

# ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ. Часть 1

Рассматриваются вопросы построения акустооптических (АО) лазерных измерительных систем (ЛИС) для контроля трехкоординатных (3D) движений с одним (1D) продольным  $\Delta l_x$  и двумя (2D) поперечными  $\Delta l_y, \Delta l_z$  смещениями. Обсуждаются особенности использования трехканальной измерительной схемы на основе систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с адаптивным управлением полос пропускания в зависимости от скоростей движения, призматической оптической схемы, преобразующей 2D в 1D поперечные смещения лазерного луча для 1D АО модулятора, оптического сопряжения последнего с волоконными фотоприемными устройствами.

**Ключевые слова:** акустооптический модулятор, лазерный интерферометр, фазовый сдвиг, фазовый интерполятор, фазометр, шумы сигнала, микролинза, оптическое волокно, межмодовая дисперсия, растр.

**Введение.** Совершенствование акустооптических (АО) лазерных измерительных систем (ЛИС) предопределено необходимостью развития высокоточных методов и средств трехкоординатных (3D) измерений смещений при производстве изделий ракетно-космической техники, авиации, машино-, приборо- и станкостроения и других отраслей. Такой контроль смещений включает измерения однокоординатного (1D) продольного  $\Delta l_x$  и двухкоординатных (2D) поперечных  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$  смещений коллинеарных оси лазерного луча (вдоль оси ОХ) и ортогональных ей (вдоль осей ОУ и ОZ) соответственно. Это используется при контроле отклонений от прямолинейности поверхностей изделий за счет высокоточных измерений продольных [1, 2] и поперечных [3] смещений, определении траектории движения элементов оборудования, измерении смещений сканирующего лазерного луча в волоконно-оптической измерительной головке (ВОИГ) [4] и других задачах.

С учетом этого актуально исследование особенностей построения высокоточных АО ЛИС для измерений 3D смещений с улучшением их основных характеристик. Подобные вопросы не полностью раскрыты в открытой печати, и данная статья направлена на восполнение этого пробела.

**1. Динамические характеристики АО ЛИС при измерении 3D смещений.** Использование систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) предполагает согласование параметров контролируемых движений изделий с ее частотными характеристиками, частотой возбуждения АО модулятора  $f_{\text{мог}}$  и быстродействием измерительной схемы. Представленное далее основано на примере использования двух типов АО модуляторов (АОМ):

1) АОМ № 1: материал световодопровода — парателлуриг ( $\text{TeO}_2$ ), частота АО модуляции  $f_{\text{мог}} =$

$= 40$  МГц, скорость ультразвуковой волны (УЗВ)  $v_{\text{узв}} \approx 616$  м/с, длина УЗВ  $\Lambda_{\text{узв}} \approx 15,4$  мкм [2, 3];

2) АОМ № 2: материал световодопровода — вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ), частота АО модуляции  $f_{\text{мог}} = 8$  МГц, скорость УЗВ  $v_{\text{узв}} \approx 1480$  м/с, длина УЗВ  $\Lambda_{\text{узв}} \approx 185$  мкм [1, 2].

При размерных измерениях допуск на отклонение от прямолинейности меньше длины измерений и, например, не должен превышать  $\Delta l_y = 0,8$  мм на длине  $\Delta l_x = 100$  мм, имея соотношение  $\Delta l_y / \Delta l_x = 0,008$ . Так, отношение скорости поперечных смещений  $v_{\text{non}}$  к продольным  $v_{\text{прог}}$  будет таким же —  $v_{\text{non}} / v_{\text{прог}} = 0,008$ .

С другой стороны, скорости движения изделия можно определить, исходя из частотных параметров измерительной схемы для каждого режима измерений:

$$\text{— для продольных смещений } v_{\text{прог}} = \frac{f_{\text{гон}} \cdot \lambda}{2}; \quad (1)$$

$$\text{— для поперечных смещений } v_{\text{non}} = f_{\text{гон}} \cdot \Lambda_{\text{узв}}, \quad (2)$$

где  $f_{\text{гон}}$  — доплеровский сдвиг частоты,  $\lambda$  и  $\Lambda_{\text{узв}}$  — длины волн лазера и УЗВ.

Значения доплеровских сдвигов частоты  $f_{\text{гон}}$ , частот измерительного сигнала, максимальных скоростей поперечных  $v_{\text{non}}$  и продольных  $v_{\text{прог}}$  смещений рассчитаны для двух типов вышеупомянутых АОМ: АОМ №1 и №2 и приведены в табл. 1. При этом для поперечных смещений в столбцах доплеровского набега частоты  $f_{\text{гон}}$ , частот измерительного сигнала и максимальной скорости указано по два значения  $a/b$ , где  $a$  и  $b$  — это значения, рассчитанные исходя их частотных параметров схемы и геометрических соотношений с вышеупомянутым коэффициентом 0,008 соответственно. И, как видно, значения  $b$  существенно, почти на 4 порядка меньше  $a$ :  $b \ll a$ , тем

Динамические характеристики АО ЛИС при 3D перемещениях: для 1D продольных (вдоль оси OX) и 2D (вдоль осей OY и OZ) поперечных смещений

№	Режим измерений	Параметры АО модулятора	Направление движения	Скорость движения, м/с	Доплеровский сдвиг частоты $f_{гон'}$ МГц	Частота сигнала, МГц
1	Продольные 1D смещения вдоль оси OX	$\Lambda_{узв} = 15,4$ мкм ( $TeO_2$ ), $f_{мог} = 40$ МГц	удаление	6,3	$\approx 20$ МГц	60
2			приближение	12,3	$\approx 39,9$ МГц	$\approx 0,1$
3		$\Lambda_{узв} = 185$ мкм ( $H_2O$ ), $f_{мог} = 8$ МГц	удаление	$\approx 0,63$	$\approx 2$ МГц	$\approx 10$
4			приближение	$\approx 2,5$	$\approx 8,0$ МГц	0
5	Поперечные 2D смещения вдоль осей OY и OZ	$\Lambda_{узв} = 15,4$ мкм ( $TeO_2$ ), $f_{мог} = 40$ МГц	против УЗВ	312/0,05	$\approx 20/0,003$	60/40,003
6			вдоль УЗВ	622,4/0,1	39,9/0,006	0,1/ $\approx 39,9$
7		$\Lambda_{узв} = 185$ мкм ( $H_2O$ ), $f_{мог} = 8$ МГц	против УЗВ	370/0,005	$\approx 2/0,0003$	$\approx 10/\approx 8$
8			вдоль УЗВ	1480/0,02	$\approx 8,0/0,0012$	0/8,0012

