

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2:543.423

**А. А. КУЗНЕЦОВ  
А. С. БРЮХОВА  
К. В. УСАЧЕВА  
Д. В. МУРАВЬЕВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИДЕНТИЧНЫХ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЙ

В работе рассмотрены способы учета внешних условий на примере анализа видеоизображений и дальнейшей математической обработки результатов спектрального анализа материалов. Целью их применения является повышение точности и воспроизводимости результатов измерений в условиях изменения влияющих факторов. Предложена структурная схема спектрометра, оснащенного датчиками для контроля изменения внешних факторов. Приводятся данные эксперимента, подтверждающие эффективность предлагаемых решений.

**Ключевые слова:** спектральный анализ материалов, датчики условий эксперимента, контроль параметров плазмы, обработка видеоизображения, повышение точности результатов анализа.

Повышение точности спектрального анализа материалов связано с выполнением ряда требований. На каждом из этапов проведения анализа начиная от пробоподготовки, энергетического воздействия на исследуемый материал, регистрации спектра, дальнейшей его обработки и интерпретации разработаны правила, влияющие на точность конечного результата — количественного содержания элементов. Снижение составляющих погрешностей конечного результата путем анализа изображения

межэлектродного промежутка при проведении спектрального анализа металлов и сплавов, исследовано в работе [1].

Анализ поверхности образцов перед проведением спектрального анализа выполнен в работе [2]. Исследование различных состояний информативного источника — электрической, лазерной и газовой плазмы, при проведении спектрального анализа и микроанализа представлено в работе [3].

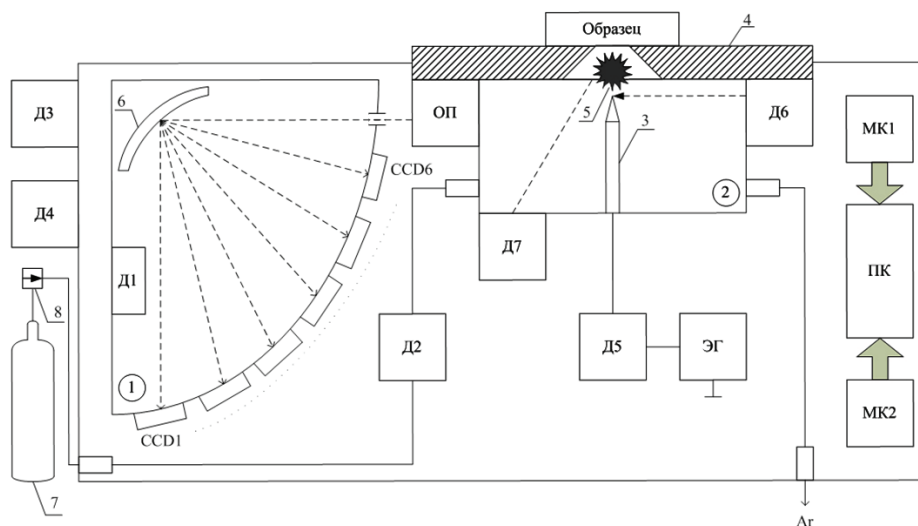


Рис. 1. Схема расположения датчиков в блоке спектрометра

Достижение требуемой точности возможно осуществить двумя способами — математической обработкой конечных результатов, полученных при различных условиях или контролем над факторами, способными внести погрешности в результаты измерений, испытаний и контроля. В работе проводится анализ изображения источника спектрального излучения для решения второй задачи повышения точности и стабильности во времени получаемых результатов. Повышение точности и стабильности проводимых анализов является актуальной задачей.

В работе обсуждается контроль стабильности источника спектрального излучения — низкотемпературной плазмы во время проведения измерений. При изменении условий в приборах спектрального анализа на примере электрического источника спектра меняется объем светящейся плазмы. В работах [1, 4] выполнено исследование факторов влияющих на результаты измерения интенсивностей при спектральном анализе материалов. Применена теория планирования эксперимента и показано распределение значимости различных факторов, влияющих на изменение интенсивности спектрального излучения.

Качественная оценка работы и аспекты автоматизации атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием видеоконтроля приведены в работе [2]. Основным параметром контроля с возможностью регулирования выбрано расстояние от противозлектрода до анализируемого образца.

С целью повышения стабильности работы спектрального оборудования авторами изобретения [3] предложено оснащать технические средства наборами датчиков различных величин, контроль которых во время проведения анализов обеспечивает высокую воспроизводимость результатов при возможном изменении условий проведения эксперимента. На рис. 1 показана структурная схема эмиссионного спектрометра, оснащенного набором датчиков, дополнительно используемых совместно с прибором.

Указанная цель в предлагаемом устройстве достигается тем, что к прибору спектрального анализа подключается семь датчиков, передающих данные в блок обработки данных влияющих факторов. Подключаемые датчики измеряют следующие параметры: Д1 — датчик, измеряющий давление аргона

в оптическом блоке спектрометра; Д2 — датчик, контролирующий расход аргона при проведении анализа; Д3 — датчик, измеряющий температуру воздуха в помещении при проведении анализа; Д4 — датчик, измеряющий атмосферное давление воздуха в помещении при проведении анализа; Д5 — датчик, измеряющий силу тока, его частоту и форму импульсов, поступающих с генератора, передающий данные на цифровой осциллограф; Д6 — датчик, контролирующий положение электрода относительно образца и форму электрической дуги; Д7 — датчик, контролирующий положение образца и наличие дефектов на поверхности в предполагаемом месте анализа.

Датчик давления Д1 располагается внутри герметичного оптического блока 1, в котором также находятся дифракционная решетка 6 и приемники излучения CCD1 — CCD6. Датчик расхода Д2 устанавливается на трубопровод подачи аргона в камеру разряда 2 прибора. Датчики температуры Д3 и влажности Д4 крепятся к наружной стороне спектрометра. Датчик электрических параметров разряда Д5 располагается в цепи протекания тока от электрического генератора ЭГ к вольфрамовому противозлектроду 3. Датчики Д6 и Д7 представляют из себя короткофокусные эндоскопы, расположенные таким образом, чтобы обеспечить нужный обзор поверхности анализируемого образца, установленного на стол 4 и облака разряда 5.

Устройство работает следующим образом. После установки анализируемого образца на предметный столик 4 на экран ПК передается его изображение с датчика Д7. При этом, в случае неправильной установки или присутствия дефектов поверхности (пятен предыдущих обжигов и др.), будет выдано соответствующее предупреждение, полученное на основе анализа изображения, получаемого с датчика Д7. При загорании электрического разряда при помощи датчика Д6 измеряется расстояние между анализируемым образцом и электродом, а также регистрируется размер облака разряда.

Более подробно в работе представлены данные эксперимента по обработке изображения низкотемпературной плазмы во время проведения анализов и делаются выводы по повышению точности измерений количественного состава определяемых элементов.

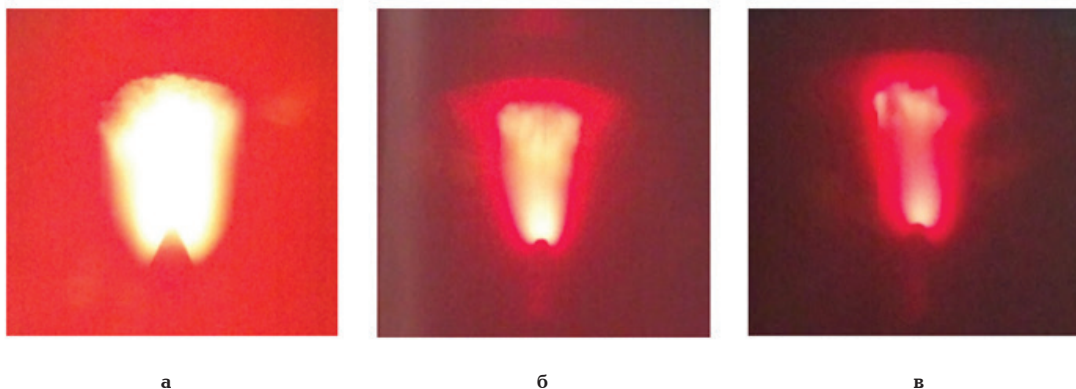


Рис. 2. Изображения низкотемпературной плазмы при различных режимах работы генератора: в «Сильном» (а), «Нормальном» (б) и «Слабом» (в)

В работе выполнено исследование работы спектрометра типа «Аргон-5СФ» в различных режимах. Для регистрации изображения использована высокоскоростная видеокамера типа «Наногейт-2В». В качестве испытуемых использовались корректировочные образцы методики «Стали низколегированные» типа уг4к, уг6к, уг9к, RE16-34. В качестве различных условий задавались «Нормальный», «Сильный» и «Слабый» режимы, которые имитируют возможное изменение режима работы высоковольтного искрового генератора или изменения режима, вызванного некачественной подготовкой рабочей поверхности исследуемого материала.

Изображения низкотемпературной плазмы в различных режимах, снятые при помощи ослабляющего оптического светофильтра, приведены на рис. 2а–в.

Для идентификации режима обескисливания на изображении необходимо определить область, соответствующую площади светящейся плазмы. Для выделения светящейся области выполняется анализ цветового состава изображения и выделение характерных базовых цветов. Среди набора базовых цветов определялся цвет, соответствующий цвету светящейся плазмы, и оценивалась площадь ее изображения.

Выделение базовых цветов изображения выполнялось при помощи метода кластеризации. Изображение интерпретируется как набор точек, каждая точка которого характеризуется трехмерным вектором интенсивности цветовых компонентов  $[R_r, G_r, B_r]$ . Задача кластеризации сводится к разбиению точек на  $k$  групп, среднее значение цветовых компонентов в каждой группе соответствует базовому цвету данной группы (центру кластера).

Для кластеризации использовался метод  $k$ -средних [5–7]. На первом шаге алгоритма выбирается  $k$  точек изображения, которые служат начальными центрами кластеров. Для достижения оптимального разбиения при выборе центров необходимо стремиться к достижению между ними максимального расстояния. Каждая точка изображения помещается в кластер, расстояние до центра которого является минимальным.

После разделения всех точек на кластеры вычисляются новые координаты центров, и процесс повторяется. Повторения в алгоритме осуществляются до тех пор, пока координаты кластеров не станут постоянными. В результате каждая точка помещается в кластер, центр которого соответствует базовому цвету изображения.

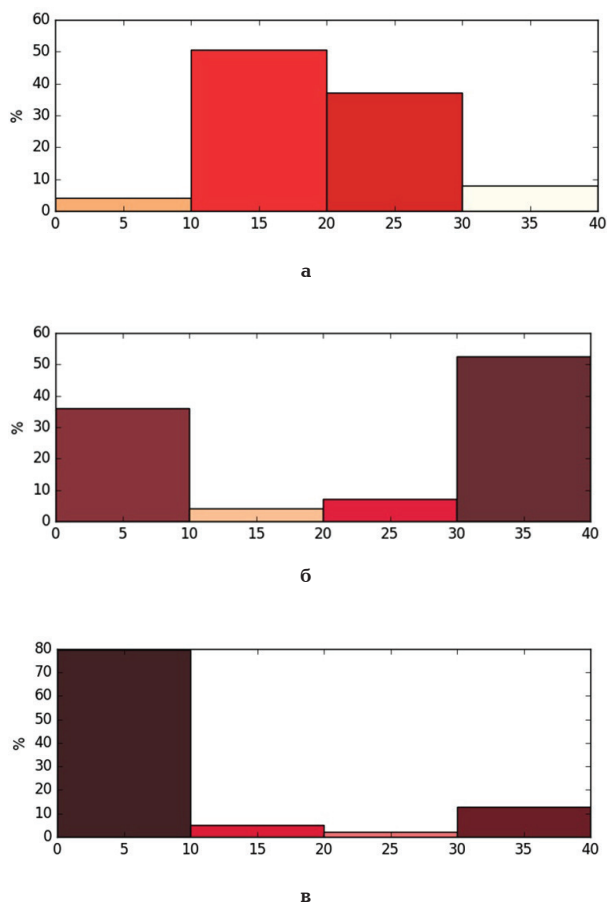


Рис. 3. Количественная оценка площади светящейся плазмы в «Сильном» (а), «Нормальном» (б) и «Слабом» (в) режимах генератора

Результат действия алгоритма приводит к тому, что суммарное квадратичное отклонение точек от центра кластера минимизируется:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k$  – число кластеров;  $S_i$  – полученные кластеры;  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $\mu_i$  – центры кластеров точек  $x_j \in S_i$ .

