

## СЕТЕВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ЗАКРЫТЫМ ОПТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ

© 2012 Г. И. Леонович<sup>1</sup>, С. А. Матюнин<sup>2</sup>, Р. Р. Акбаров<sup>3</sup>, С. В. Ивков<sup>3</sup>,  
Н. А. Ливочкина<sup>3</sup>, А. И. Глушков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>3</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Предложены принципы построения, структурные схемы и алгоритмы функционирования цифровых волоконно-оптических датчиков перемещения с закрытым оптическим каналом, характеризующихся высокой надежностью и простотой интегрирования в пассивную сенсорную сеть.

*Пассивная волоконно-оптическая сенсорная сеть, внутриволоконная Брэгговская решетка, сенсорное покрытие, цифровые волоконно-оптические датчики перемещения с закрытым оптическим каналом.*

### Введение

Пассивные волоконно-оптические сенсорные сети (ПВОСС) в ближайшие 10 лет на 80...90% покроют потребности аэрокосмической и оборонной отраслей [1-4]. Главное достоинство ПВОСС – легко реализуемое встраивание компонентов сети непосредственно в несущие конструкции, поворотные и деформируемые плоскости, силовые агрегаты и наружные элементы контрольно-измерительной аппаратуры. Этому содействуют такие качества ПВОСС, как сверхмалые массогабаритные показатели, высокая устойчивость к дестабилизирующим факторам и активным средам, долговечность. Активно внедряет и инвестирует в ПВОСС военно-промышленный комплекс США и Западной Европы. В частности, в аналитическом обзоре исследовательской технологической организации НАТО (RTO NATO) особое внимание уделено разработке и прогнозу использования волоконно-оптических датчиков (ВОД) и бортовых сенсорных сетей на основе Брэгговских решеток [1]. В числе основных поставщиков сетевого и сенсорного оборудования - компании Elcis, Leine&Linde, M.C.B., Tamagawa Seiki, Sony, Siemens, TM, Megetron, Motorola, IEI Technology, Fraba Posital, Kuebler, Omron, Pepperl+Fuchs, Heidenhain и др.

В настоящее время наблюдается дефицит ВОД угловых и линейных перемещений с закрытым оптическим каналом (ЗОК), не предложено ни одного комплексного решения задачи создания ПВОСС с универсальным протоколом сбора и обработки данных, в зачаточном состоянии целый сектор гибридных датчиков, построенных на принципах взаимодействия сенсорных покрытий с сопряженным с ними оптическим волокном (ОВ). В статье приведен анализ ряда теоретических и экспериментальных результатов, которые могут стать основой для создания широкой номенклатуры цифровых ВОД ЗОК перемещения для ПВОСС.

### Чувствительные элементы и покрытия

Наиболее распространенным, универсальным и эффективным чувствительным элементом интегрированных ВОД считается формируемая в сердцевине ОВ внутриволоконная Брэгговская решетка (ВБР) [1-4]. ВБР представляет собой участок ОВ длиной  $L_{BG}=0,3...3$  см, в котором показатель преломления сердцевины  $n_0$  промодулирован в продольном направлении с пространственным периодом  $L=300...600$  нм и глубиной модуляции  $\delta n_0=10^{-3}...10^{-4}$  (рис. 1). Можно создать ВБР с потерями  $\leq 0,1$  дБ, с точностью  $\pm 0,05$  нм и высоким подавлением помех соседнего кана-

ла ( $\geq 40$ дБ). Для низшей пространственной моды структура представляет собой спектрально-селективное зеркало с коэффициентом отражения  $K_0$  на резонансной длине волны  $I_{BG0} = 2n_0 \Lambda$ . За счет увеличения числа «штрихов» решетки до  $N_{BG} = 10^3 \dots 10^4$  значение  $K_{0max}(I) \gg 1$ .