Таблица 2

Динамические характеристики 2D поперечных смещений лазерного луча сканирующей головки при ее работе с АО датчиком обратной связи в составе ВОИГ

№	Параметры АО модулятора	Частота вращательных вибраций конца световода $f_{ск'}$ кГц	Скорость движения, м/с	Доплеровский сдвиг частоты $f_{гон'}$ МГц	Частота сигнала $f_{max'}$ МГц (против УЗВ/вдоль УЗВ)
1	$\Lambda_{узв} = 15,4$ мкм ( $TeO_2$ ), $f_{мог} = 40$ МГц	1	5,65	$\pm 0,2$	40,2/39,8
2		5	28,3	$\pm 1$	41/39
3		10	56,5	$\pm 2$	42/38
7	$\Lambda_{узв} = 185$ мкм ( $H_2O$ ), $f_{мог} = 8$ МГц	1	5,65	$\pm 0,017$	8,017/7,983
8		5	28,3	$\pm 0,085$	8,085/7,915
9		10	56,5	$\pm 0,17$	8,17/7,83

самым существенно снижая требования по частоте к измерительной схеме и, как будет показано далее, создавая возможности для повышения разрешающей способности в режиме измерений поперечных смещений.

В конструкции ВОИГ [4] также используются АО измерения 2D поперечных смещений лазерного луча, поэтому в табл. 2 представлены предъявляемые к ним динамические характеристики. Так как скорость УЗВ  $v_{узв}$  много выше линейной скорости вращения конца волокна  $v_{ск}$ :  $v_{узв} \gg v_{ск}$  то влиянием несовпадения направлений их движений можно пренебречь. Линейная скорость вращения конца вибрирующего световода и, соответственно, лазерного луча  $v_{ск}$  определяется через частоту вибрации  $f_{ск}$  как  $v_{ск} = 2\pi R_B f_{ск}$ , где  $R_B$  — радиус траектории движения конца вибрирующего световода, равный  $\approx 0,5$  мм [4]. Значения доплеровского сдвига частоты  $f_{гон}$  могут быть рассчитаны по формуле

$$f_{гон} = \frac{v_{ск}}{\Lambda_{узв}} = \frac{2\pi R_B f_{ск}}{\Lambda_{узв}} \quad (3)$$

для трех значений частоты вибрации  $f_{ск}$ : 1 кГц, 5 кГц и 10 кГц [4], а максимальная частота сигнала определена как  $f_{max} = f_{гон} + f_{узв}$ . И, согласно расчетам, значения доплеровского сдвига частоты  $f_{гон}$  не превышают 2 МГц и 0,17 МГц для АОМ № 1 и № 2 соответственно.

## 2. АО ЛИС для измерения 3D смещений: принципы работы, устройство и принцип действия.

В основе предлагаемых принципов работы АО ЛИС для измерения 3D смещений заложены четыре основные идеи:

1. Преобразование 2D поперечных смещений  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$  лазерного луча в 1D смещения с использованием 1D двух- или трехапертурного АОМ.

2. Построение трехканальной измерительной схемы, в каждом канале из которых применены фазовый интерполятор (в дальнейшем — интерполятор), фазометр малого диапазона (в дальнейшем — фазометр) и система ФАПЧ (рис. 1а, б), реализующие дифференциальный метод измерения, режимы «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений.

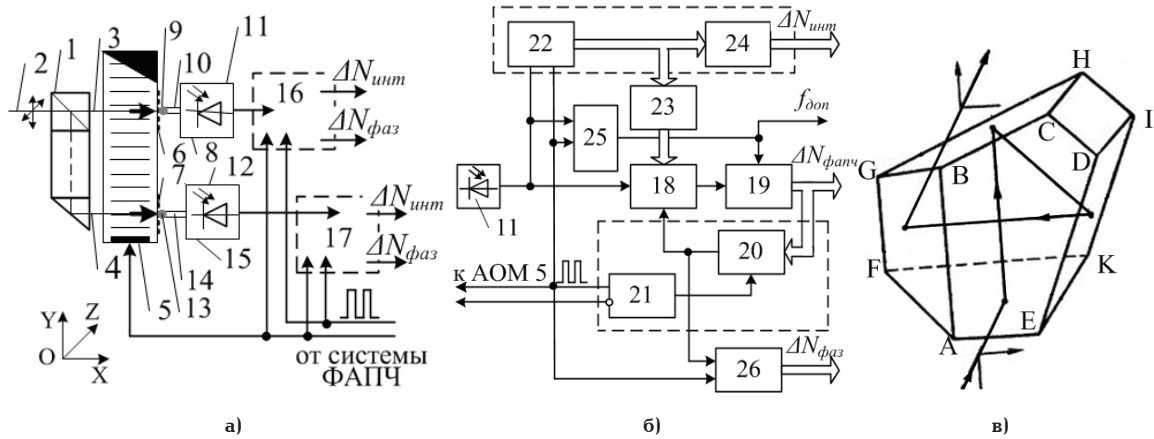


Рис. 1. Схемы АО ЛИС для 3D смещений (измерительный канал для продольных смещений  $\Delta L_x$  не показан): оптоэлектронная (а), измерительная (б), призма призмной оптической схемы 1 (в)

3. Адаптивное управление полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f_{\text{фач}}$  в зависимости от скорости движения и соответствующего доплеровского сдвига частоты  $f_{\text{дон}}$ .

4. Использование волоконного фотоприемного устройства (ВФПУ) с микролинзой на оптическом входе световода.

Воплощение этих идей рассмотрено далее. Но так как измерения продольных смещений  $\Delta L_x$  ранее уже были рассмотрены в [2], то основное внимание уделено наиболее трудным вопросам измерения 2D поперечных смещений  $\Delta L_y$  и  $\Delta L_z$ .