На рис. 3а–в представлены гистограммы анализа изображений, соответствующих рис. 2а–в.

Таблица 1

**Параметры спектральных линий, используемых для градуирования**

Элемент	Длина волны, нм
Линии анализируемых элементов	
<i>C</i>	193,09
<i>Si</i>	211,696
<i>Mn</i>	293,691
<i>Cr</i>	267,716
<i>Ni</i>	341,477
Линии сравнения	
<i>Fe</i>	192,59
<i>Fe</i>	208,412
<i>Fe</i>	292,659
<i>Fe</i>	322,207

Таблица 2

**Коэффициенты устойчивого градуирования**

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
<i>C</i>	0,10	-0,20	0,99	-0,61
<i>Si</i>	0,10	0,22	0,00	0,95
<i>Mn</i>	0,10	0,59	-0,27	-0,01
<i>Cr</i>	0,10	0,24	0,01	0,05
<i>Ni</i>	0,10	0,39	-0,54	1,00

Таблица 3

**Результаты корреляции градуировочных графиков**

Метод градуирования	Значение $R^2$		
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>
Классический	0,699	0,797	0,995
Предлагаемый	0,837	0,988	1,000

По горизонтальной оси представлены базовые цвета анализируемого изображения. Количество базовых цветов определяется экспериментатором. По вертикальной оси представлена количественная оценка кластеров базовых цветов по отношению к общему количеству кластеров исходного изображения.

Изображения, полученные в различных режимах, отличаются, в первую очередь, температурой электропроводящей области и нагретого газа (измерения проводились в среде особо чистого аргона 99,998 %). В каждом из трех представленных режимов регистрировался свой базовый цвет, соответствующий излучающей плазме. Для упрощения интерпретации полученных результатов для каждого изображения представлено по четыре базовых цве-

та, каждый из которых отличается для разных режимов. Так, область излучающей плазмы составляет 10,3 % для «Сильного», 5,2 % для «Нормального» и 3,8 % для «Слабого» режима работы спектрально-генератора.

В случае, когда все измеренные параметры нормальны (не более 10 % ограниченной площади), конечный результат измерения считается достоверным. Если же значения некоторых параметров выходят за допустимые пределы, необходимо выполнять корректировку градуировочной зависимости по стандартным образцам.

Другой подход при создании виртуальных эталонов — набора реальных стандартных образцов в совокупности с математической моделью, компенсирующей влияние факторов на результат измерения, и ее применения в программном обеспечении автоматизированной системы измерений.

С целью получения инвариантной модели измеряют интенсивности спектральных линий при различных условиях проведения эксперимента. Для получения положительного результата необходимо иметь наибольшее расхождение измеряемых параметров. Для построения модели выбирают спектральные линии с различными энергетическими характеристиками (по-разному влияющие на изменение факторов) [5, 8, 9].

Для учета различных энергетических характеристик спектральных линий было предложено использование обобщенной функции вида:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^N a_i I_{anij}}{\sum_{i=1}^M b_i I_{cpij}} = \frac{a_0 I_{an0j} + a_1 I_{an1j} + \dots + a_N I_{anNj}}{b_0 I_{cp0j} + b_1 I_{cp1j} + \dots + b_M I_{cpMj}}, \quad (2)$$

где  $I_{an}$  — интенсивности спектральных линий анализируемого элемента;  $I_{cp}$  — интенсивности линий сравнения, имеющие различные энергетические показатели;  $a_i$ ,  $b_i$  — весовые коэффициенты устойчивого градуирования;  $N$  — количество линий анализируемого элемента;  $M$  — количество линий сравнения.

Градуировочные характеристики, построенные по предложенной модели, сохраняют стабильность при изменении внешних условий или могут переноситься на приборы одного типа без потери точности, обусловленной индивидуальными параметрами калибровки [10]. В табл. 1–3 приведены результаты эксперимента на стандартных образцах низколегированной стали уг4к, уг6к, уг9к, RE16-34. Градуировочные зависимости получены классическим способом и по выражению (2). Повышение коэффициента детерминации при построении зависимостей на рис. 4 для анализируемых элементов углерода, марганца и никеля подтверждается значениями табл. 3.

Таким образом, в методическом и программном обеспечении современных спектрометров целесообразно использовать двухступенчатый алгоритм повышения точности.

На первом этапе необходимо использовать системы анализа видеоизображения основного источника получения информации — низкотемпературной плазмы. Это обусловлено тем, что дальнейшая математическая обработка способна устранить лишь незначительные изменения условий проведения эксперимента. Возможные грубые отклонения условий следует исключить на первом этапе. Второй этап — математическая обработка параллельных

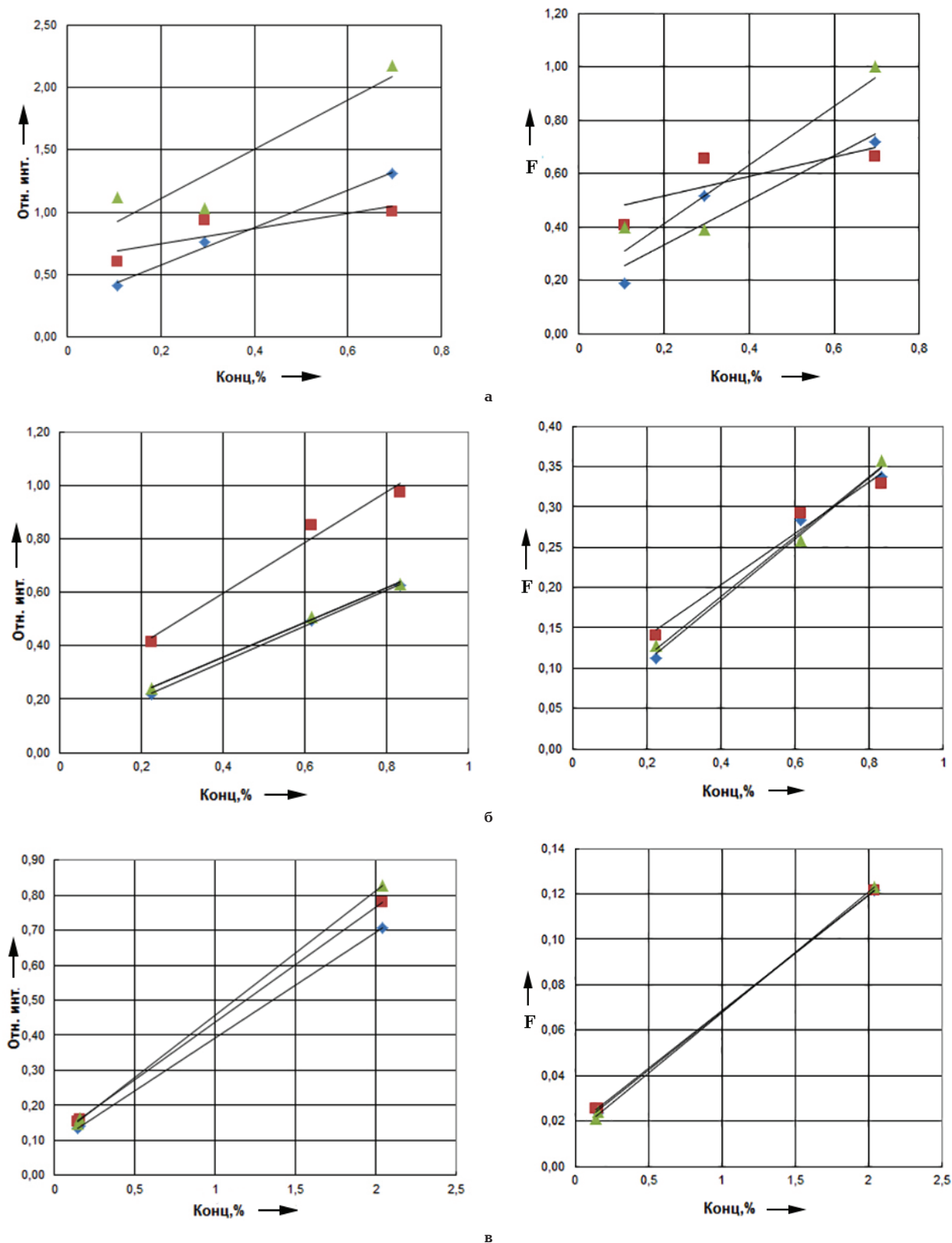


Рис. 4. Градуировочные зависимости анализируемых элементов С (а), Мп (б), Ni (в), полученные классическим и предлагаемым методами

измерений будет более эффективной при устранении грубых отклонений, которые легко устраняются при визуальном анализе видеoinформации, в том числе и в автоматическом режиме.

#### Библиографический список

1. Кузнецов А. А., Мешкова О. Б., Слептерев В. А. Исследование факторов, влияющих на результаты измерения

интенсивностей, при спектральном анализе материалов // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 242–245.

2. Семёнов З. В., Неклюдов О. А., Строков И. И. [и др.]. Программа видеоконтроля процесса атомно-эмиссионного спектрального анализа // Применение анализаторов МАЭС в промышленности: материалы XI Междунар. симп. Новосибирск, 2011. С. 70–73.

3. Пат. 134319 Российская Федерация, МПК G 01 J 3/50. Спектрометр с блоком обработки данных, влияющих

факторов / Кузнецов А. А., Слептерев В. А., Шахов А. В. № 2013104150/28; заявл. 31.01.13; опублик. 10.11.13, Бюл. № 31.

4. Купцов А. В., Заякина С. Б., Сапрыкин А. И. Изучение распределения температуры и интенсивностей спектральных линий аналитов по высоте плазменного факела дугового двух-струйного плазматрона // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 1-II. С. 52–55.

5. MacKay D. Information theory, inference and learning algorithms. Cambridge University Press, 2003. 640 p. ISBN 0521642981, 978-0521642989.

6. Ogura K., Yamamoto S., Iwao T. [et al.]. Motoshige Yumoto Spectrum and number for cathode spot with changing current // 2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS). 2014. 1–1. DOI: 10.1109/PLASMA.2014.7012580.

7. Sasamoto R., Matsumoto T., Izawa Y. [et al.]. Spatial distribution measurement of plasma parameters using spectral image processing // 2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS). 2014. 1–1. DOI: 10.1109/PLASMA.2014.7012626.

8. Кузнецов А. А., Слептерев В. А., Пелезнев А. В. Реализация мобильных градуировочных характеристик приборов спектрального анализа материалов с использованием виртуальных эталонов // Омский научный вестник. 2013. № 3 (125). С. 241–246.

9. White R. G., Nunney T. S., Strohmeier B. R. [et al.]. Automated XPS Analysis of Passivated Stainless Steel to the SEMI

Standard // Microscopy and Microanalysis. July 2010. 16 (Suppl 2). P. 436–437. DOI: 10.1017/S1431927610057569.

10. Кузнецов А. А., Мешкова О. Б., Зачатейский Д. Е. Способ достижения инвариантности градуировочных графиков при определении количественного состава металлов и сплавов автоматизированными системами АЭСА / Омский научный вестник. 2010. № 2. С. 169–172.

**КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: KuznetsovAA@omgups.ru

**БРЮХОВА Анна Сергеевна**, аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: annaivan29@gmail.com

**УСАЧЕВА Ксения Викторовна**, аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: ksu1791@mail.ru

**МУРАВЬЕВ Дмитрий Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава».

Адрес для переписки: MuravjevDV@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2017 г.

© А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, К. В. Усачева, Д. В. Муравьев

УДК 621.37

**В. Л. ХАЗАН**  
**М. Н. КОВАЛЕВА**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## КАНАЛЫ СВЯЗИ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ

Теория «парных эхо» является универсальным математическим аппаратом для анализа линейных и нелинейных явлений в радиотехнических цепях и каналах связи. В данной статье анализируются только линейные искажения, которые могут происходить в среде распространения и в трактах радиоаппаратуры. Каналы связи с переменными параметрами и радиотехнические цепи с нелинейными искажениями предполагается проанализировать в следующих статьях. Ниже исследуется влияние искажений амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик канала связи на вид его импульсной реакции и, наоборот, влияние импульсной реакции на вид амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик. В современной научной литературе по радиотехнике эти вопросы не нашли своего достойного освещения. Рассмотренные в статье конкретные примеры показывают, что искажения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик приводят к многолучевости в канале связи и, наоборот, многолучевость приводит к искажениям амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик канала связи.

