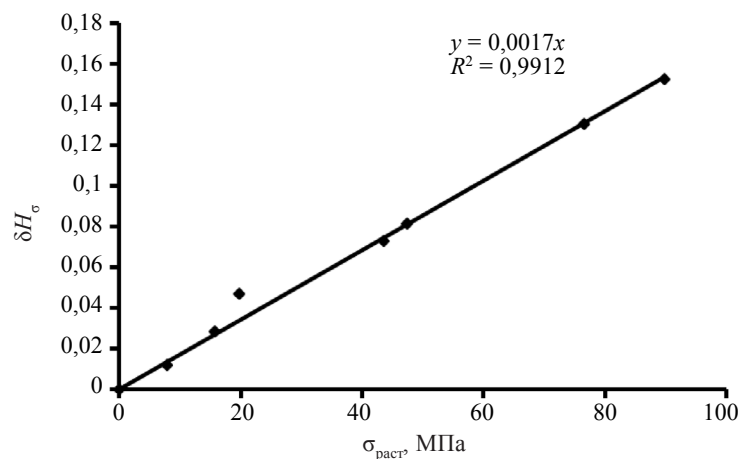


Рис. 5. Зависимость относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния  $\delta H_{\sigma}$  локальной остаточной намагниченности балки № 2 от напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  измеренных тензометрическим устройством.

величине напряжения  $\sigma_{\text{раст}}$ . Каждый из трех этапов измерения (1, 2, 3) проводился через разные промежутки времени, после локального намагничивания балок. Причем между 2 и 3 этапами прошло гораздо больше времени, по сравнению с промежутком времени от 1 до 2 этапа. Следовательно, в период от 2 до 3 этапа измерений через мост переместилось больше транспорта, чем за время до 2 этапа, и вероятность испытания балками в это время больших нагрузок гораздо выше.

Результаты измерения деформации растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  нижней полки исследуемой балки № 2 тензометрическим устройством при изгибе и вызванного ей соответствующего магнитоупругого размагничивания  $\delta H_{\sigma}$  ЛОН показаны на рис. 5 в виде зависимости  $\delta H_{\sigma} = f(\sigma_{\text{раст}})$ . Для получения такой зависимости на нижней полке балки № 2 крепился датчик деформации (1) тензометрического устройства (как показано на рис. 3б), и его измерительный мост приводился в равновесное состояние ( $\Delta U = 0$ ). Производилось локальное намагничивание балки (как показано на рис. 2), измерялось начальное значение  $H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН и последующие значения  $H_{\sigma}$ , когда измерительный мост испытывал разбаланс ( $\Delta U > 0$ ) вследствие деформации датчика и балки, вызванной действием проезжающего транспорта. В результате была установлена зависимость относительного изменения  $\delta H_{\sigma} = (H_{0\sigma} - H_{\sigma})/H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН балки № 2 от напряжения  $\Delta U$  разбаланса измерительного моста тензометрического устройства. Используя результаты вышеописанной калибровки величины разбаланса тензомоста  $\Delta U$  тензометрического устройства по уровню испытываемых напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$  в виде зависимости  $\Delta U = f(\sigma_{\text{раст}})$ , была получена зависимость  $\delta H_{\sigma} = f(\sigma_{\text{раст}})$  (см. рис. 5). В дальнейшем зависимость рис. 5 использовалась для калибровки величины МУП ЛОН каждой исследуемой балки по уровню напряжений растяжения. Результаты калибровочной оценки  $\sigma_{\text{раст}}$  по величине  $\delta H_{\sigma}$  в каждой балке представлены в табл. 1 и на рис. 4. В работах [28—31] предлагается для повышения точности магнитоупругих методов контроля НДС стальных конструкций измерять магнитоупругую чувствительность их стали, например, с помощью устройства, позволяющего оказывать локально дополнительное ударное воздействие непосредственно в месте ЛН [28—30].

Таблица 1

**Результаты измерения относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния  $\delta H_{\sigma}$  ЛОН, коэрцитивной силы  $H_c$  в них и оценки напряженного состояния  $\sigma_{\text{раст}}$  нижних полок балок эстакады по результатам исследования их магнитоупругого размагничивания от воздействия на мост провозимых грузов (транспорта)**

№ балки	$\delta H_{\sigma}$	$H_c$ , А/м	$\sigma_{\text{раст}}$ , МПа
1	0,169	—	100
2	0,216	370	127
3	0,193	387	114
4	0,032	405	19
5	0,066	410	39
6	0,106	410	62
7	0,147	410	86
8	0,0096	—	6

Предлагаемым методом мы решаем также вопрос калибровки применяемого в работах [28, 30] ударного устройства для определения МУЧ стали и эффективного напряжения, создаваемого им.

Пределы выносливости  $\sigma_{-1}$  при 107 циклах нагружения и текучести  $\sigma_T$  для стали 15ХСНД равны 274—299 и 349 МПа соответственно.

Максимально динамически нагруженными воздействием транспорта за период исследований были балки № 1, 2 и 3, расположенные под первой и второй наиболее интенсивными полосами движения транспорта, въезжающего на эстакаду. Балка № 4 приходилась на нейтральную (разделительную) полосу эстакады. В меньшей степени изменилось поле локальной остаточной намагниченности у балок № 5, 6, 7, 8 на второй половине эстакады, где динамическое воздействие съезжающего с нее транспорта существенно слабее, чем при скоростном въезде.

Следует отметить, что величина напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  шести балок, оцениваемая расчетным способом в работе [30] по уровню МУП с учетом экспериментально определенной МУЧ, в 1,4—1,6 раза превышает результаты (см. табл. 1), полученные с применением тензометрического устройства. При этом распределение напряжений по всем балкам остается неизменным и имеет максимум для балки № 2. Количественное отличие полученных здесь и в работе [30] результатов оценки  $\sigma_{\text{раст}}$  балок объясняется калибровой эффективностью напряжения в лабораторных условиях на гораздо более тонких пластинах и учетом индивидуальной МУЧ стали, значение которой, как показано в работе [30], может для каждой балки заметно отличаться.

Таким образом, для определения одноосных растягивающих напряжений (или сжимающих) в любой стальной конструкции (высотный, автомобильный подъемный кран, мосты, рельсы, машины и т.д.) от динамических воздействий методом МУП необходимо наклеить на участок контролируемой конструкции пластмассовое фиксирующее кольцо, произвести локальное намагничивание. Такой намагниченный участок конструкции будет служить «квазидатчиком», запоминающим пиковые напряжения в этом месте. Для более детального изучения распределения напряжений в исследуемой конструкции необходимо создать на ней требуемое количество таких «квазидатчиков». Производя периодически измерения поля рассеяния  $H$  в таком намагниченном «квазидатчике», по относительной величине его изменения можно оценивать максимальные деформации (напряжения), которые испытала контролируемая конструкция за это время. Контроль НДС методом МУП необходим в конструкциях и сооружениях, испытывающих периодически непредсказуемые нагрузки. Все это не требует больших материальных средств для приборного оснащения, так и для проведения самого контроля и может быть легко внедрено.

Для контроля напряжений конструкции тензометрическим методом необходимо наклеивание на ее поверхность тензодатчиков, и связанное с этим временное прекращение эксплуатации, применение регистрирующей и записывающей аппаратуры, что удорожает и усложняет ее тотальный и долговременный контроль. Предлагаемый метод МУП лишен этих недостатков. Однако он не конкурирует с тензометрическим, но может дополнить его путем более широкого охвата контролируемой конструкции и возможности без приборного запоминания пикового значения напряжений, без использования дорогостоящей запоминающей электронной аппаратуры. Метод МУП позволит выявлять участки конструкций, испытывающих аномально высокие нагрузки, испытываемые ею в процессе работы. И что не менее важно, метод позволит определять избыточную металлоемкость некоторых элементов проектируемых конструкций. Знание эпюры напряжений в элементах мостов, трубопроводов, зданий позволит при дальнейшем проектировании аналогичных конструкций снижать уровень запаса их прочности, а, следовательно, и металлоемкость, а также себестоимость производства и эксплуатации.

## ВЫВОДЫ

Разработано, изготовлено и апробировано на двутавровой балке автомобильной эстакады съемное запоминающее тензометрическое устройство для измерения деформации на ее поверхности.

Проведенная калибровка относительного изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности  $\delta H$  исследованных балок по уровню механических напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$  измеренных тензометрическим устройством, показала их практически линейную зависимость в диапазоне рабочих напряжений (0—90 МПа);

Исследуемый метод позволяет создавать на стальной конструкции множество магнитных квазидатчиков и в режиме «памяти» без дежурной аппаратуры определять распределение напряжений по балкам моста, что может быть полезным для контроля напряженно-деформированного состояния элементов стальной металлоконструкции в процессе эксплуатации и при ее проектировании.

Реализация исследуемого метода МУП не требует заметных капиталовложений и может быть быстро внедрена для обследования НДС металлоконструкций.

Анализ полученных предварительных результатов определения напряжений в несущих балках моста показывает их существенный разброс и, на наш взгляд, не специалистов по мостостроению, на избыточный (более чем десятикратный) запас прочности некоторых элементов, завышенную металлоемкость и стоимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская Федерация. Законы. Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федера-

ции: Федеральный закон от 08.11.2007 N 257-ФЗ [принят Государственной думой 18 октября 2007 года: одобрен Советом Федерации 26 октября 2007 года]. М.: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс. Текст: непосредственный.

2. Постановление правительства Тюменской области от 30 декабря 2014 года N 701-п Об утверждении государственной программы Тюменской области «Развитие транспортной инфраструктуры» до 2022 года.

3. ГОСТ 19281—89 Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28.09.89 г. № 2972: дата введения 1991-01-01. М.: Стандартиформ, 2009. 16 с. Текст: непосредственный.

4. СНИП II-23-81\*: Часть II Нормы проектирования: глава 23 Стальные конструкции: утверждены постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144. М.: ЦИТП, 1990. 96 с. Текст: непосредственный.

5. Пономарев В.П., Травуш В.И., Бондаренко В.М., Еремин К.И. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений. Текст: электронный // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2012. С. 1—9. Электронный ресурс: <http://ramag.ru/pressa/bss-pse>.

6. Walnut B., Sertis D. Failures of pedestrian bridges. Bridges of the world. 2004. P. 69—77. (In Russian).

7. Ovchinnikov I.G., Dyadchenko G.S. Peshekhodnye mosty: konstrukciya, stroitel'stvo, arhitektura. [Pedestrian bridges: design, construction, architecture.]. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2005. 227 p.

8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для машиностроительных вузов. М.: Наука, 1974. 544 с.

9. Куриленко Е.Ю., Огороднова Ю.В., Шантала И.В. Сопротивление материалов: учебное пособие по технической механике и сопротивлению материалов. Тюмень: РИО Тюм ГАСУ, 2014. 163 с.

10. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Регулирование динамических характеристик пролетных строений мостов в условиях изменяющегося воздействия временной подвижной нагрузки // Профессорский журнал. Серия: Технические науки. 2021. № 1 (4). С. 4—19.

11. Липанов И.Д., Молодкин И.А., Хомоненко А.Д. Разработка и перспективы информационной системы для мониторинга состояния мостов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 3 (27). С. 11—16.

12. Горохов Е.В., Васылев В.Н., Миронов А.Н., Щербина А.С. Напряженно-деформированное состояние металлической эллиптической балки // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 4 (104). С. 65—68

13. Божков В.И., Дизенко С.И., Педан О.А., Хорошев А.А. Испытание моста через реку Сочи // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2017. № 3. С. 83—89.

14. Будник М.С., Иодчик А.А. Исследование влияния коррозии на напряженно-деформированное состояние стальных конструкций // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. Т. 1. № 1. С. 18—20.

15. Козлов В.А. Напряженно-деформированное состояние элементов мостовых конструкций с переменной толщиной стенок вдоль длины // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 71—82

16. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 1. Текст: электронный // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2017. Т. 4. № 4. <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417

17. Способ определения механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов / Пат. 2274840 РФ №2004132739/28; заявл. 10.11.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.

18. Новиков В.Ф., Устинов В.П., Радченко А.В., Муратов К.Р., Кулак С.М., Сорокина С.В. О контроле напряжений в сложно нагруженной стальной конструкции методом магнитоупругого размагничивания // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 71—76.

19. Kulak S.M., Novikov V.F., Baranov A.V. Control of Mechanical Stresses of High Pressure Container Walls by Magnetoelastic Method / Transport and Storage of Hydrocarbons IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V.154. P.012004. DOI:10.1088/1757-899X/154/1/012004

20. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—67.

21. Кулак С.М., Новиков В.Ф. Определение механических напряжений в стали методом магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 7. Т. 81. С. 56—59.

22. Кулак С.М., Новиков В.Ф. Контроль механических напряжений стальных конструкций и сооружений, испытывающих многоосные деформации // Контроль. Диагностика. 2016. № 5. С. 55—59.

23. Большаков В.Н., Горбаш В.Г., Оленович Т.В. Влияние механических напряжений на локальную остаточную намагниченность // Известия АН БССР. Серия: Физ. Тех. Наук. 1980. № 1. С. 109—112.

24. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. Москва—Ленинград: ГИТТЛ, 1948. 816 с.
25. *Устинов Ю.Ф., Семькин В.Н., Калинин Ю.И., Ульянов А.В.* Магнитоупругий метод контроля металлических конструкций землеройно-транспортных и грузоподъемных машин // *Механизация строительства*. 2009. № 4. С. 7—11.
26. *Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С., Кулак С.М., Муратов К.Р.* Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2009. 200 с.
27. *Новиков В.Ф., Сорокина С.В., Муратов К.Р., Устинов В.П.* Учет временной стабильности остаточной намагниченности при диагностике механических напряжений магнитоупругим размагничиванием // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. № 4. С. 44—47.
28. *Novikov V.F., Kulak S.M., Parakhin A.S.* Testing Uniaxial Stresses in Steels with Allowance for Their Magnetoelastic Sensitivity // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 4. P. 310—319. [*Новиков В.Ф., Кулак С.М., Парахин А.С.* Контроль одноосных напряжений в сталях с учетом их магнитоупругой чувствительности // *Дефектоскопия*. 2021. № 4. С. 42—50.]
29. Способ контроля механических напряжений в стальных конструкциях магнитоупругим методом / Пат. 2764001 РФ №2021112651; заявл.29.04.2021; опубл. 12.01.2022. Бюл. № 2.
30. *Новиков В.Ф., Кулак С.М., Андреев В.О.* О контроле напряженно-деформированного состояния стальных мостовых конструкций (мост) методом магнитоупругого размагничивания // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2020. № 4. С. 3—7.
31. *Сандомирский С.Г.* Условия повышения достоверности двухпараметрового косвенного измерения свойств сталей по сравнению с однопараметровым / В сб. *Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов*. Сб. ст. 7-й Международной научно-технической конференции. Могилев, 2020. С. 170—176.

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕОРАДАРМ ДЛЯ ТОЧНОЙ ОЦЕНКИ ДИАМЕТРА ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

© 2022 г. Рим Гоззи<sup>1,2,\*</sup>, Самер Лахвар<sup>1,3</sup>, Чокри Суани<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Университет Монастира, Окружающая среда авеню, 5000 Монастир, Тунис

<sup>2</sup> Университет Суса, Технопарк Новейшин-Сити Суса, 4023 Сус, Тунис

<sup>3</sup> Центр исследований микроразнообразия и нанотехнологий,  
ЦИМН, Технопарк Новейшин-Сити Суса, 4054 Сус, Тунис

<sup>4</sup> Высший институт прикладных наук и технологий Суса, 4003 Сус, Тунис

\*Email: ghozzi.rym@gmail.com

Поступила в редакцию 06.12.2021; после доработки 07.01.2022

Принята к публикации 14.01.2022

Подповерхностная радиолокационная станция (РЛС) — это система дистанционного зондирования, способная обнаруживать и определять местонахождение подземных коммуникаций неразрушающим способом. Однако оценка диаметра этих инженерных коммуникаций по исходным РЛС-изображениям остается проблематичной. Точное измерение не может быть произведено непосредственно из результатов данных РЛС-сканирования. В данной статье проводится анализ РЛС-сканов для измерения диаметра в однородной среде подземных коммуникаций. Анализ основан на геометрической и математической модели. Также исследуется неопределенность параметров модели, чтобы охарактеризовать различия между фактическими выходными значениями и выходными значениями модели. В этом анализе используются два фактора неопределенности: глубина и относительная диэлектрическая проницаемость. Данные РЛС-сканирования, использованные в анализе, были сгенерированы с помощью численного симулятора grgMax, в котором используется метод конечных разностей во временной области (КРВО). Также экспериментальные данные используются для оценки диаметра проложенных в грунте водопроводных труб. Эта статья улучшает оценку диаметра проложенных в грунте коммуникаций. Результаты моделирования подтверждают правильность используемой модели.

*Ключевые слова:* оценка диаметра цилиндрического объекта, подповерхностная радиолокационная система (РЛС), гиперболическое отражение, неразрушающий контроль (НК), анализ чувствительности (АЧ).

DOI: 10.31857/S0130308222030034

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Подповерхностная радиолокационная система (РЛС) — система, действие которой основано на отражении электромагнитных (ЭМ) волн. Такой система известна под многими названиями, включая подповерхностную радиолокацию, георадар и подповерхностную проникающую радиолокацию. С 1980-х годов подповерхностная РЛС все чаще используется в качестве средства для неразрушающего контроля (НК) при проведении геофизических [1, 2], археологических [3, 4], инженерных [5, 6] исследований.

В последние годы более широкое использование подповерхностных РЛС выявило задачу улучшения не только всей системы, но и методов, необходимых для обработки и правильной интерпретации РЛС-данных. Одной из задач РЛС-исследований является оценка диаметра таких заглубленных длинных цилиндрических объектов, как, например, трубы. Также важно знать параметры, которые будут иметь наибольшее влияние на ее правильную оценку. В этом смысле анализ чувствительности (АЧ) используется, чтобы проанализировать данный эффект [7]. В статье представлено исследование чувствительности двух моделей, которые можно использовать для оценки диаметра залегающего под землей цилиндра с помощью подповерхностной РЛС:

модель 1, которая представлена Ghozzi и др. в [8]. Она основана на использовании отличительных РЛС-признаков залегающего цилиндрического объекта, полученных при нескольких измерениях;

модель 2 представлена Zhang и др. в [9]. Она основана на форме определенных полуокружностей, образованных координатами трех точек, и геометрической связи между точечными отражателями на верхнем краю заглубленной трубы и местами расположения зондов.

РЛС-данные, использованные в этом анализе, были сгенерированы числовым симулятором grgMax, который использует метод конечных разностей во временной области (КРВО) для имитации РЛС-отражений. Также использовались полевые РЛС-данные, собранные с помощью георадарной системы GSSI SIR-3000.

Статья построена следующим образом. Описание моделей и процедуры анализа описаны в разделе 2. В разделе 3 представлены полученные результаты и их обсуждение, соответственно на основе численного моделирования и экспериментальных исследований. Наконец, выводы представлены в разделе 4.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

### 2.1. Описание модели

Подповерхностная РЛС — это устройство, способное передавать и принимать импульсные ЭМ-волны, что позволяет обнаруживать скрытые объекты или границы раздела сред. Схематическое изображение измерительной РЛС-системы показано на рис. 1а. Главным образом, работа системы заключается в излучении передающей антенной короткого ЭМ-импульса, а затем записи отраженных сигналов, создаваемых любой границей раздела, на которой имеется различие в диэлектрической проницаемости. Изменения диэлектрической проницаемости и электропроводности в значительной степени влияют на дифракцию электромагнитных волн, которые улавливаются приемной антенной [10]. РЛС-приемник измеряет и записывает амплитуду электрического поля (или напряженность поля, В/м) как функцию времени. Таким образом, записанный амплитудно-временной сигнал обычно называют А-сканом. Антенны обычно перемещаются по определенным направлениям, поэтому добавляется пространственная информация по оси  $X$ . Двустороннее распространение зависит от параметров диаграммы направленности антенны и параметров сканируемой среды. Отражения с наибольшей амплитудой ожидаются там, где поляризация электрического поля параллельна длинной оси объекта [6]. Записанный В-скан компоненты электрического поля  $E_z$  показан на рис. 1б. Нелинейная кривая, наблюдаемая на изображении (радарограмме), полученном с помощью РЛС, указывает на наличие в объекте цилиндрического отражателя.

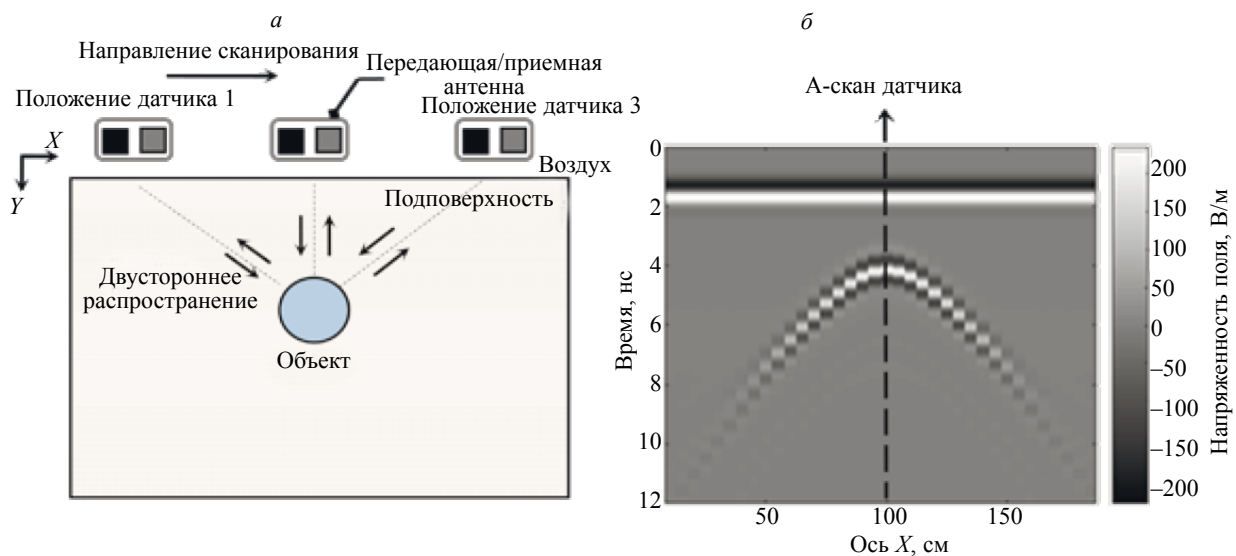


Рис. 1. Схема получения данных РЛС над залегающим цилиндрическим объектом (а); результирующие РЛС-данные геофизического исследования (В-скан) (б).

Распространение РЛС-волн в диэлектрической среде можно промоделировать с помощью программы *grMax*, разработанной Dr. Giannopoulos в 1996 г. Она основана на методе КРВО [11]. Новая улучшенная версия этого программного обеспечения была предложена Warren и др. [12]. Новая версия может выполнять 2D или 3D-моделирование распространения ЭМ-поля подповерхностной РЛС.

Основная цель этого раздела — представить два примера двухмерных моделей в *grMax*, содержащих несколько заглубленных цилиндрических объектов. Эти модели аналогичны моделям Ghazzi и др. [8] и Чжан и др. [9]. Был проведен эксперимент, в котором варьировались две переменные: глубина и относительная диэлектрическая проницаемость залегающего цилиндрического объекта.

На рис. 2 представлены строение моделей с использованием программы *ParaView*, а также радарограмма (В-Scan) в *MATLAB*. Первая модель содержит четыре заглубленных цилиндриче-



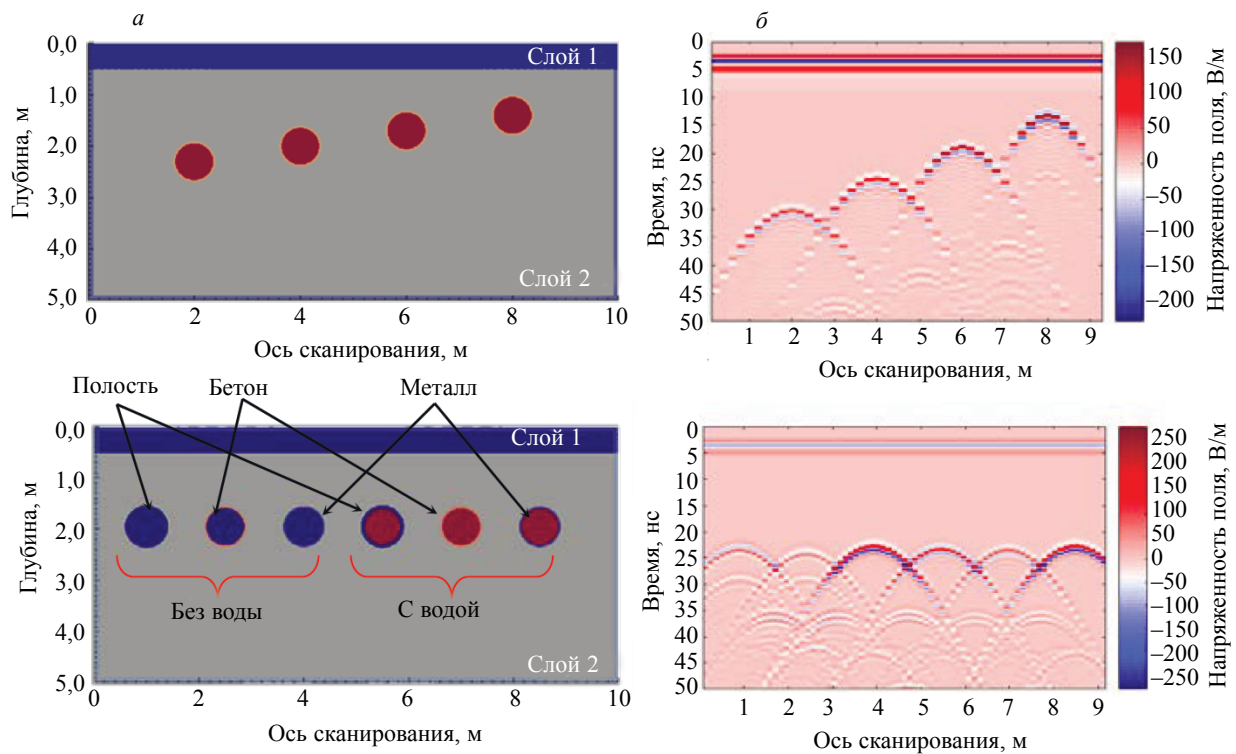


Рис. 2. 2D-модель и В-скан бетонных цилиндрических объектов, залегающих на разных глубинах и заполненных водой (а); 2D-модель и В-скан залегающих цилиндрических объектов из различных материалов [8, 9] (б).