2.1. Преобразование 2D в 1D поперечные смещения лазерного луча, функционирование измерительной схемы. Призматическая оптическая схема 1 (рис. 1а) формирует из входного луча 2 с 2D поперечными смещениями  $\Delta L_y$  и  $\Delta L_z$  в плоскости YOZ, два оптических потока 3 и 4, смещаемых только вдоль оси OY:  $\Delta L_y = \Delta L'_y$ ,  $\Delta L_z = \Delta L''_y$ . Поток 3 используется для измерения смещений  $\Delta L_y$  вдоль оси OY входного оптического потока (смещения  $\Delta L_z$  вдоль оси OZ исключаются):

$$\begin{cases} \Delta L_y = \Delta L'_y, \\ \Delta L_z = 0, \end{cases} \quad (4)$$

а поток 4 поворачивается призмой (рис. 1в) на  $90^\circ$  — для преобразования смещений  $\Delta L_z$  вдоль оси OZ входного оптического потока в смещения  $\Delta L''_y$  вдоль оси OY:

$$\begin{cases} \Delta L_y = 0, \\ \Delta L_z = \Delta L''_y. \end{cases} \quad (5)$$

Потоки 3 и 4 проходят через возбуждаемый сигналом генератора 21 (рис. 1б) АО модулятор 5 с появлением на его выходе при режиме дифракции Брэгга двух пар оптических потоков, каждый из которых состоит из первого  $E(1)$  и нулевого  $E(0)$  дифракционных порядков. Далее описание составлено для первого канала с введением нумерации для второго канала в скобках.

Первый дифракционный порядок  $E(1)$  отклоняется по оси OY на двойной угол Брэгга  $\alpha_{\text{бр}}$  и внутри нулевого дифракционного порядка  $E(0)$ , т.е. в ближней зоне дифракции (зоне Френеля), интерферирует с ним с образованием бегущей интерференционной картины с шагом  $\Lambda_{\text{ик}}$ . Она освещает растр 6 (7) с шагом  $\Lambda_p$ , формируя бегущие комбинационные полосы с увеличенным шагом  $\Lambda_{\text{кп}}$ , входную микро-

линзу 9 (13) и, попадая в световод 10 (14), направляется им для регистрации на фотоприемник 11 (15). Три последних элемента образуют ВФПУ 8 (12).

Оптическое волокно позволяет вынести фотоприемник 11 (15) за пределы оптической схемы. Входная микролинза 9 (13) диаметром  $\approx 200 - 1000$  мкм выполняет роль диафрагмы при регистрации интерференционной картины в ближней зоне Френеля, облегчая введение оптических потоков в световод и передачу их к фотоприемнику 11 (15), снижая требования по угловым юстировкам.

Фотоприемник 11 (15) преобразует интерферирующие оптические потоки на частоте  $f_{\text{аом}}$  с учетом доплеровского сдвига частоты  $f_{\text{дон}}$  от смещений луча в выходной электрической сигнал. Он поступает на вход измерительной схемы 16 (17) (рис. 1б) на основе системы ФАПЧ, состоящей из замкнутого контура, включающего фазовый детектор 18, фильтр низких частот 19, синтезатора частот 20 с возможностью ослабления входных шумов и помех. Согласно измерительной схеме на рис. 1б сигнал с выхода фотоприемника 11 поступает на вход интерполятора 22, фазового 18 и частотного 25 детекторов.

Смещения лазерных лучей  $\Delta L'_y$  и  $\Delta L''_y$  приводят к соответствующим смещениям бегущих интерференционных картин мимо микролинз 9 (13) ВФПУ 8 (12), приводя к регистрации и измерениям обоими каналами двух фазовых сдвигов. Каждый из них измеряется интерполятором 22, выходной цифровой код которого следует на вход реверсивного счетчика 24, накапливающего код  $\Delta N_{\text{шум}}$ , и проходит через логическую схему 23 на цифровой вход фазового детектора 18. Он формирует на своем выходе сигнал, пропорциональный фазовому сдвигу в малом диапазоне, т.е. между сигналом фотоприемника 11 и цифровым кодом интерполятора 22.

Сигнал синтезатора частоты 20 и опорный сигнал генератора 21 поступают на вход фазометра 26, измеряющего фазовый сдвиг в малом диапазоне при малых скоростях движения, определяемым разрешением (последним(и) разрядом(ами)) интерполятора 22. Так реализуется дифференциальный метод измерения фазы и возможность т.н. старт-стопного режима работы АО ЛИС, когда максимальное разрешение достигается при малых скоростях, начале/окончании движения, характерного почти для всех перемещений.

В зависимости от доплеровского сдвига частоты  $f_{\text{дон}}$  между измерительным сигналом на выходе

фотоприемника 11 и опорным сигналом генератора 21, частотный детектор 25 формирует на своем выходе сигнал управления полосы пропускания фильтра низких частот 19, реализуя возможность адаптивного управления полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f_{\text{фанч}}$ .

В результате измерений на выходе измерительной схемы (рис. 1б), а именно, реверсивного счетчика 24 и фазометра 26 формируются два основных цифровых сигнала  $\Delta N_{\text{инт}}$  и  $\Delta N_{\text{фаз}}$  для смещений в большом и малом диапазонах с «низким» разрешением интерполятора 22 и «высоким» разрешением фазометра 26 внутри погрешности квантования интерполятора соответственно. После обработки этих цифровых сигналов судят о 2D смещениях  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$  в плоскости YOZ.

**2.2. Реализация режима «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений.** В [2] был описан способ повышения разрешающей способности продольных «быстрых и грубых» и «медленных и точных» измерений  $\Delta l_x$  за счет реализации дифференциального метода измерений при совместной работе интерполятора, фазометра и системы ФАПЧ. Подобный подход использован и для построения дополнительных двух каналов 16 и 17 (рис. 1а) для измерения 2D поперечных смещений  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$  лазерного луча.