**Ключевые слова:** амплитудно-частотная характеристика, фазо-частотная характеристика, импульсная характеристика, многолучевость, опережающий сигнал, запаздывающий сигнал.

Каналы связи [1] и радиотехнические цепи [2] могут быть с постоянными и с переменными параметрами. Если характеристики канала связи с течением времени не меняются, то такой канал связи

считается каналом связи с постоянными параметрами. Канал связи с идеальными амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками не вносит никаких изменений в сигнал, кроме

уменьшения/увеличения его уровня и факта запаздывания за счет времени преодоления этим сигналом среды распространения. Искажения амплитудно-частотной или фазо-частотной характеристики канала связи приводят к искажениям передаваемого по этому каналу связи сигнала, которые заключаются в появлении в точке приема опережающих и запаздывающих относительно основного сигнала его копий, называемых «эхо-сигналами».

Математический анализ вышеуказанного явления, происходящего в каналах связи с линейными искажениями, может быть произведен с помощью так называемой теории «парных эхо» [3, 4].

Рассмотрим канал связи с неограниченной полосой пропускания частот, с косинусоидальными искажениями АЧХ и с линейной крутизной ФЧХ  $\varphi(\omega) = -T\omega$ , как показано на рис. 1а и рис. 1б соответственно.

$T$  — крутизна фазо-частотной характеристики. Этот параметр обуславливает время запаздывания сигнала в канале связи.

АЧХ с косинусоидальными искажениями описывается выражением:

$$K(\omega) = \left[ K_0 + k \cos \left( \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega + \Phi \frac{\omega}{|\omega|} \right) \right].$$

Здесь  $K_0$  — коэффициент передачи канала связи при отсутствии искажений;  $k$  — глубина искажений АЧХ,  $k \leq K_0$ ;  $\Phi$  — начальная фаза искажающей АЧХ косинусоидальной функции, которую в дальнейшем для простоты будем считать равной нулю.

Определим импульсную характеристику канала связи  $g(t)$  путем обратного преобразования Фурье от передаточной функции  $K(j\omega) = K(\omega)\exp(-j\omega T)$ .

$$K(j\omega) = \left[ K_0 + k \cos \left( \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega \right) \right] e^{-j\omega T}.$$

Известно [2], что  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} d\omega = \delta(\tau)$ .

С учетом этого:

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ K_0 + k \cos \left( \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega \right) \right] e^{-j\omega T} e^{j\omega t} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ K_0 + \frac{k}{2} e^{j\frac{2\pi}{\Delta\Omega}\omega} + \frac{k}{2} e^{-j\frac{2\pi}{\Delta\Omega}\omega} \right] e^{j\omega(t-T)} d\omega = \\ &= \frac{k}{2} \delta \left( t - T + \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \right) + K_0 \delta(t - T) + \frac{k}{2} \delta \left( t - T - \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \right). \end{aligned}$$

Из полученного равенства следует, что косинусоидальные искажения АЧХ канала связи приводят к появлению дополнительных двух «эхо-сигналов». Второе слагаемое последней строки равенства соответствует основному сигналу на выходе канала связи, запаздывающему относительно поступающего на вход канала связи сигнала на время  $T$ , которое является средней крутизной фазо-частотной характеристики этого канала связи. Первое слагаемое соответствует сигналу, опережающему основной сигнал на время  $2\pi/\Delta\Omega$ , а последнее слагаемое — сигналу, отстающему от основного сигнала на время  $2\pi/\Delta\Omega$ . При этом уровни опережающего

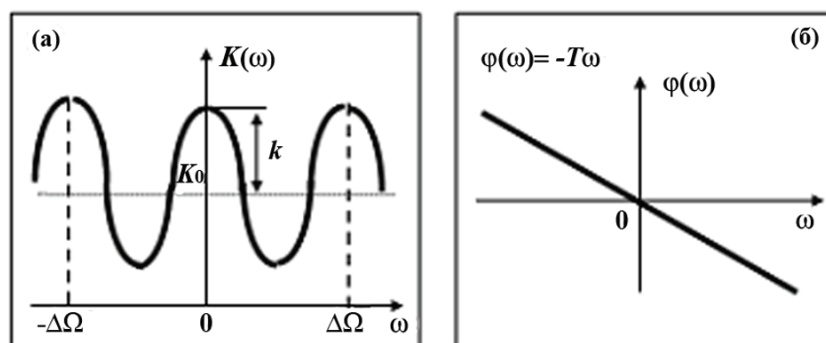


Рис. 1. АЧХ канала связи с косинусоидальными искажениями (а) и ФЧХ канала связи без искажений (б)

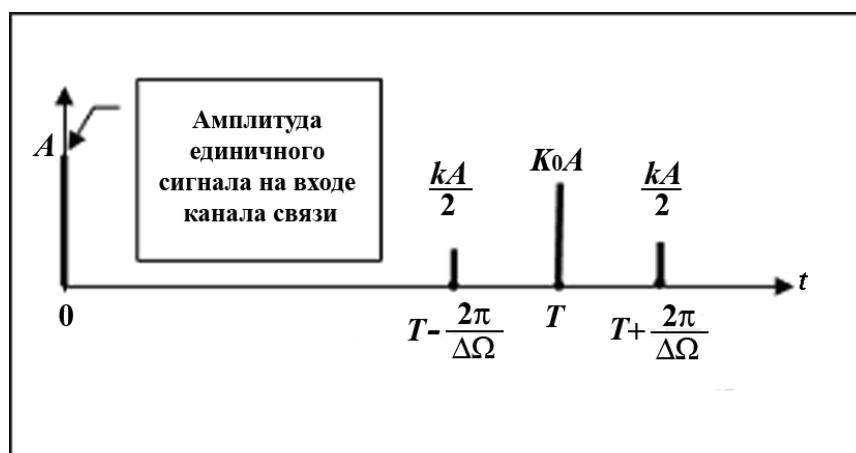


Рис. 2. Трехлучевая выходная реакция канала связи с косинусоидальными искажениями АЧХ на единичное импульсное входное воздействие

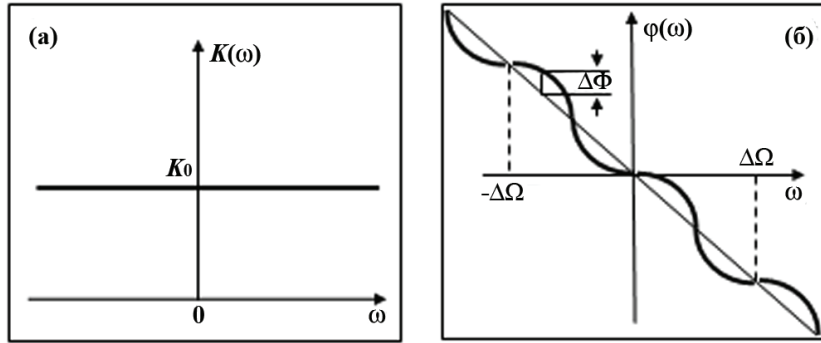


Рис. 3. АЧХ канала связи без искажений (а) и ФЧХ канала связи с синусоидальными искажениями (б)

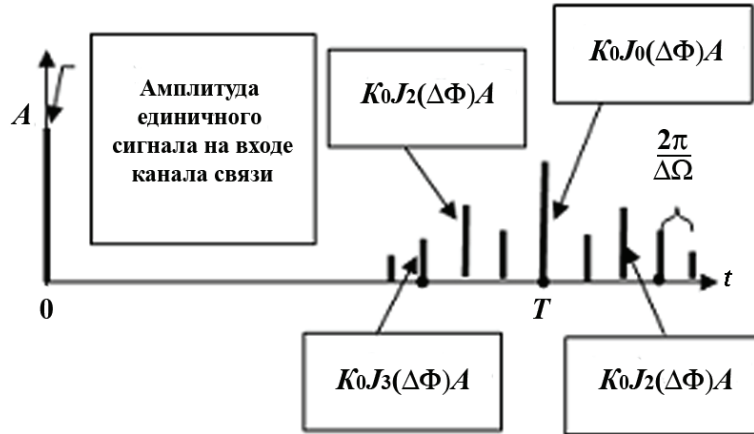


Рис. 4. Многолучевая выходная реакция канала связи с синусоидальными искажениями ФЧХ на единичное импульсное входное воздействие

и отстающего сигналов зависят от амплитуды искажающей функции  $k$ .

Рассмотренный случай соответствует трехлучевому каналу связи с постоянными параметрами. На рис. 2 изображена реакция такого канала связи на единичный импульс, поданный на его вход.

Рассмотрим канал связи с неограниченной полосой пропускания частот, с равномерной (без искажений) АЧХ  $K_0(\omega)$  и с синусоидальными искажениями ФЧХ  $\varphi(\omega)$ , как показано на рис. За и рис. 3б соответственно.

На рис. 3 обозначено:

$\Delta\Phi$  — амплитуда отклонения ФЧХ от среднего значения —  $T\omega$ ;  $\Delta\Omega$  — период искажающей ФЧХ синусоидальной функции.

Изображенная на рис. 3б ФЧХ описывается выражением:

$$\varphi(t) = -T\omega + \Delta\Phi \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega\right).$$

Определим импульсную характеристику  $g(t)$  четырехполюсника с передаточной функцией вида:

$$K(j\omega) = K_0 e^{-jT\omega + j\Delta\Phi \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega\right)}.$$

Возьмем обратное преобразование Фурье от передаточной функции  $K(j\omega)$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_0 e^{-j\left(\omega T - \Delta\Phi \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega\right)\right)} e^{j\omega t} d\omega =$$

$$= \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega(t-T)} e^{j\Delta\Phi \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega\right)} d\omega.$$

Известно [5, 6], что

$$e^{\pm j\alpha \sin \beta} = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(\alpha) e^{\pm jk\beta},$$

где  $J_k(\alpha)$  — функции Бесселя 1-го рода,  $k$ -го порядка для действительного аргумента.

Следует учитывать тот факт, что  $J_k(-x) = (-1)^k J_k(x)$ . То есть функции Бесселя нечетного порядка являются нечетными функциями, а функции Бесселя четного порядка являются четными функциями. С учетом вышеизложенного:

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega(t-T)} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(\Delta\Phi) e^{jk\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \omega} d\omega = \\ &= \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(\Delta\Phi) e^{j\omega\left(t-T+k\frac{2\pi}{\Delta\Omega}\right)} d\omega = \\ &= K_0 \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(\Delta\Phi) \delta\left(t-T+k\frac{2\pi}{\Delta\Omega}\right). \end{aligned}$$

Из полученного равенства следует, что синусоидальные искажения ФЧХ канала связи приводят к появлению бесконечного числа дополнительных компонентов, которые по форме не отличаются



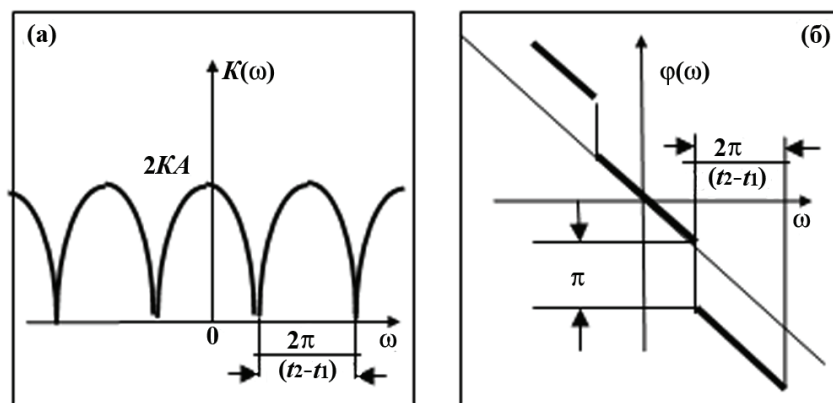


Рис. 5. АЧХ (а) и ФЧХ (б) двухлучевого канала связи

от основного сигнала, но по времени опережают и отстают от него. Необходимо заметить, что при определенном значении амплитуды, искажающей ФЧХ синусоиды, уровни отдельных дополнительных сигналов по порядковому номеру  $n$  от основного (нулевого) сигнала могут принимать значение, равное нулю, когда соответствующие им функции Бесселя  $J_n(\Delta\Phi) = 0$ . Время отставания и время опережения всех дополнительных сигналов относительно основного кратно значению  $2\pi/\Delta\Omega$ . На рис. 4 изображена реакция на единичный импульс канала связи с синусоидальными искажениями ФЧХ.

