

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

*Т.П. Андреева, канд. техн. наук, начальник сектора,
Федеральное государственное унитарное предприятие
Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия*

Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами

Оценка температурного состояния теплонпряженных частей газотурбинного двигателя (ГТД) при его испытаниях и эксплуатации с целью контроля и управления режимами работы является основой обеспечения безопасности полетов. Особенно жесткие требования предъявляются к точности поддержания температуры поверхности рабочих лопаток турбины высокого давления ГТД.

В связи с этим в течение последних лет, как в нашей стране, так и за рубежом, активно решались проблемы, связанные с созданием аппаратуры для оценки температурного состояния лопаток в виде оптических пирометрических преобразователей (ОПП), аппаратуры обработки сигнала ОПП и средств метрологического обеспечения.

Обзор публикаций и анализ нерешённых проблем

При проектировании одноканального или двухканального ОПП важно выбрать области спектральной чувствительности каналов ОПП, исходя из необходимости обеспечения:

- требуемой чувствительности каналов ОПП;
- сведения к минимуму влияния мешающего излучения, воспринимающегося оптическим зондом ОПП (излучение сажистых частиц, попадающих в поле зрения ОПП; излучение продуктов сгорания топлива и т. д.).

Характерное распределение энергетической яркости излучения от рабочих лопаток турбины высокого давления (B_λ), сажистых частиц, газообразных продуктов сгорания топлива и характеристика спектральной чувствительности кремниевого фотодиода (Ψ_λ) представлены на рис. 1 [1].

$B_\lambda, \Psi_\lambda, [-]$

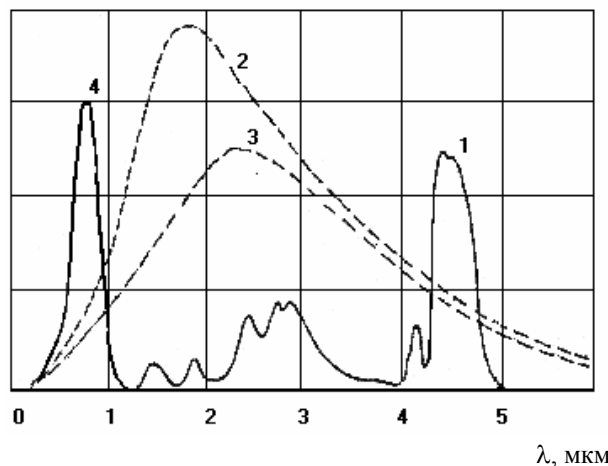


Рис. 1. Распределение спектра излучения лопаток и продуктов сгорания в ГТД в поле зрения ОПП

1 - смеси газов и паров воды,
2 - сажистых частиц,
3 - лопаток турбины высокого давления ГТД,
4 - характеристика спектральной чувствительности кремниевого фотодиода

Наиболее сильные полосы излучения продуктов сгорания топлива наблюдаются на длинах волн 2.7 мкм и 4.4 мкм [2].

Уменьшение влияния мешающего излучения продуктов сгорания топлива на полезный сигнал ОПП возможно за счет оптимального выбора областей спектральной чувствительности фотоприемников. При этом с одной стороны необходимо обеспечить требуемый уровень сигнала ОПП, с другой стороны отсутствие излучения продуктов сгорания топлива.

Сигнал помехи, возникающий от излучения сажистых частиц, попадающих в поле зрения ОПП, представляет собой отдельные положительные импульсы или «пачки» импульсов, сигнал от которых накладываются на полезный сигнал.

Снижение степени влияния излучения сажистых частиц возможно за счет использования специальной

алгоритмической обработки выходного сигнала ОПП, что в значительной степени решается в существующей аппаратуре обработки сигнала ОПП типа БИАСОП (8Г2.702.042 ТО).

В связи с изложенным к ОПП как к средству измерения температуры рабочих лопаток турбины высокого давления ГТД предъявляются ряд технических и эксплуатационных требований, которые приведены в табл. 1 [3, 4].

Таблица 1
Технические требования к ОПП

Параметр	Значение параметра
Диапазон измерения температуры, К	973 - 1423
Полоса пропускания, кГц	0 - 100
Предел допускаемого значения основной погрешности преобразователя с доверительной вероятностью 0.95, не более, К	± 6
Показатель визирования, не более	0,05
Синусоидальная вибрация:	
амплитуда ускорения, g	30
амплитуда перемещения, мм	5
диапазон частот, Гц	5-2000
Акустический шум:	
диапазон частот, Гц	50-10000
уровень звукового давления, дБ	150
Повышенная температура среды, К(°С):	
в зоне объектива	923 (+650)
в зоне световода	623 (+350)
в зоне объектива фотоэлектрического преобразователя без теплозащитного кожуха	353 (+80)
в зоне объектива фотоэлектрического преобразователя с теплозащитным кожухом	393 (+120)
кратковременно	488 (+215)
Пониженная температура среды, К(°С):	213 (-60)

Выполнение требований к ОПП накладывает ряд условий по выбору фотоприемников:

- области спектральной чувствительности фотоприемников, не должны попадать в диапазон селективных полос излучения продуктов сгорания топлива ГТД;

- граничная полоса частоты по уровню 0.7 не менее 100 кГц;
- рабочая повышенная температура окружающей среды должна быть не менее 80°С;
- рабочая пониженная температура окружающей среды должна быть не более минус 60°С.