Смещение  $\lambda_{BG}$ , используемое для со-

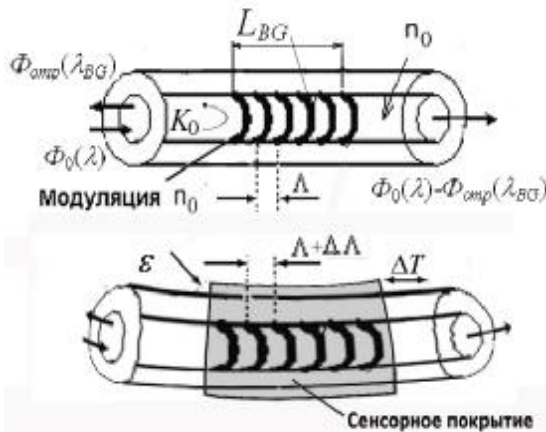


Рис. 1. Внутриволоконная решетка Брэгга

здания встроенных сенсоров, зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений [4]:

$$\Delta I_{BG} = 2n_0 \Lambda \left\{ 1 - \left( \frac{n_0^2}{2} \right) [r_{12} - n(r_{11} + r_{12})] \right\} e + \left[ a + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right] \Delta T, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  - изменение температуры;  $\epsilon$  - приложенное механическое напряжение;  $r_{ij}$  - коэффициенты упругооптического тензора;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

Типичные значения сдвига  $\Delta \lambda_{BG}(\Delta T)$  составляют  $\sim 0,01$  нм/К от относительного удлинения сенсорного участка световода  $\sim 10^3 \times \Delta L_{BG} / L_{BG}$  нм. Современные измерительные средства позволяют определить  $\lambda_{BG}$  и  $\Delta \lambda_{BG}$  с точностью до долей нм при измерении  $\Delta L_{BG}(x)$  и  $\Delta n_0(x)$  при различных внешних воздействиях  $x$  на участок  $L_{BG}$ . К неоспоримым достоинствам ВОД на ВБР можно отнести малые размеры и массу, универсальность, химическую стойкость, возможность создания сенсорных сетей. Недостатки – пока ограниченный перечень измеряемых пара-

метров, связанный с зачаточным состоянием развития промежуточных сенсорных элементов и покрытий ОБ, основанных на преобразовании измеряемого параметра  $x$  в механическое напряжение и/или температуру (рис. 1).

Другие эффекты, предлагаемые, в частности, для измерения перемещения и давления: 1) возбуждение и смещение мод при микроизгибах по большому радиусу ( $R > 10$  мм) и 2) потери в ОБ при макроизгибах по малому радиусу ( $R \approx 1 \dots 10$  мм). В первом варианте используется зависимость выходной мощности возбуждаемых и смещаемых мод от изгиба ОБ с амплитудой до 1 мм при длине сенсорного участка 1 см. Во втором случае, по аналогии с туннельным прохождением частиц через потенциальный барьер, разность коэффициентов преломления сердцевин и оболочки трактуется как «высота барьера» [6]. При изгибе с малым радиусом имеет место понижение этого барьера, и в результате увеличивается вероятность выхода излучения из сердцевин в оболочку.

Потери мощности сигнала в децибелах на изгибе вычисляют по формуле [6]:

$$A = 10 \lg \left( \frac{J}{J_0} \right) = \frac{5j R \lg e}{2\sqrt{rR}} P_D, \quad (2)$$

где  $J, J_0$  – интенсивность поля при изогнутом и прямом волокне соответственно;  $j$  – угол изгиба;  $r$  – радиус сердцевин;  $R$  – радиус изгиба;  $P_D$  – вероятность туннельного перехода через барьер.

Из (2) следует, что потери прямо пропорциональны длине изогнутого участка волокна и возрастают с уменьшением радиуса кривизны до 4 дБ и более. Достоинство эффекта - простота реализации точечных и распределенных датчиков, построенных на измерении амплитуды оптического сигнала. Недостатки сенсоров с подвижным ОБ – ограниченное число пространственных эволюций при больших динамических нагрузках на сенсорный участок ОБ, а также связанная с механическими микрповреждениями деградация ОБ и нестабильность результатов. Вместе с тем, при фиксированных изгибах ОБ, открываются возможности не только для вывода, но и для ввода светового излучения

от источника, включенного в измеряемую электрическую схему с цифровым выходом [7].

