



УДК 536.521.2

В.Б. Сахаров¹, А.Ю. Поройков², М.А. Садовин¹

¹ГНЦ ФГЦП "Центральный институт авиационного моторостроения имени
П.И. Баранова", 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

²ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», 111250, Россия, Москва,
Красноказарменная ул., 14

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПИРОМЕТР СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

АННОТАЦИЯ

В работе представлен усовершенствованный пирометр спектрального отношения для определения температуры в газовых потоках. Приведены теоретические основы проведения измерений рассматриваемым пирометром. Рассмотрен подход к усовершенствованию блока усиления сигнала фотодиодов для повышения величины отношения сигнал/шум.

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПИРОМЕТР

ВВЕДЕНИЕ

Измерения температур элементов авиадвигателей и температур газового потока является важной задачей при доводке разрабатываемых и эксплуатации промышленно выпускаемых агрегатов. Такие измерения позволяют получить информацию о состоянии элементов двигателя и его важную характеристику – тягу. Для решения этой задачи широко применяются методы оптической пирометрии, так как они обладают двумя достоинствами: бесконтактностью и быстродействием [1].

Одним из таких методов является метод измерения температуры газового потока по излучению его компонент – по отношению двух спектральных линий β , принадлежащих одному и тому же элементу (метод спектральных отношений) [2]. В этом случае отношение интенсивностей излучения не зависит от концентрации частиц, что и позволяет определять температуру. При измерении температуры высокотемпературного газового потока, содержащего продукты сгорания углеводородных топлив, можно использовать всегда присутствующие в спектре линии водяного пара в ближней ИК области спектра.

Расчет температуры газового потока осуществляется по отношению интенсивностей излучения пламени в двух спектральных окнах. Спектральная интенсивность излучения, попадающего на фотоприемник пирометра и определяющая электрический сигнал одного канала пирометра, дается выражением

$$I(\lambda, T) = \int_{\lambda} \tau(\lambda) \cdot N_0(\lambda, T) \cdot k(\lambda, T) d\lambda,$$

где $N_0(\lambda, T)$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, $k(\lambda, T)$ – коэффициент поглощения водяного пара, $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропускания

интерференционного фильтра, используемого для выделения спектральной полосы излучения водяного пара в пирометре с учетом спектральной чувствительности фотоприемника. Для оптически тонкого слоя отношение спектральных интенсивностей излучения по двум каналам, определяющее градуировочную характеристику пирометра

$$\beta = \frac{I_{\lambda 2}}{I_{\lambda 3}},$$

не зависит от характерного размера исследуемого потока и концентрации излучающих молекул, что и дает возможность измерять температуру.

УСТРОЙСТВО ПИРОМЕТРА

Блок схема пирометра спектрального отношения представлена на рис. 1. Особенностью пирометра такого типа является наличие минимум двух измерительных каналов для регистрации интенсивности на различных длинах волн. Каждый канал включает в себя фотодиод, светофильтр и, при отсутствии мультиплексирования при усилении сигналов, отдельный усилитель на каждый канал [3].