ских объекта, заполненных водой и расположенных на разной глубине (рис. 2а). Модель состоит из двух слоев и имеет высоту 5 м и ширину 10 м. Передающая/приемная антенны расположены в первом слое (воздушном), имеющем толщину 0,5 м. Расстояние между двумя антеннами составляет 20 см, а зазор между антеннами и поверхностью земли составляет 2 см. Второй слой представляет собой слой глины с электропроводностью 0,01 мСм/м и относительной диэлектрической проницаемостью 8. Слой содержит четыре цилиндрических объекта, параллельных оси  $Y$ . Интервал времени для регистрации РЛС-данных был установлен на 50 нс, а количество записей было установлено на 46 (то есть В-скан содержит 46 А-сканов). Волна Рикера — это форма волны передающей антенны с амплитудой, равной единице, и центральной частотой 500 МГц. Волна Рикера (или мексиканская шляпа) представляет собой отрицательную нормализованную вторую производную формы волны Гаусса. Эта форма волны определяется уравнением [13]:

$$g(t) = -\left(2\xi(t-\chi)^2 - 1\right)e^{-\xi(t-\chi)^2}, \quad (1)$$

где  $\xi = \pi^2 f^2$ ,  $\chi = \frac{\sqrt{2}}{f}$  и  $f$  — частота.

Вторая модель содержит шесть заглубленных цилиндрических объектов из разных материалов: воздуха, бетона и металла. На рис. 2б показаны трубы; три первые трубы (полая, бетонная и металлическая) пусты, а три последние заполнены водой. На рисунке также показаны РЛС-сканы этих труб. Диаметры всех шести труб 0,8 м при толщине стенки 0,05 м и глубине 1 м. Количество записей установлено на 75, а все остальные характеристики аналогичны первой модели. В табл. 1 представлены описание 2D-модели и параметры антенны, использованные при моделировании в `gprMax`.

## 2.2. Процедура анализа

Основная процедура анализа влияния двух источников погрешности на чувствительность модели показана на рис. 3. В этом анализе используются два источника погрешности: глубина и относительная диэлектрическая проницаемость заглубленного цилиндрического объекта. Анализ

Таблица 1

## Описание параметров моделей

Ширина/высота модели		10 м/ 5 м		
Пространственная дискретизация $\Delta x = \Delta y$ , м		0.01		
$\Delta t$ , с		2.35e-11		
ЭМ-источник	Тип	Амплитуда	Частота (МГц)	
	Волна Рикера	1	500	
Материал	Глина	Бетон	Вода	
Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$	8	6	81	
Удельная электропроводность $\sigma$ , мСм/м	0,01	0	0,5	
Объект	Первая модель	Толщина, м	Материалы	Диаметр, м/Глубины, м
		0,05	Бетон, заполненный водой	0,8/1,4, 0,8/1,1, 0,8/0,8 и 0,8/0,5
	Вторая модель	0,05	Воздух, бетон, метал с водой/без воды	0,8/1

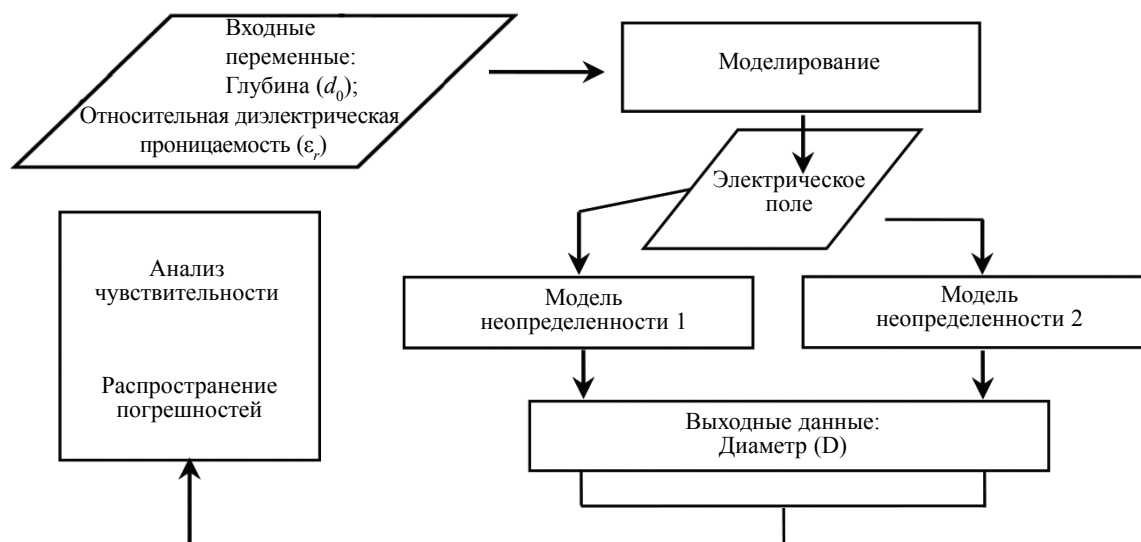


Рис. 3. Блок-схема исследования.

чувствительности используется для обнаружения источника, который оказывает наибольшее влияние на оценку диаметра цилиндра. В этой работе важно разработать эксперимент, который может выявить взаимосвязь между откликом и входными данными. Наиболее естественным способом планирования исследования является использование метода раздельного исследования факторов [14], который изменяет один фактор за раз, а остальные остаются неизменными, т.е. фиксированными.

По модели 1 диаметр можно определить с помощью нескольких расположений зондирования (А-сканов), полученных по радарограмме. Для оценки этого параметра были предприняты следующие шаги. Первоначально к отраженным сигналам применяется преобразование Гильберта [15], чтобы выделить огибающую сигнала. Далее были оценены времена прохождения первых двух максимальных пиков для каждой из полученных огибающих (используя функцию `findpeaks`

MATLAB в Signal Processing Toolbox). Затем пики использовались для оценки времени прохождения от точки измерения на поверхности земли до границы раздела грунт—труба на верхнем краю трубы. После этого, когда передающие/приемные антенны располагались непосредственно над трубой, регистрировались строки сканирования. Желаемое положение определялось путем определения абсциссы ( $x$ -координата  $x_0$ ) вершины нелинейной кривой, наблюдаемой на радарограмме. Различающиеся локальные максимумы кривой также были обнаружены функцией `findpeaks` MATLAB. Последний шаг состоял в применении теоремы Пифагора для получения математической модели гиперболы. Путем выбора восьми пиков, ближайших к вершине кривой, наконец, была проведена гиперболическая аппроксимация уравнения (2) [16] для оценки диаметра трубы. Аппроксимация выполнялась функцией аппроксимации кривой в MATLAB, в Curve Fitting Toolbox:

$$t = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{c} \left( -\frac{D}{2} + \sqrt{x^2 + \left(d_0 + \frac{D}{2}\right)^2} \right). \tag{2}$$

В модели 2 диаметр рассчитывался по форме определенных полуокружностей, заданных координатами трех точек и геометрической привязкой между точечными отражателями на верхней кромке заглубленной трубы и местами зондирования [9]. Время прохождения отраженной электромагнитной волны и скорость электромагнитной волны в подповерхностной среде использовались для оценки радиусов трех полуокружностей (уравнение (3)). Время прохождения — это время, за которое волна проходит от точки измерения на поверхности земли до границы раздела трубы с грунтом на верхней крышке трубы и обратно.

$$r_1, r_2, r_3 = v \cdot (t_1, t_2, t_3). \tag{3}$$

Для оценки диаметра использовались уравнения:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = \left(\frac{D}{2} + r_1\right)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = \left(\frac{D}{2} + r_2\right)^2, \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = \left(\frac{D}{2} + r_3\right)^2 \end{cases} \tag{4}$$

где  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  — координаты положений трех датчиков, а  $r_1, r_2, r_3$  — радиусы трех полуокружностей.

Рис. 4 иллюстрирует геометрическое описание двух моделей.

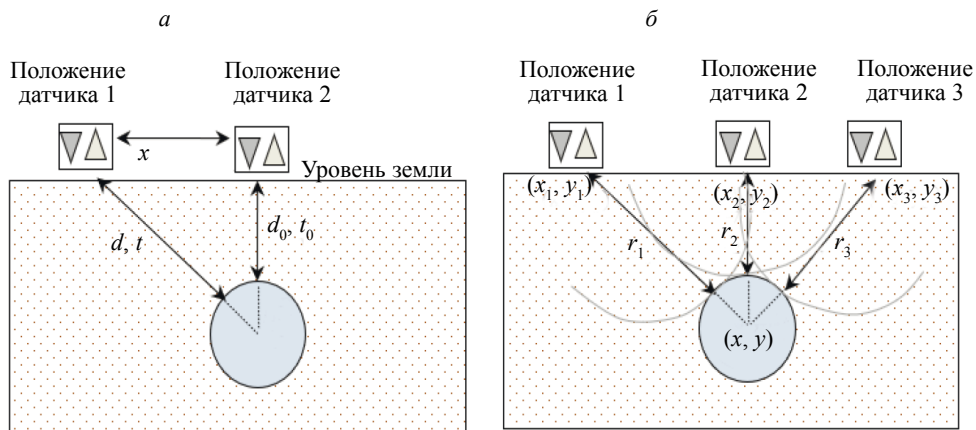


Рис. 4. Геометрия 2D-моделей для РЛС-измерений: модель 1 [8] (а), модель 2 [9] (б).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Численное моделирование

Результаты численного моделирования двух геометрических моделей, описанных в предыдущем разделе, показаны в табл. 2 и 3. Стоит отметить, что диаметр, рассчитываемый по модели 1, обладает меньшей средней абсолютной процентной ошибкой (МАПО) по сравнению с диаметром, рассчитываемым по модели 2. МАПО определяется по уравнениям:

$$\text{Относительная погрешность, \%} = \frac{|\text{Теоретический диаметр} - \text{Реальный диаметр}|}{\text{Реальный диаметр}} \times 100 \%, \quad (5)$$

$$\text{МАПО, \%} = \frac{1}{n} \sum_n \text{Относительная погрешность}. \quad (6)$$

Как можно видеть из табл. 2 и 3, модель 1 может оценивать диаметр залегающих цилиндров в однородной среде с МАПО 0,5 и 0,32 % для двух исследуемых объектов соответственно. С другой стороны, методика, предложенная по модели 2 Zhang и др. [9], может оценивать тот же параметр с МАПО 2,56 и 11,17 %.

Таблица 2

Относительная погрешность оценки диаметра для подземных цилиндров на различных глубинах

Глубина залегания, м	Реальный диаметр, см	Теоретический диаметр, см		Относительная ошибка, %	
		Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 1
1,4	80	83	80,6	3,75	0,75
1,1	80	82,4	80,8	3,00	1,00
0,8	80	81,6	80,2	2,00	0,25
0,5	80	81,2	80,0	1,50	0,00
				МАПО, %	0,50

Таблица 3

Относительная погрешность оценки диаметра для различных материалов цилиндров

	Реальный диаметр, см	Теоретический диаметр, см		Относительная погрешность, %	
		Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 1
Полость без воды	80	100,8	79,4	26	0,8
Бетон без воды	80	85,4	79,8	6,8	0,3
Металл без воды	80	80,2	80,0	0,3	0,0
Полость с водой	80	103,8	79,8	29,8	0,3
Бетон с водой	80	77	79,6	3,8	0,5
Металл с водой	80	80,2	80,0	0,3	0,0
				МАПО (%)	11,17
					0,32

На рис. 5 показаны результаты АЧ для различных параметров. Параметр, оказывающий наибольшее влияние на результаты моделирования, указан вверху. Результаты анализа иллюстрируют взаимосвязь параметров (глубина и материал объекта) с относительной погрешностью. В этой

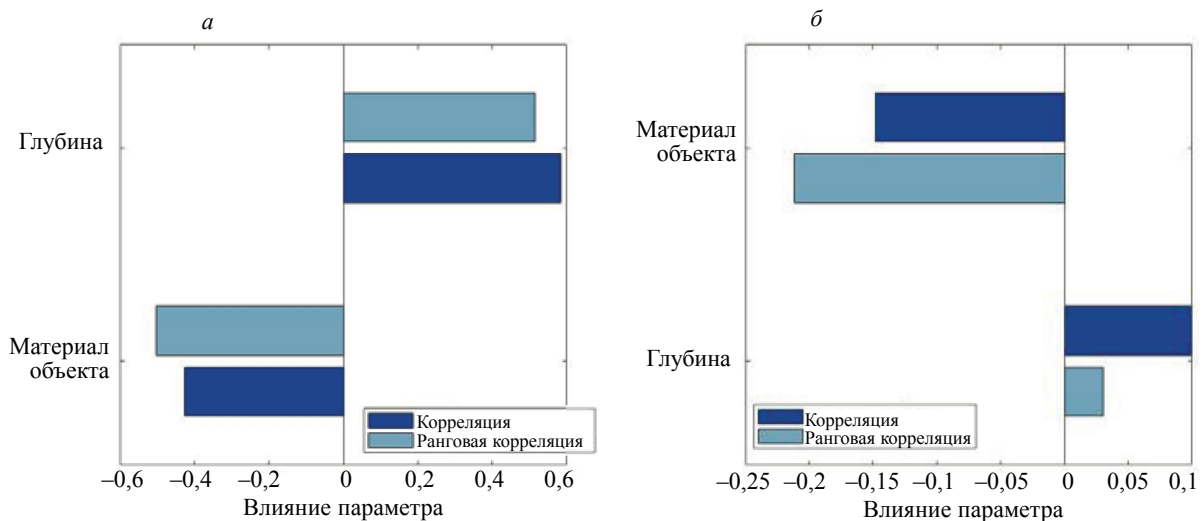


Рис. 5. Результаты анализа чувствительности для двух источников погрешности: модель 1 (а), модель 2 (б).

работе использовались две разные корреляции: корреляция Пирсона и ранговая корреляция Спирмена. Корреляция Пирсона предоставляет подробную информацию о линейной зависимости между двумя рядами данных. Корреляция Спирмена (ранговая корреляция) показывает подробную информацию о взаимосвязи между ранговыми значениями двух рядов данных. Уравнение коэффициента корреляции Пирсона ( $R$ ) показано ниже [17]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right]}}, \quad (7)$$

где  $n$  — количество значений переменных,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние величины  $x$  и  $y$ ,  $x_i$  и  $y_i$  — значения переменных  $x$  и  $y$  с номером  $i$  соответственно. Коэффициент корреляции Спирмена определяется как [17]

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (8)$$

где  $d_i$  — разность между рангами  $x$  и  $y$ .

Предыдущие результаты показывают, что наибольшее влияние на результаты для модели 1 оказывает глубина. Однако для модели 2 наибольшее влияние оказывает материал объекта. Корреляция и ранговая корреляция глубины по модели 1 равны 0,58 и 0,51 соответственно. Относительно модели 2 корреляция и ранговая корреляция материала объекта равны -0,14 и -0,21 соответственно. Следует отметить, что использование модели 1 дает лучшие результаты, чем использование модели 2.

### 3.2. Экспериментальное исследование

Экспериментальное подтверждение проводилось в Сусе, расположенном в 140 км к югу от столицы Туниса (рис. 6). Исследуемый участок содержит заполненную водой бетонную трубу с внешним диаметром 0,6 м, толщиной 0,06 м, относительной диэлектрической проницаемостью окружающей среды, равной 2,9, и глубиной залегания 0,7 м. На рис. 6 показана исследуемая территория и карта инженерных коммуникаций. С использованием картографических данных коммунальных служб сбор РЛС-данных проводился в направлении, перпендикулярном трубе.

Подповерхностная РЛС, используемая в работе, представляла собой модель SIR-3000 производства Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI). В этой РЛС используется антенна с частотой

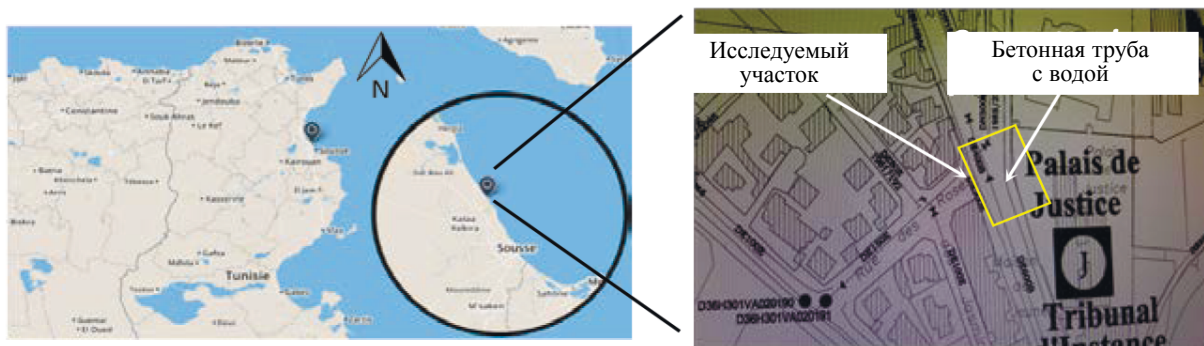


Рис. 6. Исследуемый участок и карта инженерных коммуникаций.

Таблица 4

#### Параметры сбора данных георадаром

Количество строк	480
Шаг между строками, м	0,02
Длина участка, м	9,58
Измерения в строке	512
Интервал измерения, нс	0,184
Интервал времени, нс	94

400 МГц. Параметры сбора РЛС-данных, использованные во время съемки, приведены в табл. 4. Для открытия и отображения файлов георадара, которые были в стандартном файловом формате GSSI (.DZT), использовался бесплатный пакет MATLAB matGPR [18].

На рис. 7 показаны пики, обнаруженные на реальных РЛС-изображениях (5 В-сканов) с использованием алгоритма обнаружения для модели 1. Для выбора наилучшего В-скана с целью оценки диаметра была рассчитана глубина по строке, снятой, когда подповерхностная РЛС находилась прямо над трубой. Таким образом, время прохождения было определено путем расчета разницы между временами обнаруженных пиков, как описано в разделе 2.

Определение параметров измерения времени прохождения оценивается путем вычисления относительной ошибки (как показано в табл. 5).

Таблица 5

#### Оценка относительной погрешности определения глубины

	Реальная глубина, м	Расчетное время прохождения, нс	Расчетная глубина, м	Относительная погрешность, %
В-скан 1	0,7	6,8	0,6	14,28
В-скан 2	0,7	9,74	0,86	22,86
В-скан 3	0,7	9,57	0,84	20
В-скан 4	0,7	8,28	0,73	4,28
В-скан 5	0,7	7,91	0,71	1,42

Результаты показывают, что В-скан 5 имеет минимальную относительную погрешность, равную 1,42 %. К выделенным точкам на В-скане 5 применяется процедура аппроксимации для оценки диаметра. В табл. 6 приведены различия между измеренными и фактическими значениями диаметра трубы.

Результаты оценки диаметра

Глубина залегания, м	Теоретический диаметр, м	Фактический диаметр, м	Относительная погрешность, %
0,7	0,58	0,6	3,33

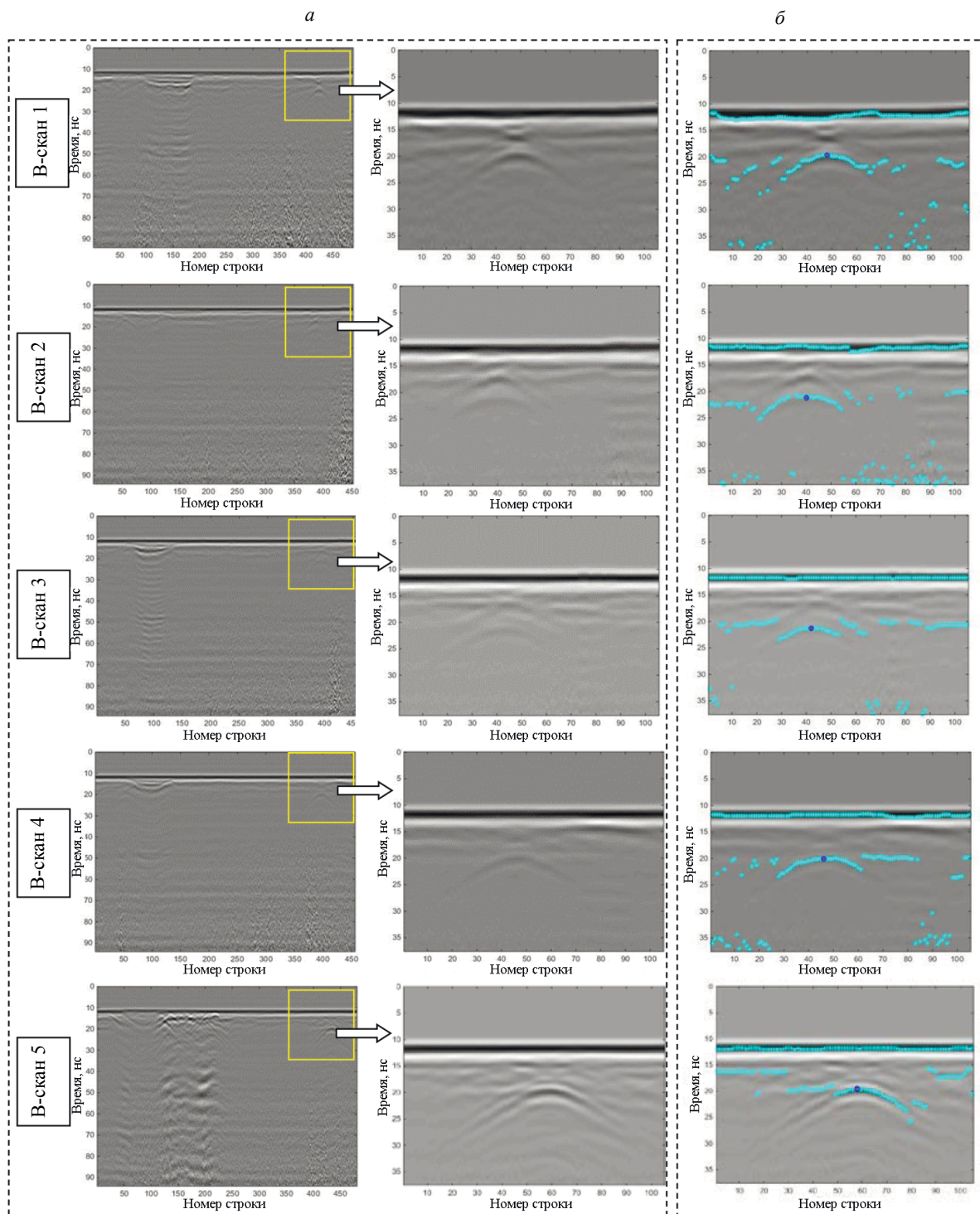


Рис. 7. Обнаружение пиков на реальных РЛС-изображениях: исходные РЛС-В-сканы (а), результаты обнаружения (б).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были проанализированы данные сканирования подповерхностной радиолокационной станции для улучшения неразрушающего контроля диаметра подземных коммуникаций в однофазной среде. Это исследование было основано на геометрической и математической модели с использованием координат нескольких точек измерения (модель 1). Погрешность модели также была проанализирована для описания различий между реальными выходными значениями и выходными значениями модели.

В данной работе используются два фактора погрешности: глубина и относительная диэлектрическая проницаемость. Данные георадарного сканирования собираются с помощью численного симулятора *gprMax* с двух моделей. Первая модель включает четыре закопанных цилиндрических объекта, наполненных водой и расположенных на разной глубине. Вторая модель содержит шесть заглубленных цилиндрических объектов из разных материалов: воздуха, бетона и металла. Также использовались экспериментальные данные и карта подземных коммуникаций в Тунисе. При численном моделировании результаты показывают, что диаметр оценивается со средней абсолютной погрешностью в процентах (МАПО) 0,5 и 0,32 % соответственно для двух протестированных моделей. Кроме того, это исследование показало, что наибольшее влияние на результаты оказывает глубина. Поэтому для экспериментальных исследований оценивается также и глубина, чтобы улучшить результат измерения диаметра.