В последние годы появились фотодиоды на основе гетероструктур InGaAsP/InP, предназначенные для использования в волоконно-оптических линиях связи, которые обладают высоким быстродействием, имеют практически плоскую спектральную характеристику в диапазоне 1,0 - 1,55 мкм, фоточувствительность не менее 0,5 А/Вт, емкость 30 пФ и темновой ток не более 80 нА [5].

Фотодиоды производства НИИ «Полус» на основе InSbAs PIN типа ДФД250ТО/Б, ДФД500ТО/Б [6], предназначенные также для волоконно-оптических линий связи, имеют активный диаметр 250 мм, 500 мм, чувствительность на длинах волн 1.3 мкм и 1.55 мкм 0.7 А/Вт и 0.75 А/Вт, время отклика фотоответа 2 нс и 10 нс соответственно. Фотодиод ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN разработан для использования в датчиках для приема инфракрасного оптического сигнала, имеет конструкцию с вводом излучения через мезаструктуру с большим активным диаметром – 2000 мм, область спектральной чувствительности от 0.9 до 1.7 мкм, чувствительность на длине волны 1.55 мкм составляет 0.85 А/Вт [7]. Фотодиоды InGaAs/InP PIN фирмы Hamamatsu G8370 series обладают чувствительностью до 0.95 А/Вт, имеют диаметр активной приемной площадки от 1 до 5 мм и граничную частоту по уровню 0,7 от 0.6 до 35 МГц соответственно [8].

Важнейшей задачей при выборе вариантов построения ОПП является проведение оценок чувствительности каналов с использованием новых быстродействующих типов фотодиодов.

Цель исследований

Целью исследований являлся анализ чувствительности ОПП при применении фотоприемников различных типов. Рассматривались характеристики разработанных оптических пирометрических преобразователей ОПП-94К и проектирующихся двухканальных ОПП.

Результаты исследований

Одноканальный ОПП. Рассмотрим ОПП, построенный по принципу яркостного пирометра, типа ОПП-94К. В нем используется термостойкий кремниевый фотодиод ФД-293 АДБ№ 368.245 ТУ [9].

Градуировочную характеристику ОПП с фотодиодами различного типа можно представить в виде

$$U_{\text{ФД}}(T) = G \cdot K \cdot S_{\lambda_{\text{max}}} \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda T) b(\lambda T) \Psi(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где G – коэффициент пропорциональности, связанный с геометрическими факторами;

$b(\lambda T)$ – спектральная плотность энергетической яркости, излучаемой абсолютно черным телом (АЧТ);

$S_{\lambda_{\text{max}}}(\lambda)$ – монохроматическая чувствительность фотодиода в максимуме характеристики относительной спектральной чувствительности;

K – коэффициент передачи усилителя преобразователя;

$\Psi(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность фотодиода;

$\varepsilon(\lambda T)$ – излучательная способность излучающей полости модели АЧТ.

Для проведения расчетных оценок чувствительности ОПП реальные характеристики спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов ФД-293 аппроксимировались функцией вида

$$\Psi(\lambda) = q(\lambda - s) \exp[-a(\lambda - s)^8], \quad (2)$$

где значения коэффициентов a , q и s определены по экспериментально полученным значениям спектральной характеристики фотодиода.

Двухканальный ОПП. Для ОПП, построенного по принципу пирометра спектрального отношения, в качестве фотоприемников предполагается использовать:

- по первому (коротковолновому) каналу – кремниевый фотодиод типа ФД-293;
- по второму (длинноволновому) каналу – фотодиоды различных типов:
 - германиевый фотодиод, перед которым установлен фильтр в виде кремниевой пластины [10];

- фотодиод ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN [7].

Отношение сигналов R можно представить в виде

$$R(T) = G \cdot K \cdot \frac{S_{\lambda_1 \text{ max}} \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda T) b(\lambda T) \Psi_1(\lambda) d\lambda}{S_{\lambda_2 \text{ max}} \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda T) b(\lambda T) \Psi_2(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

где $\Psi_1(\lambda)$, $\Psi_2(\lambda)$ – относительные спектральные чувствительности фотоприемников коротковолнового длинноволнового каналов ОПП соответственно.