К числу перспективных составляющих пассивных ВОД относятся гибридные сенсоры, в первую очередь интегрально-оптические (ГИОС) [8-10]. ГИОС в общем случае представляет собой составной чувствительно-кондуцирующий элемент, в котором сопряжены два типа преобразователей – химический и физический. Химический сенсор состоит из слоя чувствительного материала, который формирует селективный отклик на определяемый компонент. Физический преобразователь – трансдьюсер - преобразует энергию, которая возникает в ходе реакции селективного слоя с измеряемым воздействием (компонентом), в модулированный по определенным параметрам оптический сигнал.

Для повышения избирательности и расширения динамического диапазона используются селективно-кондуцирующие слои (ионообменные, гидрофобные, фотохромные и другие пленки). В зависимости от типа ГИОС их действие основано на принципах поглощения и отражения света, люминесценции, изменения объема, деформации и др. [1-4, 7-9].

До 70% бортовых датчиков КА и ЛА являются преобразователями угловых и линейных перемещений. Причем, в первую очередь востребованы датчики с цифровым выходом, устойчиво работающие в жестких условиях эксплуатации. Практически все известные цифровые ВОД перемещения построены по схеме с открытым оптическим каналом. Одним из перспективных направлений для создания цифровых ВОДЗОК перемещения является использование ГИОС. В работе [10] описан принцип построения ВОД давления, основанный на кондуцирующем эффекте слоя из алифатического полиуретана со сферическими наночастицами двуокиси кремния толщиной 10...1000 нм. Такое покрытие дает 5...40-кратное увеличение динамического диапазона и чувствительности датчика к механическому и ультразвуковому воздействию. Перемещающийся источник воздействия, закрепленный на объекте изме-

рения, открывает возможности для построения на базе подобного и других кондуцирующих ГИОС различных типов ЦВОДЗОК.

### Цифровые ВОД перемещения с закрытым оптическим каналом

В большинстве ПВОСС используется импульсный источник излучения на основе полупроводниковых лазеров или светодиодов. Для получения пространственного, временного или волнового распределения кодовых импульсов, количество, амплитуда и взаимное расположение которых коррелирует с измеряемой величиной, можно использовать оптические линии задержки и профилированные ГИОС.

На рис. 2, а в качестве примера показана структурная схема ЦВОДЗОК для преобразования линейного перемещения в оптический последовательный двоичный код.

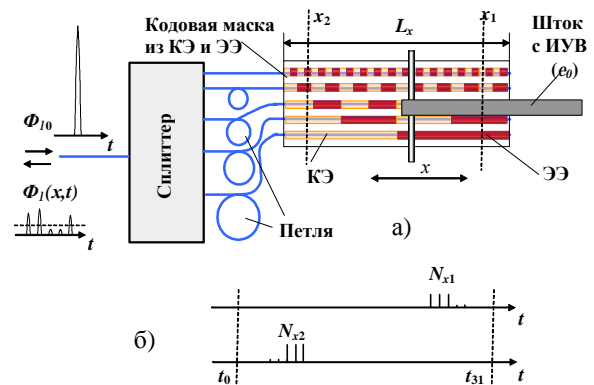


Рис. 2. Цифровой волоконно-оптический датчик линейного перемещения с закрытым оптическим каналом ( $m=5$ )

За основу ВОД берется оптический разветвитель (сплиттер) и отрезки ОВ, число  $m$  которых равно разрядности цифрового кода. На ОВ накладывается кодовая маска, выполненная из набора экранирующих ЭЭ и кондуцирующих КЭ элементов. Рисунок ВБР совпадает с рисунком шкалы, т.е. решетки наносятся под КЭ. Перемещающийся штوك снабжен источником управляющего воздействия ИУВ ( $e_0$ ), например, нажимным выступом, ширина которого равнозначна участку ОВ с  $N_{BC} \approx 10^3$  штрихами.

В датчике используется эффект отражения узкополосного оптического импульса

от деформируемого участка ОВ со смещенной ВБР, брэгговская длина волны  $L_{BG}$  которой связана с центральной длиной волны источника излучения  $L_{III}$  соотношением (1) таким образом, что длина волны отраженного сигнала равна

$$I_o = \begin{cases} I_{BG} \neq I_{III} & \text{при } e \ll e_0 \\ I_{BG} + \Delta L_{BG} = I_{BG0} = I_{III} & \text{при } e = e_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где значения  $e$  определяются профилем кодовой маски.