При этом часть цифрового кода  $\Delta N_{\text{инт}}$  интерполятора 22, измеренная для «быстрых и грубых» измерений, соответствующая дробной части перемещений, т.е. малому диапазону, поступает на вход фазометра 26 для «медленных и точных» измерений (без учета цифрового кода на выходе системы ФАПЧ  $\Delta N_{\text{фанч}}$  используемого для введения коррекций):

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_{\text{инт}} + \Delta l_{\text{фаз}} = \\ &= \Delta N_{\text{инт}} \cdot \Delta l_{\text{рс1}} + \Delta N_{\text{фаз}} \cdot \Delta l_{\text{рс2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Формируемый интерполятором 22 выходной цифровой код  $N_{\text{инт}}$  можно записать в виде обобщенной формулы:

$$N_{\text{инт}} = \left[ \frac{\Delta l}{\Delta l_{\text{рс1}}} \right] = 2^{S_{\text{инт}} + (1-w)} \left[ \frac{\Delta l}{L'} \right], \quad (7)$$

где  $S_{\text{инт}}$  — разрядность интерполятора,  $w$ -код, определяющий режим продольных  $\Delta l_x$  (при  $w=0$ ) и поперечных  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$  (при  $w=1$ ) смещений,  $L' = \lambda^{(1-w)} \cdot \Lambda_{\text{узв}}^w$  — обобщенный пространственный период, описывающий функции преобразования для продольных смещений  $\Delta l_x$  при  $w=0$  и  $L' = \lambda$  с учетом двойного хода луча:

$$N_{\text{инт}} = 2^{S_{\text{инт}} + 1} \left[ \frac{\Delta l}{\lambda} \right] \quad (8)$$

или для поперечных смещений  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$  при  $w=1$  и  $L' = \Lambda_{\text{узв}}$

$$N_{\text{инт}} = 2^{S_{\text{инт}}} \left[ \frac{\Delta l}{\Lambda_{\text{узв}}} \right]. \quad (9)$$

Интерполятор 22 для АО ЛИС может быть создан с использованием резистивного делителя [5], а фазометр 26 — цифровой обработки сигналов [6, 7].

**2.3. Адаптивное управление полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f_{\text{фанч}}$  в зависимости от скорости движения и доплеровского сдвига частоты**

соответственно. Повышение разрешающей способности АО ЛИС возможно при повышении соотношения сигнал/шум за счет фильтрации входных шумов при сужении полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f_{\text{фанч}}$ .

Но такой подход ограничивает доплеровский сдвиг частоты  $f_{\text{гон}}$  и контролируемую скорость движения. И компромиссным решением может быть обеспечение адаптивного управления полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f_{\text{фанч}}$  от доплеровского сдвига частоты  $f_{\text{гон}}$  и скорости движения с учетом коэффициента запаса  $k_{\text{зан}}$ :

$$\Delta f_{\text{фанч}} = k_{\text{зан}} \cdot f_{\text{гон}} \quad (10)$$

Тогда, с учетом уравнений (1) и (2), можно сформировать две пары уравнений для «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений, определяющих максимальные и минимальные полосы пропускания системы ФАПЧ  $\Delta f'_{\text{max}}, \Delta f'_{\text{min}}, \Delta f''_{\text{max}}, \Delta f''_{\text{min}}$  для максимальной и минимальной скоростей продольных и поперечных смещений соответственно:

1. продольные смещения  $\Delta l_x$

1.1 «быстрые и грубые» измерения

$$\Delta f'_{\text{min}} = k_{\text{зан1}} \frac{2v''_{\text{прог}}}{\lambda}; \quad (11)$$

1.2 «медленные и точные» измерения

$$\Delta f'_{\text{min}} = k_{\text{зан1}} \frac{2v''_{\text{прог}}}{\lambda}; \quad (12)$$

2. поперечные смещения  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_z$

2.1 «быстрые и грубые» измерения

$$\Delta f''_{\text{max}} = k_{\text{зан2}} \frac{v''_{\text{нон}}}{\Lambda_{\text{узв}}}; \quad (13)$$

2.2 «медленные и точные» измерения

$$\Delta f''_{\text{min}} = k_{\text{зан2}} \frac{v''_{\text{нон}}}{\Lambda_{\text{узв}}}. \quad (14)$$

Максимальные значения полосы пропускания  $\Delta f'_{\text{max}}, \Delta f''_{\text{max}}$  систем ФАПЧ АО ЛИС для «быстрых и грубых» измерений определяются преимущественно динамическими характеристиками измерений, рассмотренными выше в п. 1. Минимальные значения полосы пропускания  $\Delta f'_{\text{min}}, \Delta f''_{\text{min}}$  «медленные и точные» измерения, вероятно, будут определяться частотой 50 Гц помехи сетевого питания, т.е.  $\Delta f'_{\text{min}} \approx \Delta f''_{\text{min}} < 50$  Гц. Другие особенности адаптивного управления будут рассмотрены во второй части статьи.

**2.4. Использование ВФПУ для регистрации интерференционного оптического сигнала.** Упрощение оптической схемы с вынесением фотоприемника за ее пределы и регистрацией интерференционной картины малой входной апертурой возможно за счет использования ВФПУ (рис. 2а). Оно включает фотоприемник, оптический вход которого выполнен в виде оптического волокна с входной микролинзой полусферической (рис. 2б) или шаровидной (рис. 2в) форм нужного размера и диаграммой приема излучения, выполненных лазерным нагревом или фотополимерным способом [8]. Тогда входной оптический поток из двух дифракционных порядков  $E(0)$  и  $E(+1)$ , создающих интерференционную картину (рис. 2а), следует по пути микролинза → входной торец волокна → оптическое волокно → фотоприемник.