В ходе дальнейших исследований будут проанализированы дополнительные параметры, включая относительную диэлектрическую проницаемость близлежащей среды и толщину подземных коммуникаций, для улучшения результата оценки диаметра.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы хотели бы выразить признательность двум национальным компаниям ОТС и SONEDE за предоставление радиолокационных данных и служебных карт, а также Mr. Graig Warren за его помощь в использовании программного обеспечения с открытым исходным кодом *gprMax*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alhumimidi M.S., Harbi H.M., Alfarhan M.S., Abdelrahman K., Aiken C.L.V.* Imaging fracture distributions of the Al-Khuff Formation outcrops using GPR and ERT geophysical techniques, Al-Qassim area, Saudi Arabia // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. V. 10. No. 14. P. 1—11. DOI: 10.1007/s12517-017-3059-0
2. *Gomez-Ortiz D., Montesinos F.G., Martin-Crespo T., Solla M., Arnosio J., Velez E.* Combination of geophysical prospecting techniques into areas of high protection value: Identification of shallow volcanic structures // *Journal of Applied Geophysics*. Oct. 2014. V. 109. P. 15—26. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.07.009
3. *Zhao W.K.* et al. Advances in GPR data acquisition and analysis for archaeology // *Geophysical Journal International*. Jul. 2015. V. 202. No. 1. P. 62—71. DOI: 10.1093/gji/ggv121
4. *Odah H., Ismail A., Elhemaly I., Anderson N., Abbas A.M., Shaaban F.* Archaeological exploration using magnetic and GPR methods at the first court of Hatshepsut Temple in Luxor, Egypt // *Arabian Journal of Geosciences*. 2013. V. 6. No. 3. P. 865—871. DOI: 10.1007/s12517-011-0380-x.
5. *Hai-kuan W., Zhi-le S., Chang-wu L., Yi-chen M., Bao-xian L.* Experimental Research on the Detection of Inner Defects of Bellows Based on Ground Penetrating Radar // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 6. P. 516—526. 2020. DOI: 10.1134/S1061830920060042
6. *Benedetto A., Pajewski L.* Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar / Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering ed. Italy, 2015. P. 373.
7. *Mahmoudi E., Hölter R., Georgieva R., König M., Schanz T.* On the global sensitivity analysis methods in geotechnical engineering: A comparative study on a rock salt energy storage // *International Journal of Civil Engineering*. 2019. V. 17. No. 1. P. 131—143. DOI: 10.1007/s40999-018-0302-3
8. *Ghozzi R., Lahouar S., Souani C.* An Innovative Technique for Estimating the Radius of Buried Cylindrical Targets Using GPR / In *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*: Springer. 2019. P. 151—154. DOI: 10.1007/978-3-030-01440-7\_35
9. *Zhang P., Guo X.X., Muhammad N., Wang X.D.* Research on probing and predicting the diameter of an underground pipeline by GPR during an operation period // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Sep. 2016. V. 58. P. 99—108. DOI: 10.1016/j.tust.2016.04.005
10. *Alsharahi G., Driouach A., Faize A., Khamlichi A.* Effect of electrical conductivity and dielectric constant on the performance of ground penetrating radar // *International Journal of Microwave and Optical Technology*. 2015. V. 10. No. 6. P. 458—463.
11. *Giannopoulos A.* Modelling ground penetrating radar by *GprMax* // *Construction and Building Materials*. Dec. 2005. V. 19. No. 10. P. 755—762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007



12. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. Dec. 2016. V. 209. P. 163—170. DOI: 10.1016/j.cpc.2016.08.020
13. Warren C., Giannopoulos A. gprMax User Guide Release 3.1. 1. 2017 / Available: www.gprmax.com.
14. Daniel C. One-at-a-time plans // Journal of the American statistical association. 1973. V. 68. No. 342. P. 353—360. DOI: 10.1080/01621459.1973.10482433
15. Benitez D., Gaydecki P.A., Zaidi A., Fitzpatrick A.P. The use of the Hilbert transform in ECG signal analysis // Computers in Biology and Medicine. Sep. 2001. V. 31. No. 5. P. 399—406. DOI: 10.1016/s0010-4825(01)00009-9
16. Ghozzi R., Lahouar S., Souani C. The estimation of buried empty cylindrical tubes characteristics using GPR / In 2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2018: IEEE. P. 1—6. DOI: 10.1109/ATSIP.2018.8364486
17. Weisburd D., Britt C. Measuring Association for Interval-Level Data: Pearson's Correlation Coefficient // Statistics in Criminal Justice. 2007. P. 381—420. DOI: 10.1007/978-1-4614-9170-5\_14
18. Tzanis A. matGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data. Ed.: FastTimes, 2010. V. 15. P. 17—43.

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

© 2022 г. А.И. Казьмин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Россия 394064 Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А  
E-mail: \*alek-kazmin@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2022; после доработки 14.02.2022

Принята к публикации 22.02.2022

Представлено формализованное описание методов поверхностных электромагнитных волн, применяемых для определения электрофизических и геометрических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой (многослойные и анизотропные материалы и покрытия, метаматериалы, материалы и покрытия с дефектами). Разработанные принципы использования в измерительных целях поверхностных электромагнитных волн позволяют в рамках единого методического подхода определять электрофизические и геометрические параметры любых типов плоскостойких материалов и покрытий со сложной внутренней структурой в едином цикле измерения, в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.). Разработанные подходы позволяют в зависимости от типа исследуемого материала или покрытия, набора подлежащих оценке электрофизических параметров и точности их определения выбирать требуемый набор физически измеряемых характеристик поля поверхностных электромагнитных волн, ширину полосы частот измерений и их количество. Экспериментальные исследования двухслойных и трехслойных диэлектрических покрытий показали, что при ширине полосы частот измерений 9—13 ГГц обеспечивается оценка диэлектрической проницаемости слоев не больше 6 % и толщин слоев не больше 5,5 % с достоверной вероятностью 0,95.

*Ключевые слова:* поверхностные электромагнитные волны, измерение, материалы и покрытия со сложной внутренней структурой, многослойные материалы и покрытия, электрофизические и геометрические параметры, операторное уравнение, дисперсионное уравнение, целевая функция.

DOI: 10.31857/S0130308222030046

### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические и магнитодиэлектрические материалы и покрытия (МП), предназначенные для работы в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), широко востребованы во многих наукоемких сферах, в том числе микроэлектронной, аэрокосмической, машиностроительной и др. В отдельное важнейшее самостоятельное направление, связанное с повышением обороноспособности государства, выделяются разработки перспективных типов радиопоглощающих покрытий, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности современных образцов вооружения, военной и специальной техники [1, 2].

В современных условиях качественного роста характеристик различных СВЧ-устройств требуется создание тонких, легких, широкополосных и устойчивых к внешним воздействиям МП. Большое значение имеет совершенствование их физико-химических характеристик, улучшение их стойкости, технологичности и др., что нашло отражение в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, в котором одним из приоритетных направлений развития является переход к новым материалам и способам конструирования» [3].

Исходя из этого, в настоящее время для достижения требуемых характеристик МП реализуются на основе перспективных материалов со сложной внутренней структурой, таких как многослойные и плавно неоднородные диэлектрические и магнитодиэлектрические структуры с диэлектрическими и магнитными потерями, метаматериалов и частотно-селективных поверхностей, материалов с высокими динамическими значениями магнитной проницаемостей, композиционных материалов с различными наполнителями (углеродные нанотрубки, проводящие сферические наночастицы, ферриты и др.) [4—13].

С точки зрения основного целевого назначения — работа в диапазоне СВЧ, эффективность МП со сложной внутренней структурой определяется их электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФП), к важнейшим из которых относятся комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости  $\epsilon$  и  $\mu$ , толщина МП  $t$ , а также стойкость к образованию различного рода дефектов.

Кроме того, основная специфика создания подобных МП заключается в том, что в процессе эксплуатации они будут находиться в различных, зачастую жестких, условиях применения, что приводит к изменению их ЭФГП и образованию различных дефектов.

С учетом этого, на первое место в ходе испытаний на эффективность МП выступает оценка ЭФГП МП с учетом воздействия на них основных внешних факторов (температура, вибрации, влага и др.), определяемых условиями эксплуатации и хранения МП в условиях приближенных к их реальному применению, т.е. с учетом размещения МП на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и т.д. [14].

Специфика определения ЭФГП МП состоит в том, что измерения необходимо проводить в радиоволновом диапазоне, входящем в рабочий диапазон МП, что обеспечивает максимальное приближение условий измерений к условиям применения МП на практике.

Радиоволновые методы измерения интегральных значений ЭФГП однослойных плоскостных МП в значительной степени отработаны. При этом определение ЭФГП МП, имеющих многослойную структуру с диэлектрическими и магнитными потерями, значительно сложнее. Кроме того, вопросы достоверного измерения ЭФГП МП на основе метаматериалов и материалов с анизотропией электрофизических параметров, с учетом размещения их на металлической подложке, практически не прорабатывались.

Между тем, несмотря на большое количество работ по данному направлению, следует отметить, что условия проведения измерений ЭФГП разнородных типов МП кардинально отличаются друг от друга и не соответствуют реальной практической ситуации использования МП, зачастую используются «разрушающие» методы измерений, подразумевающие размещение специально подготовленных образцов МП в волноводах, резонаторах или специальных измерительных ячейках.

В результате, в общем случае можно выделить следующие проблемы измерения ЭФГП основных типов МП радиоволновыми методами.

1. *Многослойные МП.* Для многослойных МП методы, использующие в качестве информативного параметра комплексный коэффициент отражения  $R$ , проработаны только для контроля материалов с малыми потерями. Для достижения приемлемой точности оценки ЭФГП слоев многослойного материала требуются измерения комплексного коэффициента отражения в широкой полосе частот ( $\Delta f = 5\text{—}6$  ГГц и более), при этом частотная дисперсия электрофизических параметров материала не учитывается, или рассматриваются материалы с малой частотной дисперсией, что не позволяет использовать данные методы для контроля реальных образцов МП на металлической подложке. Кроме того, данные методы обладают низкой локальностью контроля из-за использования апертурных антенн с размером раскрытия, превышающим рабочую длину волны [15—21].

2. *Метаматериалы.* С учетом размещения метаматериала на металлической подложке его эффективные параметры начинают меняться и могут возникать новые резонансы в частотных зависимостях комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Методы свободного пространства, основанные на одновременном измерении комплексных коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$  электромагнитных волн, фактически оказываются непригодными для контроля ЭФГП метаматериалов, нанесенных на металлическую подложку. Кроме того, из-за использования апертурных антенн данные методы фактически обеспечивают получение только эквивалентных значений измеряемых параметров всего исследуемого образца в целом и не обеспечивают локальный контроль ЭФГП [22—27].

3. *Анизотропные МП.* Одним из способов создания тонких, легких и устойчивых к внешним воздействиям МП, работающих в широкой полосе частот, является реализация их в виде неоднородных композиционных структур, которые состоят из полимерной основы (матрицы) и соответствующего наполнителя. Электрофизические параметры подобных материалов могут обладать значительной анизотропией. Электродинамические модели совместных измерений компонент тензоров комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей анизотропных МП проработаны недостаточно. Обычно в публикациях приводятся лишь упоминания о том, что можно учесть анизотропию, но конкретных подходов к измерению не приводится [28—31].

В [32—36] на основе выявленных фундаментальных закономерностей, связывающих ЭФГП слоистых МП со сложной внутренней структурой (многослойные МП, метаматериалы, анизотропные МП) с характеристиками поля поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ), развиты методы, обеспечивающие достоверный контроль их ЭФГП в процессе проектирования и испытаний на эффективность. Однако реализовать свойства современных МП возможно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении на реальный объект, что возможно за счет разработки общих методологических принципов оценки ЭФГП и параметров

дефектов МП в едином цикле измерения в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.).

Поэтому основной целью статьи является разработка на основе систематизированного формализованного описания разработанных методов поверхностных электромагнитных волн общих методологических принципов определения ЭФГП и оценки параметров дефектов различных типов МП со сложной внутренней структурой с заданными точностью и достоверностью.

### ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Основным информативным параметром ПЭМВ, используемым для проведения измерений ЭФГП и дефектоскопии, выступает поперечное волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ в свободном пространстве по нормали к поверхности МП — комплексный коэффициент ослабления (КО) поля ПЭМВ  $\dot{\alpha}(f_k, \xi_j) = \alpha'(f_k, \xi_j) - j\alpha''(f_k, \xi_j)$ , где  $\alpha'(f_k, \xi_j)$  — действительная часть КО ПЭМВ — коэффициент характеризующий экспоненциальное ослабление поля ПЭМВ по нормали к поверхности МП;  $\alpha''(f_k, \xi_j)$  — мнимая часть КО ПЭМВ — коэффициент характеризующий фазовый набег для ПЭМВ, распространяющейся по направлению к поверхности раздела «МП—свободное пространство»,  $\xi_j = \{\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$  — вектор, подлежащих оценке ЭФГП,  $\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N$  — комплексные диэлектрические проницаемости,  $\dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N$  — комплексные магнитные проницаемости,  $t_n, \dots, t_N$  — толщины МП [32—37]. В [32—38] доказано, что действительную часть КО  $\alpha'(f_k, \xi_j)$  можно определить по результатам косвенных измерений напряженности электрического поля ПЭМВ по нормали к поверхности МП в разнесенных точках измерений методом «зонда» [39, 40]:

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

где  $E_j$  и  $E_{j+1}$  — значения напряженности электрического поля ПЭМВ, измеренные по нормали к поверхности МП в точках измерений  $y$  и  $y + s$ ,  $s$  — расстояние между точками измерений,  $J$  — количество точек измерения.

В общем случае для определения ЭФГП МП требуется оценить КО в заданной полосе частот на сетке дискретных частот, т.е. получить частотную характеристику КО поля ПЭМВ  $\alpha'(f_k, \xi_j)$ ,  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Представим задачу оценки ЭФГП МП в формализованном виде.

Задача определения вектора ЭФГП и параметров дефектов  $\xi_j$  плоскостойких образцов МП со сложной внутренней структурой по измеренным характеристикам поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{эj}$  сводится к решению операторного уравнения первого рода:

$$\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_{эj}, \quad \xi_j \in \Xi_j, \quad \mathbf{r}_{эj} \in \mathbf{R}_j, \quad (2)$$

где  $\Xi_j$  — метрическое пространство векторов  $\xi_j$  для  $j$ -типа МП,  $\mathbf{R}_j$  — метрическое пространство характеристик поля ПЭМВ для  $j$ -типа МП;  $\Theta_j$  — нелинейный оператор для  $j$ -типа МП, осуществляющий преобразование множества значений вектора  $\xi_j$  в множество значений характеристик поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{эj}$ ;  $j$  в зависимости от типа МП может принимать значения, приведенные в табл. 1.

Решением операторного уравнения (2) на компакте  $\Xi_j^k$  из  $\Xi_j$  будет являться элемент  $\xi_{0j} \in \Xi_j^k$ , минимизирующий функционал (целевую функцию)  $\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj})$ :

$$\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \hat{\xi}_{0j}, \mathbf{r}_{эj}) = \arg \min_{\xi \in \Xi_j^k} \rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj}) + \gamma_{\text{рег}j}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_{эj}$  — полученные в эксперименте значения измеряемой характеристики поля ПЭМВ, то есть при наличии некоторой погрешности;  $\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj})$  — расстояние между  $\Theta_j \cdot \xi_j$  и  $\mathbf{r}_{эj}$  в метрическом пространстве  $\mathbf{R}_j$  возможных значений  $\mathbf{r}_{эj}$ ;  $\gamma_{\text{рег}j}$  — функция, регуляризирующая решение (2).

Область  $\Xi_j$  задания  $\xi_j$  определяется границами технически возможных параметров МП. Граничные значения области  $\mathbf{R}_j$  определяются максимальными значениями характеристик поля ПЭМВ.

Таким образом, для соответствующего типа МП ( $j = 1, \dots, 4$ ), с границами технически возможных параметров  $\xi_{j\min} \leq \xi_j \leq \xi_{j\max}$ , необходимо найти вид нелинейного оператора  $\Theta_j$  и целевой

функции  $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \hat{\xi}_{0j}, \mathbf{r}_{эj})$  операторного уравнения (2), обеспечивающих оценку неизвестных ЭФГП и параметров дефектов с заданными точностью и достоверностью при минимизации целевой функции, путем варьирования составляющими вектора  $\xi_j$ .

Таблица 1

Разработанные методы ПЭМВ для контроля ЭФГП МП

Тип МП	$\Theta_j \cdot \xi_j \leftarrow \boxed{\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_{эj}} \rightarrow \mathbf{r}_{эj}$
<p>Многослойные МП <math>j=1</math></p>	<p>где <math>\Theta_1 \cdot \xi_1</math>,</p> <p><math>\Theta_1</math> - оператор, описывающий модель ПЭМВ в многослойном МП;</p> <p><math>\xi_1 = \{\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N, \hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}</math> - вектор ЭФГП многослойного МП</p>
<p>МП на основе метаматериалов <math>j=2</math></p>	<p>где <math>\Theta_2 \cdot \xi_2</math>,</p> <p><math>\Theta_2</math> - оператор, описывающий модель ПЭМВ в метаматериале</p> <p><math>\xi_2 = \{\epsilon'(f_k), \epsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}</math> - вектор ЭФГП метаматериала, в соответствии с частотно-дисперсионными моделями Друде-Лоренца</p>
<p>МП с анизотропией комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей <math>j=3</math></p>	<p>где <math>\Theta_3 \cdot \xi_3</math>,</p> <p><math>\Theta_3</math> - оператор, описывающий модель ПЭМВ в МП с анизотропией ЭФГП</p> <p><math>\xi_3 = \{\hat{\epsilon}, \hat{\mu}, t\}</math> - вектор ЭФГП анизотропного МП,</p> $\hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_d & -j\mu_{нд} & 0 \\ j\mu_{нд} & \mu_d & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}, \quad \hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \hat{\epsilon}_{  x} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\epsilon}_{  y} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\epsilon}_{  z} \end{bmatrix}$
<p>МП с дефектами <math>j=4</math></p>	<p>где <math>\Theta_4 \cdot \xi_4</math>,</p> <p><math>\Theta_4</math> - оператор, описывающий модель ПЭМВ в МП с дефектами</p> <p><math>\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}</math> - вектор параметров дефектов МП,</p>

Для оценки качества многослойных МП ( $j = 1$ ) определяется вектор ЭФГП  $\xi_1 = \{\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N, \hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$ , где  $\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N$  и  $\hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N$  — комплексные диэлектрические и магнитные проницаемости слоев,  $t_n, \dots, t_N$  — толщины слоев МП. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{э1}$  выступает вектор-столбец ее комплексных коэффициентов ослабления (КО)  $\dot{A}_э$  или вектор-столбец действительной части комплексного КО  $A'$  (см. табл. 1) [32, 33].

Для МП на основе метаматериалов ( $j = 2$ ) оценивается вектор ЭФГП  $\xi_2 = \{\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}$ , где  $\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k)$  описываются частотно-дисперсионными моделями Друде—Лоренца [34]. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{3,2}$  выступает вектор-столбец ее комплексных КО  $\mathbf{A}_3$  и вектор-столбец резонансных значений действительной части комплексного КО  $\mathbf{A}_R$ , причем  $\mathbf{A}_R \subseteq \mathbf{A}_3$  (см. табл. 1) [34].

Для анизотропных МП ( $j = 3$ ) оценивается вектор ЭФГП  $\xi_3 = \{\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{\mu}}, t\}$ , где  $t$  — толщина материала;  $\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{\mu}}$  — тензоры комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые имеют следующий вид [35]:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{\parallel x} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{\parallel z} \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{\mu}} = \begin{bmatrix} \dot{\mu}_d & -j\mu_{нд} & 0 \\ j\mu_{нд} & \dot{\mu}_d & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{\parallel x} = \varepsilon'_{\parallel x} - j\varepsilon''_{\parallel x}$  и  $\dot{\varepsilon}_{\parallel z} = \varepsilon'_{\parallel z} - j\varepsilon''_{\parallel z}$  — тангенциальные составляющие тензора комплексной диэлектрической проницаемости (в плоскости покрытия);  $\dot{\varepsilon}_{\perp y} = \varepsilon'_{\perp y} - j\varepsilon''_{\perp y}$  — нормальная составляющая тензора комплексной диэлектрической проницаемости;  $\dot{\mu}_d$  — диагональная компонента тензора;  $\mu_{нд}$  — недиагональная компонента тензора;  $\mu_z$  — компонента тензора в направлении распространения поверхностной электромагнитной волны.

В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{3,3}$  выступает вектор-столбец комплексных КО  $\mathbf{A}_3$  и угловые зависимости действительной части комплексного КО  $\mathbf{A}_\theta$ , причем  $\mathbf{A}_\theta \cup \mathbf{A}_3$  (см. табл. 1) [35].

Для МП с дефектами ( $j = 4$ ) оценивается вектор параметров дефектов  $\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ . В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{3,4}$  выступает вектор-столбец комплексных КО  $\mathbf{A}_3$  [36, 37] и вектор-столбец дисперсий действительной части комплексного КО  $\mathbf{A}'_D$  (см. табл. 1) [38].

Нелинейные операторы  $\Theta_1, \dots, \Theta_4$  описывают распространение ПЭМВ в соответствующем типе МП и представляют собой дисперсионные уравнения, составленные на основе метода «поперечного резонанса» [32—37, 39].

В качестве примера использования разработанного формализованного описания рассмотрим подходы к оценке ЭФГП многослойных МП.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФГП МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

В соответствии с методологией формализованного описания (см. табл. 1) для определения ЭФГП многослойных МП с помощью ПЭМВ требуется разработать математическую модель определения частотной зависимости комплексного КО поля ПЭМВ многослойных МП в широкой полосе частот (нелинейный оператор  $\Theta_1$ ), целевую функцию для решения операторного уравнения (2)  $\rho_{R1}(\Theta_1 \cdot \xi_{01}, \mathbf{r}_{3,1})$  и функцию  $\gamma_1$ , регуляризирующую решение (2).

Геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФГП многослойных МП на металлической подложке с помощью ПЭМВ приведена на рис. 1.

*Математическая модель определения частотной зависимости комплексного КО.* Модель представляет собой обобщенное дисперсионное уравнение для ПЭМВ  $E$ - или  $H$ -типов в многослойных МП, позволяющее однозначно определять частотную зависимость комплексного коэффициента ослабления ПЭМВ  $\mathbf{A}_3 = [\alpha'_{31}(f, \xi_1) - j\alpha''_{31}(f, \xi_1), \dots, \alpha'_{3K}(f, \xi_1) - j\alpha''_{3K}(f, \xi_1)]^T$ ,  $k = 1, \dots, K$  при задании вектора ЭФГП  $\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$  и частоты  $f$ .

В качестве примера рассмотрим дисперсионное уравнение для ПЭМВ  $E$ -типа. В общем случае уравнение «поперечного резонанса» для составления дисперсионных уравнений для любых типов МП имеет следующий вид [32, 33, 41]:

$$\dot{Z}_b(y) + \dot{Z}_n(y) \text{ при } \forall y, \quad (5)$$

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

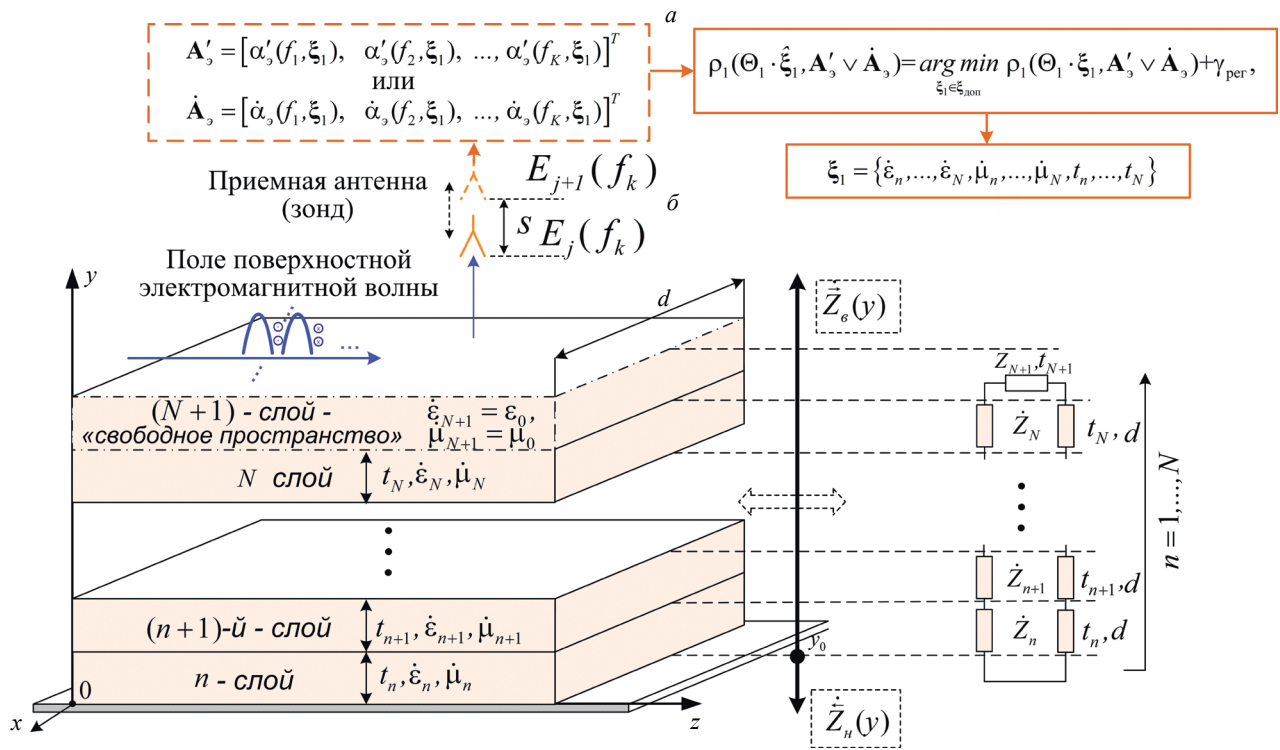


Рис. 1. Геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФП многослойных МП на металлической подложке с помощью ПЭМВ:  
 а — геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФП многослойных МП; б — эквивалентная схема многослойного МП на основе метода поперечного резонанса.