С целью временного разделения разрядных каналов задержка отраженного импульса в ОВ под  $i$ -м КЭ  $k$ -й дорожки шкалы плавно варьируется в пределах элемента и всей шкалы в соответствии с алгоритмом

$$\Delta L_{ik} = 2 \left[ \left( \frac{L_{k0}}{c} + (i-1) \rightarrow i \right) \left( \frac{L_x}{v2^k} \right) \right], \quad i=2,4,6,\dots,2^k, \quad (4)$$

где  $L_{k0}$  – длина согласующей петли ОВ для  $k$ -й разрядной дорожки;  $L_x$  – диапазон перемещения, равный длине чувствительного участка ВОД;  $c$  – скорость распространения импульса в ОВ.

Согласующие петли выполняют функцию упорядоченного сдвига импульсов разрядных дорожек, как показано на рис. 2, б. В частности, длины петель могут выбираться из соотношения

$$L_{k0} = \frac{M(k-1)L_x}{2^{k-1}}, \quad (5)$$

где  $M$  – масштабирующий коэффициент, значение которого определяется длительностью импульса, дисперсионными явлениями, инерционностью фотоприемного устройства и электронных компонентов ЭБ.

На рис. 3 показана структурная схема цифрового волоконно-оптического преобразователя линейного перемещения с закрытым оптическим каналом, работающего как на прямой, так и на отраженной волне.

Датчик представляет собой изогнутый по топологии кодирующих дорожек световод с сенсорным покрытием, выполненным в форме цифровой шкалы по аналогии с предыдущим примером. В таком ВОД реализуется управление оптическим бюджетом в соответствии с алгоритмом цифровой амплитудной модуляции. При экранировании управляющего воздействия (УВ) участка ОВ

под ЭЭ имеют коэффициент пропускания  $\tau = \tau_0 \approx 1$  (затухание  $A \approx 0$ ), а при наличии КЭ  $t_i = t_0 - 2^i \Delta t$ , где  $i$  – номер разрядной дорожки,  $\Delta t$  – квант дискретизации пропускания.

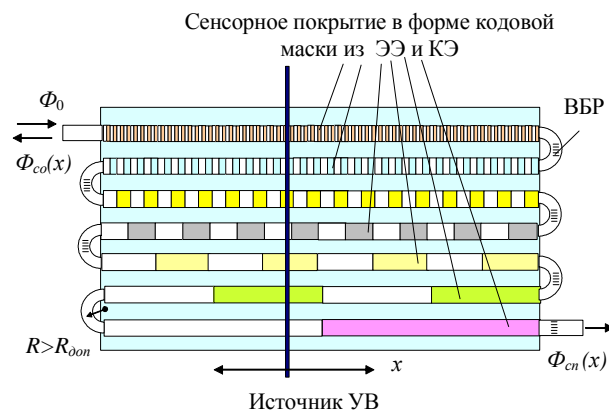


Рис. 3. ВОД линейного перемещения с амплитудной цифровой модуляцией оптического сигнала

Формированием разделительных ВБР реализуется дополнительное разделение каналов по длине волны, способствующее снижению требований к точности выдерживания значения  $e_0$ . Снижению инструментальной погрешности датчика способствуют выполнение маски в соответствии с кодом Грея, увеличение длины участка ОВ с ВБР относительно длины кодирующего элемента, нанесение ВБР с девиацией периода  $L$ , а также применение сенсорно-кондуцирующих покрытий, фокусирующих воздействие на центр основания КЭ, сопряженного с ОВ. Достижение высокой разрешающей способности при превышении длины участков с ВБР ( $L_{BG} = 0,3...3$  мм) длины кодирующих элементов шкалы ( $L_{BG} > \Delta L_{ik}$ ) осуществляется формированием нониусных шкал с редуцией кванта измерения перемещения и реализацией других известных способов.

В простейшем накапливающем датчике количество квантованных дорожек уменьшается до двух. При этом за счет взаимного смещения дорожек с квантами шириной  $a_0/2$  по координате перемещения  $x$  на величину  $a_0/4$  ( $a_0$  – период квантования) реализуется алгоритм формирования кода перемещения и его направления.