**3. Совершенствование схемотехники АО ЛИС для измерения 3D смещений.** В разделе рассмотре-

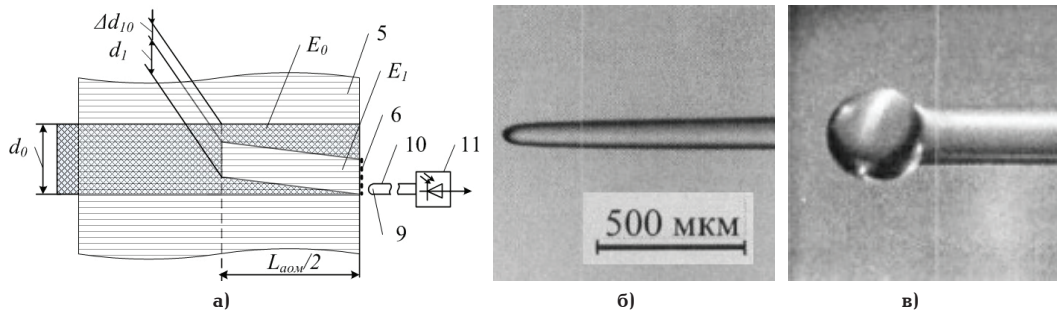


Рис. 2. Волоконное фотоприемное устройство: при регистрации интерференционной картины, образованной оптическими потоками E(0) и E(+1) (а), микролинзы на торцах оптического волокна (б, в) [8]

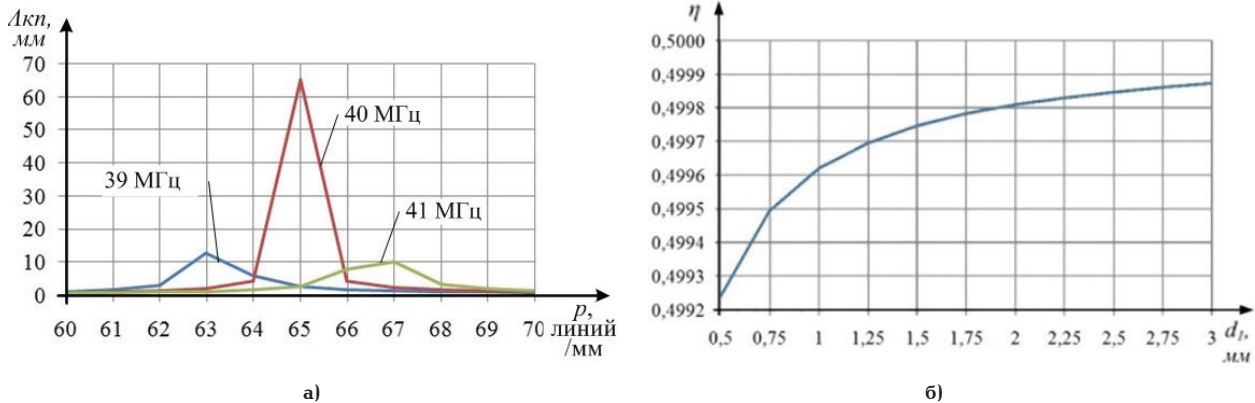


Рис. 3. Графики зависимостей оптических параметров: значения комбинационных полос  $\Lambda_{кп}$  для частот АО модуляции 39, 40 и 41 МГц для шага раstra 65 делений/мм (а), отношение интенсивности  $\eta$  дифракционного порядка  $E_1$  (б)

ны технические решения, улучшающие характеристики АО ЛИС для измерения 3D смещений.

3.1. *Призматическая оптическая схема.* Призматическая оптическая схема делит входной лазерный луч, смещаемый в плоскости YOZ на два потока со смещениями  $\Delta l'_y$  и  $\Delta l''_y$  вдоль оси OY. Ее основным элементом является призма, поворачивающая изображение входного лазерного луча на  $90^\circ$ . Входящий в призму через грань ABCDE луч в результате 4-кратного полного отражения от зеркально покрытых граней следует по маршруту (рис. 1в): AFKE  $\rightarrow$  BGHC  $\rightarrow$  EDIK  $\rightarrow$  AFGV и выходит параллельно вошедшему лучу через грань FGHIK [9].

3.2. *Определение шага раstra.* Между АО модулятором и микролинзой световода ВФПУ установлен растр 7 (8) с шагом  $\Lambda_p$ , применение которого позволяет перейти от регистрации интерференционной картины с малым шагом  $\Lambda_{ук}$  к регистрации комбинационных полос с большим шагом  $\Lambda_{кп}$ . С учетом этого значение  $\Lambda_{кп}$  увеличивается согласно выражению:

$$\Lambda_{кп} = \frac{\Lambda_p \cdot \Lambda_{ук}}{|\Lambda_p - \Lambda_{ук}|} \quad (15)$$

В соответствии с (15) построены графики зависимости значения комбинационных полос  $\Lambda_{кп}$  от изменений числа делений  $p$  в растре в диапазоне от 60 до 70 линий/мм (где  $\Lambda_p = 1/p$ ) для АОМ №1 и трех значений  $\Lambda_{ук}$  частот модуляции  $f_{аом}$ : 39, 40 и 41 МГц (где  $\Lambda_{ук} = v_{зв}/f_{аом}$ ). Как видно, наибольшее значение  $\Lambda_{кп} \approx 65$  мм образуется при  $f_{аом} = 40$  МГц и  $p = 65$  линий/мм (рис. 3а).

Однако для устойчивого фотоприема, как правило, добиваются выполнения условия:  $d_{мл} \leq (\Lambda_{кп}/6 \dots \Lambda_{кп}/4)$ , с учетом которого шаг раstra определяется формулой (для худшего варианта, когда  $d_{мл} \leq \Lambda_{кп}/6$ ):

$$\Lambda_p = \frac{6d_{мл} \cdot \Lambda_{ук}}{|6d_{мл} - \Lambda_{ук}|} \quad (16)$$

При  $d_{мл} = 0,3$  мм и  $\Lambda_{ук} = 15,4$  мкм шаг раstra должен составлять  $\Lambda_p \approx 15,5$  мкм.

3.3. *Особенности оптического сопряжения интерферирующих дифракционных порядков в зоне Френеля АО модулятора и ВФПУ.* В соответствии с соотношением диаметров  $d_0$  и  $d_1$  нулевого  $E(0)$  и первого  $E(+1)$  дифракционных порядков (рис. 2а) соответственно запишем  $d_0 = d_1 + 2\Delta$ . Также с учетом отклонения первого  $E(+1)$  дифракционного порядка можно записать  $\frac{2\Delta}{L_{аом}} = \text{tg}\alpha_{\sigma p}$  и, соответственно, получить  $d_0 = d_1 + L_{аом} \cdot \text{tg}\alpha_{\sigma p}$ . И тогда соотношение интенсивностей дифракционных порядков  $\eta$  можно выразить формулой:

$$\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_0} \approx \frac{S_1}{S_1 + S_0} = \frac{d_1^2}{d_1^2 + d_0^2} = \frac{d_1^2}{d_1^2 + (d_1 + L_{аом} \cdot \text{tg}\alpha_{\sigma p})^2} \quad (17)$$

где  $I_0, I_1, S_0, S_1$  — интенсивность, площадь и диаметр нулевого  $E(0)$  и первого  $E(+1)$  дифракционных порядков.

