

УДК 681.586.57

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ЗОНДА МАЛЫХ АКСИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© А. В. Минеев, В. Х. Ясовеев

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12
E-mail: yasov@mail.ru*

Проанализирован способ измерения перемещений на основе логометрического метода с применением разветвлённого волоконно-оптического коллектора. Разработана аналитическая модель опτικο-электронного зонда малых аксиальных перемещений, и определены значимые факторы, влияющие на характер градуировочной характеристики. Проведён светоэнергетический анализ оптической схемы измерительного опτικο-электронного зонда, дана оценка оптическим потерям на длине оптического тракта.

Ключевые слова: волоконно-оптический коллектор, измерение перемещений, аналитическая модель, градуировочная характеристика, светоэнергетический анализ, логометрический метод.

DOI: 10.15372/AUT20210109

Введение. В промышленности круг задач автоматического контроля малых аксиальных перемещений необычайно широк. Проблема повышения точности и производительности процессов контроля объектов, расположенных в труднодоступных местах, в условиях экстремальной эксплуатации (повышенное давление, температура, воздействие агрессивных сред и т. д.) [1] ставит задачу построения новых измерительных систем [2]. Анализ способов измерения малых аксиальных перемещений для условий экстремальной эксплуатации с учётом возможности создания и обеспечения метрологического оснащения показывает, что наиболее предпочтительным является опτικο-электронный способ [3, 4]. Построение опτικο-электронной системы на базе логометрического метода измерения [5, 6] позволит свести к минимуму погрешности, связанные с изменением оптических свойств компонентов контролируемого объекта и нестабильностью излучателя первичного преобразователя. В работе [7] приводятся результаты экспериментальных исследований, однако отсутствуют материалы, связанные с аналитическим моделированием, позволяющим провести предварительный анализ и расчёт на этапах проектирования и модернизации измерительного опτικο-электронного зонда (ОЭЗ).

Целью данной работы является анализ рассматриваемого способа измерения малых перемещений (принципа действия, основных элементов схемы измерения и потерь оптического сигнала). Построение аналитической модели позволяет получить математический аппарат для оценки светоэнергетической эффективности измерительного ОЭЗ. Аналитическая модель может быть использована для проектирования оптимальной конструкции волоконно-оптического коллектора (ВОК), подбора электронной компонентной базы ОЭЗ и оценки его эффективности для измерения заявленных аксиальных перемещений.

Основным узлом рассматриваемой системы измерения является разветвлённый ВОК, который представляет собой структуру, состоящую из трёх групп оптических волокон, регулярно уложенных и коаксиально расположенных в поперечном сечении [7–10], изображённом на рис. 1: центральная группа (1) служит для передачи потока излучения $\Phi_{\text{вх}}$ от

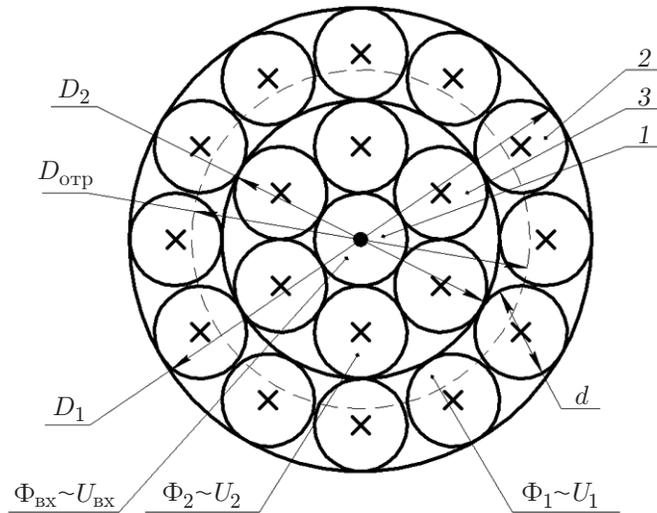


Рис. 1. Коаксиальная схема укладки оптических волокон ВОК (вид со стороны КО): D_1, D_2 — диаметры внешнего и внутреннего колец приёмных каналов ВОК, $D_{отр}$ — диаметр пятна отражённого потока излучения, d — диаметр волокна

модуля излучения; вторая (2) и третья (3) группы волокон служат для приёма отражённых потоков излучения Φ_1 и Φ_2 от контролируемого объекта (КО). Оптические волокна внешнего и внутреннего приёмных колец ВОК скомплектованы в самостоятельные приёмные оптические каналы, сопряжённые с фотоприёмными устройствами (ФПУ) ФПУ₁ и ФПУ₂ (рис. 2).

Процесс измерения перемещения данным способом можно условно разделить на две фазы:

- в первой фазе от модуля излучения по передающему оптическому волокну, расположенному в центре ВОК, подаётся поток излучения $\Phi_{вх}$ на КО;
- во второй фазе измерения входной поток излучения $\Phi_{вх}$, отражаясь от поверхности контролируемого объекта, попадает в приёмные оптические волокна, по которым далее потоки излучения Φ_1 и Φ_2 передаются на фотоприёмные устройства.

Уровень светового потока, попадающего на торец ВОК, зависит от коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта и от величины аксиального перемещения.