## Пассивные сенсорные сети на цифровых ВОД перемещения с закрытым оптическим каналом

При проектировании ПВОСС под конкретный объект необходим комплексный подход к решению нескольких задач, связанных со следующими основными факторами: количество и места расположения точек и групп учета (съема данных); место расположения устройства сбора и обработки информации (электронного блока); кратность резервирования датчиков и каналов передачи информации; объем информации; период опроса и допустимая задержка получения конечной информации.

На рис. 4 представлен пример топологии ПВОСС, построенной на однотипных рефлектометрических датчиках, инициируемых импульсным источником излучения, и соответствующий оптический бюджет сети.

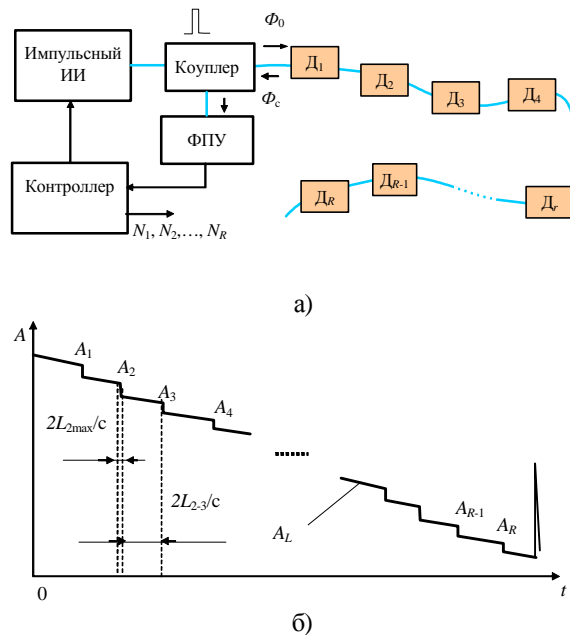


Рис. 4. ПВОСС на рефлектометрических датчиках (а) и оптический бюджет сети (б)

Минимальное затухание  $A_{\min} = A_L$  имеет место, когда коды во всех  $R$  датчиках равны нулю, максимальное (которое используется для расчетов) - при максимальных значениях всех кодов  $N_r$ . Оптический бюджет рассчитывается исходя из 2...3-кратного превышения разрядным импульсом с максимальным затуханием  $\max(A_{ikr})$  порогового значения  $A_{\text{пор}}$ , определяемого затуханием в линии, шумами, эксплуатационными темпе-

ратурными и деформирующими девиациями (вибрации, ускорения, перепады давления и т.п.):

$$A_{\Sigma} = \sum_r \sum_k \sum_i \max(A_{rki}) + \sum_s A_{\text{cmm}s} + A_L, \quad (6)$$

где  $A_{\text{cmm}s}$  - затухание в соединениях  $s$ -го сплиттера с ВОД и ОВ (в общем случае  $s^2k$ );  $A_L$  - затухание в сетевом ОВ.

Временной бюджет рассчитывается в соответствии с выражением

$$T_{\Sigma} = \frac{2L}{c} + \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \max\left(\frac{2L_{rk}}{c}\right), \quad (7)$$

где  $L_{rk}$  - длина участка ОВ, задействованного в  $k$ -й разрядной дорожке  $r$ -го датчика.

Спектральный бюджет определяется как

$$\Delta I_{\Sigma} = \sum_r \Delta I_r = \sum_r \sum_k (\Delta I_{BGrk} + \Delta I_{srk}), \quad (8)$$

где  $\Delta I_{srk}$  - защитный интервал между каналами.