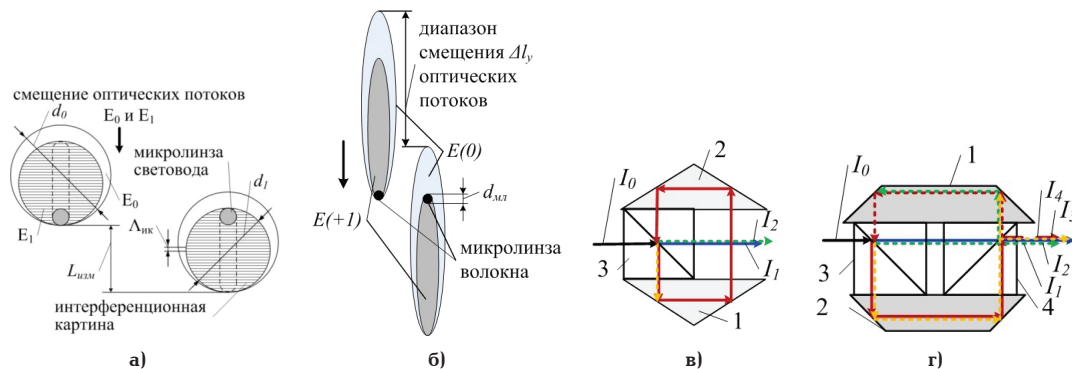


Рис. 4. Смещение интерференционных картин относительно микролинзы световода: круглой (а) (используемая часть интерференционной картины выделена серым фоном с пунктирным контуром) и овальной (б) форм, формирователи световой полосы: с одним (в) и двумя (г) светоделителями

Для данных, взятых из [2, 3] при разведении лучей (двойной угол Брэгга)  $\alpha_{бр} = 2,17^\circ$  и  $L_{аом} = 20$  мм имеем  $L_{аом} \cdot \text{tg} \alpha_{бр} = 0,76 \cdot 10^{-3}$ , позволяя построить график зависимости (17) от  $d_1$ . Как видно, она асимптотически стремится к 0,5 при изменении  $d_1$  от 0,5 до 3 мм (рис. 3б).

3.4. Диапазон измерения и возможности его увеличения. Диапазон измерения  $L_{изм}$  определяется разностью диаметров круглой интерференционной картины, задаваемой первым дифракционным порядком  $E(+1)$   $d_{ик} = 2r_1$  и микролинзы  $d_{мл}$  (рис. 4):

$$L_{изм} = d_{ик} - d_{мл} = 2r_1 - d_{мл}. \quad (18)$$

При  $d_{мл} = 0,3$  мм и  $d_{ик} = 2r_1 = 2$  мм значение  $L_{изм}$  равно 1,7 мм, составляя  $\approx 110$  пространственных периодов  $l_{пл} = \Lambda_{аом} = 15,4$  мм для АОМ №1.

При перемещениях круглой интерференционной картины мимо круглой микролинзы световода ВПФУ (рис. 2) используется лишь ее центральная эллиптическая часть (выделена пунктиром на рис. 4а). И эффективность  $G$  использования оптического сигнала интерференционной картины можно оценить как отношение площади такого эллипса  $S_{эл}$ , связанной с радиусом микролинзы  $r_{мл}$ , к площади интерференционной картины  $S_{ик}$ :

$$G = \frac{S_{эл}}{S_{ик}} = \frac{\pi r_1 r_{мл}}{\pi r_1^2} = \frac{r_{мл}}{r_1}. \quad (19)$$

И для  $d_{мл} = 2r_{мл} = 0,3$  мм и  $d_1 = 2r_1 = 2$  мм имеем  $G = 0,15$ , или всего лишь 15 %.

Формирование оптического потока в виде полосы позволяет создать в зоне Френеля интерференционную картину в виде полосы с увеличением диапазона измерения  $L_y$ , равного длине полосы  $l_n$  без учета диаметра микролинзы  $d_{мл}$ :

$$L_y = l_n - d_{мл} = 2 \cdot k \cdot r \lambda - d_{мл}, \quad (20)$$

где  $k$  — коэффициент удлинения лазерного луча.

Предложены два формирователи световой полосы за счет т.н. «точечного» удлинения, т.е. формирования полосы из нескольких лучей, выстроенных в линию.

Первый состоит из двух отражателей 1, 2 и светоделителя 3 (рис. 4в) с коэффициентами делением  $a$  и  $(1-a)$  для прямого и отклоненного лучей. Амплитуды порядков можно записать согласно эмпирической формуле:

$$I = I_0 \left[ a + (1-a)^2 \sum_{n=1}^{\infty} a^{n-1} \right]. \quad (21)$$

Так, при значениях  $a = 0,2; 0,3; 0,4$  и  $0,5$  три первые порядка имеют амплитуды:  $0,2/0,64/0,128; 0,3/0,49/0,147$ ,  $0,4/0,36/0,144$  и  $0,5/0,25/0,125$ , демонстрируя существенное падение амплитуды уже на третьем порядке. Это означает, что может быть получено всего лишь  $\approx$  двукратное удлинение световой полосы.

Во втором формирователе световой полосы (рис. 4г) добавлен дополнительный светоделитель 4. И, согласно его оптической схеме, при равном делении света в каждом светоделителе уравнение для набора из двух групп создаваемых пространственно разнесенных оптических потоков можно представить в виде суммы двух сходящихся рядов:

$$I = I_0 \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n}} (l_1 + (n-1)\Delta l') + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n}} (l_1 + (n-1)\Delta l' + \Delta l'') \right] = I_0 \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n}} (l_1 + (n-1)\Delta l') + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n}} (l_2 + (n-1)\Delta l'') \right], \quad (22)$$

где  $n$  — номер порядка,  $l_1$  и  $l_2$  — координаты первых порядков двух потоков,  $\Delta l'$  и  $\Delta l''$  — смещения, для двух потоков, определяемые длиной призм X и Y.