На выходе из оптического узла потоки излучения передаются на фотоприёмные устройства, в которых оптические сигналы преобразуются в фототоки, пропорциональные интенсивностям излучений, и затем в напряжения U_1 и U_2 .

Оценку уровня отражённой энергетической облучённости, собранной первым и вторым кольцами волокон, можно представить для каждого канала в следующем виде [7]:

$$E_{e1} = k_{и} I_{и} r k_1 \Phi_1(\delta), \tag{1}$$

$$E_{e2} = k_{и} I_{и} r k_2 \Phi_2(\delta), \tag{2}$$

где E_{e1} и E_{e2} — уровни отражённой энергетической облучённости, приходящейся на ФПУ₁ и ФПУ₂; $k_{и}$ — коэффициент, характеризующий нестабильность источника излучения; $I_{и}$ — интенсивность излучения источника; r — коэффициент отражения облучаемой контролируемой поверхности; k_1 и k_2 — коэффициенты, учитывающие потери в оптических компонентах внешнего и внутреннего колец соответственно; $\Phi_1(\delta)$ и $\Phi_2(\delta)$ — отражённые потоки

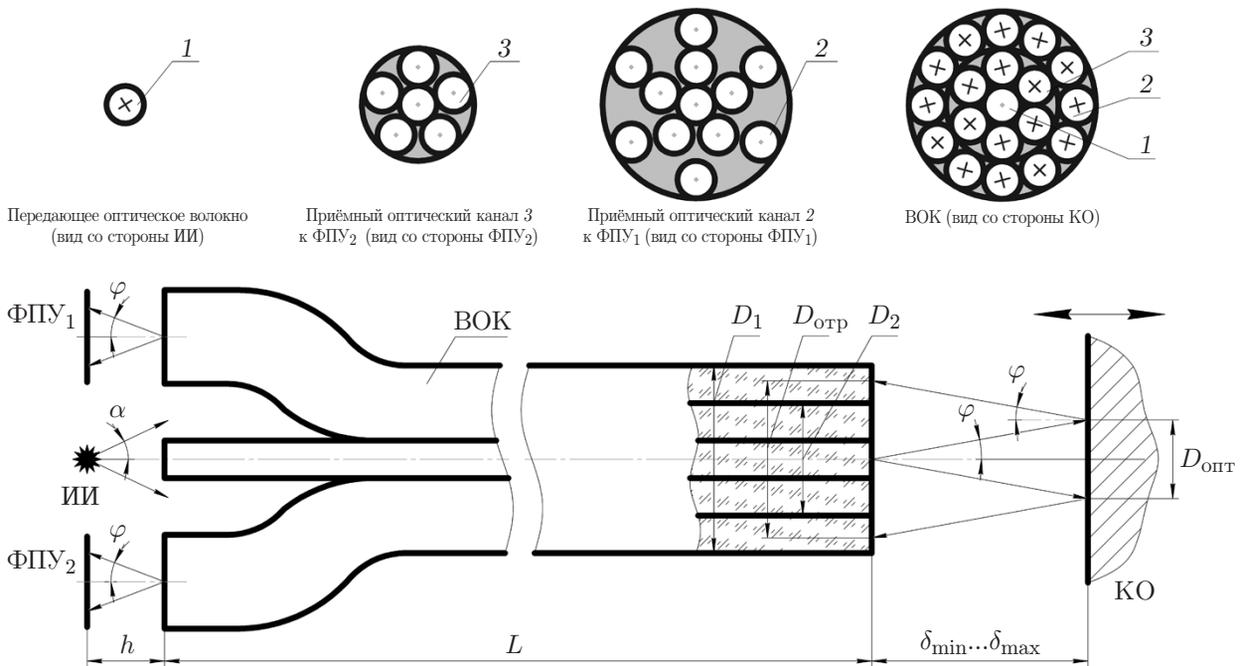


Рис. 2. Оптическая схема ОЭП

излучения, зависящие от величины зазора между торцом ВОК и КО; δ — измеряемое аксиальное перемещение (зазор).

Поделив уравнение (1) на (2), получим

$$\frac{E_{e1}}{E_{e2}} = \frac{k_1 \Phi_1(\delta)}{k_2 \Phi_2(\delta)} \sim \frac{U_1(\delta)}{U_2(\delta)}, \quad (3)$$

где $U_1(\delta)$ и $U_2(\delta)$ — напряжения на выходе из приёмных каналов ОЭЗ, зависящие от величины зазора между торцом ВОК и контролируемым объектом.

Из (3) видно, что результаты измерений данным способом не зависят от изменения коэффициента отражения облучаемой поверхности контролируемого объекта и изменения интенсивности излучения.

Для оценки эффективности разрабатываемого оптико-электронного преобразователя (ОЭП) на стадии проектирования инженерами-разработчиками выполняется светоэнергетический расчёт. Применим подход, рекомендованный в источниках [11, 12].

Для светоэнергетического анализа первичного ОЭП использовалась оптическая схема, изображённая на рис. 2. Схема первичного ОЭП представлена:

- источником излучения (ИИ), имеющим яркость излучения $L_{ИИ}$, интенсивность излучения $I_{ИИ}$ и апертурный угол α ;
- разветвлённым волоконно-оптическим коллектором с регулярной коаксиальной схемой укладки оптических волокон в поперечном сечении (см. рис. 1), имеющих апертурный угол φ (максимальный угол входа (выхода) по отношению к оси волокна, при котором излучение попадает в сердцевину);
- фотоприёмными устройствами ФПУ₁ и ФПУ₂.