Многие каналы связи отличаются многолучевостью, вызванной отражением радиоволн от неоднородностей среды распространения сигнала, например, от ионосферы или от каких-либо крупногабаритных объектов, например, зданий, расположенных вдоль линии радиосвязи.

Многолучевоcть приводит к селективным замираниям сигнала [7].

Рассмотрим частный, но часто встречающийся на практике случай канала связи с двухлучевым распространением радиоволн. Пусть в точку приема сигнал поступает двумя различными путями, которые имеют разное время распространения радиоволн  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно. Не нарушая общности, для упрощения, начальную фазу всех спектральных составляющих сигналов в отдельно взятых лучах будем считать равной нулю. В этом случае импульсная характеристика канала связи будет описываться выражением:

$$g(t) = K_1\delta(t - t_1) + K_2\delta(t - t_2).$$

При передаче гармонического сигнала

$$S_{\text{пер}}(t) = A \cos(\omega t)$$

в точке приема будет иметь место сигнал:

$$S_{\text{пр}}(t) = K_1 A \cos(\omega(t - t_1)) + K_2 A \cos(\omega(t - t_2)).$$

Известно [9], что  $\cos x + \cos y = 2 \cos \frac{(x+y)}{2} \cos \frac{(x-y)}{2}$ .

Поэтому для частного случая, когда  $K_1 = K_2 = K$ , можно записать:

$$S_{\text{пр}}(t) = 2KA \cos \left[ \omega \left( t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right] \cos \frac{\omega(t_2 - t_1)}{2}. \quad (1)$$

Согласно этому выражению, АЧХ двухлучевого канала связи с равным уровнем лучей описывается выражением:

$$K(\omega) = 2K \left| \cos \frac{\omega(t_2 - t_1)}{2} \right|.$$

График АЧХ, соответствующий этому выражению, приведен на рис. 5а.

Согласно полученному выше выражению (1) время группового запаздывания  $T$ , обуславливающее крутизну ФЧХ, равно  $T = \frac{t_1 + t_2}{2}$ . Но второй косинусоидальный множитель в выражении (1) каждые полпериода меняет свой знак. Это говорит о том, что ФЧХ в этих точках скачком меняет свое значение на  $\pi$ . ФЧХ двухлучевого канала связи с равным уровнем лучей приведена на рис. 5б.

Таким образом, искажения АЧХ и ФЧХ канала связи являются причиной его многолучевости и наоборот — многолучевоcть канала связи является причиной искажения как АЧХ, так и ФЧХ этого канала связи.

Косинусоидальные искажения АЧХ канала связи приводят к появлению двух эхо-сигналов, которые располагаются по оси времени симметрично относительно основного сигнала, время запаздывания которого обусловлено крутизной ФЧХ этого канала связи. Время опережения и запаздывания эхо-сигналов обусловлено периодом искажающей АЧХ косинусоиды.

Синусоидальные искажения ФЧХ канала связи приводят к появлению бесконечно большого числа эхо-сигналов, которые располагаются по оси времени симметрично относительно основного сигнала, время запаздывания которого обусловлено средней крутизной ФЧХ канала связи.

Время опережения и запаздывания эхо-сигналов кратно величине  $2\pi/\Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  период искажающей ФЧХ синусоиды. Уровень эхо-сигналов, появляющихся в результате искажений АЧХ и ФЧХ, зависит от амплитуд, искажающих эти характеристики гармонических функций.

Чтобы избежать рассеяния сигналов на выходе трактов аппаратуры необходимо добиваться минимальных отклонений их АЧХ и ФЧХ от идеальных форм, соответственно равномерной и линейной. Необходимо иметь в виду, что многолучевоcть канала связи приводит к селективным искажениям его АЧХ, что требует принятия специальных мер для адаптации приемной аппаратуры к такого рода условиям связи.

Приложение  
 Формулы, которые могут быть  
 использованы при теории «парных эхо» [8–11],

$$\begin{aligned} \sin(\alpha \sin \beta) &= 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\alpha) \sin[(2n+1)\beta] \\ \cos(\alpha \cos \beta) &= \\ &= J_0(\alpha) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\alpha) \cos 2n\beta \\ \sin(\alpha \cos \beta) &= 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(\alpha) \cos[(2n+1)\beta] \\ e^{\pm j\alpha \sin \beta} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha) e^{\pm jn\beta} \\ e^{\pm j\alpha \cos \beta} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\pm j)^n J_n(\alpha) e^{\pm jn\beta} . \end{aligned}$$

#### Библиографический список

1. Хазан В. Л. Каналы связи: Модели, линейные и нелинейные искажения. Омск: Изд-во Palmarium Academic Publishing, 2015. 230 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Изд. 4, испр. и доп. М.: Радиотехника, 2016. 528 с. ISBN 978-5-9710-2464-4.
3. Farnett E. C., Stevens G. H. Pulse compression radar. Chapter 10 / M. I. Skolnik (Ed.-In-Chief) // Radar Handbook. 2nd ed. McGraw-Hill, NY, 1990. P. 10.1–10.39.
4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Советское радио, 1971. 568 с.

5. Корнев Б. Г. Введение в теорию бесселевых функций. М.: Наука, 1971. 287 с.
6. Картьяну Г. Частотная модуляция. Бухарест: Изд-во Акад. Румынской Народной Республики, 1961. 578 с.
7. Ramoni Adeogun. Multipath parameter estimation and channel prediction for wideband mobile to mobile wireless channel // Wseas transactions on communications. 2014. Vol. 13. P. 201–207.
8. Справочник по специальным функциям / Под ред.: М. Абрамовиц, И. Стриган; пер. с англ. под ред.: В. А. Диткина, Л. Н. Кармазиной. М.: Наука, 1979. 830 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: пер. с англ. М.: Наука, 1968. 720 с.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 544 с.
11. Хазан В. Л. Методы и средства проектирования каналов декаметрового радиосвязи: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2009. 358 с.

**ХАЗАН Виталий Львович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность». Адрес для переписки: vlhazan@yandex.ru  
**КОВАЛЕВА Марина Николаевна**, магистрант гр. ИСм-161 факультета «Элитное образование и магистратура». Адрес для переписки: marisha92@bk.ru

Статья поступила в редакцию 09.10.2017 г.  
 © В. Л. Хазан, М. Н. Ковалева

## Книжная полка

**Русинов, М. М. Техническая оптика / М. М. Русинов. – 2-е изд. – М. : Едиториал УРСС, 2017. – 488 с. – ISBN 978-5-397-05887-2.**

Вниманию читателей предлагается книга выдающегося ученого-оптика М. М. Русинова, в которой нашел отражение накопленный автором опыт практической разработки оптических систем. В первой, второй и третьей частях книги рассмотрены общетеоретические вопросы геометрической оптики, но применительно к большим полям зрения и апертурам. Четвертая часть посвящена изучению свойств отдельных конструктивных оптических элементов и узлов, в том числе поверхностей несферической формы. В пятой части дана классификация простейших оптических систем и рассмотрена композиция объективов различного рода и назначения. В книге приведено большое число практических примеров, иллюстрирующих те или иные теоретические выводы. Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений оптических специальностей, а также инженерно-технических работников, занимающихся расчетом оптических систем и конструированием оптических приборов.

**Жуков, В. К. Метрология. Теория измерений : учеб. пособие / В. К. Жуков. – М. : Юрайт, 2017. – 414 с. – ISBN 978-5-534-03865-1.**

В данном учебнике рассматриваются вопросы теоретической метрологии. В первых двух главах учебника приведены необходимые сведения по разделам математики, на которых в основном базируется теория измерений. Это теория вероятностей и теория множеств. Рассмотрение собственно теории измерений начинается с изучения физических величин, единиц и систем единиц физических величин, эталонов единиц. Далее в главах 5, 6 и 7 последовательно излагаются вопросы формирования, преобразования и передачи измерительных сигналов по каналам связи. В главах 8 и 9 рассматриваются шкалы измерения и общие вопросы средств измерения без привязки их к конкретным реализациям. Большое внимание в учебнике уделено вопросам статических (гл. 10) и динамических погрешностей (гл. 11), расчетному (гл. 12) и экспериментальному (гл. 13) нормированию инструментальной погрешности.

# ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ 3D ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ

Статья посвящена вопросам построения многоканальных гибридных 3D измерительных головок (ИГ) для контактных и бесконтактных координатных измерений на координатных измерительных машинах (КИМ). В такой головке внутри полого рубинового сферического наконечника радиусом  $r_n$  размещен многоканальный волоконно-оптический преобразователь (ВОП), состоящий из  $n$  волоконных каналов с одним центральным и набором из  $q$  окружающих его рядов световодов с суммарной угловой апертурой  $\pm\pi/2$ . Проведен анализ работы ИГ в режиме контактных измерений, осуществляемых традиционно за счет механического контактирования рубинового наконечника с поверхностью изделия и работы ИГ при бесконтактных измерениях волоконными каналами за счет их переключения.

Рассмотрены конструктивные вопросы создания двух вариантов ВОП: т.н. «грибовидного», выпуклого и чашевидного, вогнутого.

**Ключевые слова:** координатная измерительная машина, координатные измерения, измерительная головка, головка касания, волоконно-оптический преобразователь, микролинза, низкокогерентный интерферометр.

**Введение.** Повышение точности и функциональных возможностей измерительных головок (ИГ) для координатных измерений размеров изделий сложной формы на координатно-измерительных машинах (КИМ) является актуальной задачей для ракетно-космической отрасли, а также машино-, станко- и приборостроения.

Работы [1, 2] посвящены вопросам создания и исследования бесконтактных одноканальных ИГ и гибридной 3D измерительной головки на её основе [3] с формированием пространственно-чувствительной полусферы. Существенным ограничением такого направления являются большая диаграмма направленности (угловая апертура) излучения и приема света, равная  $\pm\pi/2$  и, соответственно, малый уровень полезного сигнала и соотношение сигнал/шум, обуславливающие необходимость повышения мощности источника излучения до сотен мВт [3]. Альтернативное направление может быть связано с развитием многоканальных ИГ, вопросам построения которых посвящена данная статья.

**1. Конструкция многоканальной гибридной 3D измерительной головки и принцип её работы.** Многоканальная гибридная 3D измерительная головка является механическим устройством, реализующим возможности контактной ИГ и встроенного многоканального ВОП с полусферической угловой апертурой и возможностями бесконтактной ИГ. Они осуществляют два разных принципа действия, описание каждого из которых представлено далее.

*1.1. Измерения размеров изделий в режиме контактной ИГ.*

Проведение контактных измерений данной измерительной головкой во многом подобно одноименному процессу для одноканальной ИГ [3]. В процессе этого используется механическая конструкция ИГ (рис. 1), состоящая из электромеханического формирователя сигнала 1, измерительного стержня 2 со сферическим рубиновым наконечником 3 радиусом  $r_n$ .

При подведении рубинового наконечника 3 к поверхности изделия 4, в момент касания с ней формирователем сигнала 1 формируется триггерный выходной сигнал  $U_{вых} \sim 1(r - r_n)$  для измерения и оцифровывания точки касания по трем координатам КИМ:  $I_x$ ,  $I_y$  и  $I_z$ . Весь процесс измерений состоит из последовательности подобных измерений с формированием набора оцифрованных точек:  $(I_{x1}; I_{y1}; I_{z1})$ ,  $(I_{x2}; I_{y2}; I_{z2}) \dots (I_{xn}; I_{yn}; I_{zn})$ , с помощью которых оцениваются отклонения от заданных размеров изделия.

*1.2. Измерения размеров изделий в режиме бесконтактной ИГ.*

Часть многоканальной гибридной 3D измерительной головки, работающей в режиме бесконтактной ИГ (рис. 1, 2), включает следующие узлы: бесконтактный измеритель 5, оптический переключатель 10, фотоприемники ПЗС 11, светодиод 12, сканирующий интерферометр 13 и управляемую линию задержки 14.