Для расчета градуировочной характеристики длинноволнового канала ОПП с фотодиодом ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN и германиевого фотодиода с кремниевым фильтром использовался метод численного интегрирования и специально разработанная программа для расчета в среде Microsoft Excel.

Полученные расчетные градуировочные характеристики приведены на рис. 2.

$U(T), B; R(T), [-]$

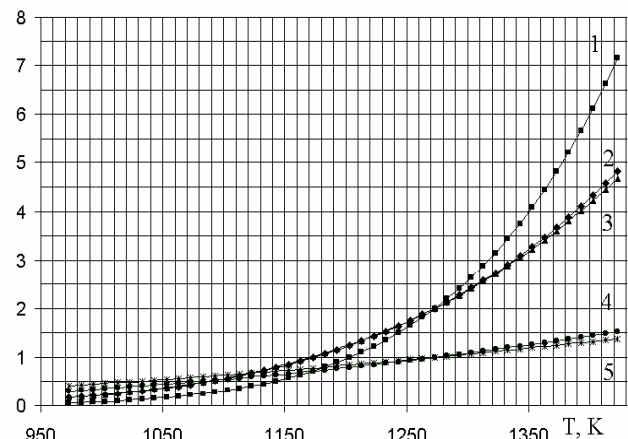


Рис. 2. Градуировочные характеристики ОПП различных типов

- 1 – для ОПП с фотодиодом ФД-293;
- 2 – для канала ОПП с фотодиодом на основе фотодиодом ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN;
- 3 – для канала ОПП с германиевым фотодиодом и кремниевым фильтром;
- 4 – отношение $R(T)$ сигналов каналов двухканального ОПП:
 - первый канал с кремниевым фотодиодом;
 - второй канал с германиевым фотодиодом и с кремниевым фильтром;
- 5 – отношение $R(T)$ сигналов каналов двухканального ОПП:
 - первый канал с кремниевым фотодиодом;
 - второй канал с фотодиодом ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN.

Оценки чувствительности $dU_{\text{ФД}}/dT$ ОПП, построенного по принципу яркостного пирометра с кремниевым фотодиодом ФД-293 и ОПП, построенного на принципе пирометра спектрального отношения, dR/dT приведены на рис. 3.

dU/dT , мВ/град; dU/dT , [-]

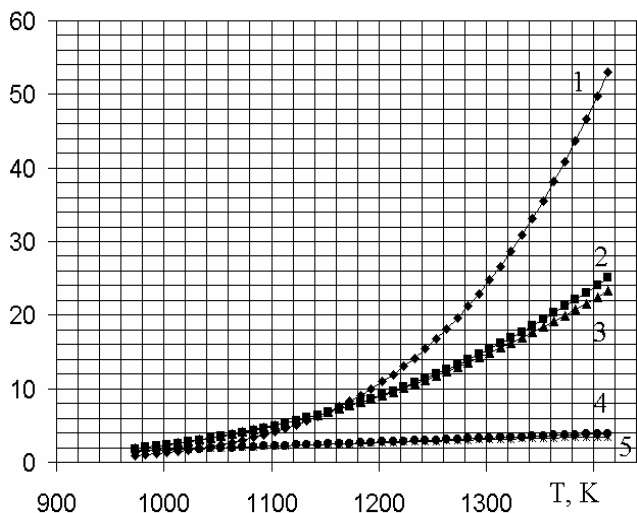


Рис. 3. Характеристики чувствительности ОПП различных типов

- 1 – для ОПП с фотодиодом ФД-293;
- 2 – для канала ОПП с фотодиодом ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN;
- 3 – для канала ОПП с германиевым фотодиодом и с кремниевым фильтром;
- 4 – чувствительность отношения dR/dT двухканального ОПП (сигнала кремниевых фотодиода типа ФД-293 к сигналу германиевого фотодиода и с кремниевым фильтром);
- 5 – чувствительность отношения dR/dT двухканального ОПП (сигнала кремниевых фотодиода типа ФД-293 к сигналу фотодиода ДФД2000ТО)

Из рассмотрения параметров градуировочных характеристик и характеристик чувствительности можно отметить, что в ОПП, построенных на принципе яркостного (одноканального) пирометра, наибольшей чувствительностью обладают ОПП с кремниевым фотодиодом ФД-293 (19,62 мВ/град при измеряемой температуре 1273 К). Каналы ОПП с фотодиодом ДФД2000ТО на основе InSbAs PIN и с германиевым фотодиодом и кремниевым фильтром имеют чувствительность при измеряемой температуре 1273 К 13,28 мВ/град и 12,92 мВ/град соответственно.