Аналитическая модель измерительного оптико-электронного зонда. Примем допущение, что яркость ИИ по его излучающей поверхности постоянна, aberrации оптической системы отсутствуют, дисперсия ВОК не влияет на световой пучок. Количество введённой в оптическое волокно энергии прежде всего зависит от числовой апертуры волокна NA . При сопряжении источника излучения со световодом захватываются в сердцевине

только те лучи, которые заключены внутри конуса с максимальным лучом $\varphi_{кр}$. Если угол при вершине конуса излучения источника α превышает $\varphi_{кр}$, то обязательно имеют место потери, связанные с вводом излучения в волокно. Пренебрежём данными потерями для приведённой оптической схемы.

При расчёте будем пренебрегать потерями, обусловленными отражением излучения от торца передающего волокна. Запишем выражение для расчёта потока излучения Φ_B , вводимого в волокно [10]:

$$\Phi_B = L_{и} A_{п1} \pi (NA)^2, \quad (4)$$

где $A_{п1}$ — площадь поперечного сечения передающего волокна ВОК; NA — числовая апертура волокна, определяемая как $n_0 \sin \varphi = NA$; n_0 — показатель преломления внешней среды (в нашем случае воздух), тогда $\sin \varphi = NA$.

Коэффициент пропускания передающего канала ВОК обозначим через τ_B . Тогда облучённость в плоскости КО будет иметь вид

$$E_{КО} = \int_{1/\delta_{\min}^2}^{1/\delta_{\max}^2} \tau_B(L) \tau_{ср}(\delta) A_{опт} L_B d\delta = \tau_{ср}(\delta) \int_{1/\delta_{\min}^2}^{1/\delta_{\max}^2} I_{иО} d\delta, \quad (5)$$

где $\tau_{ср}(\delta)$ — коэффициент пропускания среды между торцом ВОК и КО, учитывающий потери на поглощение и рассеивание; $A_{опт}$ — площадь оптического пятна на КО; $I_{иО}$ — осевая сила излучения передающего канала; $L_B = L_{и}/[A_{п1} \pi (NA)^2]$ — энергетическая яркость источника излучения на выходе из передающего волокна ВОК; $\delta_{\min} \dots \delta_{\max}$ — диапазон измерений минимального и максимального расстояния.

После отражения потока КО можно рассматривать как вторичный источник излучения для приёмной части ВОК. Яркость будет определяться как

$$L_{КО} = r_{КО} E_{КО} / \pi, \quad (6)$$

где $r_{КО}$ — коэффициент яркости поверхности контролируемого объекта.

Отражённый поток излучения $\Phi_{отри}$, поступающий на вход приёмных каналов ВОК, определяется выражением

$$\Phi_{отри} = A_{опт} A_{при} \int_{1/\delta_{\min}^2}^{1/\delta_{\max}^2} \tau_{ср}(\delta) L_{КО} d\delta, \quad (7)$$

где $A_{при}$ — суммарная площадь торцов приёмных оптических каналов; i — номер приёмного канала.

Поскольку расстояние между торцом ВОК и КО меняется во времени, соответственно и величины $A_{опт}$, $A_{отр}$ также являются переменными (где $A_{отр}$ — площадь отражённого пятна на торце ВОК). В трёхмерном пространстве излучение от передающего канала ВОК на КО создаёт коническую фигуру с углом φ между осью конуса и образующими (крайними лучами). Отражённое излучение представляет собой усечённый конус с диаметрами оснований $D_{опт}$ и $D_{отр}$ (см. рис. 2). Диаметр оптического пятна $D_{опт}$ вторичного

источника излучения на КО запишем в виде $D_{опт} = 2 \operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta$. Тогда выражение для

нахождения диаметра отражённого $D_{\text{отр}}$ пятна на торце ВОК будет иметь следующий

вид: $D_{\text{отр}} = 4 \operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta$. С учётом формул для $D_{\text{опт}}$ и $D_{\text{отр}}$ можем записать выражения

для нахождения $A_{\text{опт}}$, $A_{\text{отр}}$: $A_{\text{опт}} = \pi \left(\operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta \right)^2$ и $A_{\text{отр}} = 4\pi \left(\operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta \right)^2$.

Отражённый поток излучения, приходящийся на каждый из приёмных каналов, зависит от суммарной площади торцов приёмных каналов, измеряемого расстояния δ и оптических свойств КО. Учитывая D_1 и D_2 , можно записать выражения для нахождения площади торцов для каждого из приёмных каналов:

$$A_{\text{пр1}} = \pi k_{\Pi} [(d + D_{\text{в}}/2)^2 - (d - D_{\text{в}}/2)^2] = k_{\Pi} (\pi/4) (D_1^2 - D_2^2)_{\text{пр2}}, \quad (8)$$

$$A_{\text{пр2}} = k_{\Pi} (\pi D_2^2/4) - A_{\text{пр1}}, \quad (9)$$

где k_{Π} — коэффициент полезности, учитывающий межволоконные зазоры. Для плотной коаксиальной укладки оптических волокон $k_{\Pi} = 0,75$.