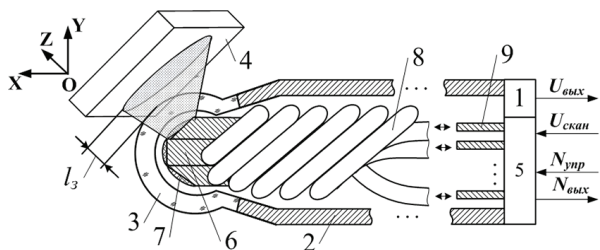


Рис. 1. Схема ИГ с измерительным наконечником на основе семиканального ВОП при проведении бесконтактных измерений

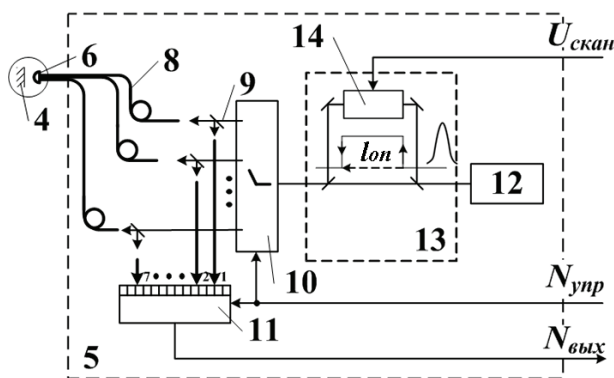


Рис. 2. Схема многоканальной гибридной 3D измерительной головки

Принцип действия многоканальной 3D измерительной головки основан на переключении каналов ВОП (последовательно или по специальному алгоритму) и проведении измерений во время подключения каждого канала бесконтактным измерителем 5.

Это реализовано при совместном использовании с одним низкокогерентным интерферометром, подобным используемым в [4, 5], нескольких переключаемых оптическим переключателем 10 каналов ВОП 6 и фотоприемников ПЗС 12, создаваемых за счет выбора управляющего кода  $N_{упр}$  соответственно.

При этом из излучения светодиода 11, проходящего через опорный сканирующий интерферометр 13, за счет разности хода  $l_{он}$  формируются две пространственно совмещенные оптические компоненты с временным сдвигом между собой, вносимым управляемой линией задержки 14.

Конструкция ВОП 6 выполнена в виде набора соединенных многомодовых 8 волокон с созданными на их торцах микролинзах 7, осуществляющих излучение и прием света. Общая диаграмма угловая апертура для ВОП 6 достигает полусферы  $\pm\pi/2$  и поделена на угловые сектора кратно числу используемых световодов. Многомодовые 8 и одномодовые 9 световоды ВОП 6 проложены внутри измерительного стержня 2, а торцевая приемно-излучательная часть ВОП 6 с микролинзами 7, выполненная криволинейной поверхностью: выпуклой, грибовидной или вогнутой, чашевидной, расположена внутри прозрачного рубинового наконечника 3.

В статье рассматривается использование круглых волокон, хотя по ряду параметров, например, для уменьшения зазоров, возникающих в разных конструкциях в ВОП, рассмотренных далее, более

перспективны созданные недавно квадратные световоды. Для уменьшения возникающих зазоров, в первую очередь, в приемно-излучательной части ВОП 6 с многомодовых волокон удалена «родная» оболочка и по бокам нанесено внешнее отражающее покрытие, преимущественно из алюминия (Al) толщиной  $\sim 5-20$  мкм. Для увеличения угловой апертуры многомодовых волокон ВОП 6 у них создана небольшая спиральная закрутка, приводящая к повышению доли сагиттальных (косых) лучей относительно меридиональных, проходящих через ось световода [6].

Итак, в процессе работы сформированный двухкомпонентный оптический поток направляется оптическим переключателем 10 на выбранные и последовательно оптически соединенные одномодовое 9 и многомодовое 8 волокна ВОП 6, микролинзу, следует через рубиновый наконечник 3 и локально, в пределах малого углового сектора, освещает поверхность изделия 4.

Часть оптического потока, отраженного по нормали от освещаемой области поверхности изделия 4, следует в обратном направлении, добавляя к исходным двум компонентам еще две оптические компоненты с дополнительным сдвигом, образованным зазором  $l_3$  между поверхностями рубинового наконечника 3 и изделия 4.

Доля этого четырехкомпонентного оптического потока отводится на вход выбранного кодом  $N_{упр}$  фотоприемника ПЗС 11 и в результате интерференции формирует на его выходе цифровой электрический сигнал  $N_{вых}$ .

Вблизи равенства разности хода первой  $l_{он}$  и второй  $l_3$  пар оптических компонент на входе фотоприемника ПЗС 11 интенсивность «по огибающей» формирующейся интерференционной картины увеличивается с достижением ее максимума при полном равенстве  $l_{он} = l_3$ . Фиксация этого максимума используется для формирования триггерного сигнала, так же как и в режиме контактных измерений, и позволяет реализовать «грубые» (на уровне долей мкм), но «быстрые» измерения. При неполном равенстве  $l_{он} \approx l_3$  в пределах малого диапазона  $\approx \pm 5 \dots 7\lambda$  реализуются «медленные», но «точные» фазовые измерения, кратные долям  $\lambda$ , на уровне десятков нанометров [3].

### 1.3. Физические основы бесконтактных измерений.

Работа бесконтактного измерителя 5 (рис. 2), реализованного с участием волоконного низкокогерентного интерферометра [4, 5], включающего сканирующий интерферометр 13, основана на применении светодиода 12, спектральная плотность мощности  $S(\omega)$  которого описывается функцией Гаусса:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\Delta\omega)^2} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2(\Delta\omega)^2}\right), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  — центральная длина волны и ширина спектра светодиода 12 соответственно, а интенсивность интерферирующих оптических потоков, освещающих фотоприемник ПЗС 11, будет иметь вид

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{(l_{он} - l_3)^2}{2l_{кор}^2}\right) \cos[k(l_{он} - l_3)], \quad (2)$$

где  $l_{он}$  — разность длин плеч сканирующего интерферометра 13,  $l_3$  — толщина зазора по нормали между рубиновым наконечником 3 и поверхностью

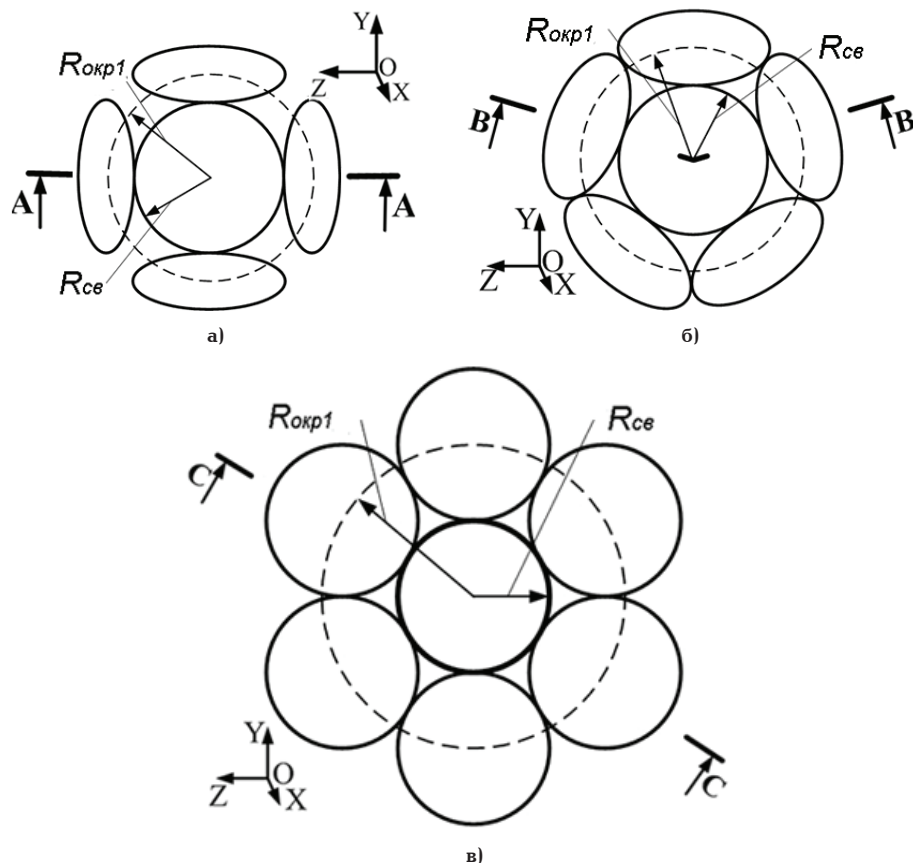


Рис. 3. Три варианта пространственного расположения торцов световодов однорядного ВОП (вид сверху):  
 — с наклонными под разными углами боковыми торцами, примыкающими к центральному (а) и (б);  
 — с фронтальным примыканием всех торцов и продольным расположением всех световодов (в)

изделия 4,  $l_{\text{кор}}$  — длина когерентности светодиода 12,  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — центральная длина волны светодиода 12.

Определение положения максимума аналогично измерениям «по огибающей» сигнала, описываемой формулой

$$A(z) = A_0 \exp\left(-\frac{(l_{\text{он}} - l_z)^2}{2l_{\text{кор}}^2}\right), \quad (3)$$

и соответствует измерениям «по фазе» интерференционного сигнала и цифрового выходного кода  $N_{\phi}$ , созданного на основе сигнала  $N_{\text{вых}}$  с учетом двойного хода луча:

$$N_{\phi} = 2k_{\text{инт}} \Delta l / \lambda, \quad (4)$$

где  $k_{\text{инт}}$  — коэффициент интерполяции периода интерференционной картины.

Уравнения (3) и (4) показывают возможность работы в двух режимах измерений: «по огибающей» — «быстрые», но грубые измерения, «по фазе» — «медленные» с временем измерения для одного канала  $\geq 100$  мс [7], но «точные» измерения. Точность измерений для т.н. «быстрых» и «медленных» измерений может достигать долей мкм и десятков нанометров соответственно [3], а время таких измерений будет оценено далее.

**2. Конструктивные особенности ВОП.** Многоканальный ВОП является основным приемно-излучающим элементом ИГ. Число световодов в  $i$ -ом ряду

ВОП может быть только целым числом и определяется отношением длины окружности  $L_{\text{окр}i}$  радиусом  $R_{\text{окр}i}$  соединяющей центры боковых (коаксиальных) окружающих световодов, к диаметру световода  $\sim 2R_{\text{св}}$ , которое можно описать следующим эмпирическим выражением:

$$N_i \approx \left[ \frac{L_{\text{окр}i}}{2R_{\text{св}}} \right] = \left[ \frac{\pi R_{\text{окр}i}}{R_{\text{св}}} \right]. \quad (5)$$

Максимальное влияние на расчет угловой апертуры торцов световодов, составляющих ВОП, оказывает число каналов  $q$  по сечению головки вдоль осей, связанное с числом рядов  $i$  и определяемое как

$$q = 2i + 1. \quad (6)$$

**2.1. Конструкция ВОП с одним рядом световодов.**

Для конструкции ВОП, созданной с примыкающими наклонными торцами световодов к центральному ( $q=3$ ), выражение (5) записывается как

$$N'_i \approx \left[ \frac{2\pi \cdot R_{\text{св}} (1 + \cos \beta_1)}{2R_{\text{св}}} \right] = \left[ \pi (1 + \cos \beta_1) \right], \quad (7)$$

где  $\beta$  — угол наклона торцов боковых световодов к плоскости центрального.

В случае использования световодов с одинаковыми торцами имеем  $\beta_1 = 60^\circ$  и после расчетов по-

лучаем  $N'_i \approx [1,5\pi] = [4,71] = 4$ . В этом варианте ВОП имеем 1 центральный и 4 боковых торца световода, пространственно распределенных в виде структуры 1–4 общим числом, равным  $N'_{\text{общ}1} = 5$  (рис. 3а).

Можно достичь увеличения числа окружных световодов до 5, реализуя для них пространственную структуру ВОП 1–5 (рис. 3б). Для этого после решения уравнения  $\pi(1 + \cos \beta'_i) = 5$  находим, что  $\beta'_i = \arccos\left(\frac{5}{\pi} - 1\right) \approx 53,7^\circ$ , а разность  $\beta - \beta'_i = 6,3^\circ$  может быть скомпенсирована увеличением угловой апертуры каждого световода.