Для первых наиболее значимых трех членов ( $n = 1, 2, 3$ ) из формулы (22) получим:

$$I \approx I_0 \left[ \frac{1}{4} (l_1) + \frac{1}{16} (l_1 - \Delta l') + \frac{1}{64} (l_1 - 2\Delta l') + \frac{1}{4} (l_2) + \frac{1}{16} (l_2 - \Delta l'') + \frac{1}{64} (l_2 - 2\Delta l'') \right], \quad (23)$$

составляя  $2 \cdot \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{64} \right] = \frac{42}{64} \approx 0,656$  мощности входного потока, т.е.  $\approx 2/3$ .

Для такого формирователи световой полосы удлинение световой полосы можно достигнуть уже  $\approx 4$ .

3.5. Расчет максимальной длины оптического волокна ВФПУ. Для световодов выделяют несколько видов дисперсий  $t_{гус}$ : модовую (или межмодовую)  $t_{мог}$ , поляризационную  $t_{пол}$  и хроматическую  $t_{хр}$ , состоящую из материальной  $t_{мат}$  и волноводной  $t_{вол}$

дисперсий. Суммарную дисперсию  $t_{guc}$  можно рассчитать согласно выражению:

$$t_{guc} = \sqrt{t_{mog}^2 + t_{xp}^2 + t_{пол}^2} = \sqrt{t_{mog}^2 + (t_{mat} + t_{вол})^2 + t_{пол}^2}. \quad (24)$$

Для многомодовых волокон со ступенчатым и градиентным профилями показателями преломления (ППП), используемыми в ВФПУ, значениями поляризационной  $t_{пол}$  и волноводной  $t_{вол}$  дисперсий можно пренебречь. Также для этих волокон будут выполняться два условия по дисперсиям  $\tau_{mog} > \tau_{mat}$  и  $\tau_{mat} > \tau_{ог}$  соответственно, которые формируют два равенства  $\tau = \tau_{mog}$  и  $\tau = \tau_{mat}$ .

Разрешающая способность высокоточных АО ЛИС в основном зависит от уровня джиттера  $\Delta t_{гж}$  генератора, управляемого напряжением (или синтезатора частоты) системы ФАПЧ, определяемого уровнем шумов управляющего сигнала [2]. У АО ЛИС для продольных смещений при уровне джиттера  $\Delta t_{гж} \approx 3$  пс [10–11] на частоте  $\approx 60$  МГц разрешающая способность может достигнуть значений  $\Delta l_{рс} \approx \lambda/10000$  [2].

С учетом этого расчет максимальной длины световода ВФПУ возможен при соотношении уровня дисперсии волокна ВФПУ с джиттером для двух вариантов: жесткого и мягкого условий: когда вносимой составляющей погрешности измерений можно пренебречь или она будет соразмерна другой (им) составляющим погрешности измерений соответственно. Эти условия можно выразить выражениями:

$$\text{— для жесткого условия: } \Delta \tau_{guc} = \Delta t_{гж} / 10; \quad (25)$$

$$\text{— для мягкого условия: } \Delta \tau_{guc} = \Delta t_{гж}. \quad (26)$$

Для ММ волокон обычно приводится т.н. удельная дисперсия  $\Delta \tau_{guc} = \Delta t_{гж} / l$ , приходящаяся на 1 км волокна, нс/км. И для волокон со ступенчатым и градиентным ППП их минимальные значения могут быть уменьшены до значений  $\approx 20$  нс/км и  $\approx 0,5$  нс/км (для  $\lambda \approx 0,527$  нм) соответственно [12].

С учетом этого соотношения (25) и (26) можно изменить к виду

$$\text{— для жесткого условия: } l = \frac{\Delta t_{гж}}{10 \Delta \tau_{guc}}; \quad (27)$$

$$\text{— для мягкого условия: } l = \frac{\Delta t_{гж}}{\Delta \tau_{guc}} \quad (28)$$

и рассчитать искомые значения, которые сведены в табл. 3.

Таким образом, ВФПУ могут быть удалены от зоны Френеля на расстояние до 0,6 м, минимизируя оптическую схему при использовании тонких оптических волокон с микролинзами для регистрации интерференционной картины.

**3.6. Многоапертурный АО модулятор.** АО модулятор № 2 может быть выполнен в виде многоапертурного двухкамерного АО модулятора, включающего круглый пьезоизлучатель 1, оптически прозрачный корпус 2, круглый поглотитель 3, соединительное отверстие 4, заливная пробка 5, воздушный «пузырек-демпфер» 6, «рабочая» жидкость (светозвукопровод) 7 (рис. 5а, б) [13]. Его поглотитель 3 использует свойства «резонансного» прохож-

Таблица 3

Длины оптических волокон ВФПУ со ступенчатым  $l_{ст}$  и градиентным  $l_{гр}$  ППП

№	Ограничивающее условие	Длина многомодового оптического волокна ВФПУ	
		ступенчатый ППП $l_{ст}$ , см (для $\Delta \tau_{guc} = 20$ нс/км)	градиентный ППП $l_{гр}$ , см (для $\Delta \tau_{guc} = 0,5$ нс/км)
1	Жесткое условие $l = \frac{\Delta t_{гж}}{10 \Delta \tau_{guc}}$	1,5	60
2	Мягкое условие $l = \frac{\Delta t_{гж}}{\Delta \tau_{guc}}$	15	600