В зависимости от значения δ диаметр отражённого пятна принимает следующие значения:

1. $D_{\text{отр}} < D_2$ — не удовлетворяет основному условию логометрического метода измерения (отсутствие сигнала на одном из измерительных каналов);
2. $D_2 < D_{\text{отр}} \leq D_1$;
3. $D_{\text{отр}} > D_1$.

Согласно оптической схеме, изображённой на рис. 2, диапазон измерения лежит в пределах $\delta_{\min} \cdots \delta_{\max}$, где δ_{\min} — минимальное расстояние, при котором выполняется основное условие логометрического метода измерения, т. е. $D_{\text{отр}} > D_2$. Если $D_{\text{отр}} \gg D_1$, то сказывается существенное влияние пространственного распределения плотности светового потока, имеющего гауссов характер [13].

В рамках данной задачи примем допущение, что ИИ обладает свойствами сферического ламбертова излучателя.

С учётом формулы (9) выражение для нахождения потока излучения, попадающего на 2-й приёмный ВОК (7), примет следующий вид:

$$\Phi_{\text{отр2}} = [k_{\Pi} (\pi D_2^2/4) - A_{\text{пр1}}] \left[\pi \left(\operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta \right)^2 \right] \int_{1/\delta_{\min}^2}^{1/\delta_{\max}^2} \tau_{\text{ср}}(\delta) L_{\text{КО}} d\delta. \quad (10)$$

С учётом формулы (8) выражение (7) для 1-го приёмного канала для случая $D_{\text{отр}} > D_1$ запишем как

$$\Phi_{\text{отр1}} = \left[k_{\Pi} \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \right] \left[\pi \left(\operatorname{tg} \varphi \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta \right)^2 \right] \int_{1/\delta_{\min}^2}^{1/\delta_{\max}^2} \tau_{\text{ср}}(\delta) L_{\text{КО}} d\delta. \quad (11)$$

Чтобы рассчитать поток отражённого излучения, попадающего на 1-й приёмный канал ВОК, для случая $D_2 < D_{\text{отр}} \leq D_1$ необходимо ввести поправочный коэффициент

$k_{\text{пр}}$, учитывающий площадь перекрытия 1-го приёмного кольца отражённым оптическим пятном:

$$k_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{отпр}} - A_2}{A_1 - A_2} = \left[4\pi \left(\text{tg } \varphi \int_{\delta_{\text{min}}}^{\delta_{\text{max}}} d\delta \right)^2 - \frac{\pi D_2^2}{4} \right] \frac{1}{\left[\pi D_1^2/4 - \pi D_2^2/4 \right]}. \quad (12)$$

Тогда выражение (7) для 1-го приёмного коллектора в случае $D_2 < D_{\text{отпр}} \leq D_1$ примет следующий вид:

$$\Phi_{\text{отпр1}} = k_{\text{пр}} \left[k_{\text{п}} \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \right] \left[\pi \left(\text{tg } \varphi \int_{\delta_{\text{min}}}^{\delta_{\text{max}}} d\delta \right)^2 \right] \int_{1/\delta_{\text{min}}^2}^{1/\delta_{\text{max}}^2} \tau_{\text{ср}}(\delta) L_{\text{КО}} d\delta. \quad (13)$$

При согласовании ВОК и ФПУ наиболее существенные потери излучения возникают вследствие их механического рассогласования (величина зазора, угловое рассогласование, боковое смещение). Рассчитаем потери при механическом рассогласовании оптических волокон и фотоприёмных устройств с величиной зазора h (см. рис. 2) безупречным состоянием торцевых поверхностей и строго перпендикулярными срезами волокон по отношению к их оси и оси фотоприёмных устройств. Влиянием бокового смещения пренебрегаем вследствие большого апертурного числа ФПУ $NA_{\text{ФПУ}}$ и малого диаметра оптических волокон. Поток излучения, приходящийся на каждое из ФПУ, будет определяться по формуле

$$\Phi_{\text{ФПУ}i} = \left[\frac{A_{\text{п1}}(NA)^2 \pi A_{\text{ФПУ}}(NA_{\text{ФПУ}})^2}{h^2} \right] \Phi_{\text{отпр}i} \tau_{\text{пр}i} N_i, \quad (14)$$

где $A_{\text{ФПУ}}$ — площадь чувствительной площадки ФПУ; $NA_{\text{ФПУ}}$ — апертурное число ФПУ; $\tau_{\text{пр}i}$ — коэффициент пропускания приёмных каналов ВОК; N — количество приёмных волокон; $i = 1, 2$ — номер приёмного канала.

Коэффициент пропускания каждого из каналов $\tau_{\text{ж}i}$ волоконного оптического жгута находится по формуле $\tau_{\text{ж}i} = A_{\text{пр}i} \tau_{\text{в}} (1 - \rho)^2 \sin \varphi / A_i$, где $A_{\text{пр}i}$ — суммарная полезная площадь приёмного канала ВОК; A_i — суммарная площадь торца ВОК (включающая также зазоры между волокнами); ρ — коэффициент отражения на торцах волокна.