Для конструкции ВОП с торцами световодов, уложенными продольно вдоль центрального, выражение (5) приобретает вид

$$N''_i \approx [2\pi i], \quad (8)$$

а общее число световодов в ВОП определится формулой

$$N''_{\text{общ}i} = 1 + \sum_i^n [2\pi i]. \quad (9)$$

В соответствии с этим число световодов в ВОП с одним рядом ( $i=1$ ) определяется как  $N''_i \approx \left[\frac{2\pi R_{\text{св}}}{R_{\text{св}}}\right] = [6,28] = 6$ , можно реализовать гексагональную пространственную структуру 1–6 (рис. 3в), а при учете центрального световода их общее число  $N''_{\text{общ}1} = 7$ .

Недостатком этого варианта является увеличение площади торца световода при его косом срезе. Однако его можно существенно уменьшить технологически при изготовлении микролинзы на поверхностях боковых световодов, равных по площади центральному.

Во всех вариантах ВОП (рис. 4а–в) световоды должны формировать оптический поток в пределах телесного угла, равного  $\Theta = 60^\circ$  ( $NA = \sin \Theta / 2 = 0,5$ ), и это вполне достижимо за счет совместного использования спиральной закрутки световодов с внешней металлизированной оболочкой [8] и микролинз разных форм [9–13].

Итак, как видно для данного варианта ВОП, возможно реализовать пространственные структуры расположения световодов: 1–4, 1–5 и 1–6. И последний вариант является наиболее перспективным

из-за симметричности и максимального числа световодов.

2.2. Конструкция ВОП с двумя рядами световодов.

При построении ВОП с двумя рядами окружных световодов ( $q=5$ ) полусферическая угловая апертура ИГ предполагает выполнение условий  $\beta_{21} = 36^\circ$  и  $\beta_{22} = 72^\circ$  для торцов световодов первого и второго рядов к центральному соответственно. Исходя из этого, формируется система уравнений для расчета количества световодов в первом и втором рядах:

$$\begin{cases} N''_{21} \approx [\pi(1 + \cos \beta_{21})] \\ N''_{22} \approx [\pi(1 + 2\cos \beta_{21} + \cos \beta_{22})], \end{cases} \quad (10)$$

и для вышеуказанных значений  $\beta_{21}$  и  $\beta_{22}$  получаем

$$\begin{cases} [5,68] \\ [9,20] \end{cases} = \begin{cases} 5 \\ 9 \end{cases}. \quad (11)$$

Таким образом, для данного варианта ВОП общее количество световодов составляет 15, и они распределены по рядам следующим образом: 1-5-9.

Для конструкции ВОП с торцами световодов, уложенными продольно, число световодов во втором ряду ( $i=2$ ) по выражению (7) определится как

$$N''_2 \approx \left[\frac{4\pi R_{\text{св}}}{R_{\text{св}}}\right] = [12,56] = 12, \text{ формируя структуру}$$

ВОП 1-6-12, а их общее число в ВОП при учете центрального и первого ряда соответствует  $N''_{\text{общ}2} = 19$ .

Как видно, подобное соединение световодов обладает преимуществом по общему числу световодов. Однако существенным недостатком этого варианта является появление зазора между микрооптическими элементами первого и второго ряда.

3. Основные компоненты многоканальных гибридных 3D измерительных головок. Конструкции и технологии изготовления сферического рубинового полого наконечника с капилляром и многомодовых световодов со спиральной закруткой, являющиеся общими как для одноканальных, так и для многоканальных гибридных 3D измерительных головок рассмотрены ранее в [3]. В данном разделе обсуждаются современные варианты реализа-

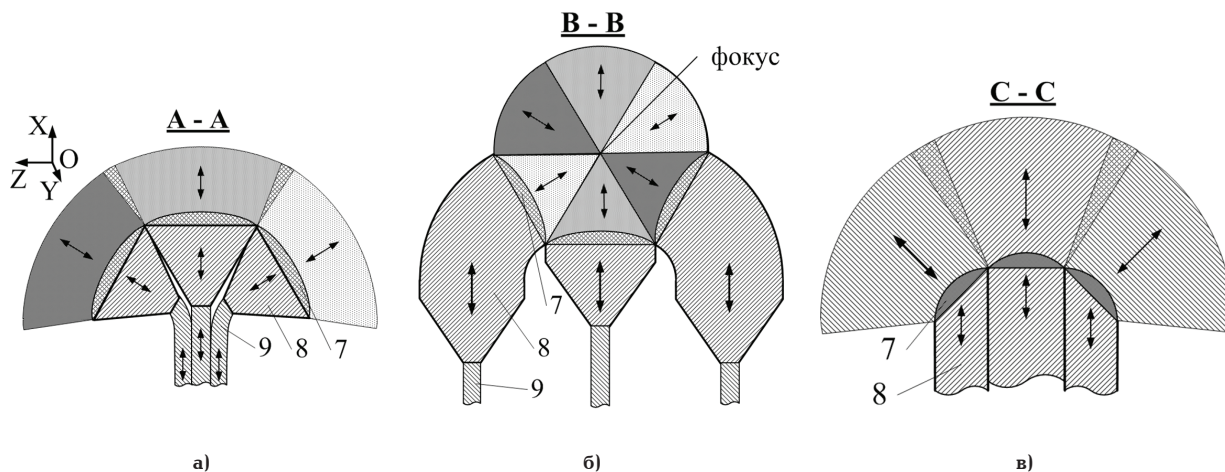


Рис. 4. Приемно-излучательная часть ВОП (виды сбоку): грибовидной (а) и чашевидной (б) форм, с продольным расположением световодов (в)

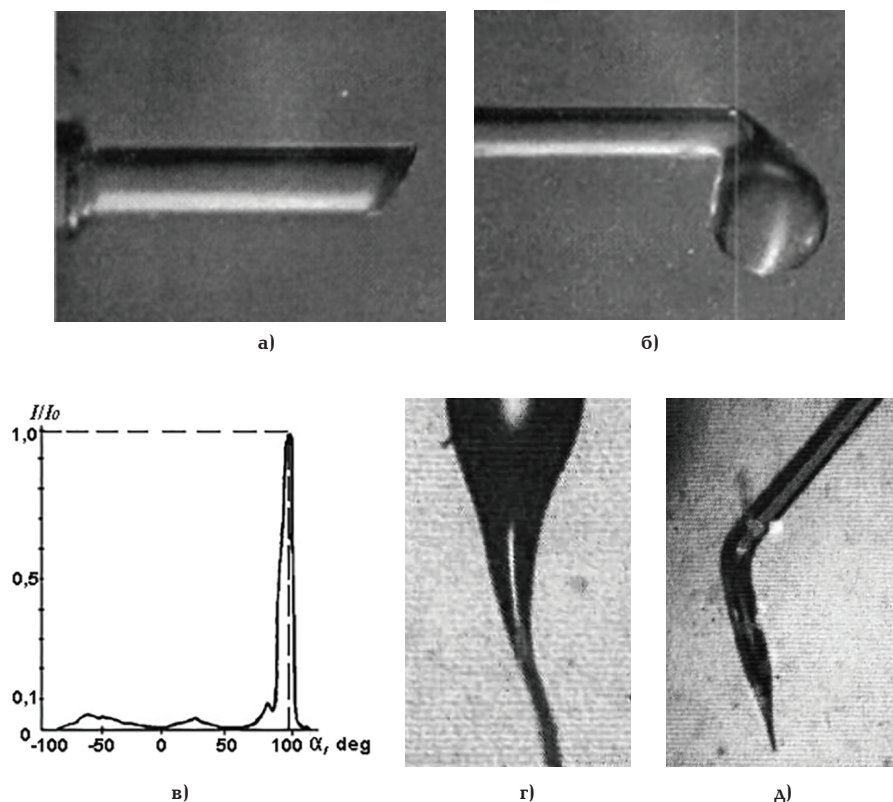


Рис. 5. Варианты формирования несимметричной угловой апертуры световодов: косым срезом торца световода (а), боковой каплевидной микролинзой (б) и с нужной угловой апертурой (в), вытягиванием и изгибом для ближнепольных оптических зондов (г, д)

ции ВОП, оптических переключателей и фазовых модуляторов.

**3.1. Несимметричные микрооптические элементы, фотополимерные микролинзы и металлостеклянные нанозонды.**

Формирование несимметричной угловой апертуры у многомодовых световодов для рассматриваемых ВОП может быть обеспечено созданием косого среза световода (рис. 5а) [12], микрооптической линзы с нужными параметрами апертуры, в т.ч. каплевидной (рис. 5б, в) [11], или несимметричных, или изогнутых световодов для ближнепольных оптических зондов (рис. 5г, д) [8]. В процессе последней создаются металлостеклянные нанозонды с нужным изгибом напыленной на световоды металлической пленкой.

Еще одна из новых технологий создания микролинз на торцах оптических волокон основана на фотолимеризации (затвердевания) жидкого фотополимера на основе органических красителей, таких как родамин Б, Кумарин 120 [13] или метиленовый голубой [9, 10] и превращения в прозрачное утолщение.

**3.2. Оптические переключатели.**

Для переключения оптического сигнала могут быть использованы выполненные в виде микросхем волоконно-оптические переключатели  $1 \times N$ , где  $N$  — число каналов, достигающее 128 и 64 для одно- и многомодовых световодов [14]. Так, фирма DiConFiberoptics, Inc. (США) выпускает подобные переключатели на основе управляемых ТГЛ-сигналами микрзеркал с временем переключения не более 10–30 мс с общим ресурсом не менее 109 переключений.

**3.3. Фазовые модуляторы.**

Наиболее перспективными для обсуждаемых устройств можно считать волоконные фазовые модуляторы с частотой модуляции  $f_{\text{mod}}$  как минимум, до 300 кГц, т.е. с циклом сканирования до  $\approx 3$  мкс и разностью хода до  $\sim 6000$  рад, что для  $\lambda_0 \approx 1,5$  мкм составляет около 1,5 мм [15].

Как видно, время переключения волоконно-оптических переключателей существенно превышает время цикла сканирования и определяет минимальное время измерений для «грубых», но «быстрых» измерений.

**Закключение.** 1. Разработанные многоканальные гибридные 3D головки могут работать как контактно, так и бесконтактно. При механическом контактировании рубинового наконечника с изделием такие ИГ работают в качестве контактной головки касания. При обеспечении зазора между рубиновым наконечником и изделием с переключением каналов волоконно-оптического преобразователя с зональным освещением поверхности изделия осуществляются бесконтактные измерения.

2. Многоканальная конструкция ВОП совместно с низкокогерентным волоконно-оптическим интерферометром позволяет реализовать два режима бесконтактных измерений: «быстрые», «грубые» и «медленные», «точные».

3. Общее число световодов в конструкции ВОП с продольно коаксиально уложенными световодами вокруг центрального, достигая 7 и 19 для одного и двух рядов соответственно, преобладает над конструкциями с наклонно примыкающими торцами световодов к центральному. Однако конструкции ВОП с двумя рядами имеют недостаток, связанный с необходимостью введения зазора между первым и вторым рядом.