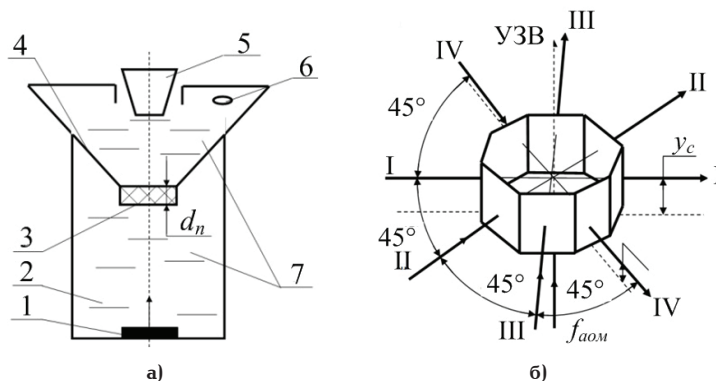


Рис. 5. Многоапертурный жидкостной АО модулятор [13]: двухкамерная конструкция (а) и схема прохождения четырех лучей (I–IV) через четырехапертурный АО модулятор (б)

дения УЗВ через пластину полимера, снижающий требования по согласованию волновых сопротивлений материалов. В этом случае коэффициент отражения  $r_n$ :

$$r_n = \frac{(m^2 - 1)^2}{4m^2 \text{ctg}^2 \left( \frac{2\pi l_n}{\Lambda_{\text{узв}}} \right) + (m^2 + 1)^2}, \quad (29)$$

где  $d_n$  — толщина пластины,  $\Lambda_{\text{узв}}$  — длина УЗВ в материале поглотителя,  $m$  — отношение волновых сопротивлений материала светозвукопровода и поглотителя,  $l$  — глубина УЗВ поля.

Для минимизации коэффициента отражения  $r_n$  толщина пластины должна выбираться, как минимум, кратной половине длины УЗВ поглотителя:

$$d_n = g \frac{\Lambda_{\text{узв}}}{2}, \quad (30)$$

где  $g$  — целое число, удовлетворяющее условию:

$$g = \frac{1}{\pi \varepsilon} \ln \frac{1}{a_n r_n}, \quad (31)$$

где  $a_n$  — коэффициент ослабления вторичной УЗВ, возвращающейся в светозвукопровод АО модулятора после двукратного прохождения поглотителя.

Для АО модулятора № 2 с  $f_{\text{ом}} = 8$  МГц рекомендовано применять полимеры и пластмассы с  $\varepsilon > 0,03$  с целью уменьшения толщины поглотителя и размеров АО модулятора соответственно.

**Заключение.** Исследования показывают, что при совершенствовании АО ЛИС для измерения 3D смещений можно достичь следующего прогресса:

1. Упрощения оптической схемы за счет двух технических решений:

— за счет перехода от использования 2D к 1D АО модулятора;

— вынесения фотоприемника за пределы оптической схемы при приеме и интерферирующих оптических потоков в ближней зоне Френеля оптическим волокном со входной микролинзой.

2. Увеличения диапазона измерений при измерении поперечных смещений при формировании из круглого лазерного луча т.н. «точечной» световой полосы.

3. Построения трехканальной измерительной схемы, реализующей дифференциальный метод измерения, в каждом канале которых применены интерполяторы, фазометр и система ФАПЧ с адаптивным управлением ее полосы пропускания системы в зависимости от скорости движения и доплеровского сдвига частоты соответственно.

#### Библиографический список

1. Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения перемещений с фазоцифровым преобразованием // Технология машиностроения. 2002. № 5. С. 33–40.

2. Леун Е. В. Повышение быстродействия и разрешающей способности акустооптических гетеродинных лазерных интерферометров перемещений. Адаптивный лазерный интерферометр // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 92–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-92-98.

3. Леун Е. В. Совершенствование методов и средств контроля отклонений от прямолинейности на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 71–77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77.

4. Леун Е. В., Шаханов А. Е. Повышение точности гибридных сканирующих 3D волоконно-оптических измерительных головок с акустооптическим датчиком обратной связи для контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 63–70. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-63-70.

5. Пат. 2016380 Российская Федерация, МПК G 01 B 21/00. Способ автоматической интерполяции фазового сдвига в лазерных интерферометрах и устройство для его осуществления / Михальченко Е. П., Рюмин А. В., Яковлев Н. А. № 4911738; заявл. 15.02.91; опубл. 15.07.94.

6. Гончаренко А. М., Бугров С. В., Воевода А. А. [и др.]. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра // Сборник научных трудов Новосибирского гос. техн. ун-та. 2009. № 2 (56). С. 109–114.

7. Пат. 2582625 Российская Федерация, МПК G 01 R 23/02. Фазометр / Жмудь В. А., Ляпидевский А. В. № 2015106094; заявл. 20.02.15; опубл. 27.04.16. Бюл. № 12.

8. Петров А. А. Лазерное формирование микролинз на базе оптических волокон: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 112 с.

9. А. с. № 637765 Российская Федерация, МПК G 02 2 D 5/04. Отражательная призма для поворота изображения на 90° / Кокоулин Ф. И. № 2409427; заявл. 27.09.76; опубл. 15.12.78, Бюл. № 46.

10. Генераторы кварцевые ГК-152-УН-А. ЗАО НПФ «БМГ ПЛЮС». URL: <http://www.bmgplus.ru/images/pdf/pdf152a.pdf> (дата обращения: 10.04.2020).

11. Генераторы, управляемые напряжением серии 6U. Даташит для 6U-10.000МБЕ-Т (ТХС), 6U-25.000МБЕ-Т (ТХС), 6U-16.38. URL: [https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf\\_file=http%253A%252F%252Fwww.farnell.com%252Fdatasheets%252F1740905.pdf](https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=http%253A%252F%252Fwww.farnell.com%252Fdatasheets%252F1740905.pdf) (дата обращения: 10.04.2020).

12. Каталог продукции лаборатории специальных оптических волокон ОМ-64. НПК «Волокно», АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова». URL: [http://fiber-lab.ru/new\\_ed/rus/prod\\_new.html?path=produkcija.html](http://fiber-lab.ru/new_ed/rus/prod_new.html?path=produkcija.html) (дата обращения: 30.09.2020).

13. Базыкин С. Н., Базыкина Н. А., Капезин С. В., Шошкина М. Н. Многоапертурный акустооптический модулятор света // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 2. DOI: 10.15862/148TVN215.

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

#### Для цитирования

Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения трехкоординатных перемещений. Часть 1 // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-103-110.

Статья поступила в редакцию 30.09.2020 г.

© Е. В. Леун