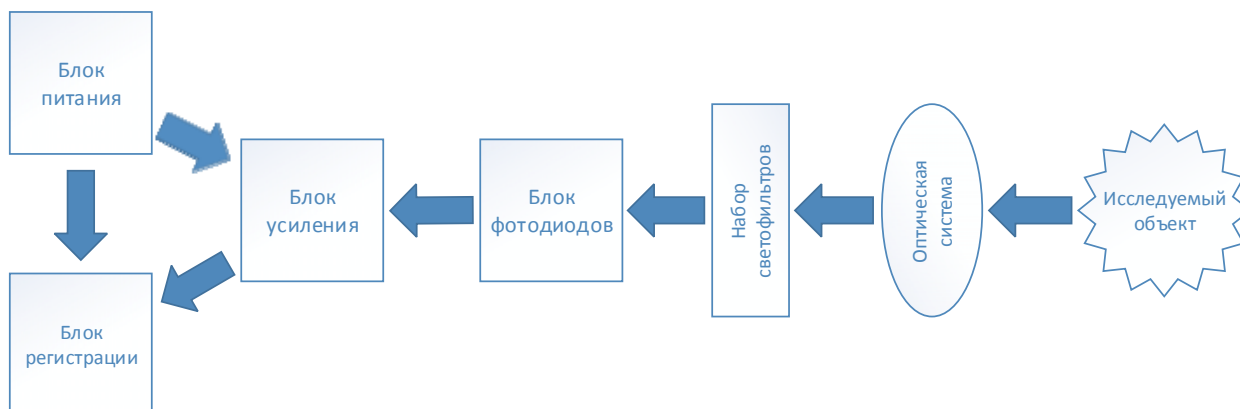


Рис. 1. Блок схема устройства пирометра спектрального отношения

Пирометр состоит из приемной оптической системы, формирующей входящее излучение и направляющей его в измерительные каналы пирометра, набора светофильтров для каждого канала, блока фотодиодов для измерения интенсивности излучения в каждом канале, блока усиления сигнала фотодиодов, блока регистрации усиленного сигнала и блока питания.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЛОКА УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ФОТОДИОДОВ

Одна из важнейших частей пирометра – блок усиления, именно он отвечает за величину отношения сигнал/шум. Каскад усилителей сигнала в данном блоке работает в фотогальваническом режиме. В этом режиме измеряемой характеристикой является ток, протекающий через фотодиод, который генерируется за счет падающего на него излучения. Падение напряжения на диоде при этом должно быть нулевым. Для этого необходимо использовать усилитель с нулевым входным сопротивлением [4].

Схема по которой был построен каскад усиления в блоке представлена на рис. 2. Она позволяет снизить влияния точности подбора значений сопротивлений, величины паразитных емкостей и взаимного расположения резисторов относительно ОУ на создаваемый шум и увеличить степень подавления синфазных помех [5–7].

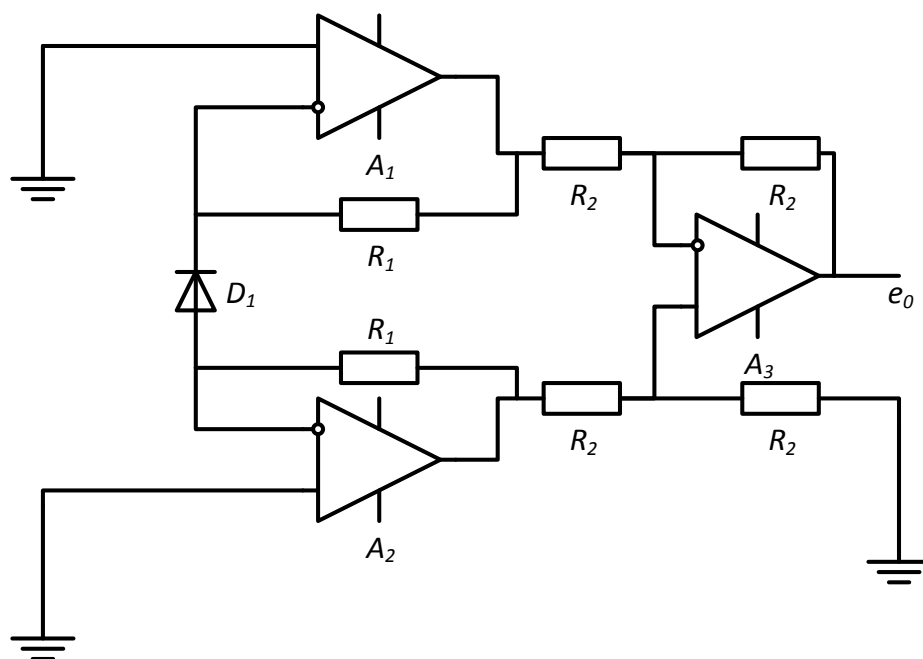
В выбранной схеме фотодиод подключается к двум трансимпедансным усилителям на ОУ A_1 и A_2 , а напряжение с их выходов подается на еще один ОУ A_3 с единичным коэффициентом усиления. Неинвертирующие выходы ОУ A_1 и A_2 подключены к «земле», что устраняет падение напряжения на фотодиоде и, соответственно, его ток утечки. ОУ A_3 имеет высокий показатель КОСС, что, с симметричностью двух усилителей ток-напряжение, позволяет в значительной степени уменьшить синфазные помехи.

Также симметричность схемы позволяет разместить все компоненты на печатной плате для максимальной эквивалентности нижней и верхней части схемы для еще лучшего подавления электростатических синфазных помех.

В качестве операционных усилителей в блоке усиления были использованы две микросхемы: первая для предварительного усиления Texas Instruments OPA2140 [8], вторая с программируемым коэффициентом усиления Burr Brown PGA204 [9].

ОУ OPA2140 имеет двухканальное исполнение, что позволяет разместить элементы A_1 и A_2 на одной микросхеме, уменьшив общие размеры блока усиления и разместить три канала усиления для трех фотодиодов на одной печатной плате.