## Библиографический список

1. Пат. 2235972 Российская Федерация, МПК G01B9/02. Способ оптического контроля геометрических параметров изделий / Леун Е. В. № 2000121726; заявл. 14.08.00; опубл. 10.09.04.
  2. Пат. 157867 Российская Федерация, МПК G01B9/02. Бесконтактная оптическая головка для контроля геометрических параметров изделий / Леун А. Е., Юдин А. Д., Дмитриев А. О., Привезенцева И. В., Леун Е. В., Пчелкин С. Е. № 2015104149; заявл. 09.02.15; опубл. 20.12.15, Бюл. № 15.
  3. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 140–146.
  4. Ахсаханян А. А., Ахсаханян А. Д., Волков П. В. [и др.]. Перспективы применения метода тандемной низкокогерентной интерферометрии для измерения формы асферических поверхностей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 8. С. 1–4.
  5. Волков П. В., Горюнов А. В., Лукьянов А. Ю. [и др.]. Измерение профиля поверхности протяженных асферических объектов // Нанозифика и нанозлектроника: материалы XXI Междунар. симпозиума, 13–16 марта 2017 г., Нижний Новгород. 2017. Т. 1. С. 379–380.
  6. Пат. 2573661 Российская Федерация, МПК G01F 23/22, G01F 23/292. Способ измерения уровня жидкости и устройство с нерегулярной биспирально-конической световодной структурой для его реализации (варианты) / Корнев М. С. № 2014111062; заявл. 24.03.14; опубл. 27.01.16, Бюл. № 3.
  7. В России создано оптоволокно с квадратной сердцевиной: информ. сообщ. URL: <https://se7en.ws/v-rossii-sozdano-optovолокно-s-kvadratnoy-serdcevinoy> (дата обращения: 08.11.2017).
  8. Зьонг Ван Зунг Зьонг Ти Зунг. Исследование лазерного формирования комбинированных наноэзондов: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. СПб., 2007. 135 с.
  9. Соколовский А. А. Микрооптические элементы и устройства для волоконно-оптических измерительных систем: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.01. М., 2009. 225 с.
  10. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополлимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1-2. С. 240–244.
  11. Вейко В. П. Лазерное формирование микрооптических элементов. Разд. Новые лазерные технологии. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/291.pdf> (дата обращения: 31.10.2017).
  12. Петров А. А. Лазерное формирование микролинз на базе оптических волокон: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. СПб., 2005. 112 с.
  13. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. СПб., 2012. 128 с.
  14. Сайт фирмы DiCon Fiberoptics (США), производитель волоконно-оптических переключателей на основе MEMS-технологий URL: <https://www.diconfiberoptics.com/main.php> (дата обращения: 31.10.2017).
  15. Коваленко В. Г. Цельноволоконные резонансные фазовые модуляторы для высокоточных интерферометрических датчиков: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. М., 2005. 20 с.
- ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер.  
Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)
- Статья поступила в редакцию 10.11.2017 г.  
© Е. В. Леун

## Книжная полка

**Щепетов, А. Г. Основы проектирования приборов и систем. Задачи и упражнения. Mathcad для приборостроения : учеб. пособие / А. Г. Щепетов. – 2-е изд., стер. – М. : Юрайт, 2017. – 270 с. – ISBN 978-5-534-03915-3.**

Учебное пособие предназначено для проведения занятий по дисциплине «Автоматизация инженерных расчетов» и другим дисциплинам учебного плана направления подготовки «Приборостроение». Пособие получило высокую оценку студентов, а представленные материалы прошли многократную апробацию в учебном процессе. В книге даются начальные сведения о работе в интерактивной программной среде компьютерной математики Mathcad и примеры решения в этой среде типовых задач анализа, синтеза и оптимизации характеристик измерительных устройств. Изложение сопровождается большим количеством примеров с использованием оригинальных алгоритмов и программных модулей, разработанных автором.

**Райкова, Е. Ю. Стандартизация, метрология, подтверждение соответствия : учеб. / Е. Ю. Райкова. – М. : Юрайт, 2017. – 349 с. – ISBN 978-5-534-03539-1.**

Учебник содержит обобщенный материал по вопросам стандартизации, оценочной деятельности, метрологического надзора и контроля. Подробно рассмотрены вопросы организации процедур, подтверждающих соответствие с учетом изменений, происходящих в экономике в связи со вступлением России в ВТО. Освещены практические вопросы, связанные с техническим регулированием и стандартизацией, а также документы, сопровождающие эту деятельность на различных уровнях, современные подходы в оценочной деятельности, порядок проведения процедуры подтверждения соответствия, методики проверки и калибровки. Материал учебника актуализирован в связи с принятием новых технических регламентов Российской Федерации и Таможенного союза и новых национальных стандартов. В конце каждой главы представлены вопросы и задания, которые помогут учащимся осуществить контроль знаний.



Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

Научно-производственная  
компания «Энергосервис-Резерв»,  
г. Омск

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Показана необходимость диагностирования подвижного состава в процессе его эксплуатации и ремонта. Отмечена недостаточная проработка вопроса диагностирования на переходных режимах. Рассмотрены примеры использования нестационарных режимов работы оборудования по электрическим параметрам, по вибрации и температуре. Сделан вывод об экономической целесообразности систем диагностирования в динамике. Определены перспективные направления исследований.

**Ключевые слова:** подвижной состав, диагностирование, нестационарные режимы, динамические режимы, переходные процессы, вибрация, температура.

Диагностирование является необходимым элементом технологии обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог. В большей мере это относится тяговому подвижному составу — локомотивам. Диагностирование (в соответствии с ГОСТ 27518-87) [1] позволяет решать задачи по поддержанию установленного уровня надежности, обеспечению требований безопасности и эффективности эксплуатации локомотивов.

Наиболее эффективным является комплексное сквозное диагностирование ответственных узлов и агрегатов [2]. Сквозное диагностирование подразумевает контроль технического состояния объекта на различных стадиях технического обслуживания и ремонта, например, диагностирование подшипников тягового электродвигателя (ТЭД) на испытательной станции, в составе собранного колесно-моторного блока (КМБ), диагностирование под локомотивом.

К наиболее ответственным (лимитирующим) узлам локомотивов относят роторные механические узлы: буксовые подшипники, моторно-якорные подшипники тяговых электродвигателей (ТЭД), зубчатые зацепления редукторов. В вагонном хозяйстве диагностируются элементы редукторов от средней части оси и буксовые подшипники колесных пар. В электрической части это ТЭД и вспомогательные электрические машины. Для тепловозов это дизель-генераторная установка (ДГУ), включающая цилиндропоршневую группу (ЦПГ), топливную систему, газозадушный тракт (ГВТ).

Практически все диагностическое оборудование, которое в настоящее время эксплуатируется на сети железных дорог, использует для опреде-

ления технического состояния объектов стационарные режимы его работы. Так, при вибродиагностировании колесно-моторных блоков (КМБ) локомотивов и колесных пар вагонов они приводятся во вращение и выводятся на стационарный режим с использованием специальных устройств поддержания стабильной частоты вращения. Это является одним из необходимых условий успешного диагностирования.

С точки зрения авторов, в вопросах диагностирования подвижного состава незаслуженно недооцененными оказались нестационарные (динамические или переходные) режимы работы. Из теории автоматического управления известно, что наибольшее количество информации (по некоторым оценкам до 90 %) о свойствах объекта можно получить именно при анализе информации, полученной на переходных режимах. Методы идентификации динамических объектов по их переходным характеристикам подробно описаны в литературе, например, в [3].

Анализ литературы и интернет-источников по этой тематике (применительно к железнодорожной технике) показал, что публикаций по этой теме относительно немного. Это, как правило, кандидатские диссертации, в которых приводится моделирование процессов, а исследования заканчиваются в лучшем случае экспериментальным образцом.

Эту ситуацию можно объяснить несколькими причинами:

— организация динамического режима в условиях активного эксперимента, как правило, требует дополнительного оборудования (дополнительных усилий) для задания возмущающих воздействий;

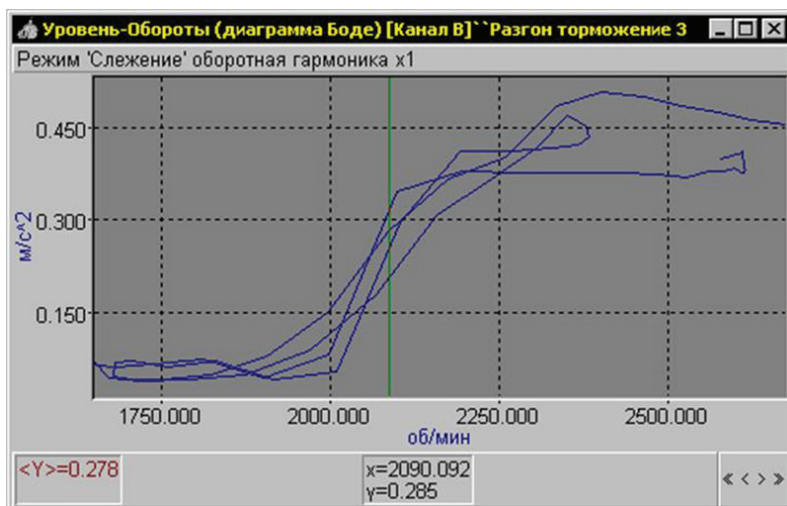


Рис. 1. Диаграмма Бode



Рис. 2. Диаграмма Найквиста

— обработка и анализ полученной информации требует разработки более сложных алгоритмов и более сложного математического аппарата;

— сложность выработки критериев по отношению диагностируемых объектов к той или иной градации технического состояния.

Рассмотрим возможные варианты диагностирования на переходных режимах по различным физическим параметрам.

Диагностирование по вибрации. Одними из немногих разработчиков вибродиагностического оборудования (ВДО), которые реализовали в своих программно-аппаратных комплексах инструмент для исследования переходных режимов, является фирма «ИНКОТЕС». Это универсальные инструменты для фиксации различных зависимостей на переходных режимах. Критерии оценки технического состояния объекта, диагностические признаки и тем более пороговые значения анализируемых параметров не приводятся.

К упомянутым инструментам разработчики относят [4].

— диаграмму Бode (рис. 1), которая представляет собой зависимость уровня вибрации от частоты вращения;

— диаграмму Найквиста (уровень вибрации в зависимости от фазового угла), рис. 2;

— график зависимости уровня вибрации от времени;

— график зависимости частоты вращения от времени.

Похожие и даже более широкие возможности исследования переходных процессов вибрации предоставляет ручной программно-аппаратный комплекс CSI 2140 фирмы CSI США (рис. 3).

Программное обеспечение этого ВДО позволяет регистрировать не только временные характеристики типа «разгон – выбег», но и фиксировать реакцию системы на дельта-импульс (дельта-функцию), то есть реакцию на ударный тест.

Дельта-функция  $\delta(x)$  определяется как функция, удовлетворяющая условиям:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1.$$

Авторами проводились исследования на экспериментальном стенде по определению диагностических признаков дефектов подшипников путем записи и анализа временного сигнала вибрации, который являлся реакцией на дельта-импульс



Рис. 3. Виброанализатор CSI 2140

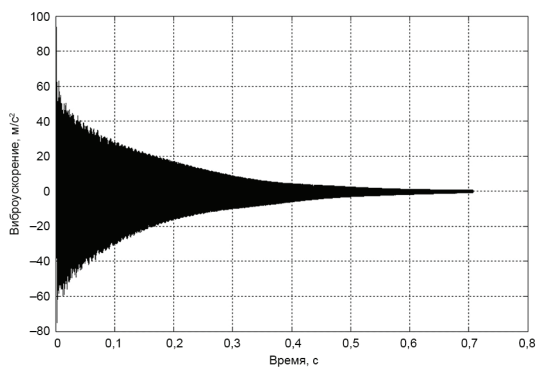


Рис. 4. Сигнал виброускорения — реакция на дельта-импульс (внутреннее кольцо подшипника без дефекта)

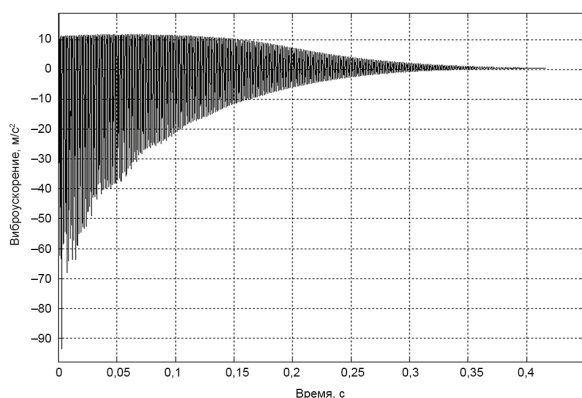


Рис. 5. Сигнал виброускорения — реакция на дельта-импульс (внутреннее кольцо подшипника с трещиной)

(рис. 4, 5). На рис. 6 и 7 показаны спектры сигналов виброускорения с бездефектного и дефектного внутренних колец подшипника.