Толщина типичных многослойных МП на практике обычно намного больше поверхностного слоя в металле, исходя из этого принято, что  $\dot{Z}_n(y) \approx 0$ . Характеристическое сопротивление  $\dot{Z}_n(y)$  «вверх» относительно опорного сечения  $y_0$  представляет собой эквивалентное характеристическое сопротивление слоев  $n = 1, \dots, N + 1$  и определяется по рекуррентной формуле трансформации волновых сопротивлений [20, 32, 33]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}(n, n+1) = \dot{Z}_n \frac{\dot{Z}_{n+1} + j\dot{Z}_n \text{tg}(\dot{q}_n t_n)}{\dot{Z}_n + j\dot{Z}_{n+1} \text{tg}(\dot{q}_n t_n)}, \\ \dot{Z}(n, \dots, n+2) = \dot{Z}(n, n+1) \frac{\dot{Z}_{n+2} + j\dot{Z}(n, n+1) \text{tg}(\dot{q}_{n+1} t_{n+1})}{\dot{Z}(n, n+1) + j\dot{Z}_{n+2} \text{tg}(\dot{q}_{n+1} t_{n+1})}, \\ \dots \\ \dot{Z}(n, \dots, N) = \dot{Z}(n, \dots, N-1) \frac{\dot{Z}_N + j\dot{Z}(n, \dots, N-1) \text{tg}(\dot{q}_{N-1} t_{N-1})}{\dot{Z}(n, \dots, N-1) + j\dot{Z}_N \text{tg}(\dot{q}_{N-1} t_{N-1})}, \\ \dot{Z}(n, \dots, N+1) = \dot{Z}(n, \dots, N) \frac{\dot{Z}_{N+1} + j\dot{Z}(n, \dots, N) \text{tg}(\dot{q}_N t_N)}{\dot{Z}(n, \dots, N) + j\dot{Z}_{N+1} \text{tg}(\dot{q}_N t_N)}, \\ n = 1, \dots, N+1, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $\dot{Z}(n, n+1)$  — характеристическое сопротивление  $n$ -го слоя покрытия, нагруженного на характеристическое сопротивление  $n+1$ -слоя покрытия;  $\dot{Z}_{n+1}$  и  $\dot{Z}_n$  — характеристические сопротивления на границе раздела между  $N$ -слоем многослойного покрытия и свободным пространством и в слоях многослойного покрытия соответственно. Выражения для  $\dot{Z}_{n+1}$  и  $\dot{Z}_n$  имеют следующий вид [32, 33, 41]:

$$\dot{Z}_{N+1} = -j\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1) / (\omega\epsilon_0); \quad \dot{Z}_n = \dot{q}_n / (\omega\epsilon_0\epsilon_n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где  $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1)$  — теоретические комплексные КО ПЭМВ;  $\dot{q}_n$  — комплексное поперечное волновое число в  $n$ -слое покрытия,  $\dot{q}_n = \sqrt{k_n^2 - k_0^2 - \dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1) + \beta^2}$ ,  $n = 1, \dots, N$ , где  $k_0 = 2\pi f / c$  и  $k_n = 2\pi f \sqrt{\epsilon_n \mu_n} / c$  — волновое число свободного пространства и в  $n$ -слое покрытия соответственно,  $c$  — скорость ЭМВ в свободном пространстве,  $\beta = \pi d / d$  — волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ по ширине покрытия  $d$ ;  $j$  — мнимая единица.

Итоговое дисперсионное уравнение имеет следующий вид:

$$\Theta_1 \equiv D[\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1); f_k] \equiv \dot{Z}(n, \dots, N+1) = 0. \quad (8)$$

Полученное дисперсионное уравнение позволяет однозначно определять значения комплексных КО поля ПЭМВ  $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1)$  при задании составляющих вектора ЭФГП  $\xi_1 = \{\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$  и частоты  $f_k$ .

*Целевая функция и регуляризация решения.* В соответствии с [21, 32, 33], решение операторного уравнения (2) (см. табл. 1) и, соответственно, определение вектора ЭФГП  $\xi_1 = \{\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$  многослойных МП сводится к минимизации целевой функции, построенной как невязка между вектор-столбцом экспериментальных  $\mathbf{A}_s$  и вектор-столбцом вычисленных теоретических значений  $\mathbf{A}_T$  комплексных КО ПЭМВ, на наборе частот  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  в заданной полосе частот  $\Delta f = f_k - f_1$ :

$$\begin{aligned} \xi_1 = \arg \min_{\xi_1 \in \xi_{\text{доп}}} \rho(\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1, \mathbf{A}_s) &= \frac{1}{K} |\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_T|^2 + \varpi \left( \sum_{n=1}^N q_n^{\dot{\epsilon}} \|(\dot{\epsilon}_n - \dot{\epsilon}_{n0})\|^2 + \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^N q_n^{\dot{\mu}} \|(\dot{\mu}_n - \dot{\mu}_{n0})\|^2 + \sum_{n=1}^N q_n^t \|(t_n - t_{n0})\|^2 \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mathbf{A}_s$  и  $\mathbf{A}_T$  — вектор-столбцы со следующими компонентами:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_s &= [\alpha'_s(f_1) - j\alpha''(f_1, \varphi_\alpha), \alpha'_s(f_2) - j\alpha''(f_2, \varphi_\alpha), \dots, \alpha'_s(f_k) - j\alpha''(f_k, \varphi_\alpha)]^T, \\ \mathbf{A}_T &= [\alpha'_T(f_1, \xi_1), \alpha'_T(f_2, \xi_1), \dots, \alpha'_T(f_k, \xi_1)]^T, \end{aligned}$$

$\rho(\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1, \mathbf{A}_s)$  — расстояние в метрическом пространстве комплексных КО ПЭМВ между экспериментально полученными  $\mathbf{A}_s$  и вычисленными теоретическими значениями  $\mathbf{A}_T$  КО поля ПЭМВ в области допустимых значений  $\xi_1 \in \xi_{\text{доп}}$ ;  $q_n^{\dot{\epsilon}}$ ,  $q_n^{\dot{\mu}}$ ,  $q_n^t$  — веса, определяющие степень априорной информации о комплексных диэлектрических проницаемостях, комплексных магнитных проницаемостях и толщинах слоев МП;  $\dot{\epsilon}_n$ ,  $\dot{\mu}_n$ ,  $t_n$  — комплексные диэлектрические проницаемости, комплексные магнитные проницаемости и толщины слоев МП;  $\dot{\epsilon}_{n0}$ ,  $\dot{\mu}_{n0}$ ,  $t_{n0}$  — найденные с учетом априорной информации о составляющей среднее значение  $n$ -й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений  $\dot{\epsilon}_{n0} \in [\dot{\epsilon}_{n \min}, \dots, \dot{\epsilon}_{n \max}]$ ,  $\dot{\mu}_{n0} \in [\dot{\mu}_{n \min}, \dots, \dot{\mu}_{n \max}]$ ,  $t_{n0} \in [t_{n \min}, \dots, t_{n \max}]$ ;  $\varpi$  — параметр регуляризации.

В соответствии с [34—36], мнимые части  $\alpha''(f, \varphi_\alpha)$  экспериментальных комплексных КО учтены как дополнительный параметр при минимизации целевой функции (9) путем представления их в виде параметрической функции:  $\alpha''(f, \varphi_\alpha) = \sum_{i=0}^n a_{n-i}^r f^i$ , где  $a_{n-i}$  — параметры, которые представляют собой коэффициенты регрессии данной функциональной зависимости мнимой части КО;  $f$  — текущая частота измерения;  $\varphi_\alpha = \{a_{n-i}\}$ ,  $i = 0, \dots, n$  — вектор параметрических коэффициентов данной функциональной зависимости.

Фундаментальная особенность использования ПЭМВ заключается в том, что глобальный минимум целевой функции (9) довольно «острый» и расположенный в относительно узкой полосе оцениваемых ЭФГП. Выбором сред с конечным числом слоев и ограниченным диапазоном возможных значений их параметров выделяется компактный класс решений, обеспечивающий единственность решения обратной задачи при минимизации функционала (9). Регуляризация обратной задачи (9) сводится к выбору параметра регуляризации  $\varpi$  и весовых коэффициентов  $q_n^{\dot{\epsilon}}$ ,  $q_n^{\dot{\mu}}$ ,  $q_n^t$  [21, 32, 33].



Решение  $\hat{\xi}_1$ , обеспечивающее минимум целевой функции (7), зависит от параметра регуляризации  $\varpi$ . При больших  $\varpi$  основную роль играют критерии отбора решений, а при малых  $\varpi$  большое значение имеет близость вычисленного  $\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1$  к измеренному  $\dot{\alpha}_s(f_k, \xi_1)$ . Исходя из этого, для выбора  $\varpi$  использовался принцип невязки: выбиралось максимальное  $\varpi$ , при котором выполнялось условие:

$$\|\Theta_1 \cdot \xi_1 - \dot{\alpha}_s(f_k, \xi_1)\|^2 \leq \Delta^2. \quad (10)$$

Вследствие того, что обычно точное значение  $\Delta$  неизвестно, а имеется лишь оценка  $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ , задача (10) решалась для нескольких значений из указанного интервала (2—5 значений), а затем проводилось усреднение полученных решений.

*Выбор диапазона частот измерений и их количества.* На практике требуется оценка комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей многослойных материалов и покрытий в заданном частотном диапазоне (учет частотной дисперсии материалов). В результате, для исследуемого диапазона частот наибольшая погрешность оценки составляющих величин вектора  $\xi_1$  будет наблюдаться в том случае, если КО, соответствующие двум разным векторам  $\xi_1^1$  и  $\xi_1^2$ , имеют близкие значения на частотах  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . В этом случае становится труднее оценить различие между двумя близкими величинами  $\xi_1^1$  и  $\xi_1^2$ . Чтобы уменьшить эту неопределенность, количество частот и ширину полосы частот измерений необходимо выбирать такими, чтобы КО, соответствующие разным векторам  $\xi_1^1$  и  $\xi_1^2$ , максимально отличались друг от друга. Поэтому набор и количество частот, который обеспечивает максимальную точность оценки величины  $\xi_1$ , следует выбирать в соответствии со следующим правилом:

$$\langle F \rangle = \arg \max_f \{Y\}, \quad (11)$$

где

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\},$$

$$Y = \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1, r=1}^M |\dot{\alpha}_t(f_k, \xi_1^m) - \dot{\alpha}_t(f_k, \xi_1^r)|^2.$$

Для уменьшения погрешности измерений и оценки большего числа ЭФГП (для многослойных и анизотропных МП осуществляется адаптивное управление выбором набора частот и ширины полосы частот измерений в соответствии с (11)).

Подходы к оценке ЭФГП других типов МП, приведенных в табл. 1 ( $j = 2, 3, 4$ ), аналогичен.

Таким образом, разработаны методологические подходы к оценке ЭФГП МП со сложной внутренней структурой с помощью поверхностных электромагнитных волн, возбуждаемых непосредственно в исследуемых образцах. В общем случае определение ЭФГП подобных МП заключается в следующей последовательности действий.

1. Выбор информативных параметров поля ПЭМВ  $\mathbf{r}_{3j}$  (см. табл. 1).
2. Составление дисперсионного уравнения для ПЭМВ в соответствующем типе МП (нелинейный оператор  $\Theta_j$  (см. табл. 1)).
3. Выбор и составление целевой функции  $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{3j})$ , которая чаще всего является квадратичным функционалом, определяющим разность между экспериментальными и теоретическими характеристиками поля ПЭМВ.
4. Минимизация целевой функции  $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{3j})$ , в результате которой определяются неизвестные ЭФГП исследуемого МП.

## МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Измерительный комплекс (ИК) для реализации метода определения ЭФГП многослойных материалов и покрытий реализован в виде стенда на основе векторного анализатора электрических цепей (ВАЦ) «Панорама Р4226» (АО «НПФ «Микран»»), системы перемещения приемной антенны (измерительного зонда) с числовым программным управлением и осциллографа Keysight DSO9404A (Agilent Technologies).

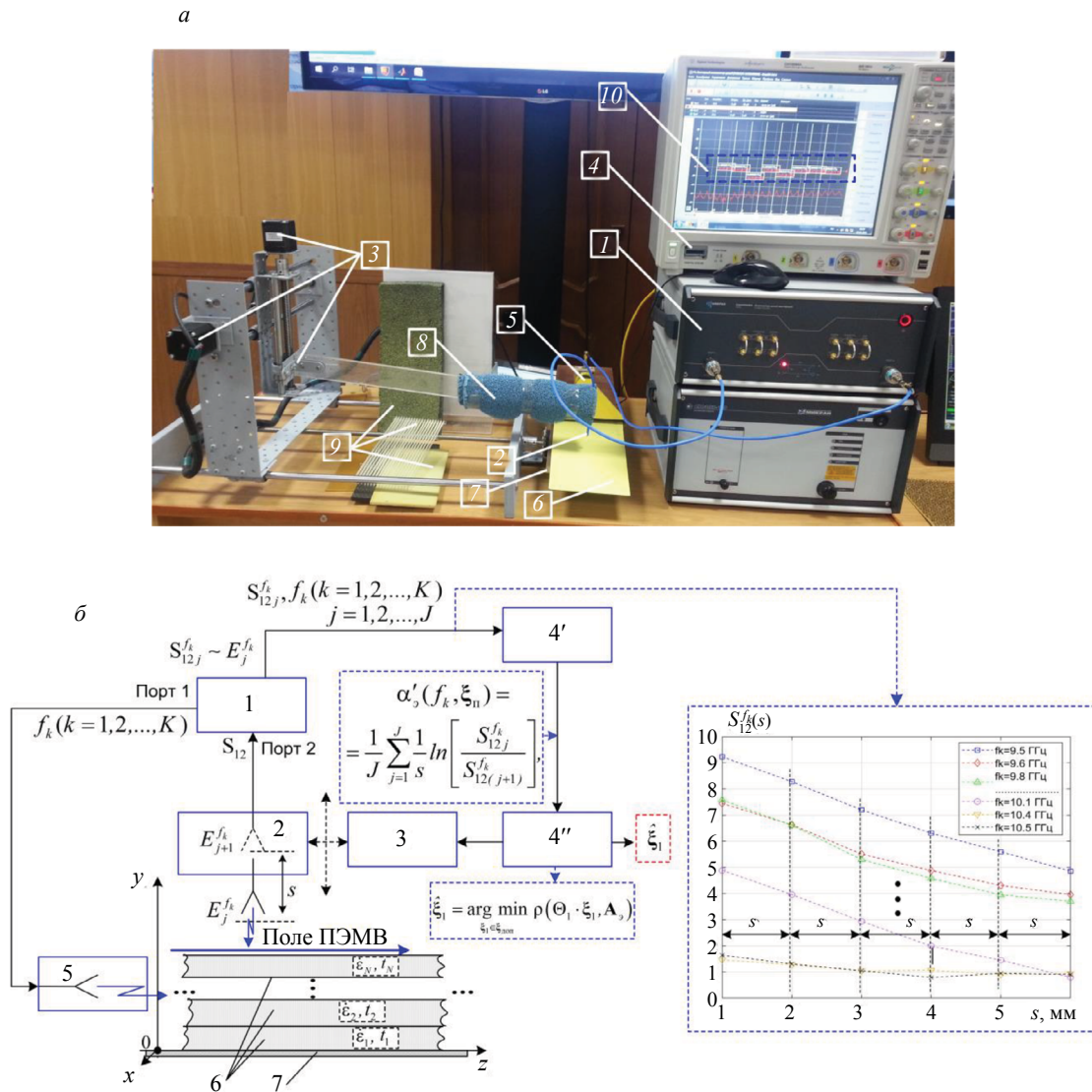


Рис. 2. Фотография (а) и структурная схема (б) ИК, реализующего метод определения ЭФГП многослойных материалов и покрытий.

На рис. 2а представлена фотография ИК, на рис. 2б — структурная схема и общая схема проведения эксперимента по оценке ЭФГП многослойных материалов и покрытий, где цифрами обозначено: 1 — векторный анализатор электрических цепей; 2 — приемная антенна с механизмом перемещения — 3; 4 — электронная вычислительная машина (осциллограф Keysight DSO9404A); 5 — антенна возбуждения ПЭМВ; 6 — исследуемый образец многослойного покрытия; 7 — металлическая подложка; 8 — радиопоглощающий материал для «экранировки» приемной антенны (измерительного зонда); 9 — набор исследуемых образцов материалов; 10 — вариант отображения частотной зависимости коэффициентов передачи  $S_{12}$  на осциллографе.

Использование ВАЦ позволило отказаться от отдельного генератора и блока детектирования, а также фактически осуществлять одновременное измерение значений КО поля ПЭМВ на всех заданных частотах ( $f_k, k = 1 \dots K$ ) в одном цикле измерения. Для этого первый порт ВАЦ подключен к антенне возбуждения ПЭМВ, а второй порт подключен к приемной антенне (измерительному зонду). С учетом использования для измерений ПЭМВ E-типа их возбуждение в исследуемых образцах осуществлялось с помощью H-секториальной рупорной антенны. Несмотря на то, что рупорная антенна, использованная при измерениях, создает сферический фронт волны и косинусоидальное распределение амплитуды поля поперек исследуемого образца, ошибками

измерений, вызванными несинфазностью фронта волны, можно пренебречь, поскольку они проводились на малом расстоянии от поверхности (2—2,5 мм) и с малым пространственным шагом. В качестве электронной вычислительной машины использовались аппаратные возможности осциллографа Keysight DSO9404A.

Общий алгоритм работы ИК следующий. Перед началом проведения измерений проводилась калибровка ВАЦ с помощью калибровочных мер и далее с помощью стандартных образцов материалов различной толщины калибровка ИК в целом. Для калибровки ИК использовали стандартные образцы полиметилметакрилата (ПММК) ( $\epsilon = 2,7 - j0,081$ ) различной толщины (соизмеримой с толщиной измеряемого многослойного образца).

Возбуждение ПЭМВ в исследуемом образце осуществляется с помощью передающей антенны 5, которая запитывается от первого порта ВАЦ. С помощью приемной антенны (измерительного зонда) и механизма ее перемещения осуществляется снятие зависимостей действительной части коэффициента передачи  $S_{12}$  от расстояния по нормали до поверхности исследуемого покрытия на частотах  $f_k$ ,  $k = 1 \dots K$  (см. рис. 2). Оценку КО поля ПЭМВ проводили по измеренным коэффициентам передачи  $S_{12}$ , которые пропорциональны значениям напряженности поля ПЭМВ, по формуле:

$$\alpha'(f_k, \xi_1) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{S_{12j}}{S_{12j+1}} \right], \quad (12)$$

где  $s$  — шаг между точками измерений;  $J$  — количество точек измерения (экспериментальные исследования показали, что для приемлемой точности оценок КО необходимо  $J = 4-5$  точек измерения над поверхностью).

В качестве образцов материалов для формирования многослойных покрытий для натуральных экспериментов использовались промышленные СВЧ-ламинаты из одной серии на основе фторопласта FR-4 с керамическим наполнителем, предназначенные для изготовления СВЧ-печатных плат: Rogers Ro3010 ( $\epsilon = 10,2 - j0,022$ ,  $t = 0,64$  мм), Rogers Ro3006 ( $\epsilon = 6,15 - j0,012$ ,  $t = 1,28$  мм), Rogers Ro3003 ( $\epsilon = 3 - j0,003$ ,  $t = 0,13$  мм) [8, 42]. Данные материалы в частотном диапазоне 8—15 ГГц обладают практически частотно-независимыми значениями комплексной диэлектрической проницаемости [42]. Размеры образцов 200×100 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера оценки параметров многослойных материалов и покрытий рассмотрим результаты экспериментальных исследований по оценке ЭФГП двух- и трехслойных СВЧ диэлектрических покрытий.

Для объективной оценки возможностей метода в определении ЭФГП исследованы наиболее сложные случаи, когда исследуемые покрытия являются контрастными по диэлектрической проницаемости и имеют различные толщины слоев. Кроме того, в состав покрытий включался слой с небольшой диэлектрической проницаемостью и электрической толщиной Rogers Ro3003 ( $\epsilon = 3 - j0,003$ ,  $t = 0,13$  мм).

Исходя из этого, для исследования двухслойных покрытий изготовлено два образца покрытий на основе Rogers Ro3010 и Rogers Ro3003: «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010».

В соответствии с методикой (8) для оценки параметров двухслойных покрытий приняли полосу частот измерений  $\Delta f = 9 - 12$  ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот  $K = 31$ ). Согласно (2.32) параметры регуляризации для целевой функции (2.33) при определении параметров двухслойного покрытия следующие:  $\varpi = 0,0018$ ,  $q_1^{\epsilon'} = 1,8$ ,  $q_1^{\epsilon''} = 1,8$ ,  $q_1^t = 1,7$ ,  $q_2^{\epsilon'} = 1,8$ ,  $q_2^{\epsilon''} = 1,8$ ,  $q_2^t = 1,7$ .

Перед началом проведения измерений проводили калибровку ИК на двухслойном покрытии из двух слоев стандартного образца ПММК равной толщины ( $t = 0,5$  мм). Частотные калибровочные зависимости КО ПЭМВ ПММК и профили диэлектрической проницаемости, полученные при решении обратной задачи (2) приведены на рис. 3.

Значения экспериментальных относительных погрешностей оценки ЭФГП проницаемостей каждого из двух одинаковых слоев соизмеримы между собой и составляют  $\delta_{\epsilon'} \approx 4,8\%$ ,  $\delta_{\epsilon''} \approx 5,5\%$ , а толщины — 4,5%. Таким образом, обеспечиваются объективные оценки ЭФГП слоев двухслойного диэлектрического покрытия.

Полученные экспериментальные частотные зависимости КО ПЭМВ покрытий «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010» приведены на рис. 4.

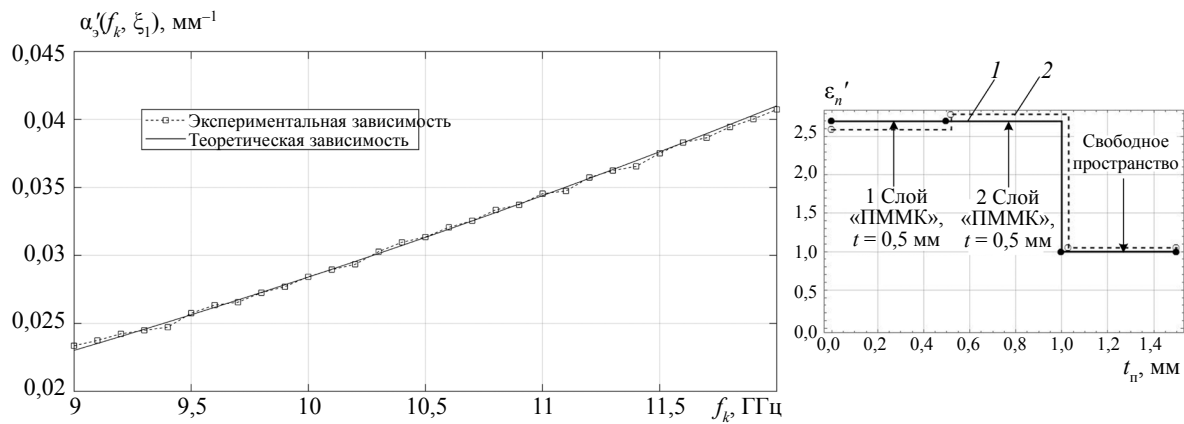


Рис. 3. Экспериментальные калибровочные частотные зависимости КО поля ПЭМВ  $\alpha_3(f_k, \xi_1)$  двухслойного покрытия на основе ПММК:

1 — точный профиль; 2 — измеренный профиль.

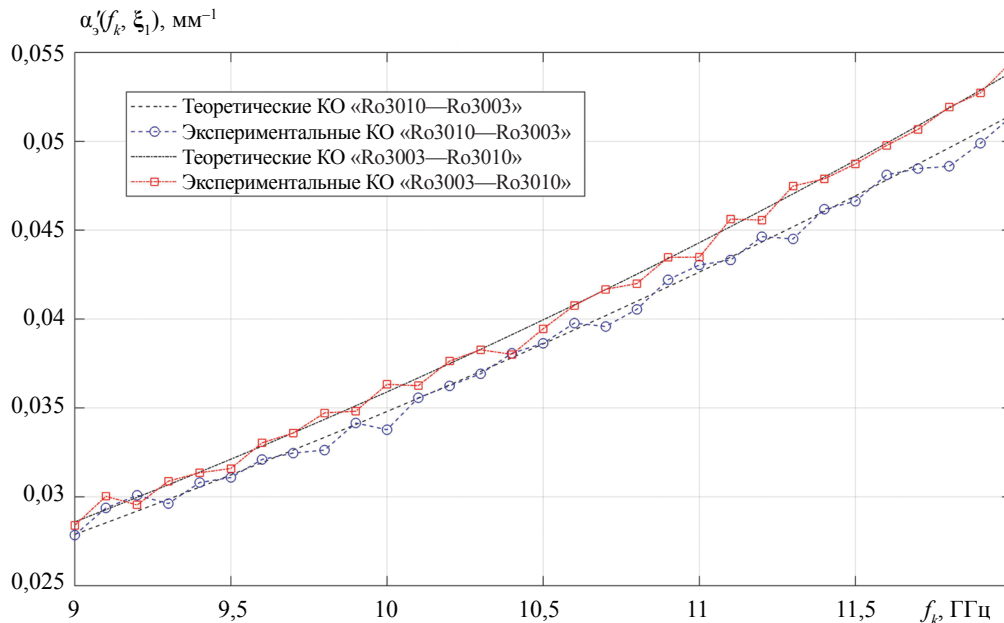


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ  $\alpha_3(f_k, \xi_1)$  двухслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010».

Указанные частотные зависимости для данных покрытий различаются, что позволяет надежно определять порядок сочетания слоев. Далее по ним решалась обратная задача (9). На рис. 5а и 5б показан точный профиль действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и полученный в результате решения обратной задачи (9) по экспериментальным данным с ИК.

