

---

---

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

УДК 536.5

### **СПОСОБЫ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*В.Р. Багаутдинов, аспирант, Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 450078, Россия, г. Уфа, ул. Чернышевского 145, e-mail: bag\_vr@mail.ru.*

*В статье приведен обзор современных способов дистанционного измерения температуры, в которых используются бесконтактные измерительные приборы, основанные на законах теплового излучения, применяемых как инструмент в борьбе за экологическую безопасность. Сначала мы рассматриваем способ дистанционного контроля температуры, используемый в энергетическом машиностроении, в котором информационно-измерительное устройство для дистанционного контроля температуры построено на основе волоконно-оптического кабеля. Далее мы рассматриваем еще одно устройство, также активно используемое в энергетическом машиностроении, которое содержит в себе пирометр. В заключении мы рассматриваем принципиально новый метод теплового контроля объектов – информационно-измерительную систему для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов в котором измерение проводится с помощью тепловизора. Приведен общий вид системы для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов, схема установки тепловизоров, а также блок-схема управления ими. В статье произведен анализ всех рассмотренных устройств дистанционного измерения температуры. Описаны законы теплового излучения.*

**Ключевые слова:** *информационно-измерительные системы, пирометр, букс, дистанционная диагностика температуры, движущиеся объекты, контроль, датчики, тепловизор, волоконно-оптический кабель, газотурбинный двигатель.*

### **WAYS OF REMOTE MEASUREMENT OF TEMPERATURE AND THEIR APPLICATION IN MAINTENANCE OF ECOLOGICAL SAFETY**

*V.R. Bagautdinov, the post-graduate student, the Ufa state academy of economy and service, 450078, Russia, Ufa, 145 Chernyshevsky street, e-mail: bag\_vr@mail.ru.*

*In given article the review of modern ways of remote measurement of temperature in which the contactless measuring devices based on laws of thermal radiation, applied as the tool in struggle for ecological safety are used is resulted. At first we consider a way of remote control of the temperature, used in power mechanical engineering in which the measuring device is information, for remote control of temperature, is constructed on the basis of a fiber-optical cable. Further we consider one more device also actively used in power mechanical engineering which comprises a pyrometer. In the conclusion we consider essentially new method of thermal control of objects – measurement is information measuring system for heating control буксовых knots of wheels of cars in which is spent with the help thermographic camera. The general view of system for heating con-*

---

---

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

*trol axle boxes knots of wheels of cars, the installation scheme thermographic camera and also the block the scheme of management is resulted by them. In article the analysis of all considered devices of remote measurement of temperature is made. Laws of thermal radiation are described.*

**Key words:** *information-measuring systems, pyrometer, axle boxes, remote diagnostics of temperature, moving objects, thermographic camera, gages, a fiber-optical cable, the engine.*

Возросшие требования к качеству окружающей среды диктуют необходимость создания эффективных методов и средств измерения физических величин, характеризующих экологическую безопасность. Важнейшей физической величиной при этом является температура. В энергетике, промышленности, производстве, машиностроении своевременное обнаружение температурных аномалий на поверхностях оборудования может предотвратить крупную аварийную ситуацию, которая могла бы стать причиной экологического загрязнения. Очень важно своевременно измерить температуру какого-либо элемента системы, чтобы вовремя принять меры в случае превышения температуры допустимой нормы [1, 2].

Дистанционное измерение температуры поверхностей является современным и незаменимым инструментом в борьбе за экологическую безопасность. При дистанционном измерении температуры используют бесконтактные измерительные приборы, основанные на законах теплового излучения. Как известно, любое нагретое тело излучает электромагнитные волны. Чем выше температура тела, тем более короткие волны оно испускает. Тело, находящееся в термодинамическом равновесии со своим излучением, называют абсолютно черным (АЧТ). Излучение абсолютно черного тела зависит только от его температуры. В 1900 году Макс Планк вывел формулу, по которой при заданной температуре АЧТ можно рассчитать величину интенсивности его излучения [1, 3, 4].

Австрийскими физиками Стефаном и Больцманом был установлен закон, выражающий количественное соотношение между полной излучательной способностью и температурой черного тела:  $\epsilon = \sigma T^4$ . Этот закон носит название закон Стефана – Больцмана. Константа  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) получила название постоянной Стефана – Больцмана.

Все планковские кривые имеют заметно выраженный максимум, приходящийся на длину волны

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ (К}\cdot\text{м)}}{T \text{ (К)}}. \quad (1)$$

Это закон Вина. Так, для Солнца  $T_0 = 5\,800$  К, и максимум приходится на длину волны  $\lambda_{\max} \approx 500$  нм, что соответствует зеленому цвету в оптическом диапазоне [2, 5].