Интересные решения по использованию динамических режимов для определения технического состояния отдельных подшипников предлагают

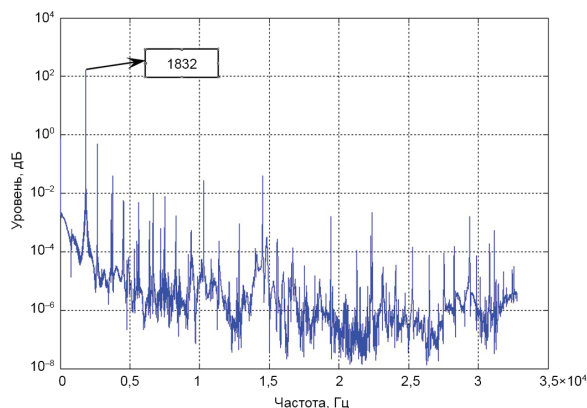


Рис. 6. Спектр сигнала виброускорения с бездефектного внутреннего кольца

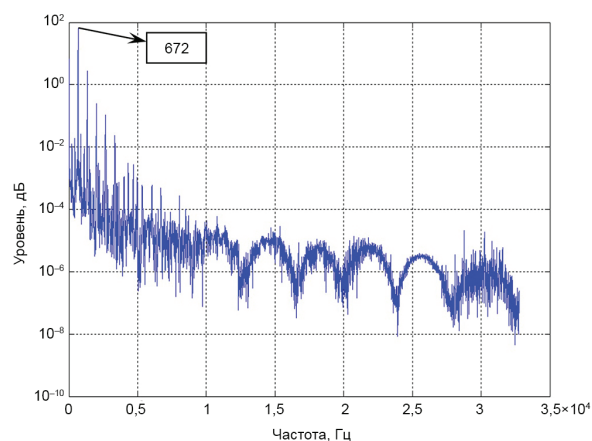


Рис. 7. Спектр сигнала виброускорения, снятого с внутреннего кольца с трещиной

специалисты Санкт-Петербургской фирмы ВАСТ совместно с соавторами их фирмы «НПП Диавэл» (Хабаровск). Эти решения предполагают использование натуральных эталонных моделей и закреплены патентом России [5].

Авторами также предложены оригинальные способы диагностирования роторных механизмов по изменениям вибрации на переходных режимах (поданы заявки на изобретения).

Суть первого способа состоит в том, что на переходных режимах фиксируют и сравнивают с пороговыми значениями амплитудные составляющие на характерных для отдельных дефектов частотах. При раскрутке механизма или его остановке (выбеге) фактически происходит частотное сканирование возмущающим фактором. При этом частотные составляющие текущих (мгновенных) спектров, являющиеся диагностическими признаками дефектов, входят в резонанс с текущей частотой вращения или ее гармониками. В момент резонанса происходит резкое увеличение амплитуды характерной частоты, что позволяет выделить ее из шумовых компонент. После обнаружения процесс диагностирования можно прекратить, не дожидаясь диагностирования на установившемся режиме. Такое решение позволит значительно сократить общее время диагностирования, например, локомотива, на две секции которого приходится от 32-х и более контрольных точек.

Еще один способ заключается в том, что записанный на переходном режиме массив данных с вибродатчика транспонируют в другой массив,

в котором интервал по времени  $\Delta t$  обратно пропорционален текущему значению частоты вращения  $n_{\text{текущ}}$ .  $\Delta t = f(n_{\text{текущ}})$  или

$$\Delta t = \frac{k_{\text{пр.}}}{n_{\text{текущ}}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{текущ}}$  — текущее значение частоты вращения;  $k_{\text{пр.}}$  — коэффициент приведения, учитывающий диапазон изменения частоты вращения.

В этом случае происходит искусственное приведение частоты вращения к единому значению. Транспонированный массив раскладывают в ряд Фурье, который анализируют на наличие диагностических признаков по известным алгоритмам для установившихся режимов.

Диагностирование по температуре. Диагностическая информация, которая в настоящее время практически не используется для определения технического состояния подвижного состава, является температура. Это обусловлено тем, что этот параметр в большинстве случаев не «вписывается» в технологию ремонта из-за относительно большого времени (десять минут), которое требуется для постановки диагноза. При диагностировании колесно-моторных блоков локомотивов оперативность получения диагноза является одним из определяющих факторов. Анализ изменения температуры может быть использован, например, при испытаниях и обкатке локомотивных редукторов после их ремонта или при испытаниях вагонных редукторов от средней части оси. Так, например, в ряде пассажирских вагонных депо для определения технического состояния редукторов типа ВБА и ЕЮК (при участии автора) была внедрена оригинальная система прогнозирования установившегося значения температуры при постоянном возмущающем воздействии, например, при вращении механизма с постоянной частотой вращения на холостом ходу или с постоянной нагрузкой. Система основана на наблюдении за изменением производной температуры, при этом использовались эталонные динамические температурные модели редукторов. Эталонные модели были сформированы путем обработки экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях. Такая система позволяет в четыре–пять раз сократить время испытания в случае неработоспособного редуктора и не только уменьшить трудоемкость процесса, но и сэкономить электроэнергию.

Инициативные работы по использованию тепловизоров для отслеживания динамики температурных полей буксовых узлов колесных пар (параллельно с вибродиагностированием) уже несколько лет ведутся в ООО «ВКМ» Старый Оскол.

Диагностирование электрических машин. В настоящее время для определения состояния подсистемы электрической части локомотива используются комплексы, например, типа «Доктор», измеряющие статические параметры: переходные и пусковые сопротивления, сопротивления изоляции, индуктивность, емкость.

Для электрических двигателей функциональное диагностирование, как правило, основано на спектральном анализе вибраций, фазных токов и напряжений, измеряемых в стационарных режимах работы двигателя [6]. Электродвигатели локомотивов значительное время эксплуатируются в переходных режимах. Для таких режимов характерны токи, которые могут в несколько раз превышать значения

токов в стационарных режимах. Вследствие этого неисправности, могущие возникнуть в «динамике», не могут быть обнаружены при испытаниях в «статике» [7]. Исследование переходных процессов для оценки состояния электродвигателей карьерной техники проведено в работе [8]. Работы, посвященные исследованию динамических режимов электрических машин подвижного состава с целью их диагностирования, авторам неизвестны.

Таким образом, можно предположить, что развитие направления диагностирования электрических машин в «динамике» позволит обнаруживать ранее не обнаруживаемые неисправности или выявлять неисправности в стадии их зарождения.

Диагностирование дизеля на переходных режимах. Так же как и электродвигатели электровозов, дизель-генераторная установка (ДГУ) значительную часть времени работы осуществляет в переходных режимах. Для маневровых тепловозов это время составляет 50 % [8]. Диагностирование и настройка тепловозных дизелей регламентирована и осуществляется на станциях реостатных испытаний путем определения значений отдельных параметров ДГУ в статических режимах.

В условиях эксплуатации при переключении контроллера длительность переходных процессов в ДГУ варьируется в пределах от 15–25 секунд до 6–8 минут [8]. В этой же работе отмечается целесообразность диагностирования ДГУ на переходных режимах, но также констатируется, что «диагностика дизеля в неустановившемся режиме при текущей эксплуатации представляется достаточно сложной».

Анализ доступных источников информации показал, что результаты работ по исследованию динамических режимов ДГУ с целью ее диагностирования не нашли широкого применения на сети железных дорог. Изучение работ по данному направлению в других отраслях, например в сельском хозяйстве, также показывает, что исследования заканчиваются на уровне экспериментальных моделей.

Авторы исследовательских работ в этом направлении считают, что с помощью анализа динамических режимов работы можно производить как интегральную оценку работы и настройки ДГУ, так и идентифицировать неисправности в отдельных узлах и агрегатах.

Экспериментальные работы, проведенные авторами на ДГУ тепловозов 2ТЭ10, ТЭМ 2, ТГМ 4 при реостатных испытаниях, показали принципиальную возможность реализации систем диагностирования на основе анализа различных динамических процессов. Так, например, с помощью определения мгновенных составляющих углового ускорения колесчатого вала (при переходе с позиции на позицию) оценивался вклад каждого цилиндра в общую развиваемую мощность. Получаемая таким образом информация в совокупности с анализом вибросигналов с топливных трубок высокого давления и форсунок позволяет локализовать местонахождение неисправности (либо это цилиндропоршневая группа, либо — топливная система) и идентифицировать ее.

Эксперименты по исследованию переходных процессов в газозоудном тракте тепловоза 2ТЭ10 позволили создать его математическую модель по параметру расхода (давления) воздуха в виде динамического звена второго порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (3)$$

где  $p$  — оператор Лапласа;  $T$  — постоянная времени;  $k$  — передаточный коэффициент;  $\xi$  — коэффициент затухания.

Использование модели, полученной на основе эмпирических данных, позволяет уточнять или корректировать математические модели, создаваемые с целью оценки технического состояния газоздушного тракта тепловозных дизелей [9].

Авторы считают целесообразным и перспективным направлением разработку и использование систем диагностирования на переходных режимах, которые основаны на эталонных моделях. Это мнение подтверждается в работах [10, 11]. Такой подход позволит не только обнаруживать недопустимые режимы работы и идентифицировать неисправности, но и создаст предпосылки к реализации систем автоматической настройки. Подобный подход был отработан авторами в модельных экспериментах по настройке топливных регуляторов авиационных двигателей [12, 13], который получил дальнейшее развитие [14].

**Выводы.** Таким образом, использование нестационарных (динамических) режимов при диагностировании узлов подвижного состава позволит снизить затраты на его техническое обслуживание и ремонт, повысить уровень работоспособности отдельных агрегатов, а для локомотивов — повысить коэффициент их готовности.

Рассмотренное направление следует считать перспективным особенно с учетом уровня развития цифровой техники и современных математических методов обработки информации.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 27518–87. Диагностирование изделий. Общие требования. Введ. 1989–01–01. М.: Стандартиформ, 2009. 5 с.
2. Тэттер В. Ю., Молчанов В. В., Головаш А. Н. [и др.]. Сквозная система контроля и диагностирования колесно-моторных блоков подвижного состава // Повышение ресурса тяговых электродвигателей: сб. докл. и сообщ. науч.-техн. конф. / ВНИИЖТ. М., 2004. С. 98–101.
3. Коновалов В. И. Идентификация и диагностика систем. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 155 с. ISBN 978-5-98298-631-3.
4. Программа измерения и анализа вибрации на переходных режимах (анализ характеристик «СТАРТ/СТОП») фирмы «ИНКОТЕС». URL: <http://www.vibration.ru/start-stop/start-stop.shtml> (дата обращения: 18.09.2017).

5. Пат. 2336512 Российская Федерация, МПК G 01 M 13/04. Способ комплексной вибродиагностики подшипников качения и устройство для его осуществления / Рябцун А. А., Барков А. В., Рябцун С. А. № 2006143733/28; заявл. 08.12.06; опубл. 20.10.08, Бюл. № 29.

6. Чернов Д. В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2005. 129 с.

7. Наговицын В. С. Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий. М.: ВИНТИ РАН, 2004. 246 с. ISBN 5-94688-030-6.

8. Гаргаев А. Н. Диагностика электроприводов карьерных экскаваторов на основе динамической идентификации электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2013. 161 с.

9. Титанков Д. А. Оценка технического состояния газоздушного тракта тепловозных дизелей: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2005. 173 с.

10. Андрианов Е. Н., Сахаров В. В., Таранин А. Г. Диагностирование рабочего процесса судового дизеля по эталонным моделям с применением вейвлетов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2013. № 3 (22). С. 46–54.

11. Лепешкин Д. И. Улучшение показателей дизеля в условиях эксплуатации повышением стабильности работы топливной аппаратуры: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2015. 227 с.

12. А. с. 1515889 СССР, МГЖ G 01M 15/00. Способ испытания топливного регулятора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления / Тэттер В. Ю., Шендалева Е. В. № 4264555/25-06; заявл. 16.06.87; опубл. 15.06.89.

13. А. с. 1605749 СССР, МПК G 01M 15/00. Стенд для испытания топливного регулятора системы автоматического управления газотурбинного двигателя / Тэттер В. Ю., Шендалева Е. В. № 4687781/25-06; заявл. 05.05.89; опубл. 05.06.90.

14. Шендалева Е. В. Разработка и исследование многоцелевого моделирующего стенда для систем автоматического управления малоразмерных газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 249 с.

**ТЭТТЕР Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС). Адрес для переписки: [te@omgups.ru](mailto:te@omgups.ru)

**ТЭТТЕР Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник научно-исследовательского отдела НПК «Энергосервис-Резерв»; доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС. Адрес для переписки: [tetterv@gmail.com](mailto:tetterv@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 04.10.2017 г.

© А. Ю. Тэттер, В. Ю. Тэттер