Получены следующие экспериментальные относительные погрешности оценки комплексной диэлектрической проницаемости и толщин материалов Ro3010 и Ro3003 при их оценке в составе двухслойных покрытий с доверительной вероятностью 0,95:

покрытие «Ro3010—Ro3003»:  $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3010}} \approx 9,67 - j0,023$ ,  $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3003}} \approx 2,84 - j0,0032$  (средние относительные погрешности оценки  $\delta_{\epsilon'} \approx 5,2\%$ ,  $\delta_{\epsilon''} \approx 6,1\%$ );  $\hat{t}_{\text{Ro3010}} \approx 0,68$  мм,  $t_{\text{Ro3003}} \approx 0,138$  мм (средняя относительная погрешность оценки толщин слоев 5,2 %);

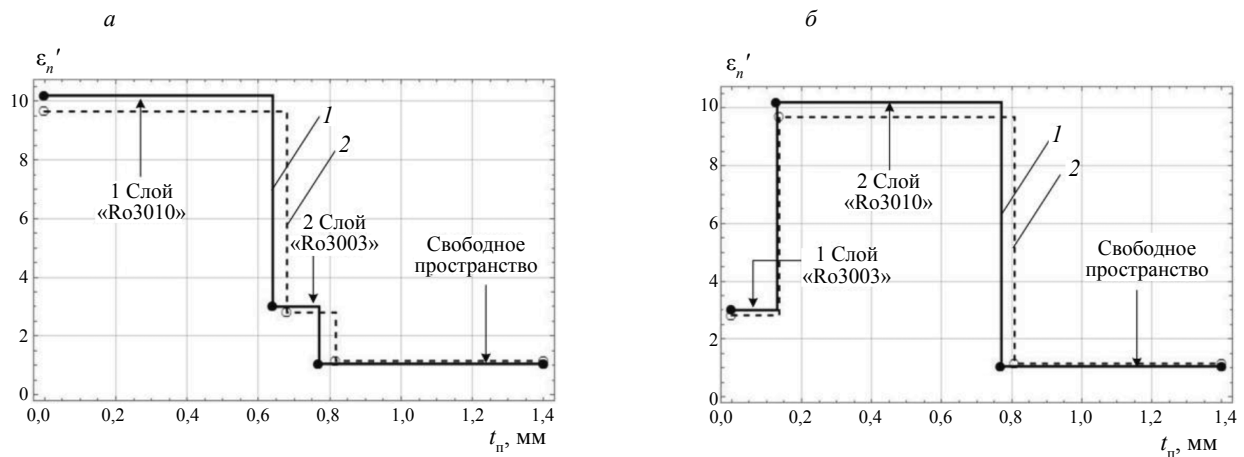


Рис. 5. Экспериментально полученные профили двухслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3003» (а) и «Ro3003—Ro3010» (б):  
1 — точный профиль; 2 — измеренный профиль.

покрытие «Ro3003—Ro3010»:  $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3003}} \approx 2,85 - j0,0031$ ,  $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3010}} \approx 9,8 - j0,022$  (средние относительные погрешности оценки  $\delta_{\epsilon'} \approx 5\%$ ,  $\delta_{\epsilon''} \approx 6\%$ );  $\hat{t}_{\text{Ro3003}} \approx 0,137$  мм,  $\hat{t}_{\text{Ro3010}} \approx 0,67$  мм (средняя относительная погрешность оценки толщин слоев 5%).

Таким образом, получено устойчивое решение обратной задачи (9). Экспериментальные относительные погрешности оценки ЭФГП слоев соизмеримы между собой, даже с учетом наличия слоя с небольшой электрической толщиной.

Для оценки возможностей метода в определении ЭФГП трехслойных покрытий сформировано четыре трехслойных диэлектрических покрытия с дополнительным слоем с небольшой электрической толщиной на основе Ro3003: «Ro3010—Ro3006—Ro3003», «Ro3010—Ro3003—Ro3006», «Ro3003—Ro3010—Ro3006» и «Ro3006—Ro3003—Ro3010».

Экспериментально установлено, что при оценке ЭФГП данных покрытий при тех же условиях что и для двухслойных ( $\Delta f = 9 - 12$  ГГц, шаг по частоте 0,1 ГГц (количество частот  $K = 31$ )), относительные погрешности оценки возрастают в среднем на 10—12%. В результате, для повышения точности оценок в соответствии с методикой (10), ширина полосы частот измерений и их количество были увеличены. В частности, ширина полосы частот измерений была принята равной  $\Delta f = 9 - 13$  ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот  $K = 41$ ). Параметры регуляризации для целевой функции (9) при определении параметров трехслойного покрытия следующие:  $\varpi = 0,0017$ ,  $q^{\epsilon'} = 1,7$ ,  $q^{\epsilon''} = 1,7$ ,  $q^t = 1,6$ .

Полученные экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ данных покрытий в логарифмическом масштабе приведены на рис. 6. Как и в случае двухслойных покрытий, указанные частотные зависимости для данных покрытий различаются, что позволяет определять порядок сочетания слоев. При этом следует отметить, что отличие частотных зависимостей КО покрытий при изменении положения слоя с небольшой электрической толщиной «Ro3003» незначительное. Это объясняет возрастание погрешностей при оценке ЭФГП трехслойного покрытия при тех же условиях, что и двухслойного. Далее по частотным зависимостям (см. рис. 6) решалась обратная задача (9).

На рис. 7 показаны точные профили действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и полученные в результате решения обратной задачи (9) по экспериментальным данным с ИК для каждого образца покрытия.

Анализ экспериментальных результатов для трехслойных диэлектрических покрытий показывает, что увеличение ширины полосы частот измерений и их количества обеспечивает получение устойчивых оценок ЭФГП слоев для всех исследуемых покрытий:  $\delta_{\epsilon'}$  не больше 6%,  $\delta_{\epsilon''}$  не больше 7% и толщин слоев не больше 5,5%, в том числе и для слоя с малой электрической толщиной «Ro3003»,  $t = 0,13$  мм. При этом полученные погрешности сопоставимы с погрешностями оценки ЭФГП двухслойных покрытий.

При оценке ЭФГП многослойных покрытий минимизация целевой функции (9) осуществлялась с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global

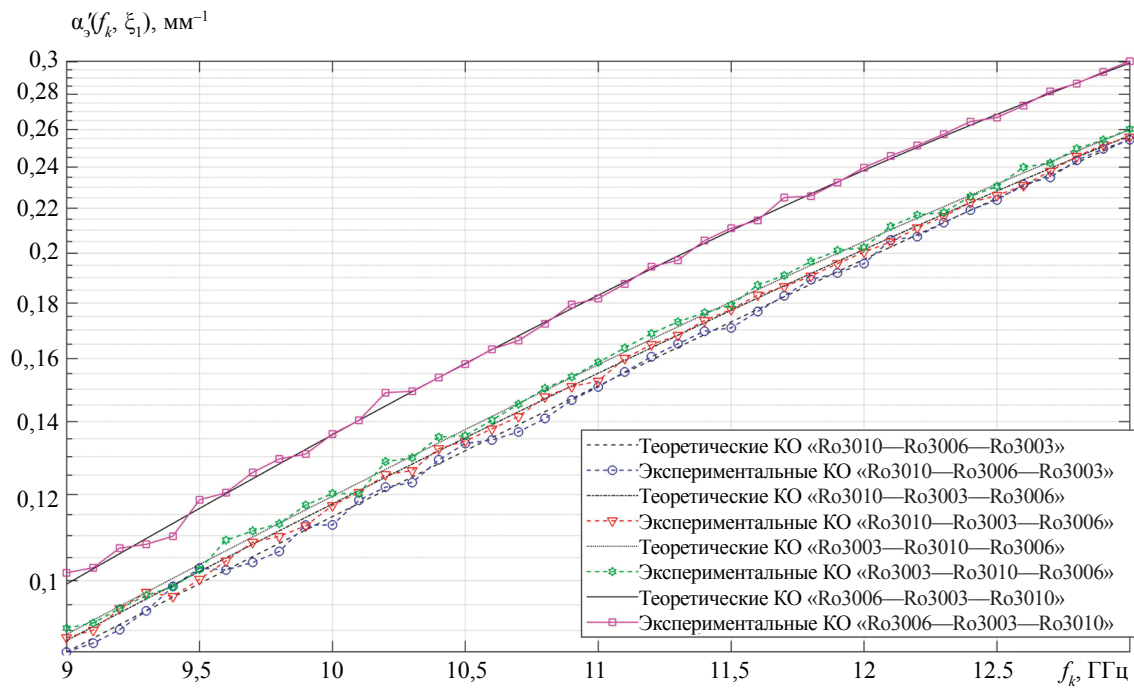


Рис. 6. Экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ  $\alpha_3(f_k, \xi_1)$  трехслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3006—Ro3003», «Ro3010—Ro3003—Ro3006», «Ro3003—Ro3010—Ro3006» и «Ro3006—Ro3003—Ro3010».

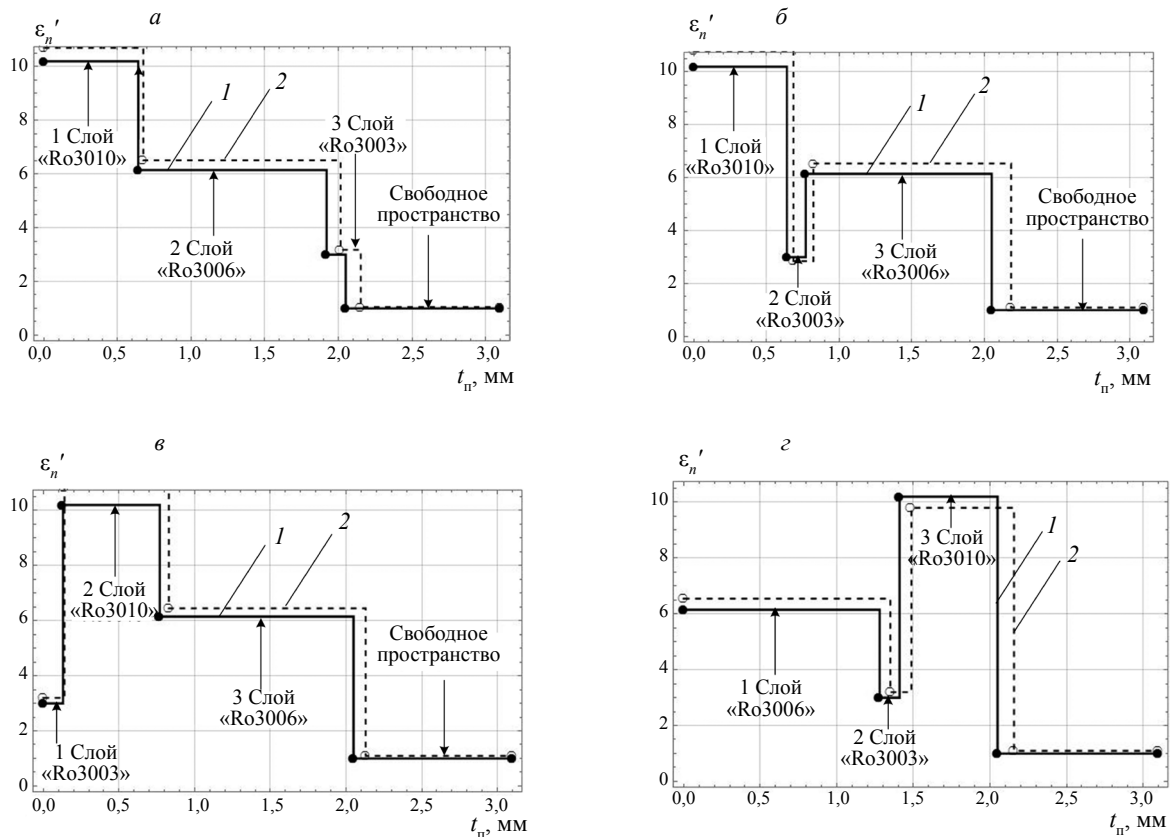


Рис. 7. Экспериментально полученные профили диэлектрической проницаемости трехслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3006—Ro3003» (а), «Ro3010—Ro3003—Ro3006» (б), «Ro3003—Ro3010—Ro3006» (в) и «Ro3006—Ro3003—Ro3010» (г):  
1 — точный профиль; 2 — экспериментальный профиль.

Search пакета Matlab. Проведенные исследования позволили оптимальным образом подобрать параметры генетического алгоритма, обеспечивающие гарантированное нахождение глобального минимума целевой функции (9). Для двухслойных покрытий (число неизвестных ЭФГП — 6) основные из них следующие: размер популяции 150000, вероятность скрещивания 90 %, вероятность мутации 10 %. Среднее время минимизации целевой функции (9) составляет не более 3–4 мин на компьютере с процессором типа intel core i5, с тактовой частотой 2,33 ГГц и 4 Гбайт оперативной памяти. Для трехслойных покрытий (число неизвестных ЭФГП 9) размер популяции был увеличен до 250000.

В случае, если число слоев  $N$  многослойного покрытия увеличивается ( $N = 3$  и более), в его составе имеются магнетодиэлектрические материалы ( $\mu' \neq 1$  и  $\mu'' \neq 0$ ), слои с анизотропией электрофизических параметров или слои на основе метаматериалов, будет соответствующим образом изменяться вид дисперсионного уравнения (8), а целевая функция (9) будет содержать большее число параметров минимизации, что влечет за собой увеличение полосы частот измерений и их количества, а также изменение параметров генетического алгоритма, в частности, размера популяции и увеличение времени оптимизации.

Более подробно вид целевых функций и дисперсионных уравнений для того или иного материала (см. табл. 1), а также оценка погрешностей измерений ЭФГП анизотропных покрытий, метаматериалов и величин отслоений покрытий от металлической подложки приведены в [32—38]. Приведем лишь основные конечные результаты.

Например, для анизотропных диэлектрических МП с толщиной и диэлектрической проницаемостью, соизмеримыми с исследованными в статье покрытиями на основе СВЧ-ламинатов при полосе частот измерений 9—13,5 ГГц, погрешности оценок коэффициентов анизотропии составляют не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 [35]. Для метаматериалов локальные значения их эффективных электрофизических параметров отличаются от расчетных не более, чем на 10 % [34]. Кроме того, численные и натурные эксперименты в [36] показали принципиальную возможность оценки значения регистрируемых величин отслоений диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий от металлической подложки 20 мкм и менее в полосе частот 9—13,5 ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе выявленных фундаментальных закономерностей, связывающих электрофизические и геометрические параметры плоскостойких МП со сложной структурой, в том числе параметров, которые присущи только определенным классам материалов (метаматериалы и анизотропные материалы), с характеристиками поля ПЭМВ, развиты методы, математические модели и методики, обеспечивающие в рамках единого методического подхода проведение измерения параметров любых типов слоистых МП со сложной структурой в едином цикле измерения, в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.).

Экспериментальные исследования двухслойных и трехслойных диэлектрических покрытий показали, что при ширине полосы частот измерений 9—13 ГГц обеспечиваются оценки действительных и мнимых частей слоев с относительной погрешностью не больше 6 и 7 % соответственно, а толщин слоев не больше 5,5 % с доверительной вероятностью 0,95.

Автор благодарит своего научного консультанта докторантуры доктора технических наук, профессора Федюнина Павла Александровича за помощь при написании статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н. и др. Актуальные задачи стелс-технологии [Электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 12.01.2022).
2. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779—787.
3. Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс] / офиц. сайт. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения: 12.01.2022).
4. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 2. С. 196—207.

5. *Lagarkov A.N., Matytsin S.M., Rozanov K.N., Sarychev A.K.* Dielectric properties of fiber-filled composites // *Journal of Applied Physics*. 1998. V. 84. No. 7. P. 3806—3814.
6. *Dankov Plamen I.* Experimental Characterization of Positive and Negative Dielectric Constants and Artificial Anisotropy of Meta-materials in the Microwave Range // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1598. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1598/1/012002
7. *Dankov Plamen I.* Dielectric Anisotropy of Modern Microwave Substrates, Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications / Edited by Igor Minin. IntechOpen. Published 01 March 2010. DOI: 10.5772/9061
8. *Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянов Е.* Фольгированные диэлектрики — как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов. Часть 1 // *Печатный монтаж*. 2013. № 2. С. 156—168.
9. *Михайлин Ю.А.* Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
10. *Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Сарычев А.К., Семененко В.Н.* Электрофизика и электродинамика метаматериалов // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. № 6. С. 1031—1048.
11. *Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Сарычев А.К., Семененко В.Н.* Электрофизика и электродинамика метаматериалов [Электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№1%20\(метаматериалы\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№1%20(метаматериалы).pdf) (дата обращения: 31.10.2020).
12. *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3—28.
13. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // *Первая миля*. 2010. № 3—4. С. 44—60.
14. *Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И., Лагарьков А.Н., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А.* Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // *Журнал радиоэлектроники*. 2016. № 7. С. 1—23.
15. *Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О.* О реализации метода квазирешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // *Дефектоскопия*. 1997. № 3. С. 39—53.
16. *Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О.* Экспериментальные исследования метода квазирешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // *Дефектоскопия*. 1997. № 4. С. 70—78.
17. *Антропов О.С., Дробахин О.О.* Повышение разрешающей способности метода фурье-преобразования коэффициента отражения путем экстраполяции спектра на основе принципа минимума длительности // *Дефектоскопия*. 2009. № 5. С. 72—80.
18. *Басков К.М., Политико А.А., Семененко 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. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/12/text.pdf>. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.12
19. *Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Baskov K.M.* Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // *Measurement Techniques*. 2019. V. 62. No. 2. P. 161—166.
20. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
21. *Гринев А.Ю., Темченко В.С., Багно Д.В.* Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.
22. *Симовский К.Р.* О материальных параметрах метаматериалов (обзор) // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. № 5. С. 766—793.
23. *Smith D.R., Schultz S., Markos P., Soukoulis C.M.* Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients // *Physical Review B*. V. 65. P. 195104. Published 19 April 2002. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.195104>
24. *Smith D.R., Vier D.C., Koschny Th., Soukoulis C.M.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials // *Physical Review E*. V. 71. P. 036617. Published 22 March 2005. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036617>
25. *Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.* Experimental Verification of a Negative Index of Refraction // *Science*. Apr 2001. V. 292. Is. 5514. P. 77—79. DOI: 10.1126/science.1058847
26. *Smith David R., Gollub Jonah, Mock Jack J., Padilla Willie J., Schuring David.* Calculation and measurement of bianisotropy in a split ring resonator metamaterial // *Journal of Applied Physics*. 2006. V. 100. P. 024507. <https://doi.org/10.1063/1.2218033>
27. *Ran L., Huangfu J., Chen H., Zhang X., Chen K., Grzegorzczak T., Kong J.* Experimental Study on Several Left-Handed Matamaterials // *Progress In Electromagnetics Research*. 2005. V. 51. P. 249—279. DOI: 10.2528/PIER04040502
28. *Hyde IV M.W., Havrilla M.J., Bogle A.E.* Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Jan. 2016. V. 64. No. 1. P. 239—246. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2502242
29. *Crowgey B.R., Crowgey Benjamin R., Tuncer Ozgur, Tang Junyan, Rothwell Edward J., Shanker B., Kempel Leo C., Havrilla Michael J.* Characterization of Biaxial Anisotropic Material Using a Reduced Aperture



Waveguide // Transactions on Instrumentation and Measurement. Oct. 2013. V. 62. No. 10. P. 2739—2750. DOI: 10.1109/TIM.2013.2259752

30. *Boybay M.S., Ramahi O.M.* Open-Ended Coaxial Line Probes With Negative Permittivity Materials // Transactions on Antennas and Propagation. May 2011. V. 59. No. 5. P. 1765—1769. DOI: 10.1109/TAP.2011.2123056

31. *Li Zhen, Haigh Arthur, Soutis Constantinos, Gibson Andrew, Sloan Robin.* A Simulation-Assisted Non-destructive Approach for Permittivity Measurement Using an Open-Ended Microwave Waveguide // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. No. 37, 39. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>

32. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Evaluating the Accuracy of Reconstruction of the Electrical and Geometric Parameters of Multilayer Dielectric Coatings by a Multifrequency Radio-Wave Method for Slow Surface Electromagnetic Waves // Measurement Techniques. November 2020. V. 63. No. 8. P. 645—652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01834-9> [*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].

33. *Chernyshov V., Kaz'min A., Fedyunin P.* Testing Electrophysical Parameters of Multilayer Dielectric and Magnetodielectric Coatings by the Method of Surface Electromagnetic Waves // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021. P. 372—377. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632211.

34. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Testing Electrophysical Parameters of Metamaterials by the Method of Surface Electromagnetic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 320—336. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830921040070> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 51—67].

35. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Fedyunin D.P.* Evaluation of Permittivity and Thickness Gaging for Anisotropic Dielectric Coatings by the Method of Surface Electromagnetic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 500—516. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830921060085> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А., Федюнин Д.П.* Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 57—72].

36. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Estimating the Extent of Exfoliation of Dielectric and Magnetodielectric Coatings with Surface Microwaves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 9. P. 727—741. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830920090053> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Оценка степени отслоения диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий с использованием поверхностных электромагнитных волн СВЧ диапазона // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 50—63].

37. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль дефектов в многослойных диэлектрических материалах СВЧ-методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 2. С. 37—43.

38. *Федюнин П.А., Казьмин А.И., Кирьянов О.Е.* Алгоритмы контроля и оценки неоднородностей в радиопоглощающих покрытиях // Контроль. Диагностика. 2010. № 7 (145). С. 60—65.

39. *Уолтер К.* Антенны бегущей волны / Пер. с англ., под общ. ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.

40. *Ваганов Р.Б., Коршунов И.П., Коршунова Е.Н., Олейников А.Д.* Экспериментальное исследование структуры поверхностной электромагнитной волны в анизотропно проводящей ленте // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 136—142.

41. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* Излучение и рассеяние волн / Под ред. М.Л. Левина, пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1. 546 с. Т. 2. 550 с.

42. Data Sheet RO3000® Series Circuit Materials RO3003™, RO3006™, RO3010™ and RO3035™ High Frequency Laminates / <https://www.rogerscorp.com/>.

**МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ,  
ОСНОВАННЫЙ НА РАЗЛОЖЕНИИ НА ВАРИАЦИОННЫЕ МОДЫ С ДРОБНЫМ  
ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ**

© 2022 г. Мин Хуэй Вэй<sup>1,2,\*</sup>, Лися Цзян<sup>1,2,\*\*</sup>, Ди Чжан<sup>3,\*\*\*</sup>,  
Бин Ван<sup>4</sup>, Фэн Мяо Ту<sup>1,2</sup>, Пэн Бо Цзян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Юго-западный нефтяной университет, Чэнду 610500, Китай

<sup>2</sup> Сычуаньский университет, Чэнду 610500, Китай

<sup>3</sup> Синьцзиньский филиал летной академии гражданской авиации Китая,  
Чэнду 611430, Китай

<sup>4</sup> 3-607, Ченхуили, улица Дагана, Новый район Биньхай, Тяньцзинь, 300280, Китай

E-mail: \*wmh881988@163.com; \*\*jlx19982016@163.com; \*\*\*403750039@qq.com

Поступила в редакцию 23.10.2021; после доработки 23.12.2021

Принята к публикации 14.01.2022

Предложен новый метод выделения признаков дефектов, основанный на методе разложения на вариационные моды с дробным фурье-преобразованием (ДФП-РВМ). Во-первых, основная идея этого метода заключается в выполнении оптимального дробного фурье-преобразования (ДФП) исходного сигнала. Затем преобразованный сигнал подвергается разложению на вариационные моды (РВМ). Для решения проблемы, заключающейся в сложности определения порядка ДФП, предлагается метод центрального момента четвертого порядка (ЦМЧП) для определения оптимального порядка. А использование критерия асимметрии и эксцесса (КАЭ) оптимизирует параметры РВМ. Вследствие этого может быть оптимизирован и ДФП—РВМ. Наконец, вычисление эксцесса и фильтрации с помощью скользящего среднего (ФСС) разложенного сигнала, чтобы реализовать извлечение признаков дефектов. Экспериментальные результаты исследования показывают, что сигналы, извлеченные этим методом, содержат все больше и больше явных характеристических частот дефектов, что значительно повышает точность контроля дефектов в различных состояниях: нормального состояния подшипника, с дефектом внутреннего кольца, с дефектом тела качения, с дефектов наружного кольца и т.д.

*Ключевые слова:* дробное фурье-преобразование, разложение по вариационным модам, выделение признаков, диагностика дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308222030058

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Подшипник качения является одной из важных частей вращающихся механизмов, входящих в устройство таких транспортных средств, как локомотивы [1], подшипник имеет характеристики сложной конструкции, высокоскоростного движения и большой нагрузки. Подшипники качения являются одной из наиболее уязвимых частей вращающихся механизмов. Условия их эксплуатации оказывают огромное влияние на оборудование, в состав которых входят вращающиеся механизмы. Любая мелкая неисправность может повлиять на нормальную работу оборудования и нанести огромный ущерб стране и людям [2]. Если дефекты в подшипнике можно диагностировать до того, как он выйдет из строя, то можно не только свести к минимуму потери, но и снизить затраты на техническое обслуживание оборудования [3]. Поэтому необходимо диагностировать неисправности подшипников качения. Однако при измерениях сигналы, свидетельствующие о неисправностях подшипников качения, часто смешиваются с большим количеством сигналов помех, что делает собранные сигналы нестационарными и нелинейными. Способ извлечения необходимой информации о характеристиках неисправностей из этих сигналов стал ключом к диагностике неисправностей подшипников качения [4].

Huang и др. [5] предложил метод разложения на эмпирические моды (РЭМ), который адаптивно извлекает эмпирических моды, отражающие основные характеристики сигнала (в соответствии с локальной структурой признаков сигнала на временной шкале), но алгоритму не хватает теоретической поддержки, появятся конечные эффекты и модальное наложение, которые будут влиять на результаты обработки сигнала. Wu Zhenhua и др. [6] представили шумовой метод анализа сигналов при РЭМ и предложили множественное разложение на эмпирические моды (МРЭМ). Хотя этот метод в определенной степени подавляет явление модового алиасинга, эффект не является полным и будет создавать ложные компоненты, а добавление шума увеличивает ошибку восстановления. В 2014 г. Dragomiretskiy и др. [7] предложил разложение на вариационные моды, новый нерекурсивный адаптивный метод обработки сигналов. В последние годы этот метод стал центром

исследований, но они все лишь привели к улучшению в целочисленной области. Из-за ограниченный самого алгоритма проблемы чрезмерного и недостаточного разложения неизбежны.