Коэффициент усиления второго ОУ PGA204 выбирается с помощью логического уровня на двух входах микросхемы и может быть равен 1, 10, 100 и 1000. Данный элемент позволяет повысить динамический диапазон измерений сигнала с фотодиодов и добавляет возможности выбора удобного уровня сигнала для измерения.



A_1, A_2, A_3 – операционные усилители; R_1 и R_2 – резисторы;
 e_0 – выход операционного усилителя; D_1 – фотодиод

Рис. 2. Схема усилительного каскада одного канала блока усиления усовершенствованного пирометра

Для создания печатной платы блока усиления учитывались критерии: симметричность расположения резисторов и емкостей обратной связи для каждого ОУ и минимальная длина дорожек для соединения важных элементов. Также был использован специальный прием – создание защитного барьера из дорожки с низким потенциалом вокруг входов ОУ для уменьшения тока утечки. Данный прием используется при построении высокочувствительных трансимпедансных усилителей. Для еще большего уменьшения тока утечки резисторы и емкости обратной связи были выбраны в выводном исполнении и установлены путем навесного монтажа.

Для удобного и быстрого подключения блока усиления к остальным частям пирометра использованы три разъема. Подключение фотодиодов осуществляется посредством пайки

для уменьшения возможных помех и шумов. Общая площадь платы составила 96×55 мм². Измерительный зонд (ИЗ) пирометра с установленной платой усиления представлен на рис. 3.



Рис. 3 – Зонд пирометра с установленной платой усиления

Для управления и питания измерительного зонда пирометра спектрального отношения создан блок управления и питания (БУиП). Блок состоит из пластикового корпуса с алюминиевыми вставками, источника питания USA150.24553 с ШИМ модуляцией, органов управления (кнопочных переключателей П2К), разъема коммутации измерительного зонда (2PMT) и измерительной аппаратуры (BNC), разъем питания.



Рис. 4. Внешний вид PCS-3 в составе измерительного зонда, блока управления и питания и интерфейсного кабеля

На передней панели блока управления и питания находятся кнопка включения питания, кнопки переключения режима усиления для каждого из трех каналов, ВЧ разъемы для подключения измерительной аппаратуры и регистрации выходного сигнала фотодиодов.

На задней панели БУиП находятся разъем коммутации измерительного зонда (2РМТ), стандартный разъем питания 220 В и место крепления земляного провода. Общий вид ПСО-3 в составе измерительного зонда, блока управления и питания и интерфейсного кабеля представлен на рисунке 4. Итоговые характеристики созданного блока усиления приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики блока усиления измерительного зонда

Параметр	Значение	Единица измерения
Коэффициент предварительного усиления	940	кОм
Коэффициент итогового усиления в режиме		
x1	0,94	МОм
x10	9,4	МОм
x100	94	МОм
x1000	940	МОм
Полоса пропускания в режиме		
x1, x10 и x100	10	кГц
x1000	1	кГц
Диапазон допустимого напряжения питания	4,5÷18	В
Максимальное выходное напряжение	±13,7 В	В
Максимальный потребляемый ток	78,5	мА
Габаритные размеры		
печатная плата	96×55×2,5	мм ³
с элементами	96×55×20	мм ³

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО БЛОКА УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ФОТОДИОДОВ

Для экспериментальной отработки макетного образца усовершенствованного пирометра были проведены испытания пирометра на модели абсолютно черного тела (АЧТ). В блоке усиление были задействованы все три канала с фотодиодами Hamamtsu G10899. В первом канале был установлен светофильтр с длиной волны пропускания 980 нм, во втором 1480 нм и в третьем 1380 нм.

Полученные зависимости выходного напряжения V с трех каналов в режиме усиления $\times 10$ от температуры модели АЧТ T приведены на рис. 5.