Отношение амплитудных значений переменных напряжений на выходе фотоприёмных устройств пропорционально измеряемому перемещению и пропорционально отношению потоков излучений, приходящихся на интегральные площадки каждого из ФПУ:

$$\delta = \Phi_{\text{ФПУ}2} / \Phi_{\text{ФПУ}1}. \quad (15)$$

Подставим выражение (14) для определения потоков излучения, поступающих на ФПУ, для каждого из приёмных каналов. Рассмотрим случай, когда приёмные каналы скомплектованы из одинаковых оптических волокон и фотоприёмных устройств с одинаковыми техническими характеристиками. С учётом аналитических преобразований получаем окончательное выражение отношения потоков излучений, приходящихся на интегральные площадки каждого из ФПУ:

$$\delta = \frac{\Phi_{\text{ФПУ}2}}{\Phi_{\text{ФПУ}1}} = \left[k_{\text{п}} \left(4\pi \left(\text{tg } \varphi \int_{\delta_{\text{min}}}^{\delta_{\text{max}}} d\delta \right)^2 - \frac{\pi D_2^2}{4} \right) N_2 \right] \frac{1}{(k_{\text{п}} \pi D_2^2/4 - A_{\text{п1}}) N_1}. \quad (16)$$

Полученное аналитическое выражение доказывает, что результаты измерений малых аксиальных перемещений логометрическим методом с применением разветвлённых волоконно-оптических коллекторов не зависят от оптических свойств контролируемого объекта, его геометрии, изменения оптических свойств защитного стекла измерительного зонда, технических характеристик излучателя и фотоприёмных устройств, пропускной способности оптических волокон. Отношение потоков излучений на выходе из приёмных оптических каналов, приходящихся на интегральные площадки каждого из ФПУ ($\Phi_{\text{ФПУ}_2}/\Phi_{\text{ФПУ}_1}$), зависит от типа и количества применяемых оптических волокон, схемы укладки в осевом сечении и от расстояния до контролируемого объекта. Исходное аналитическое выражение справедливо для измерения малых аксиальных перемещений логометрическим методом с применением разветвлённого ВОК с учётом следующих принятых допущений:

- источник излучения обладает свойствами сферического ламбертова излучателя;
- диапазон измерения аксиальных перемещений ограничен перемещениями, при которых диаметр пятна отражения от контролируемого объекта на торце ВОК находится в пределах $D_2 < D_{\text{отр}} \leq D_1$;
- каналы волоконно-оптического коллектора скомплектованы из оптических волокон с одинаковыми техническими характеристиками;
- ФПУ приёмных оптических каналов имеют равные апертуры, размеры чувствительных интегральных площадок.

Основные элементы оптико-электронного измерительного зонда. Элементная база волоконно-оптических преобразователей содержит серийно выпускаемые оптические волокна, источники излучения и фотоприёмные устройства, оптимальное сочетание параметров которых в соответствии с условиями измерения позволяет получить заданные метрологические и эксплуатационные характеристики. Наиболее приемлемым типом ФПУ для волоконно-оптического преобразователя является фотодиод. Спектральная чувствительность кремниевых и германиевых фотодиодов хорошо согласуется со спектральными характеристиками инфракрасных светодиодов и кварцевых волоконных световодов [13]. Однако измерение перемещений, зазоров на лопаточных установках (газотурбинных двигателях (ГТД), газотурбинных установках), «диктующих» экстремальные условия эксплуатации (высокие температуры, вибрации, высокие частоты вращения контролируемых объектов) [1], приведёт к необходимости высокочастотной модуляции потока излучения (≈ 200 кГц) и соответственно более высокой частоте оцифровки сигнала (≈ 2 МГц) для компенсации влияния инфракрасной «паразитной» засветки от поверхности нагретых элементов проточной части. Это вызовет удорожание аппаратной части электронного блока и усложнению алгоритма обработки сигнала.

Другим способом компенсации инфракрасной паразитной засветки от нагретых поверхностей элементов проточной части ГТД является применение ультрафиолетовых (УФ) светодиодов в качестве источников излучения. Для работы в УФ-области спектра целесообразно применение кварцевого оптического волокна с металлическим покрытием с высокой концентрацией ОН-групп (high-ОН). Высокое насыщение волокна ОН-группами снижает оптические потери в УФ-области спектра (менее 100 дБ/км), металлическое покрытие увеличивает механическую прочность и сопротивление усталости (сохранение оптических и механических свойств в температурном диапазоне от -196 до $+750$ °С и при влажности вплоть до 100 %). Выбор источника излучения оказывает значительное влияние на характеристики измерительного зонда. На рынке представлен широкий спектр высокоэффективных УФ-светодиодов. Нами экспериментально подтверждена целесообразность применения УФ-светодиодов ($\lambda = 370\text{--}395$ нм) повышенной яркости (мощность излучения не менее 0,5 мВт) с низким показателем термосопротивления. Встроенная в конструкцию

светодиода фокусирующая линза позволяет получить узкую диаграмму направленности (апертурный угол $(2\theta_{1/2})$ не более 30°), что даёт возможность обеспечить высокую эффективность ввода потока излучения в передающее оптическое волокно без применения дополнительных оптических элементов. Для реализации измерительного зонда с высокими метрологическими характеристиками в качестве чувствительного элемента ФПУ необходимо применить германиевые лавинные фотодиоды с высокими показателями быстродействия (быстродействие фотодиода должно соответствовать частоте модуляции потока излучения). Для реализации функции внутреннего контроля работоспособности (самодиагностика) в конструкцию фотодиода заложен тестирующий светодиод. Для достижения высокой точности измерения на повышенных температурах (свыше 70°C) фотодиод должен обладать встроенной системой термоэлектрического охлаждения и рассчитан на эксплуатацию в фотогальваническом режиме (без смещения) [14].