На основе вышеуказанных исследований в данной статье предлагается ДФП—РЭМ-метод выделения признаков, основанный на оптимизации ЦМЧП и КАЭ. Во-первых, ЦМЧП используется для определения оптимального порядка ДФП. Сигнал подвергается ДФП оптимального порядка. Во-вторых, оптимальные параметры РВМ определяются по КАЭ, а преобразованный сигнал подвергается РВМ. После этого коэффициенты эксцесса и ФСС разложенного сигнала рассчитываются как собственные векторы. Наконец, вектор признаков вводится в классификатор случайного леса для контроля дефектов. По сравнению с методами разложения на вариационные моды, эмпирические моды и множественное разложение на эмпирические моды, метод, предложенный автором статьи, имеет более высокую точность распознавания.

Структура этой статьи следующая. Во втором разделе выводится модель ДФП и предлагается метод определения ее оптимального порядка. В разделе 3 дается введение в РВМ и предлагается лучший метод получения параметров. В разделе 4 описан процесс реализации алгоритма ДФП—РВМ. В разделе 5 приведены эксперименты, иллюстрирующие эффективность предлагаемого метода, а окончательные выводы приведены в разделе 5.

## 2. ДРОБНОЕ ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

### 2.1. Определение дробного фурье-преобразования

ДФП, как более обобщенное фурье-преобразования в пространстве области преобразования, позволяет представить сигнал на оси координат, повернутой на любой угол по оси времени, и в определенной степени информация во временной области и информация в частотной области объединяются. Затем выделяются некоторые его параметры [8]. Из-за нестационарного характера сигнала неисправности в последние годы для диагностики неисправностей применялся метод комбинирования ДФП и разложения сигнала [9—12]. Первым, кто дал его определение с математической точки зрения, был Namias [13], который проводил исследования и анализ с точки зрения собственных значений и собственных функций:

Традиционное преобразование Фурье определяется как непрерывный линейный оператор, существующий в пространстве сигналов. Характеристическое уравнение, соответствующее этому оператору, имеет вид:

$$\xi \psi_n(t) = \lambda_n \psi_n(t) = e^{-\frac{jn\pi}{2}} \psi_n(t), n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Уравнение (1) — это определение преобразования Фурье, данное с точки зрения собственных значений и собственных функций, где  $\lambda_n$  — собственное значение;  $\psi_n(t)$  — собственная функция, которая может быть выражена как  $\psi_n = H_n(t)e^{-t^2/2}$ , где  $H_n(t)$  — полином Эрмита порядка  $n$  и выражается как

$$H_n(t) = (-1)^n e^{t^2/2} \frac{d^n e^{-t^2/2}}{dt^n}. \quad (2)$$

Как можно видеть из формулы (1), преобразование Фурье сигнала  $\psi_n$  эквивалентно произведению самого себя на комплексное число  $\lambda_n$ . Далее будет введено определение, которое может быть непосредственно выведено из основного определения ДФП.

Определение 1: пусть  $\psi_n$  — собственная функция с собственным значением  $\lambda_n$  при обычном преобразовании Фурье, выражаемая как функция Эрмита—Гаусса, и может быть использована как собственная функция конечного пространства сигналов. Затем дробное фурье-преобразование может быть определено как линейное и удовлетворять:

$$\xi^p \psi_n(t) = \lambda_n^p \psi_n(u) = \left( e^{-\frac{jn\pi}{2}} \right)^p \psi_n(u) = e^{-\frac{jnp\pi}{2}} \psi_n(u), n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Уравнение (3) определяет дробное фурье-преобразование через собственную функцию и собственное значение. Согласно выражению выше, функция с конечной энергией  $x(t)$  может быть сначала разложена в линейную суперпозицию собственных функций фурье-преобразования, а затем записана как

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n \psi_n(t), \quad (4)$$

где коэффициент разложения  $X_n = \int \psi_n(t)x(t)dt$ . Тогда пусть ДФП по обеим концам формулы:

$$\xi^p x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{jpn\pi}{2}} X_n \psi_n(u) = \int \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{jpn\pi}{2}} \psi_n(u) \psi_n(t) x(t) dt. \quad (5)$$

Уравнение (5) называется спектральным разложением ядра ДФП, и функция Эрмита—Гаусса  $\psi_n$  должна удовлетворять:

$$e^{-j2\pi ut} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{jn\pi}{2}} \psi_n(u) \psi_n(t), \quad (6)$$

$$\sqrt{1-j\cot\alpha} \cdot e^{j\pi(u^2 \cot\alpha - 2ut \csc\alpha + t^2 \cot\alpha)} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{jn\pi}{2}} \psi_n(u) \psi_n(t), \quad (7)$$

где  $\alpha = p\pi/2$ . Из указанной выше формулы может быть видно, что когда  $p = 1$ , ДФП становится традиционным фурье-преобразованием. В то же время основное определение ДФП [14]:

$$X_p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_\alpha(u, t) x(t) dt, \quad 0 < p < 2, \quad 0 < \alpha < \pi, \quad (8)$$

где  $K_\alpha(u, t)$  — функция ядра ДФП:

$$K_\alpha(u, t) = \begin{cases} B_\alpha e^{[j\pi(t^2 \cot\alpha + u^2 \cot\alpha - 2ut \csc\alpha)]}, & \alpha \neq n\pi \\ x(u-t), & \alpha = 2n\pi \\ x(u+t), & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases}. \quad (9)$$

Сравнивая формулу (8) с формулой (5), функции ядра  $K_\alpha(u, t) = e^{-\frac{jpn\pi}{2}} \psi_n(u) \psi_n(t)$  и  $B_\alpha = \sqrt{(1-j\cot\alpha)/2\pi}$ , где  $\alpha$  — это угол вращения, а связь с порядком  $p$  следующая:  $\alpha = \frac{p\pi}{2}$ .

В 1993 г. Almeida указал на физический смысл ДФП. Он интерпретировал ДФП как вращение в частотно-временной плоскости. Как показано на рис. 1, на частотно-временной плоскости осуществляется вращение  $(t, \omega)$  на угол  $\alpha$  против часовой стрелки и его преобразование в домен  $(u, v)$ , чтобы получить новое представление сигнала. Следовательно, используя ДФП, можно проследить преобразование всех характеристик сигнала из временной области в частотную, изменяя угол  $\alpha$  или порядок  $p$ .

## 2.2. Порядок выбора дробного фурье-преобразования

Сигнал может получить свою полосу пропускания во временной или частотной области посредством оценки центрального момента второго порядка [15]. Из оценки центрального момента второго порядка дробного фурье-преобразования сигнала можно получить ширину полосы сигнала в области дробного фурье-преобразования [16, 17]. Но он очень чувствителен к помехам и его оценочный эффект очень слаб, когда отношение сигнал/шум низкое, поэтому в этой статье используется центральный момент четвертого порядка дробного фурье-преобразования:

$$P_\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} |R_x^\alpha(u)|^4 (u - m_\alpha)^4 du, \quad (10)$$

где  $R_x^\alpha(u)$  —  $\alpha$  — порядок ДФП сигнала и  $m_\alpha$  — центральный момент первого порядка дробного фурье-преобразования:

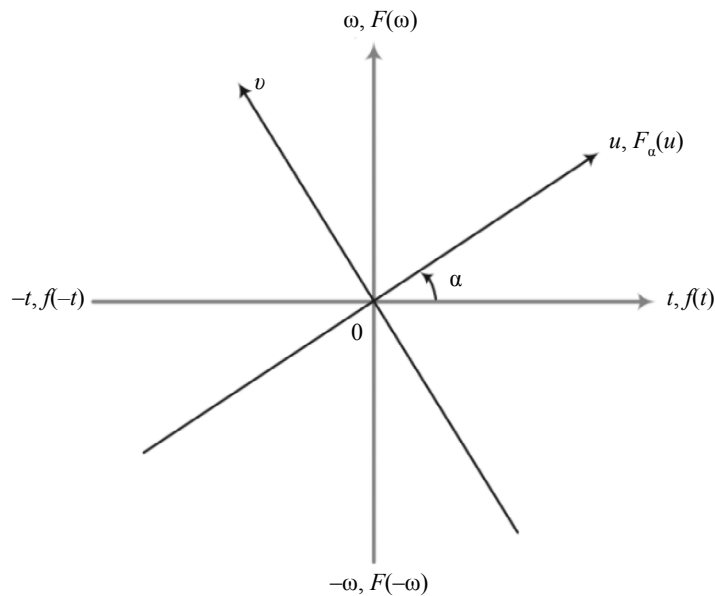


Рис. 1. Схематичная диаграмма вращения в частотно-временной плоскости при дробном фурье-преобразовании.

$$m_{\alpha} = \int_{-\infty}^{\infty} |R_x^{\alpha}(u)|^2 u du. \quad (11)$$

Рассчитывая центральный момент четвертого порядка дробного фурье-преобразования, может быть получен спектр центрального момента четвертого порядка дробного фурье-преобразования. Когда сигнал имеет наименьшую полосу пропускания при дробном фурье-преобразовании, центральный момент четвертого порядка при ДФП сигнала будет иметь максимальное значение в соответствующей области. Поскольку ДФП имеет период  $2\pi$  и существует формула (12), в интервале  $\alpha \in [0, \pi)$  будет наблюдаться максимум. Значение величины  $\alpha$ , соответствующее каждой компоненте сигнала, может быть найдено при нахождении локального максимума. Такое значение позволяет сигналам иметь наименьшую полосу пропускания в домене ДФП:

$$R_x^{\alpha+\pi}(u) = R_x^{\alpha}(-u). \quad (12)$$

### 3. РАЗЛОЖЕНИЕ НА ВАРИАЦИОННЫЕ МОДЫ

#### 3.1. Определение разложения на вариационные моды

Основная идея алгоритма РВМ заключается в том, что большая часть каждой моды исходного сигнала тесно связана с конкретной центральной частотой [18, 19]. С помощью фильтрации Винера, смещения частот и преобразования Гильберта проблема полосы пропускания каждой подмоды разбивается на несколько задач ограничения, а затем используется ряд итерационных методов решения для получения оптимального решения центральной частоты [20]. По сравнению с традиционным методом РЭМ, математическая основа РВМ является более прочной, с лучшими характеристиками сходимости и большей надежностью [21].

Таким образом, РВМ окончательно раскладывает заданный сигнал  $f(t)$  на  $k$  ЭМ и обеспечивает, чтобы сумма общей ширины полосы разложенных ЭМ была наименьшей. Опишем дальнейшие шаги реализации алгоритма. Во-первых, получить аналитический сигнал каждой ЭМ посредством преобразования Гильберта и рассчитать соответствующий односторонний частотный спектр [22]:

$$\left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot u_k(t). \quad (13)$$

После этого оценивается центральная частота каждой ЭМ, и частотный спектр каждой ЭМ модулируется в соответствующую полосу частот посредством смещения частот:

$$\left\{ \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot u_k(t) \right\} \cdot e^{-j\omega_k t}. \quad (14)$$

Наконец, для расчета нормы квадрата градиента сигнала модуляции  $L^2$  используется гауссова фильтрация. И, исходя из этого, оценивается полоса пропускания каждой ЭМ, а сумма ЭМ полос пропускания минимизируется посредством уравнения ограничения. Выражение уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| d_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2 \right\} \\ s.t. \sum_k u_k = f \end{array} \right\}, \quad (15)$$

где  $d_t$  представляет собой частную производную по времени  $t$ ; функции  $\{u_k\} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_k\}$  представляют собой  $k$ -е ЭМ-компоненты, полученные при разложении сигнала  $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k\}$ ,  $F$  — центральная частота каждой ЭМ. Вводится расширенное уравнение Лагранжа с квадратичной поправкой на потери  $\alpha$  и оператором множителя Лагранжа  $\lambda$ , так что вышеуказанное вариационное уравнение ограничения преобразуется в вариационное уравнение без ограничений и получается оптимальное решение модели:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle. \quad (16)$$

Из-за увеличения поправки на потери и оператора множителя Лагранжа модель имеет большую точность распознавания и более строгие ограничения при наличии белого гауссова шума. Метод переменного направления множителей используется для поочередного обновления  $u_k^{n+1}$ ,  $\omega_k^{n+1}$  и  $\lambda^{n+1}$  в уравнении (16), чтобы получить седловую точку уравнения в вариациях без ограничений:

$$u_k^{n+1} = \arg \min \left\{ \alpha \left( \left\| \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right) + \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) \right\|_2^2 \right\}, \quad (17)$$

где  $\omega_k$  эквивалентно  $\omega_k^{n+1}$ , а  $\sum_{i \neq k} u_i(t)$  также эквивалентно  $\sum_{i \neq k} u_i^{n+1}(t)$ . Затем используется эквидистантное преобразование Фурье для преобразования вышеуказанного уравнения в частотно-временной области и  $\omega - \omega_k$ , чтобы провести замену переменной на  $\omega$  для получения следующего уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{u}_k^{n+1} = \arg \min \left\{ \alpha \left( \left\| j(\omega - \omega_k) [(1 + \text{sgn}(\omega)) \hat{u}_k(\omega)] \right\|_2^2 \right) + \kappa \right\} \\ \kappa = \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^2(\omega)}{2} \right\|_2^2 \end{array} \right\}. \quad (18)$$

Используя преимущество симметрии эрмитового реального сигнала, уравнение (18) преобразуется в интегральное уравнение в полупространстве с неотрицательной частотой. Вместе с этим обновленное уравнение  $u_k^{n+1}$  может быть получено при квадратичной оптимизации:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^2(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}. \quad (19)$$

Схожим образом, в соответствии с условием ограничения минимальной суммы пропускных полос, задача минимума преобразуется в частотную область с использованием эквидистантного преобразования Фурье и получается переменное обновленное уравнение  $\omega_k^{n+1}$  и  $\lambda^{n+1}$ :

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}, \quad (20)$$

$$\lambda_k^{n+1} = \lambda^n + \tau(f(t) - \sum_k u_k^{n+1}). \quad (21)$$

РВМ использует метод рекурсивного цикла для разделения исходного сигнала слой за слоем [23], эффективно избегая недостатков модального алиасинга РЭМ, и имеет возможность адаптации [24]. В то же время РВМ использует принцип фильтра Винера для построения задачи с вариационными ограничениями, так что сигнал может быть эффективно и точно разложен в условиях интерференции гауссовского шума [30]. Полученная мода частотной модуляции и амплитудной модуляции (ЧМ—АМ) преобразуется во временной области по эквидистантной теореме Фурье, а затем получаются полоса пропускания и центральная частота каждого компонента, так что каждая мода отражает характеристики различных частотных диапазонов разложенного сигнала [25].

### 3.2. Выбор параметров алгоритма разложения на вариационные моды

Хотя алгоритм РВМ преодолевает недостатки традиционного РЭМ и его усовершенствованных методов, необходимо установить уровень разложения  $K$  и поправку на потери  $\alpha$  перед разложением. Выбор параметров оказывает большое влияние на результаты разложения [26]. В этой статье для оптимизации параметров используется КАЭ [27]. Эксцесс — это числовая статистическая величина, отражающая распределение случайных величин. Это безразмерный параметр, очень чувствительный к импульсным сигналам [28]. Эксцесс демонстрирует высокую повторяемость в подшипниках. В момент, когда подшипник только вводится в эксплуатацию, будучи исправным, распределение амплитуды его вибрационного сигнала близко к нормальному распределению, а значение эксцесса составляет около 3. Когда подшипник начинает выходить из строя, амплитуда сигнала будет значительно отклоняться от нормального распределения, а значение эксцесса будет соответственно увеличиваться. В таком случае можно считать, что произошла поломка. И значение эксцесса при разных неисправностях подшипника также будет разным [29, 30]. Стандартное отклонение может отражать степень дисперсии между отдельными элементами в группе набора данных и результат измерения величины дисперсии. КАЭ может отражать разницу между различными ЭМ после РВМ. Чем больше КАЭ, тем больше разница между различными ЭМ.

## 4. АЛГОРИТМ РАЗЛОЖЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ДФП—РВМ

В данной статье предлагается новый метод выделения признаков при ДФП—РВМ, основанный на ЦМЧП—СКОЭ-оптимизации. Основная идея этого метода состоит в том, чтобы отобразить плохо разделяемые данные в исходных данных в соответствующее пространство дробного порядка, а затем провести РВМ. Экспериментальные данные предоставлены подшипниковым дата-центром электротехнической лаборатории Западного резервного университета Кейза. Модель подшипника качения SKF6205. Скорость вращения двигателя составляет 1797 об/мин, а частота дискретизации — 12 кГц. Диаметр дефекта подшипника со стороны привода составляет 0,1778 мм. Характеристическая частота данных неисправности составляет 107,365 Гц. Конкретные шаги и блок-схема следующие (рис. 2).

Шаг 1: после вычисления центрального момента четвертого порядка каждого дробного порядка находится максимальное значение центрального момента четвертого порядка; соответствующий угол преобразования является оптимальным углом ДФП, по данным выполняется оптимальное ДФП.

Шаг 2: рассчитывается КАЭ, при котором  $\alpha$  увеличивается с 1000 до 10000 с шагом 100.  $K$  увеличивается с 2 до 11 с шагом 1. Выполняется оптимизация поправки на потери  $\alpha$  и уровня разложения  $K$ , затем производится РВМ по данным после ДФП.

Шаг 3: выполняется обратное ДФП на каждой ЭМ после РВМ.

Шаг 4: выполняется анализ спектра огибающей по каждой ЭМ.

Из рис. 3 видно, что когда  $X$  равно 1,028, значение центрального момента четвертого порядка является наибольшим, поэтому оптимальный порядок ДФП равен 1,028. Затем рассчитывается КАЭ, где поправка на потери  $\alpha$  увеличивается от 1000 до 10000 с шагом 100.  $K$  увеличивается с 2

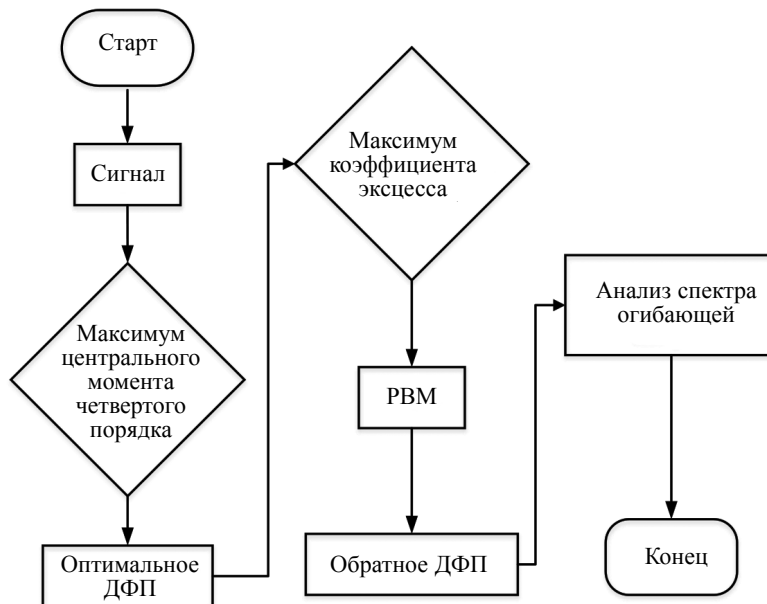


Рис. 2. Блок-схема ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ.

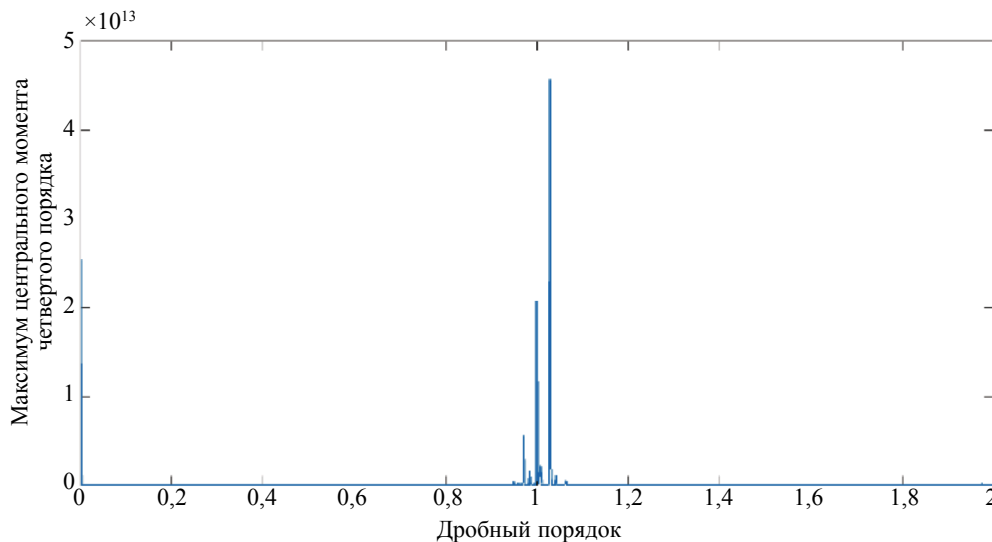


Рис. 3. Порядок ДФП.

до 11 с шагом 1. Из рис. 4 видно, что поправка на потери  $\alpha$  увеличивается в 15 раз, что равно 2500, а число уровней разложения  $K$  увеличивается в три раза, что равно 4. Видно, что оптимальные параметры  $\alpha$  и  $K$  РВМ равны 2500 и 4 соответственно.

Из рис. 6 видно, что как разложение РВМ, так и ДФП—РВМ, оптимизированное по ЦМЧП—КАЭ могут эффективно извлекать характеристическую частоту дефекта 107 Гц в сигнале от дефекта. Однако ЭМ1 из РВМ, очевидно, не может выделить характеристическую частоту дефекта, а четыре ЭМ, основанные на ДФП—РВМ, оптимизированные по ЦМЧП—КАЭ, предлагаемые в этой статье, вполне могут выделить среднюю характеристическую частоту дефекта и ее частотное умножение.

В то же время, сравнивая амплитуду характеристической частоты, извлеченную двумя методами, амплитуда характеристической частоты и соответствующий ей множитель частоты на основе



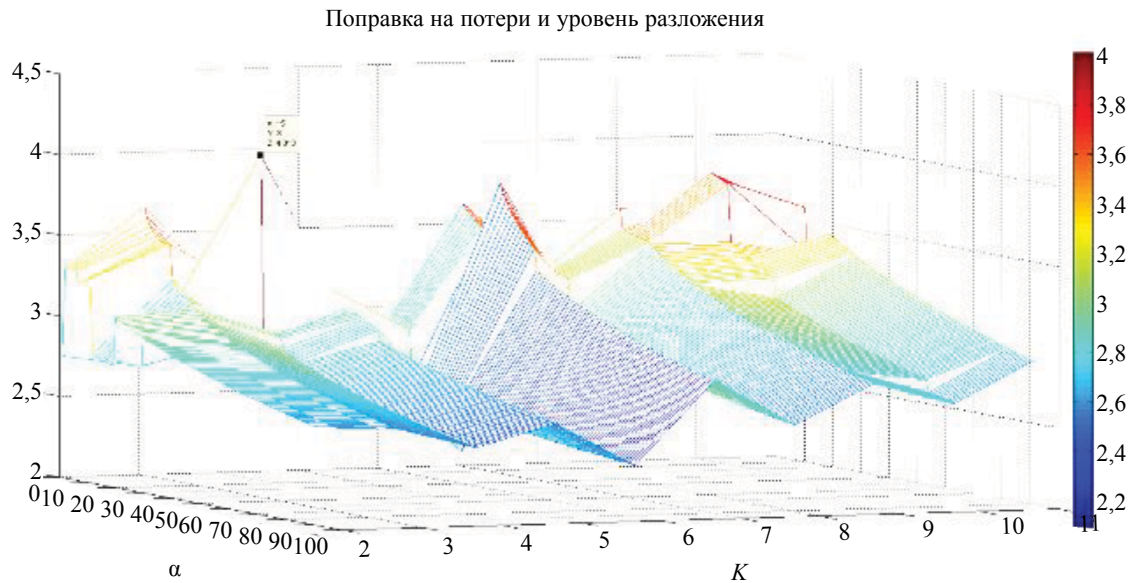


Рис. 4. Оптимизация поправок на потери и уровни разложения.

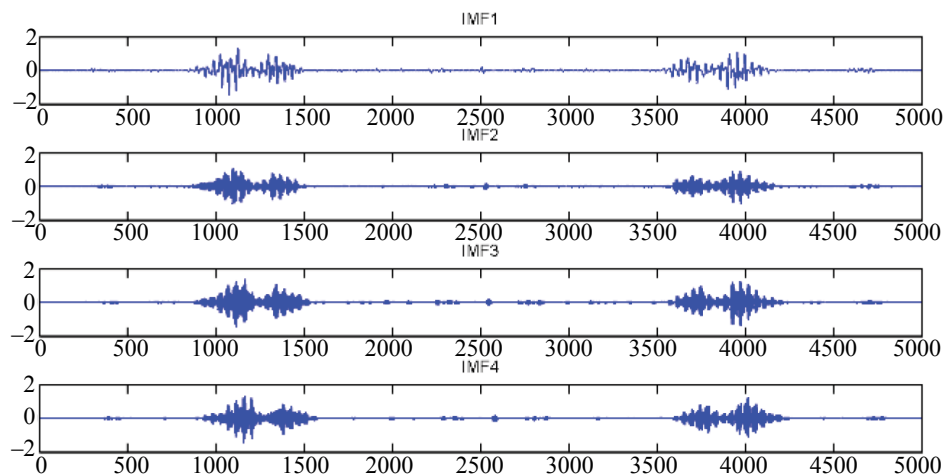


Рис. 5. Компоненты ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ.