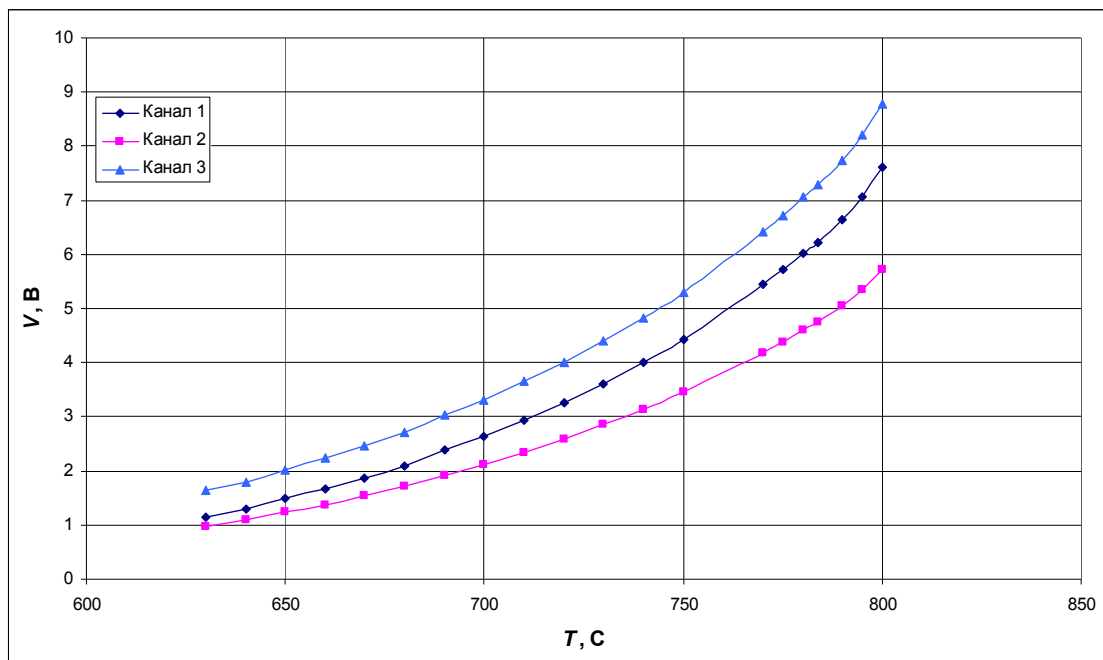


Рис. 5 – График зависимости выходного сигнала блока усиления от температуры модели АЧТ в режиме усиления $\times 10$

Из рисунка видно, что выходной сигнал находится в диапазоне от 1 В до 9 В для температур от 625°C до 800°C . Ток фотодиодов при этом составлял менее 1 мкА. В режиме усиления $\times 100$ выходной сигнал лежал в диапазоне от 0,8 В до 10 В для температур от 450°C до 625°C . Ток фотодиодов при этом составлял менее 100 нА.

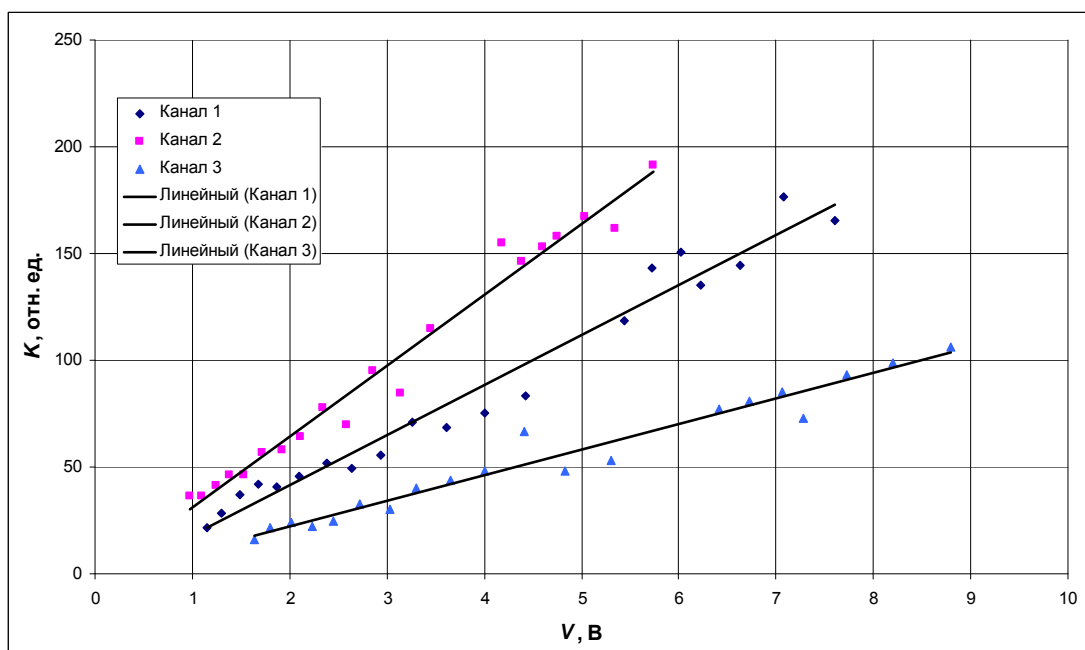


Рис. 6 – График зависимости отношения сигнал/шум от выходного сигнала пирометра в режиме усиления $\times 10$