### Библиографический список

1. Lance R.W., Parker A. R., Ko W.L., Pizazza A., Chan P. Application of Fiber Optic Instrumentation [Электронный ресурс]. – <http://www.rto.nato.int>
2. Shoenfett N.M. Fiber optic sensors for the military [Электронный ресурс]. – <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/>
3. Optical Fiber Sensors Guide. Fundamentals & Applications [Электронный ресурс]. – <http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/Micron%20Optics%20Optical%20Sensing%20Guide.pdf>
4. Reutlinger A., Glier M., Zuknik K.-H., Hoffmann L., Müller M., Rapp S., Kurvin C., Ernst T., McKenzie I., Karafolas N. Fiber optic sensing for telecommunication satellites [Электронный ресурс]. – [http://www.llb.mw.tum.de/download/papers/abstracts/2008\\_rapp\\_ofs.pdf](http://www.llb.mw.tum.de/download/papers/abstracts/2008_rapp_ofs.pdf)
5. Аксенов, В.А., Волошин, В.В., Воробьев, И.Л. и др. Потери в одномодовых волоконных световодах при однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления [Электронный ресурс] // Р.Э. – 2004. – Т. 49, № 6. – С. 734–742.
6. Устройства ввода-вывода сигнала на изгибе волокна. [Электронный ресурс]. – <http://tkc.by/ru/products/product-162.html>

7. El-Sherif M., Bansal L., Yuan J. Fiber Optic Sensors for Detection of Toxic and Biological Threats [Электронный ресурс]. – <http://www.mdpi.org/sensors>

8. Smart Polymeric Coatings—Recent Advances / Advances in Polymer Technology, Vol. 26, No. 1, 1–13 (2007)

9. Cherpak V. Fiber-optic sensors based on conductive polymers. [Электронный ресурс]. – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5423404&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.>

[re.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5423404](http://ieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5423404)

10. Леонович, Г. И. Волоконно-оптический датчик давления для системы управления двигателем БПЛА [Текст]. / Г. И. Леонович, С. А. Матюнин, А. И. Глушков, Н. А. Ливочкина, В. И. Соловьев / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2011. - №3. -Ч. 3. -С. 397-402.

## NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL CHANNEL OPTICAL NETWORK DIGITAL FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSORS WITH CLOSED OPTICAL CHANNEL

© 2012 G. I. Leonovich<sup>1</sup>, S. A. Matjunin<sup>2</sup>, R. R. Akbarov<sup>3</sup>, S. V. Ivkov<sup>3</sup>,  
N. A. Livochkina<sup>3</sup>, A. I. Glushkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Section of applied problems of the RAS Presidium

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>3</sup>FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress»

The principle of construction, block diagrams and operation algorithms in digital fiber-optic displacement sensors with a closed optical channel, characterized by high reliability and ease of integration into the passive sensor network.

*Passive fiber-optic sensor network, fiber Bragg grating, touch coating, digital fiber optic displacement sensors with a closed optical channel.*

### Информация об авторах

**Леонович Георгий Иванович**, доктор технических наук, профессор, начальник Поволжского отделения, секция прикладных проблем при Президиуме РАН. E-mail: [leogil@mail.ru](mailto:leogil@mail.ru). Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

**Матюнин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные системы и устройства», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [S.A.Matyunin@yandex.ru](mailto:S.A.Matyunin@yandex.ru). Область научных интересов: системы управления, информационно-измерительные устройства и системы.

**Акбаров Руслан Рустамович**, аспирант, Самарский государственный университет. Область научных интересов: информационно-измерительные системы.

**Ивков Сергей Валерьевич**, инженер, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: информационно-измерительные устройства.

**Ливочкина Наталья Александровна**, инженер, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: теплотехнические измерения.

**Глушков Артем Иванович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: теплотехнические измерения.

**Leonovich Georgiy Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, head of the Volga Department, Section of Applied Problems of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. E-mail: [leogi1@mail.ru](mailto:leogi1@mail.ru). Area of scientific: control systems, information-measuring devices and systems.

**Matjunin Sergey Aleksandrovich**, doctor of technical sciences, professor, head of the "Electronic Systems and Devices", Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [S.A.Matyunin@yandex.ru](mailto:S.A.Matyunin@yandex.ru). Area of scientific: control systems, information-measuring devices and systems.

**Akbarov Ruslan Rustamovich**, post-graduate student, Samara State University. Area of scientific: information and measurement systems.

**Ivkov Sergey Valeryevich**, engineer, FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress». Area of scientific: information-measuring devices.

**Livochkina Natalia Aleksandrovna**, engineer, FSUE SRPSRC «TsSKB-Progress». Area of scientific: measurement of thermal engineering.

**Glushkov Artem Ivanovich**, graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of scientific: measurement of thermal engineering.