метода ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—СКОЭ, очевидно больше амплитуды характеристической частоты, полученной из РВМ. Выше показано, что метод, предложенный в данной статье, может предоставить более эффективную информацию о характеристиках дефекта для диагностики подшипников.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

### 5.1. Процедура эксперимента

В этом разделе для дальнейшей проверки роли этого метода в диагностике дефектов подшипников для экспериментальной проверки будут использованы данные из базы данных Западного резервного университета и данных, полученных на построенной в этом университете экспериментальной платформе. Конкретный экспериментальный процесс показан на рис. 7.

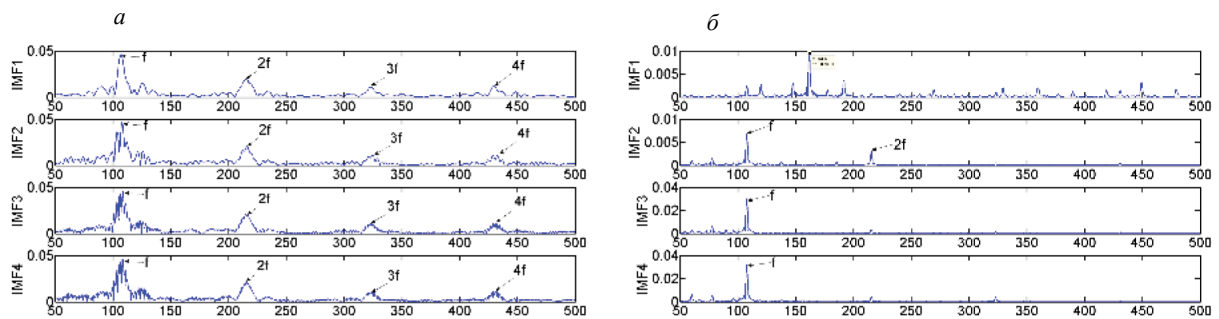


Рис. 6. Спектр огибающей каждой компоненты:  
 а — спектр огибающей компоненты ДФП—РВМ, основанный на ЦМЧП—КАЭ; б — спектр огибающей каждой компоненты РВМ.

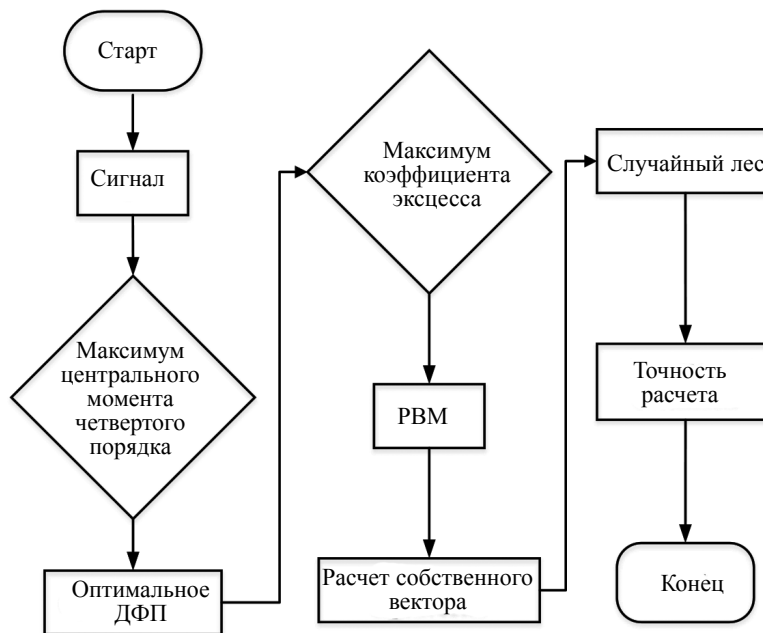


Рис. 7. Блок-схема эксперимента.

## 5.2. Диагностика дефектов

Используемые экспериментальные данные взяты из базы данных подшипников Западного резервного университета. Экспериментальная платформа состоит из двигателя мощностью 1,5 Вт, датчика крутящего момента, тестера мощности и электронного контроллера. Дефект подшипника — это одноточечное повреждение от электроискровой обработки (ЭИО). Модель подшипника SKF6205, частота дискретизации 12 кГц. Используемые данные являются нормальными базовыми данными для скорости 1797 об/мин. Дефектные подшипники так же вращались со скоростью 1797 об/мин, а диаметр неисправности составляет 0,1778 мм. Временная диаграмма данных показана на рис. 8.

Чтобы проиллюстрировать эффективность ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ при извлечении признаков дефектов сигналов подшипника, в этой статье в качестве векторов признаков дефектов используются коэффициент эксцесса и ФСС. Коэффициент эксцесса и ФСС очень чувствительны к импульсному сигналу дефекта подшипника. Когда подшипник выходит из строя, значения этих двух характеристик значительно изменяются [31]. Векторы признаков, извлеченные с помощью ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ, и векторы признаков, извлеченные с помощью РВМ, РЭМ и МРЭМ, соответственно кластеризуются. Из графика результатов класте-

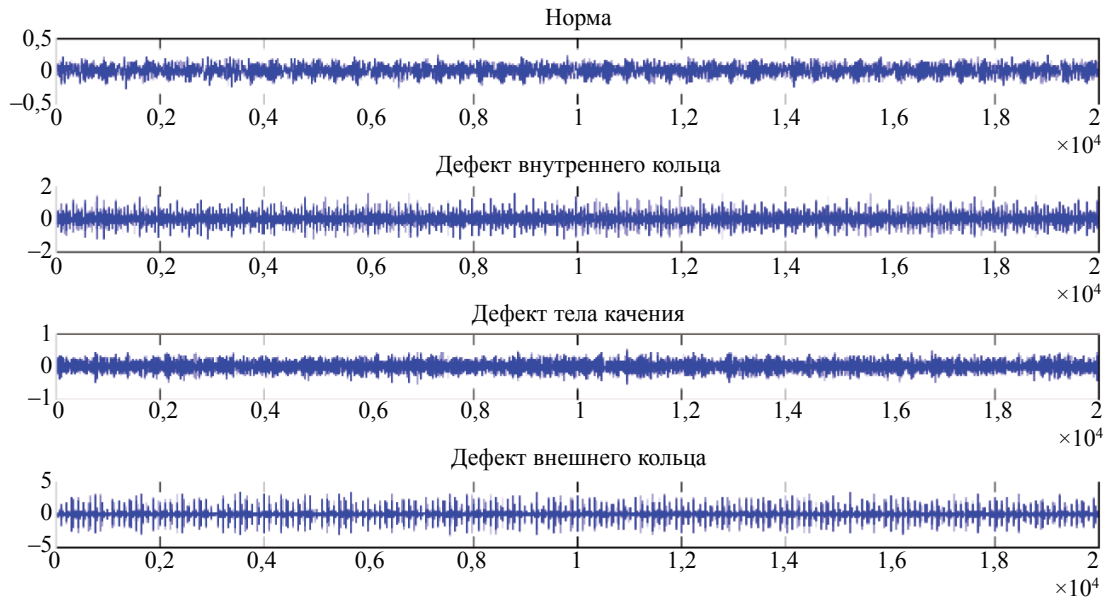
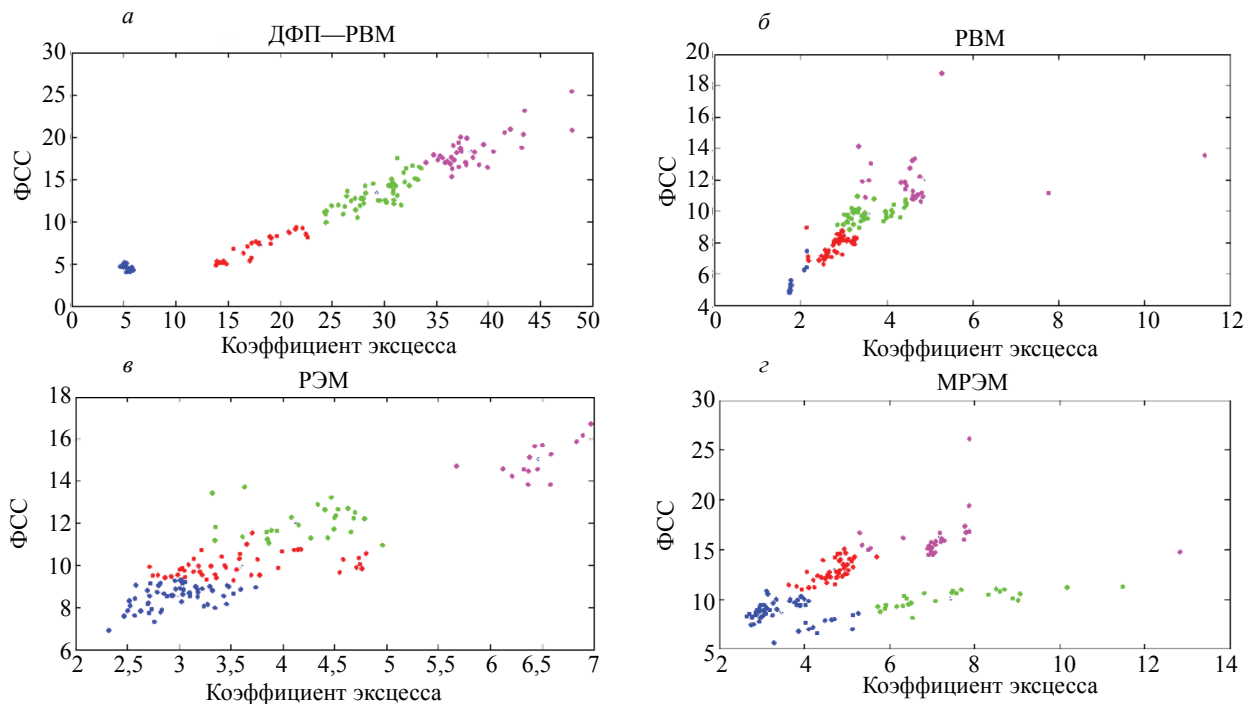


Рис. 8. Исходная временная диаграмма подшипника в каждом состоянии.

Рис. 9. График результатов кластеризации: *а* — график кластеризации дробного РВМ; *б* — график результата кластеризации РВМ; *в* — график кластеризации РЭМ; *г* — график кластеризации МРЭМ.

ризации на рис. 9 видно, что векторы признаков, извлеченные с помощью ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ, обладают сильными свойствами кластеризации. Однако эффект кластеризации векторов признаков, извлеченных с помощью РВМ, РЭМ и МРЭМ, слабый, а типы дефекты нечеткие и разрозненные.

Чтобы в дальнейшем проверить эффективность предложенного метода, в этой статье в качестве векторов признаков дефекта используются коэффициенты эксцесса и ФСС, а для диагностики неисправности используется классификатор случайного леса [32]. Во-первых, различные типы неисправностей разделены на 10 групп по 10 000 данных, которые в общей сложности разделены на 40 групп данных. Выполняется ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ для этих 40 наборов данных. Во-вторых, коэффициент эксцесса и ФСС извлекаются из полученных ЭМ в виде векторов признаков дефектов. Для каждого типа неисправности будет получено 40 наборов векторов признаков коэффициента эксцесса и ФСС. Наконец, 32 группы различных типов дефектов используются в качестве обучающего набора классификатора случайного леса, а 8 групп используются в качестве данных тестового набора для проверки точности классификации всей модели. Количество каждого состояния подшипника — как показано в табл. 1. Устанавливается количество деревьев решений в классификаторе случайного леса равным 800, а затем выполняется диагностика дефектов. Используется РВМ, РЭМ и МРЭМ для извлечения соответствующих векторов признаков дефектов из одних и тех же данных и отправки их в классификатор случайного леса для диагностики дефектов.

Таблица 1

Число подшипников в различных состояниях

Состояние подшипника	Обучающий набор	Тестовый набор	Номер
Норма	32	8	1
Дефект внутреннего кольца	32	8	2
Дефект тела качения	32	8	3
Дефект внешнего кольца	32	8	4

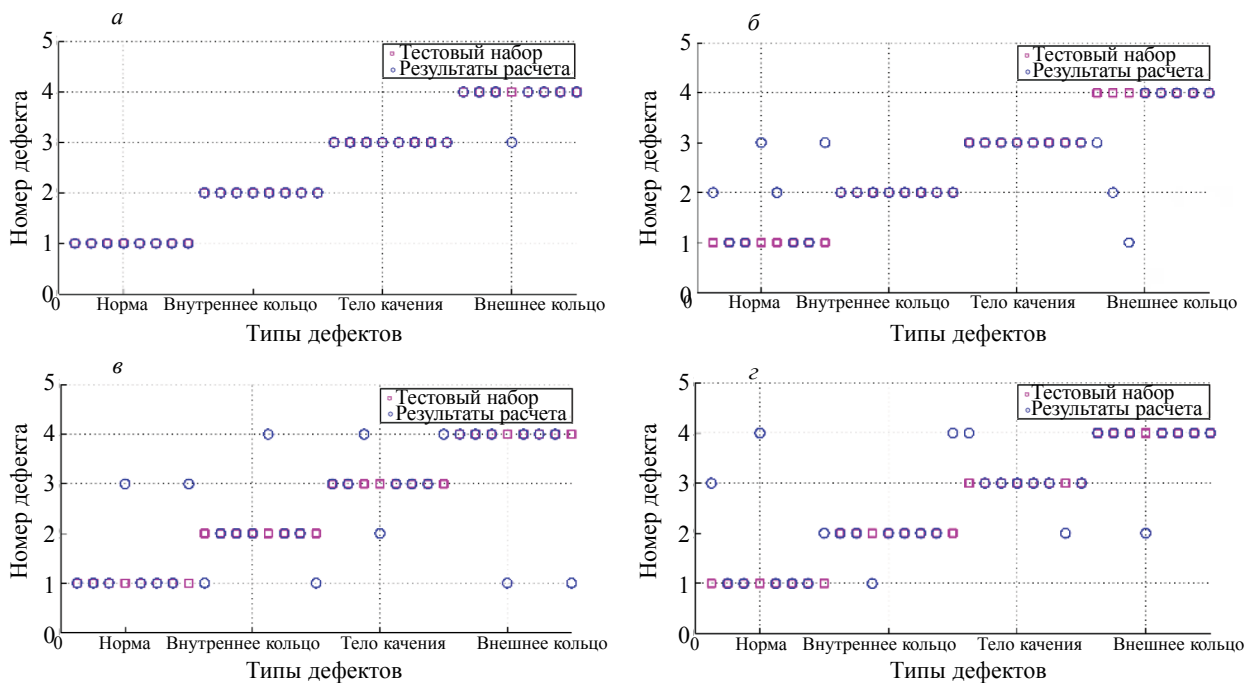


Рис. 10. График результатов классификации:

*a* — диаграмма результатов ДФП—РВМ-классификации; *б* — диаграмма результатов РВМ-классификации; *в* — диаграмма результатов РЭМ-классификации; *г* — диаграмма результатов МРЭМ-классификации.

В ходе контроля тестового набора результаты классификации четырех методов показаны на рис. 10. Из рисунка видно, что векторы признаков между различными типами дефектов, извлеченные методом выделения признаков ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ, могут быть лучше идентифицированы и классифицированы. График результатов классификации показывает, что прогнозируемый результат в основном соответствует ожидаемому значению. В результатах классификации трех других методов наблюдается большое расхождение между прогнозируемым результатом и ожидаемым значением.

Результаты классификации при использовании четырех различных методов обобщены в табл. 2—5 соответственно. Общая точность процедуры классификации, полученная с использованием метода выделения признаков ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ, составляет 93,75 %. Общая точность классификации на основе РВМ-метода выделения признаков составляет 78,1 %. Общая точность классификации на основе РЭМ-метода выделения признаков составляет 68,75 %. Общая точность классификации, основанной на методе выделения признаков МРЭМ, составляет 75 %. Экспериментальные результаты показывают, что векторы признаков, полученные на основе дробного РЭМ, имеют лучшее разрешение.

Таблица 2

## Результаты ДФП—РВМ-классификации

Состояние подшипника	Размер дефекта, мм	Номер	Обучающая выборка	Количество правильно классифицированных образцов	Точность, %
Норма	—	1	8	8	100
Дефект внутреннего кольца	0,1778	2	8	8	100
Дефект тела качения	0,1778	3	8	8	100
Дефект внешнего кольца	0,1778	4	8	7	87,5
Итого	—	—	32	31	96,875

Таблица 3

## Результаты РВМ-классификации

Состояние подшипника	Размер дефекта, мм	Номер	Обучающая выборка	Количество правильно классифицированных образцов	Точность, %
Норма	—	1	8	4	50
Дефект внутреннего кольца	0,1778	2	8	8	100
Дефект тела качения	0,1778	3	8	8	100
Дефект внешнего кольца	0,1778	4	8	5	62,5
Итого	—	—	32	25	78,1

Таблица 4

## Результаты РЭМ-классификации

Состояние подшипника	Размер дефекта, мм	Номер	Обучающая выборка	Количество правильно классифицированных образцов	Точность, %
Норма	–	1	8	6	75
Дефект внутреннего кольца	0,1778	2	8	5	62,5
Дефект тела качения	0,1778	3	8	5	62,5
Дефект внешнего кольца	0,1778	4	8	6	75
Итого	–	–	32	22	68,75

Таблица 5

## Результаты МРЭМ-классификации

Состояние подшипника	Размер дефекта, мм	Номер	Обучающая выборка	Количество правильно классифицированных образцов	Точность, %
Норма	–	1	8	5	62,5
Дефект внутреннего кольца	0,1778	2	8	6	75
Дефект тела качения	0,1778	3	8	6	75
Дефект внешнего кольца	0,1778	4	8	7	87,5
Итого	–	–	32	24	75

### 5.3. Диагностика на наличие дефектов по данным измерений

В этом разделе проводятся эксперименты по диагностике неисправностей по данным, измеренным на самодельной экспериментальной установке для подшипников качения. Экспериментальная установка для работы с подшипниками качения состоит из двух частей: вращающегося механизма и системы сбора данных (как показано на рис. 11). Часть вращающегося механизма состоит из нормальных/дефектных подшипников и трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором. Подшипник устанавливается на конце вращающегося вала трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором, а скорость вращения измеряется фотоэлектрическим датчиком. Система сбора данных состоит из датчика ускорения ICP, установленного на валу двигателя, и 24-битного сетевого устройства для распределенного сбора данных INV 3060A (включает встроенное служебное программное обеспечение Coinv DASP V10 для сбора данных). Дефект подшипника получают при помощи ЭИО. Прямую линию глубиной и шириной 0,2 мм получают на внутреннем кольце, на внешнем кольце и на шаре для имитации их дефектов. Частота дискретизации составляет 12 кГц, а экспериментальная установка показана на рис. 12.

С помощью экспериментальную установку получены данные по вибрации для четырех состояний, количество данных составило около 119 000 точек. В первую очередь, данные по вибрации для каждого состояния подшипника разделяются и группируются так, что каждая группа имеет 10 000 точек из выборки и итого имеется 20 групп для каждого состояния подшип-

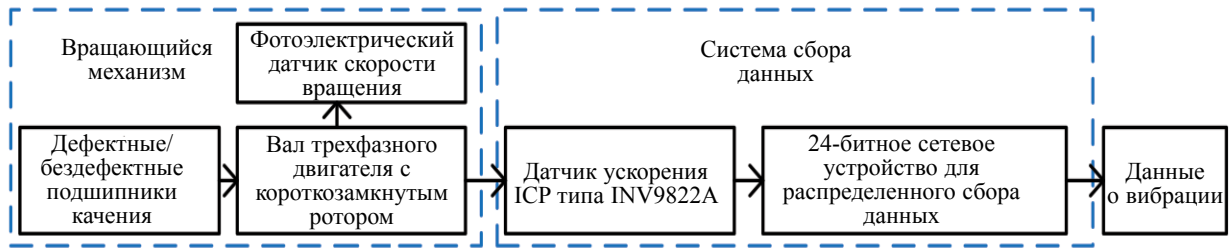


Рис. 11. Блок-схема экспериментальной установки.

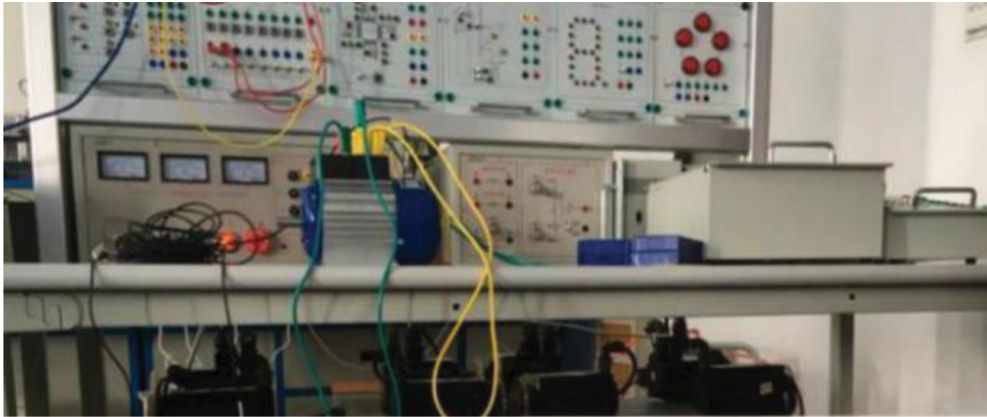


Рис. 12. Внешний вид экспериментальной установки.

ника. В общей сложности имелось 80 наборов данных. Во-вторых, над 80 наборами данных было проведено ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ. Затем из полученных ЭМ извлекаются коэффициенты эксцесса и ФСС в виде векторов признаков дефекта. Каждому типу дефекта соответствует 80 наборов собственных векторов коэффициента эксцесса и ФСС. Наконец, 50 групп для различных типов дефектов используются в качестве обучающего набора для классификатора случайного леса, а 30 групп используются в качестве контрольных данных для проверки точности классификации всей модели. Количество решающих деревьев в классификаторе устанавливается равным 800. Результат проверки работоспособности модели с помощью контрольного набора показывает, что уровень точности классификации составляет 90 %, а результат классификации показан на рис. 13.

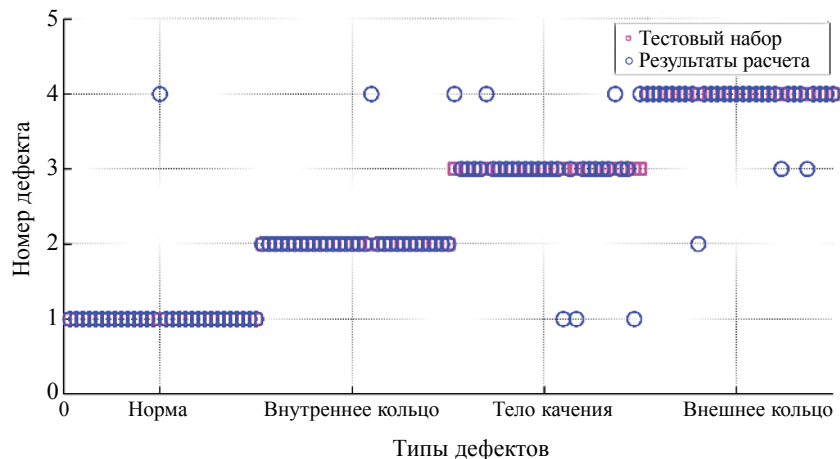


Рис. 13. Результаты классификации данных по ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ.

По результатам работы метод ДФП—РВМ, оптимизированного по ЦМЧП—КАЭ, не только имеет более высокий показатель точности контроля дефектов по данным вибродиагностики, но и применение этого метода также позволяет определить тип дефекта с более высокой точностью. Это показывает, что метод имеет конкретное практическое применение.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе объединяются методы дробного фурье-преобразования и разложение на вариационные моды, предложен метод выделения дефектов подшипника дробного фурье-преобразования—разложение на вариационные моды, оптимизированного по центральному моменту четвертого порядка—критерию асимметрии и эксцесса. Во-первых, метод определяет дробный оптимальный порядок через центральный момент четвертого порядка. Во-вторых, параметры метода РВМ оптимизируются по критерию асимметрии и эксцесса. Для сигнала, обработанного этим методом, выполняется спектральный анализ огибающей. Результаты показывают, что по сравнению с прямым РВМ сигнала, сигнал, обработанный этим методом, может получить более очевидные и более характерные сигналы дефекты. Кроме того, коэффициент эксцесса и фильтрации с помощью скользящего среднего извлекается из сигнала, разложенного на основе дробного фурье-преобразования—разложение на вариационные моды, оптимизированного по центральному моменту четвертого порядка—критерию асимметрии и эксцесса, в виде векторов признаков, и отправляются в классификатор случайного леса для диагностики дефектов. По сравнению с РВМ, РЭМ и множественным разложением на эмпирические моды точность диагностики неисправности предлагаемого в данной работе метода значительно выше и достигает 93,75 %. А показатель точности диагностики неисправностей по измеренным данным также высок, что доказывает, что метод имеет конкретное практическое применение и инженерную значимость.