Двухканальные ОПП, построенные на принципе пирометра спектрального отношения, обладают существенно меньшей чувствительностью сигнала спектрального отношения. Например, чувствительность спектрального отношения при измеряемой температуре 1273 К составляет с фотодиодом ДФД2000ТО в длинноволновом канале 2,97 мВ/град, с германиевым фотодиодом (с кремниевым фильтром) 3,09 мВ/град.

Учитывая полученные характеристики чувствительности для одноканального (яркостного) ОПП и двухканального ОПП, для обеспечения снижения степени влияния на результаты измерения температуры неучтенных методических погрешностей от:

- поглощения излучения лопатки турбины ГТД промежуточной газовой средой;
- загрязнения продуктами сгорания топлива оптики объектива;
- изменения пропускания оптического канала;
- возможного изменения излучательной способности материала лопаток турбины ГТД в процессе работы,

целесообразно проектировать ОПП по принципу, яркостного пирометра с введением периодической коррекции по сигналу спектрального отношения.

Перспективы дальнейших исследований

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении выявления путей снижения методических погрешностей, возникающих в реальных условиях эксплуатации ГТД, проведения соответствующих экспериментальных работ и расчетных оценок.

Выводы

1. Проведены оценки чувствительности одноканальных (яркостных) и двухканальных ОПП, построенных на принципе пирометра спектрального отношения, в зависимости от измеряемой температуры в диапазоне от 973 К до 1323 К.

2. Из проведенных оценок чувствительности одноканальных (яркостных) ОПП следует, что:

- наибольшей чувствительностью обладает ОПП с применением кремниевого фотодиода ФД-293;
- чувствительность ОПП с применением фотодиода InGaAsP PIN ФДФ2000ТО практически на 30% ниже.

3. Чувствительность спектрального отношения двухканального ОПП с кремниевым фотодиодам в первом (коротковолновом) канале и с двумя вариантами фотоприемников во втором длинноволновом канале:

- с германиевым фотодиодом и светофильтром в виде кремниевой пластины, установленной перед ним, составляет 2,97мВ/град,
- с фотодиодом InGaAsP PIN ФДФ2000ТО составляет 3,09мВ/град.

4. В связи с существенно меньшими значениями чувствительности сигнала спектрального отношения для фотодиодов в выбранных спектральных областях чувствительности каналов ОПП, канал спектрального отношения целесообразно использовать только для периодической коррекции сигнала основного яркостного ОПП.

5. Дальнейшие работы в области построения ОПП для измерения температуры лопаток турбины ГТД целесообразно проводить в направлении выявления путей снижения методических погрешностей, возникающих в реальных условиях эксплуатации ГТД.

Литература

1. Разработка радиационного пирометра для исследования газотурбинных лопаток: Тех. пер. № 30237. М.: ЦИАМ, 1972.- 129 с. (Пер. докл. RDR, 1698 фирмы SOLAR).

2. Хадсон Р. Инфракрасные системы.- М.: Мир, 1972.- 534 с.

3. ОСТ 1.0404-86. Преобразователи оптические пирометрические для бесконтактного измерения

температуры поверхности лопаток турбины газотурбинных двигателей. Параметры, размеры и технические требования.- Введ.- 01.02.86.- 24 с.

4. Андреева Т.П., Валиуллина М.Ш., Маликова И.А. Волоконно-оптические преобразователи для бесконтактного измерения температуры быстровращающихся объектов, предназначенных для работы в теплонапряженных условиях эксплуатации. // Устройства обработки оптических сигналов. Волоконно-оптические датчики различных физических величин: Материалы 5 Всесоюз. конф. ВОСПИ-88.- М., 1988.- Ч.5.- С. 135-137.

5. Ермаков О.Н. Длинноволновые фотодиоды для волоконно-оптических линий связи, дистанционного управления и измерительных систем. // Материалы 16 Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения.- М., 2000.- Ч.4.- С 24.

6. Рекламные материалы фирмы НИИ "Полюс", 2002.- web-ресурс: <http://www.polyus.msk.ru>

7. Рекламные материалы фирмы DILAS Co., Ltd.- web-ресурс: <http://www.dilas.ru>

8. Рекламные материалы фирмы Hamamatsu Photonics К.К., Feb. 2002.- web-ресурс: http://www.hpk.co.jp/eng/products/ssd/ingaas_e/ingaas.htm

9. Технические условия АДБ № 368.245. Фотодиод ФД-293.- Введ.- 1989.

10. А. с. 1542204 СССР, МКИ G01J 5 / 60. Пирометр спектрального отношения / Р.З. Бахтизин, Р.Г. Сагитов, М.В. Долгов, Ю.М. Попов, В.Н. Селезнев, Т.П. Андреева (СССР).- №42007699/31-25; Заявл. 09.03.87, Опубл. в Б.И., 1990.- № 5.- 6с.

Поступила в редакцию 19.05.03

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, профессор Р.З. Бахтизин, Башкирский Государственный университет, г. Уфа.