Для определения шумовых характеристик был выбран размах сигнала (peak-to-peak) на выходе каждого канала пирометра. Размах выходного сигнала не меняется в зависимости от температуры и амплитуды сигнала и является постоянной характеристикой. Для разных каналов он немного отличается, что можно объяснить использованием различных фильтров. Средний размах выходного сигнала составил около 40 мВ для режима $\times 10$ для первого и второго каналов, 90 мВ для режима $\times 10$ для третьего канала, около 45 мВ для режима $\times 100$ для первого и второго каналов и 90 мВ для режима $\times 100$ для третьего канала. Таким образом величина шума практически идентична для обоих режимов усиления.

На рисунке 6 приведен график зависимости отношения сигнал/шум K от величины сигнала V для режима $\times 10$. Отношение сигнал/шум линейно возрастает с ростом амплитуды сигнала. Что объясняется постоянным значением шума в сигнале. K изменяется от 15 до 200 в режиме $\times 10$ и от 10 до 300 в режиме $\times 100$. С учетом возможности дополнительной цифровой обработки выходного сигнала пирометра, величина отношения сигнал/шум позволяет проводить измерения в большом диапазоне температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для экспериментальной отработки пирометра и определения его шумовых характеристик были проведены испытания пирометра на модели абсолютно черного тела (АЧТ). Для определения шумовых характеристик был выбран размах сигнала (peak-to-peak) на выходе трех каналов. Размах выходного сигнала не меняется в зависимости от температуры и амплитуды выходного сигнала фотодиодов и является постоянной характеристикой. Средний размах выходного сигнала составил около 58 мВ для режима усиления $\times 10$ и в около 60 мВ для режима усиления $\times 100$.

Отношение сигнал/шум линейно возрастает с ростом амплитуды сигнала и изменяется от 15 до 200 в режиме $\times 10$ и от 10 до 300 в режиме $\times 100$. С учетом возможности дополнительной цифровой обработки выходного сигнала пирометра, величина отношения сигнал/шум позволяет проводить измерения в большом диапазоне температур.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что макетный образец усовершенствованного пирометра, своими характеристиками позволяет повысить удобство его применения и точность измерений в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В.Н., Сахаров В.Б., Смирнов Л.И. Пирометр спектрального отношения // Измерительная техника. 1987. № 12. С. 42 – 43.
2. Голенцов Д.А., Романов В.Б., Сахаров В.Б. Пирометр спектрального отношения для определения температуры газовых потоков // Оптические методы исследования потоков: Труды VIII Межд. науч.-технич. конференции. М.: Изд-во ЗАО Фирма «Знак», 2005. С. 178 – 181.
3. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. Текст. / Д. Я. Свет. М.: Наука, 1982. – 296 с.
4. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
5. Филипп С.Д. Хоббс Усилители для фотодиодов на операционных усилителях // Компоненты и технологии. Вып. №2, 2009.
6. Филипп С.Д. Хоббс Усилители для фотодиодов на операционных усилителях // Компоненты и технологии. Вып. №3, 2009.
7. Graeme, Jerald G. Photodiode amplifiers: op amp solutions / Jerald G. Graeme, McGraw-Hill Professional Publishing, 1995. 253 p.
8. High-Precision, Low-Noise, Rail-to-Rail Output, 11MHz JFET Op Amp [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4140.pdf> (дата обращения: 27.06.2014).

9. Programmable Gain INSTRUMENTATION AMPLIFIER [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga205.pdf> (дата обращения: 27.06.2014).

V.B. Saharov¹, A.Yu. Poroykov², M.A. Sadovin¹

¹*The P. I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development,
111116, Moscow, Aviamotornaya st., 2*

²*National research university MPEI, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14*

IMPROVED SPECTRAL RATIO PYROMETER FOR THE TEMPERATURE IN THE GAS FLOWS MEASUREMENTS

The paper provides an overview of the improved spectral ratio pyrometer for the temperature in the gas flow measurements. Theoretical foundations of the pyrometer measurements are reviewed. An approach to improve the photodiodes signal amplification unit for increasing signal-to-noise ratio is showed.

TEMPERATURE MEASUREMENTS, PYROMETER