Светоэнергетический анализ оптической схемы. Выражение для расчёта потоков, приходящихся на интегральные площадки ФПУ на выходе из приёмных оптических каналов (16), является конечной формулой светоэнергетического распределения и служит для оценки эффективности оптической схемы.

На рис. 3 представлен график падения потока излучения вдоль оптического тракта. Контрольные точки (1)–(7) служат для численного анализа оптических потерь:

(1): $\Phi_{\text{ИИ}}(\Phi_1) = I_{\text{И}}\Omega$, где $\Phi_{\text{ИИ}}$ — поток излучения от ИИ; Ω — телесный угол ИИ, в пределах которого распространяется излучение.

(2): $\Phi_{\text{В}}(\Phi_2) = L_{\text{И}}A_{\text{П1}}\pi(NA)^2$ — поток излучения, вводимый в передающее оптическое волокно.

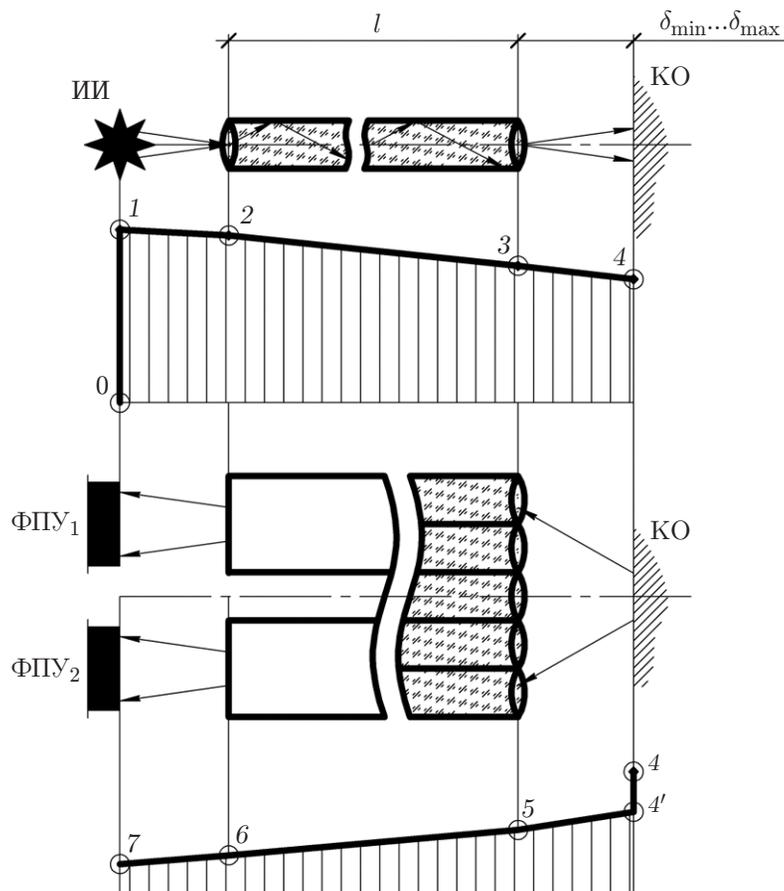


Рис. 3. Распределение потока излучения вдоль оптического тракта

(3): $\Phi_3 = \Phi_2 \tau_B(L) = L_{\text{и}} A_{\text{п1}} \pi \tau_B(L) (NA)^2$ — поток излучения на выходе из ВОК, обусловленный оптическими потерями, связанными с коэффициентом пропускания передающего оптического волокна $\tau_B(L)$.

$$(4): \Phi_{\text{КО}}(\Phi_4) = E_{\text{КО}} A_{\text{п1}} = \tau_{\text{ср}}(\delta) A_{\text{п1}} I_{\text{ИО}} \int_{1/\delta_{\text{min}}^2}^{1/\delta_{\text{max}}^2} d\delta \text{ — поток излучения в плоскости КО.}$$

В дальнейшем КО рассматривался как вторичный источник излучения с учётом значительных оптических потерь, связанных с коэффициентом поглощения КО, отражённый поток излучения будет рассчитываться по формуле

$$(4'): \Phi_{\text{КО}}(\Phi_4) = E_{\text{КО}} A_{\text{опт}}.$$

$$(5): \Phi_{\text{отри}}(\Phi_5) = A_{\text{опт}} A_{\text{при}} \int_{1/\delta_{\text{min}}^2}^{1/\delta_{\text{max}}^2} \tau_{\text{ср}}(\delta) L_{\text{КО}} d\delta \text{ — отражённый поток излучения, посту-}$$

пающий на вход приёмных каналов ВОК с учётом оптических потерь, связанных с вводом излучения в оптические волокна, и коэффициент пропускания среды между торцом ВОК и КО, учитывающий потери на поглощение и рассеивание.

(6): $\Phi_6 = \Phi_{\text{отри}} \tau_{\text{при}}(L)$ — поток излучения на выходе приёмных каналов ВОК.