Работа поддержана Государственной Ведущей Лабораторией Нефтяных Ресурсов и Разведки Китайского Университета Нефти (Пекин) (№ PRP/open-1610) и Национальным Фондом Естественных Наук Китая (№ 51804267)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guan Yang et al. 2MNet: Multi-sensor and multi-scale model toward accurate fault diagnosis of rolling bearing // Reliability Engineering and System Safety. 2021. V. 216.
2. He Deqiang et al. A rolling bearing fault diagnosis method using novel lightweight neural network // Measurement Science and Technology. 2021. V. 32 (12).
3. Zhan Jun, Cheng Longsheng, Peng Zhaoming. Rolling Bearing Fault Intelligent Diagnosis Based on VMD and Improved Multi-classification Matte System // Vibration and shock. 2020. V. 39 (02). P. 32—39.
4. Lu Ou, Dejie Yu, Hanjian Yang. A new rolling bearing fault diagnosis method based on GFT impulse component extraction // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 81. P. 162—182.
5. Huang Norden E. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998. V. 454 (1971). P. 903—995.
6. Wu Z.H., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method // Advances in Adaptive Data Analysis. 2009. V. 01 (01). P. 1—41.
7. Zosso D., Dragomiretskiy K. Variational Mode Decomposition // IEEE Transactions on Signal Processing. 2014. V. 62 (3). P. 531—544.
8. Zhang Lei, Xu Shuwen. Nonlinear Frequency Modulation Signal Detection Based on FRFT // Electronic Science and Technology. 2010. V. 23 (02). P. 68—71.
9. Zhang Y., Du X., Wen G. et al. An adaptive method based on fractional empirical wavelet transform and its application in rotating machinery fault diagnosis // Measurement Science and Technology. 2019. V. 30 (3).
10. Shao Y., Lu D., Yang G.X. Application of fractional Fourier transform in fault diagnostics of rolling bearing // Journal of Harbin University of Science and Technology. 2017. V. 22 (03). P. 68—72+79.
11. Mei J.M., Jia J.D., Zeng R.L. et al. A multi-order FRFT self-adaptive filter based on segmental frequency fitting and early fault diagnosis in gears // Measurement. 2016. V. 91. P. 532—540.
12. Wang H.Q. Fractional S transform and its application to gearbox fault diagnosis // Journal of Electronic Measurement and Instrument. 2019. V. 33 (08). P. 133—139.
13. Namias V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics // IMA Journal of Applied Mathematics. 1980. V. 25 (3). P. 241—265.
14. Haldun M. Ozaktas et al. Digital Computation of the Fractional Fourier Transform // IEEE, Transactions on Signal Processing. 1996. V. 44. No. 9. P. 2141—2150.



15. *Alieva T., Bastiaans M.J.* On fractional Fourier transform moments // IEEE Signal Processing Letters. 2000. V. 7 (11). P. 320—323.
16. *Guo Xuwei, Shen Yongjun, Yang Shaopu.* Rolling Bearing Fault Feature Extraction Based on Sample Entropy and Fractional Fourier Transform // Vibration and Shock. 2017. V. 36 (18). P. 65—69.
17. *Xinyu Liu et al.* Automatic extracellular spike denoising using wavelet neighbor coefficients and level dependency // Neurocomputing. 2015. V. 149. P. 1407—1414.
18. *Wang Y., Markert R.* Filter bank property of variational mode decomposition and its applications // Signal Process. 2016. V. 120. P. 509—521.
19. *Wang Fei, Cao Fan.* Separation and Enhancement of multi-component LINEAR FM Signals based on Time-frequency Space Singular Value Decomposition // Data acquisition and processing. 2009. V. 24 (06). P. 767—771.
20. *Zhang Shu, Liu Deping.* Bearing Fault Diagnosis based on BFA Optimization of VMD Parameters // Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology. 2020. V. 05. P. 45—47.
21. *Liu Xingdou et al.* Ultra-short-term Wind Power Prediction Model Based on VMD Decomposition and LSTM // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 838 (1).
22. *Huang Darong, Ke Lanyan, Lin Mengting, Sun Guoxi.* A New Method for Bearing Fault Diagnosis based on Parameter Optimization VMD Multi-Scale Entropy // Control and Decision. 2020. V. 35 (07). P. 1631—163.
23. *Benammar Abdessalem, Chibane Farid.* Resolution Improvement of Ultrasonic Signals Using Sparse Deconvolution and Variational Mode Decomposition Algorithms // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56 (6). P. 479—489.
24. *Fengtao Wang, Chenxi Liu, Tao Zhang, Bosen Dun, Qingkai Han, Hongkun Li.* Rolling Bearing Fault Diagnosis Method Based on K-Value Optimization VMD // Vibration. Testing and Diagnosis. 2018. V. 38 (03). P. 540—547.
25. *Zhang Chenchen.* Research on defect recognition method of ultrasonic nondestructive testing based on VMD. Dalian Ocean University, 2020.
26. *Yang Wei, Wang Hongjun.* Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on VMD Resonance Sparse Decomposition // Journal of Electronic Measurement and Instrumentation. 2018. V. 9. P. 20—27.
27. *Zhang Chen, Zhao Rongzhen, Deng Linfeng, Wu Yaochun.* Rolling Bearing Weak Fault Feature Extraction Based on SVD-EEMD and TEO\* // Vibration. Testing and diagnosis. 2019. V. 39 (04). P. 720—726+900.
28. *Liu Zerui, Xing Jishui, Wang Hongjun, Han Fengxia, Gu Fengfeng.* Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on VMD and Fast Spectrum Kurtosis // Journal of Electronic Measurement and Instrument. 2021. V. 35 (2). P. 73—79.
29. *Benammar Abdessalem, Chibane Farid.* Resolution Improvement of Ultrasonic Signals Using Sparse Deconvolution and Variational Mode Decomposition Algorithms// Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56 (6). P. 479—489.
30. *Hua Li, Tao Liu, Xing Wu, Qing Chen.* Application of optimized variational mode decomposition based on kurtosis and resonance frequency in bearing fault feature extraction // Transactions of the Institute of Measurement and Control. V. 42. Is. 3. P. 518—527.
31. *Tian Jing, Wang Zhi, Zhang Fengling et al.* Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Intermediate Bearing Outer Ring Failure // J. Propulsion Technology. 2019. V. 40. No. 03. P. 660—666. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.180081
32. *Roy S.S., Dey S., Chatterjee S.* Autocorrelation Aided Random Forest Classifier-Based Bearing Fault Detection Framework // IEEE Sensors Journal. 15 Sept. 2020. V. 20. No.18. P. 10792—10800.

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ  
ИСПЫТАНИЯ • ДИАГНОСТИКА



24-26 октября 2022  
МОСКВА • ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

КРУПНЕЙШАЯ ОТРАСЛЕВАЯ ПЛОЩАДКА  
В РОССИИ И СНГ



18+  
КРУГЛЫХ СТОЛОВ  
С УЧАСТИЕМ ЭКСПЕРТОВ



3 000+  
РУКОВОДИТЕЛЕЙ  
И СПЕЦИАЛИСТОВ



60+  
КОМПАНИЙ-ЛИДЕРОВ  
В ОБЛАСТИ НК И ТД

НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ • ИННОВАЦИИ  
РУКОВОДИТЕЛИ КОМПАНИЙ • КЛЮЧЕВЫЕ ЗАКАЗЧИКИ  
ПРЕДСТАВИТЕЛИ ВЛАСТИ • ОТРАСЛЕВЫЕ СМИ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ • ДЕФЕКТОМЕТРИЯ  
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ • ИСПЫТАНИЯ • ДИАГНОСТИКА  
ОЦЕНКА РИСКА • ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА

В РАМКАХ  
РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ НЕДЕЛИ



32 000+  
М<sup>2</sup> ВЫСТАВОЧНОЙ ПЛОЩАДИ



29 000+  
ПОСЕТИТЕЛЕЙ



500+  
КОМПАНИЙ УЧАСТНИЦ



EXPO.RONKTD.RU



ОРГАНИЗАТОР ФОРУМА  
РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ  
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ  
RONKTD.RU

**IX Международный промышленный форум  
«Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика»  
(Территория NDT-2022)**

**Дата:**

24—26 октября 2022 г.

**Место проведения:**

г. Москва, ЦВК «Экспоцентр», Павильон № 2.4

**Организатор мероприятия:** «РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ» (РОНКТД)

**Анонс мероприятия:**

**Международный промышленный Форум ТЕРРИТОРИЯ NDT** является ведущей в России и СНГ отраслевой площадкой для продуктивного диалога заинтересованных сторон и демонстрации новейших достижений и разработок в области неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга состояния и оценки ресурса.

**Форум «Территория NDT»** в очередной раз пройдет в рамках **Российской Промышленной Недели**, которая объединит следующие выставки: ТЕРРИТОРИЯ NDT, RUSWELD, METROLEXPO, ТЕХНОФОРУМ.

**ТЕРРИТОРИЯ NDT.** Международная специализированная выставка и форум в области технологий и оборудования неразрушающего контроля и технической диагностики.

**RUSWELD.** Международная специализированная выставка оборудования, технологии и материалов для процессов сварки и резки.

**ТЕХНОФОРУМ.** Международная политехническая выставка оборудования и технологий обработки конструкционных материалов.

**METROLEXPO.** Специализированную выставку «Точные измерения – основа качества и безопасности».

**SEMEXPO.** Международная выставка и конференция по технологиям, стандартам и оборудованию в области микроэлектроники.

**Российская Промышленная Неделя 2022** соберет в «Экспоцентре» более **32 000 специалистов**. На выставочной площади свыше **28 000 тыс. кв. м** будут представлены более **500 компаний-участников**. Синергия тематик, экспозиций и деловых программ сделает мероприятие уникальным пространством для ознакомления с передовыми технологиями, обсуждения отраслевых задач, расширения круга потенциальных заказчиков и полезных контактов.

Конгрессная часть Форума охватывает все отраслевые направления и аспекты: академическая наука и разработки, производство и технологии, метрология и стандартизация, подготовка студентов и поддержка молодых ученых, подготовка, квалификация, аттестация и сертификация специалистов, поддержка отечественных разработчиков и создание эффективных механизмов решения общих для всех вопросов. Каждому из этих направлений будут посвящены круглые столы, заседания, совещания и встречи, в которых будут участвовать специалисты из всех регионов России, а также наши зарубежные коллеги.

В программе 2022 года традиционно запланированы значимые мероприятия. Среди них:

**Молодежная Научная Конференция**, на которой выступят молодые ученые, аспиранты и специалисты из разных регионов России с докладами, отобранными Программным комитетом.

**Всероссийский Конкурс РОНКТД выпускных квалификационных работ «Новая генерация 2022»** — подведение итогов и награждение победителей на пленарном заседании Форума.

**Финальный этап Всероссийского Конкурса РОНКТД по неразрушающему контролю «Дефектоскопист 2022».** Конкурс специалистов неразрушающего контроля (НК) проходит при поддержке Ростехнадзора и Минпромторга России, в Оргкомитет и жюри Конкурса входят представители ПАО «Газпром», ПАО «Транснефть», ОАО «РЖД».

**Собрание Гильдии производителей средств НК.** В Гильдию входят директора компаний-разработчиков и производителей средств и технологий НК в РФ, которые заинтересованы в обсуждении с коллегами общих для всех руководителей вопросов, а также в выработке стратегии поддержки отечественных производителей и представлении их интересов с использованием ресурсов РОНКТД.

**Заседания Технического комитета по стандартизации ТК 371 «Неразрушающий контроль» и его 12 подкомитетов**, в которых примут участие около 100 ведущих компаний из различных отраслей экономики — членов ТК 371.

Собственная Деловая программа **Форума «ТЕРРИТОРИЯ NDT»** традиционно будет посвящена самым актуальным тенденциям развития неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния, отраслевой специфике существующих решений, технологиям автоматизации и цифровизации средств НК.

Выставка оборудования и технологий объединит более 60 компаний — разработчиков и поставщиков российских и зарубежных брендов, сервисные учебные и сертификационные центры, ВУЗы, НИИ, специализированные издания. Ежегодно экспозицию посещают более 2500 специалистов и экспертов.

**Приглашаем Вас внести в календарь актуальные даты и бронировать свое участие в Форуме «ТЕРРИТОРИЯ NDT» в 2022 году!**

**Контактные данные:**

Дирекция РОНКТД

Тел.: +7 (499) 245-56-56

E-mail: [info@ronktd.ru](mailto:info@ronktd.ru)

Сайт: [www.expo.ronktd.ru](http://www.expo.ronktd.ru)

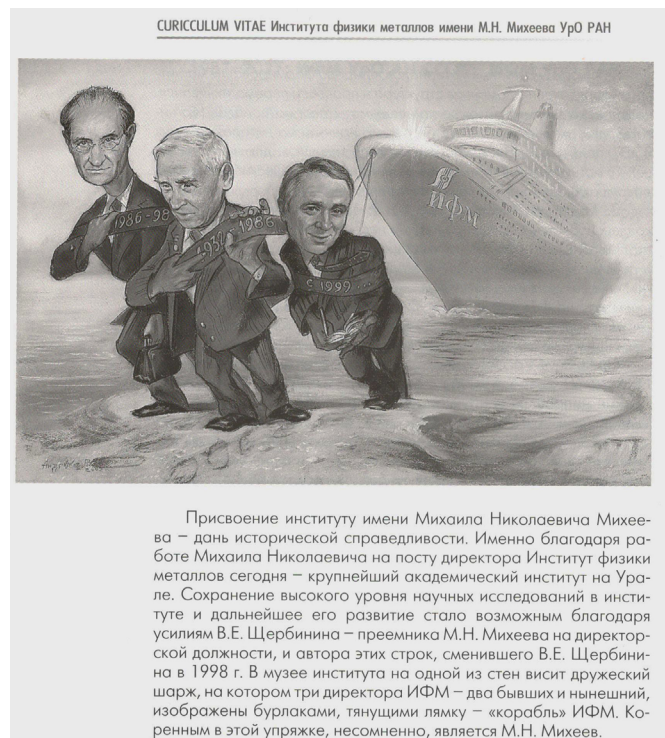


Родился Виталий Евгеньевич 1 января 1938 года в небольшом поселке Петухово в Курганской области на самой границе с Казахстаном. И после окончания школы в Петухово отправился в город Свердловск, с которым связал всю свою дальнейшую жизнь. Вначале был физико-математический факультет Уральского государственного университета им. А.М. Горького. В УрГУ студент Щербинин учился с интересом, ведь там преподавали такие маститые ученые, как Сергей Васильевич Вонсовский, Михаил Николаевич Михеев, Рудольф Иванович Янус и другие. От них, создавших в годы Великой Отечественной Войны так необходимые для оборонной промышленности методы и приборы неразрушающего контроля танковой брони, торпед и снарядов, перешло Щербинину увлечение этим новым тогда научным направлением — магнитным неразрушающим контролем, ставшим определяющим для него на всю жизнь.

В 1959 г. дипломированным специалистом В.Е. Щербинин приходит в Институт физики металлов АН СССР в лабораторию технического электромагнетизма, которую возглавлял Рудольф Иванович Янус. В ИФМ Щербинин продолжил работу, начатую еще во время подготовки к защите диплома под руководством Януса. Разработка и применение феррозондовых локальных датчиков позволяла находить микродефекты в различных изделиях как после изготовления, так и в процессе эксплуатации. Эта тема была главной и при защите диссертаций на степень и кандидата и доктора технических наук. Только в докторской работе добавился огромный пласт результатов по магнитографическому контролю дефектов и по определению толщины и качества различных защитных покрытий. После защиты докторской диссертации он становится заведующим лабораторией дефектоскопии, одной из ведущих лабораторий отдела неразрушающего контроля.

С первых дней работы в Институте Виталий Евгеньевич принимает самое активное участие в общественной и культурной жизни трудового коллектива. Успешная работа в профкоме и парткоме делает его одним из молодых и энергичных лидеров ИФМ, к мнению которого прислушиваются и к которому обращаются за помощью и советом.

В научной работе ему также сопутствует успех благодаря настойчивому и вдумчивому труду. За разработку и внедрение новых методов магнитного контроля дефектов в 1996 г. он в составе коллектива ученых удостоивается Премии Правительства Российской Федерации. До этого в 1990 году он избирается членом-корреспондентом Академии Наук СССР. А еще раньше, в 1986 г., Виталий Евгеньевич Щербинин становится директором своего родного Института физики металлов, который он возглавлял в самые трудные 80-е и 90-е годы. Главным в его работе становится забота о сохранении Института. С этой задачей он успешно справился, отстаивая каждого сотрудника, оборудование института, здания института и само его существование.



В.Е. Щербинин являлся признанным авторитетом в области неразрушающего контроля. Выполнил цикл фундаментальных исследований в области магнитопорошковой, магнитографической и магнитоферрозондовой дефектоскопии, магнитной толщинометрии и структурного анализа. Дефектоскопические установки, выполненные под его руководством, в т.ч. для контроля цельнотянутых и электросварных труб, использованы на многих заводах РФ и ближнего зарубежья. Десятки российских и международных конференций были проведены под его руководством. Он — автор около десятка научных монографий и учебных пособий для студентов, аспирантов и специалистов в области неразрушающего магнитного контроля. Более 200 работ опубликованы им в соавторстве с сотрудниками ИФМ в различных журналах. Подготовил 12 кандидатов наук. Имеет 49 авторских свидетельств на изобретения. Автор более 200 печатных работ, в т.ч. 4 монографий. В.Е. Щербинин более четверти века был главным редактором журнала «Дефектоскопия», который издается как на русском языке, так и на английском для специалистов за рубежом (с 1986 по 2016 г.).

Наука Урала, 1982, 29 апр

## «АВТОРЫ БЛАГОДАРЯТ РЕЦЕНЗЕНТА...»

Каждую пятницу в 9 часов утра в кабинете директора Института физики металлов, члена-корреспондента АН СССР Михаила Николаевича Михеева появляется черный, выдавший виды редакционный портфель, туго набитый конвертами. В каждом конверте — статья. Приходит В. Н. Щенников — бессменный заведующий редакцией журналов, приходят доктора наук И. А. Халилеев, В. В. Власов, Н. М. Родигин, А. З. Райхман, кандидаты физико-математических наук Ю. Ф. Пономорев, Ю. А. Вдовин и автор заметки. Статьи ложатся на стол, начинается работа. Каждая из них тщательно обсуждается и получает по заслугам: «Принять», «Отклонить», «Авторам на доработку». И так из месяца в месяц, из года в год, вот уже на протяжении 17 лет.

Решение о создании общесоюзного академического журнала «Дефектоскопия» было принято в 1964 году. Главным редактором был назначен профессор Рудольф Иванович Янус, а базовым институтом — Институт физики металлов. В этом сказались признание больших заслуг института, лично Р. И. Януса и созданной им школы.

Помню, в решении Президиума АН СССР названия журнала еще не было, и В. Н. Щенников сочинил и распространил анкету, в которой просил придумать такое название, у которого была бы хорошая аббревиатура. Последствия показали, что аббревиатура не требуется. Между прочим, за рубежом журналы подобного профиля называются «Неразрушающие методы контроля». И наш журнал — а он переводится в Англии и США — называется «Рус-

ле. Но не менее ценными являются вести из заводских лабораторий, из цехов — о результатах внедрения, опыте работы, проблемах, «узких» местах.

«Отменить». Чего греха таить, нередко математические упражнения выдаются за подлинную науку. Научная статья ценна идеями, полезными для практики, а не этажностью формул.

«Авторам на доработку». Чаще всего подобные статьи возвращаются с припиской: «Авторы благодарят рецензента за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи». Очень приятно. Давайте улучшать статьи, улучшать журнал, улучшать нашу работу на научно-технических прогресс.

**В. ЩЕРБИНИН,**  
ответственный секретарь  
журнала «Дефектоскопия»,  
кандидат физико-математических наук.





ЖУРНАЛУ «ДЕФЕКТОСКОПИЯ» 25 ЛЕТ

## ОСОБАЯ ТЕМА

Первый номер журнала «Дефектоскопия» вышел в феврале 1965 г. Не в январе, а в феврале — потому что журнал выходил 6 раз в год, но в очень скором времени портфель его так разбух, а тираж так увеличился, что Президент АН СССР разрешил сделать его ежемесячным.

Это произошло при нозом редакторе — Михаиле Николаевиче Михееве, который был организатором особого рода: он укрепил позиции журнала, создал Совет по неразрушающему контролю, которому приданы функции национального комитета СССР. Журнал стали переводить за рубежом (США); всякая уважающая себя фирма имеет его в своей библиотеке (впрочем, за рубежом журнал значительно дороже: у нас один номер стоит 1 руб. 50 к., а там — 100 долларов).

Особая тема — содержание журнала. Дефектоскопия есть неразрушающий контроль качества

К выходу в свет первого номера журнала «Дефектоскопия» я имею непосредственное отношение: вместе с А. Доброммысловым мы нарисовали обложку. Хорошо представляли, каким будет внутреннее содержание журнала, но бились над рисунком несколько месяцев. И вот, наконец, появился символ, который до сих пор сохранился на обложке.

А привлек нас к этому делу прекраснейший организатор журнального дела Виктор Николаевич Шенников — первый и бессменный (до безвременной кончины в 1988 г.) зав. редакцией. Это был беспокойный человек; за 10 лет до этого он организовал журнал «Физика металлов и металловедение», через 10 лет после этого — журнал «Экология», а еще через 10 лет — «Расплавы». Но писать о В. Н. Шеникове надо отдельно, это особая тема.

Первым редактором журнала был профессор Рудольф Иванович Янус — умнейший и обаятельнейший человек, признанный лидер неразрушающего контроля в Советском Союзе. О его изобретательности и остроумии в Институте физики металлов ходили легенды, а некоторые остроты до сих пор не утратили актуальности, но и эта тема — для особого разговора...

академический. Основные статьи посвящены фундаментальным исследованиям в области акустических, магнитных, радиоволновых оптических, рентгеновских и других методов контроля. Обсуждаются преимущественно физические основы методов, однако журнал не отказывается от статей и сообщений из заводских лабораторий и цехов. Вот почему журнал охотно выписывают и производственники (к тому же, в нем появляется все больше рекламы).

К работе в журнале привлечены крупнейшие специалисты СССР, что позволяет мне утверждать: научный уровень этого издания является высоким. Каждая статья проходит всесто-

роннее научное рецензирование. Люди, знакомые с этим процессом, знают, насколько деликатные иногда возникают отношения между прогрессивным (как он себя считает) автором и консервативным (как считает автор) рецензентом. Деликатная перепалка между ними иногда на порядок превышает объем статьи и сильно отличается эмоциональным накалом. Так добывается качество.

Есть ли проблемы у журнала? Есть, и немало. Прежде всего, полиграфическая база. Абзацем выше я говорил о рекламе, но увидев фотографию прибора в том виде, как она выглядит в журнале, покупатель вправе усомниться в целесообразности приобретения такого серого и невыразительного... трудно сказать, чего.

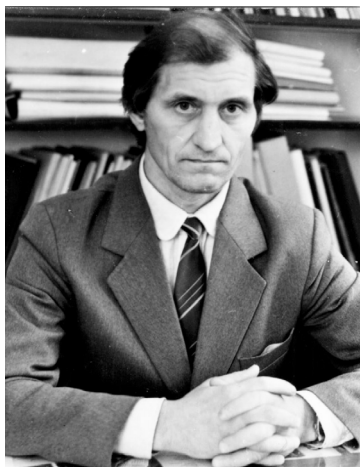
Остается уповать не на форму, а на содержание...

Итак, журналу «Дефектоскопия» — 25 лет. Пожелаем же, чтобы он и в следующие четверть века не утратил своих научных позиций; выразим глубокую благодарность и членам редколлегии, и членам редакции, без нелегкого труда которых не о чем было бы и писать. Но это уже особая тема для нового рассказа.

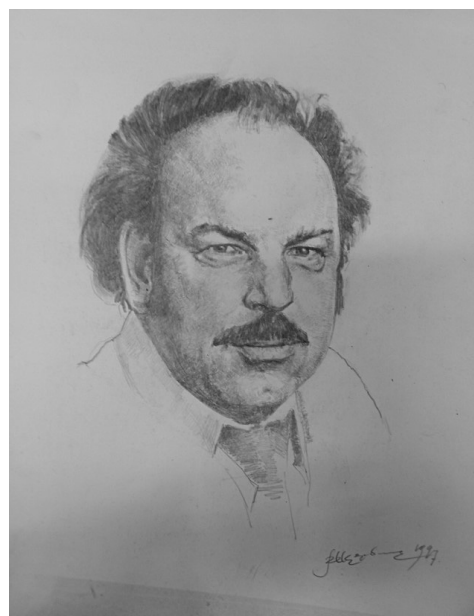
**В. ЩЕРБИНИН,**  
главный редактор  
журнала «Дефектоскопия»,  
профессор.

Его вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований заслуженно отмечен многими правительственными наградами: медалями «За доблестный труд» (1970), «За трудовую доблесть» (1975), орденами «Знак Почета» (1981) и «Дружбы» (2002).

Говоря о Виталии Евгеньевиче Щербинине, нельзя не сказать о его увлечениях, которые удивительным образом сочетались в этом человеке. Эти увлечения суть проявления его разносторонних талантов. Далек за пределами Екатеринбурга и Урала он стал известен как автор множества остроумных коротких стихов. Он являлся основателем и первым руководителем творческого объединения «Вдохновение», которое на протяжении более пятнадцати лет успешно работало в Уральском отделении РАН. Ежегодно в УрО РАН присуждалась солидная денежная премия лучшим ученым — поэтам и писателям, которая также учреждена В.Е. Щербининым. Лучший юмористический журнал страны «Красная бурда» многие годы с удовольствием публиковал его великолепные короткие стихи, рассказы, остроумные мемуары и сонеты.







Я бремя времени тащу,  
Под этой тяжестью сгибаюсь,  
Еще пытаюсь — улыбаюсь,  
Но чаще сумрачно ропщу.

Друзья куда-то подевались,  
Не то чтобы перевелись,  
А просто как-то рассосались  
И по ячейкам разбрелись.

И морщу мрачное чело,  
Как будто это мне пристало,  
И от чего-то тяжело,  
И руки валятся устало.

... А просто прошлое прошло,  
А будущее — не настало.



Кроме удивительного поэтического дара, который отражен более чем в двух десятках книг и литературных журналах, Виталий Евгеньевич Щербинин также был признанным художником и графиком. Екатеринбургское отделение Союза художников России регулярно проводило выставки с его участием.

Тяжело сознавать, что на этом свете не стало замечательного человека, наделенного столь яркими талантами. Не стало Виталия Евгеньевича Щербинина — прекрасного Ученого и мудрого Учителя.

Редколлегия