(7): $\Phi_{\text{ФПУ}_i}(\Phi_7) = \left[\frac{A_{\text{п}}(NA)^2 \pi A_{\text{ФПУ}} (NA_{\text{ФПУ}})^2}{h^2} \right] \Phi_{\text{отри}} \tau_{\text{при}} N_i$ — потоки излучения, приходящие на вход ФПУ₁ и ФПУ₂ с учётом потерь, связанных с механическим и оптическим рассогласованием оптических волокон и фотоприёмных устройств.

Анализ влияния основных характеристик оптических волокон на характер градуировочной характеристики измерительного оптико-электронного зонда. Рассмотрим градуировочную (выходную) характеристику $\Phi_{\text{ФПУ}_2}/\Phi_{\text{ФПУ}_1}$, представляющую собой отношение потоков излучения, принимаемых 1-м и 2-м приёмными оптическими каналами и действующих на интегральные чувствительные площадки каждого ФПУ от расстояния (зазора) между облучаемым объектом и торцом ВОК. Используя выражение (17), построим зависимости $\delta = \Phi_{\text{ФПУ}_2}/\Phi_{\text{ФПУ}_1}$.

Оценим влияние основных характеристик оптических волокон (диаметр d и числовая апертура NA) на отношение $\delta = \Phi_{\text{ФПУ}_2}/\Phi_{\text{ФПУ}_1}$.

Анализ градуировочных характеристик ВОК будет производиться в диапазоне изменения расстояния от 0 до 0,5 мм. На рис. 4 приведены зависимости отношений потоков излучения $\Phi_{\text{ФПУ}_2}/\Phi_{\text{ФПУ}_1}$ от перемещения δ при различных NA оптических волокон ВОК.

Анализ проведён для оптических волокон со следующими числовыми апертурами: $NA = 0,1$ ($\varphi = 11,48^\circ$), $NA = 0,22$ ($\varphi = 25,42^\circ$), $NA = 0,5$ ($\varphi = 57,37^\circ$). Наибольшую крутизну имеет характеристика ВОК, скомплектованного из оптических волокон с наименьшей числовой апертурой.

Одним из самых значимых параметров, влияющих на геометрические размеры каналов ВОК, объёмы передаваемого/принимаемого потоков излучения, является диаметр сердцевин оптических волокон d .

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 5, показывает, что наибольшей чувствительностью обладают системы с ВОК, скомплектованным из оптических волокон с наименьшим диаметром сердцевины ($d_1 = 50$ мкм), которая падает с увеличением данного параметра ($d_2 = 100$ мкм, $d_3 = 150$ мкм, $d_4 = 200$ мкм).

Для увеличения надёжности конструкции ВОК и абсолютных значений передаваемого/принимаемого сигналов рассмотрим схему укладки ВОК с большим количеством

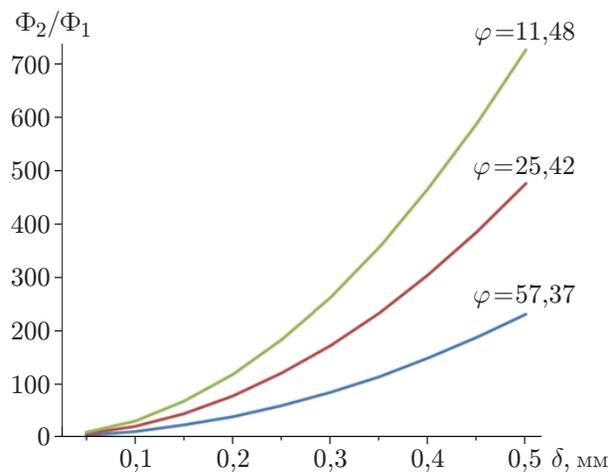


Рис. 4. Зависимости потоков излучений от перемещения δ для ВОК, скомплектованных из оптических волокон с различными числовыми апертурами

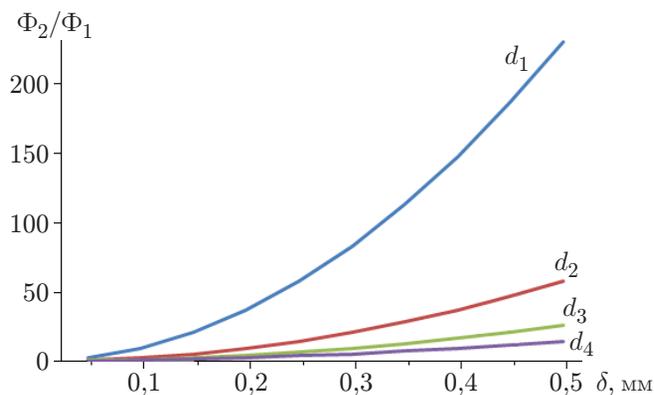


Рис. 5. Зависимости потоков излучений от перемещения δ для ВОК, скомплектованных из оптических волокон с различными диаметрами сердцевин d

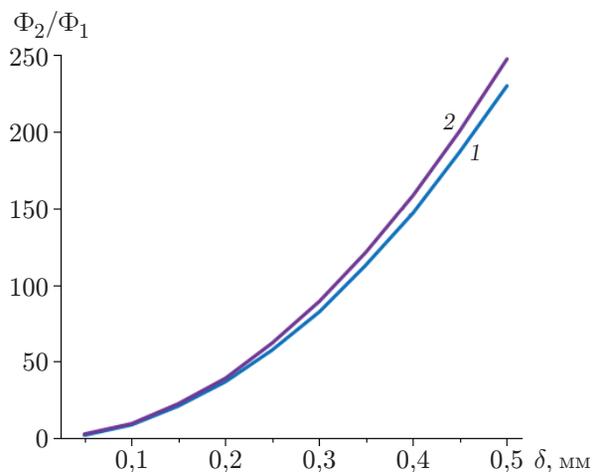


Рис. 6. Зависимости потоков излучений от перемещения δ для ВОК с различными схемами укладки оптических волокон

оптических волокон. Проанализируем влияние схемы укладки оптических волокон на градуировочную характеристику ВОК: для схем укладок № 1 — 1, 6, 12 (1 волокно — передающее, 6, 12 — количество волокон 2-го и 1-го приёмных каналов соответственно) и № 2 — 6, 12, 19 (6 волокон — передающих, 12, 19 — количество волокон 2-го и 1-го приёмных каналов соответственно) (рис. 6).

Полученные зависимости (см. рис. 6) показывают отсутствие влияния схемы укладки оптических волокон на характер градуировочных характеристик ВОК в диапазоне изменения перемещений от 0,05–0,2 мм и возрастание разницы с увеличением измеряемого расстояния (7 % при $\delta_{\max} = 0,5$ мм).

Заключение. В данной работе рассмотрен оптико-электронный способ измерения малых перемещений, основанный на логометрическом методе с применением разветвлённого волоконно-оптического коллектора с коаксиальной схемой укладки оптических волокон. Исследованы основные элементы измерительного оптико-электронного зонда, даны рекомендации по их применению. Данный способ может быть использован при разработке систем бесконтактного измерения малых перемещений с малыми габаритными размерами измерительных зондов для применения, к примеру, в авиационной промышленности на этапах разработки, модернизации и доводки ГТД.

Приведена аналитическая модель разветвлённого волоконно-оптического коллектора (16) с учётом принятых допущений, устанавливающая взаимосвязь между отношением уровней отражённых потоков излучения, приходящих на интегральные чувствительные площадки каждого из ФПУ, и величиной перемещений. Согласно данной модели градуировочные характеристики первичных волоконно-оптических преобразователей зависят от его конструктивных особенностей: типа применяемых оптических волокон, их количества и схемы укладки. Такая аналитическая модель позволяет определить оптимальные конструктивные параметры волоконно-оптического коллектора для применения к конкретной задаче.

Приведены результаты моделирования:

— график падения потоков излучения в прямом и обратном направлениях вдоль оптического тракта (см. рис. 3) позволяет выявить участки оптической схемы с наибольшими потерями излучения и провести оптимальные доработки;

— зависимости выходного сигнала ВОК от перемещения дают возможность сделать выбор оптимальных параметров ВОК: апертурного числа (см. рис. 4), диаметра (см. рис. 5), схемы укладки и числа (см. рис. 6) оптических волокон передающего и приёмных каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К. и др. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. 51, № 3. С. 104–112.
2. Минеев А. В., Ясовеев В. Х. Классификация способов измерения радиальных зазоров // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: Матер. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: РИК УГАТУ, 2017. С. 119–125.
3. Минеев А. В., Ясовеев В. Х. Вопросы измерений радиальных зазоров авиационных двигателей // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. С. 55–58.
4. Минеев А. В., Ясовеев В. Х. Анализ средств измерения радиальных зазоров по аспекту метрологического обеспечения // Тр. II Междунар. науч.-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике». Брянск: Изд-во БГТУ, 2018. С. 183–189.

5. **Гиниятуллин Н. И.** Волоконно-оптические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 2008. 456 с.
6. **Масюренко Ю. А.** Логометрические преобразователи с автоматической коррекцией погрешностей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 86 с.
7. **García I.** Desarrollo de un sensor de fibra optica para la medida del tip clearance y tip timing en motores aeronauticos // Universidad del Pais Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea. Bilbao, 2017. 66 p.
8. **Lei H., Binghui J.** An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine // Intern. Journ. Aerospace Eng. 2017. 4168150.
9. **Zhao J., Zhang X., Wang Y.** Study on an intelligent optical fibre displacement sensor // Procedia Eng. 2011. 15. P. 989–993.
10. **Иванов С. В.** Разработка и исследование макетного образца безлинзового термостойкого оптоволоконного зонда для измерения зазоров у концов рабочих лопаток // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2009–2010 гг.). М.: ЦИАМ, 2010. С. 739–742.
11. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В.** Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчёта: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
12. **Якушенков Ю. Г.** Теория и расчёт оптико-электронных приборов: учебник для вузов. М.: Логос, 1999. 479 с.
13. **Зак Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. М.: Энергоатомиздат, 1989. 127 с.
14. **Горшков Б. Л.** Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков: По материалам семинара «Practical design techniques for sensor signal conditioning». СПб.: АВТЕКС, 2000. 311 с.

Поступила в редакцию 21.02.2020

После доработки 12.11.2020

Принята к публикации 23.11.2020