С увеличением температуры максимум излучения АЧТ сдвигается в коротковолновую часть спектра. Более горячая звезда излучает большую часть энергии в ультрафиолетовом диапазоне, менее горячая – в инфракрасном. Таким образом, закон Стефана – Больцмана и закон Вина служат основой при проектировании тепловизионных приборов, способных дистанционно измерять температуру объектов [1, 3].

Современные тепловизионные приборы, спроектированные на законах теплового излучения, активно внедряются и используются во всех областях человеческой деятельности.

Энергетическое машиностроение является важнейшей отраслью производства, бесперебойная и безаварийная работа которого определяет благоприятную экологическую обстановку вокруг. Очень важно вовремя и точно получать контрольные параметры того или иного элемента системы. Незаменимым является устройство для контроля температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя, активно используемое в энер-

гетическом машиностроении. На рисунке 1 представлена блок-схема данного измерительного устройства [1, 4].

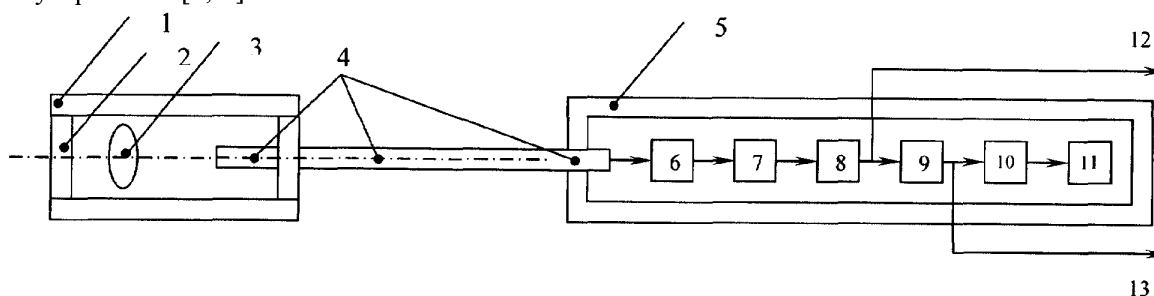


Рис. 1. Схема измерительного устройства для контроля температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя

Данное устройство содержит оптическую головку 1, состоящую из инфракрасно прозрачного стекла 2 и объектива 3, одновременно выполняющего функции полосового фильтра частот. Внутри оптической головки введен торец волоконного световода, выполненного в виде волоконно-оптического кабеля 4.

С помощью волоконно-оптического кабеля 4 из зоны, близкой к турбине, расположен электронный блок 5, внутри которого введен второй торец волоконно-оптического кабеля 4. С торцом волоконно-оптического кабеля 4 оптически связан приемник оптического излучения 6. За ним следуют последовательно соединенные усилитель 7, устройство коррекции помех 8, аналого-цифровой преобразователь 9, запоминающий регистр 10, жидкокристаллический индикатор 11.

Для сопряжения с внешними устройствами введены аналоговый узел связи 12, связанный с выходом устройства коррекции помех 8 и цифровой узел связи 13, связанный с выходом аналого-цифрового преобразователя 9.

Измерительное устройство для контроля температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя работает следующим образом. Излучение от лопатки проецируется оптической головкой 1 через инфракрасно прозрачное стекло 2 и объектив 3, одновременно выполняющий функции полосового фильтра частоты, на входной торец волоконно-оптического кабеля 4. Излучение с выходного торца волоконно-оптического кабеля 4 преобразуется в электрический сигнал приемником оптического излучения 6. Далее он усиливается усилителем 7.

С помощью устройства коррекции помех 8 осуществляется коррекция помех и выделяется информативный сигнал, являющийся функцией температуры лопаток турбины.

В аналого-цифровом преобразователе 9 аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровой код, который хранится в запоминающем регистре 10 и представляется на жидкокристаллическом индикаторе 11 в виде результата измерения.

Устройство содержит аналоговый и цифровой узлы сопряжения с внешними устройствами в виде аналогового 12 и цифрового 13 узлов связи.

Использование в качестве волоконного световода волоконно-оптического кабеля, выполнение оптической головки с инфракрасно прозрачным стеклом и объективом, одновременно выполняющим функции полосового фильтра частот, и введение в состав электронного блока устройства коррекции помех позволяют повысить точность измерения температуры.

Последовательное соединение в электронном блоке на выходе волоконно-оптического кабеля цепочки, состоящей из приемника оптического излучения, усилителя, устройства коррекции помех, аналого-цифрового преобразователя, запоминающего регистра, жидкокристаллического индикатора, и введение аналогового и цифрового узлов связи

---

---

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

для сопряжения с внешними устройствами позволяет расширить функциональные возможности устройства, обеспечивая запоминание значений измеряемой температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя и отображение их на жидкокристаллическом индикаторе [4, 7].

Еще одно инновационное устройство, активно используемое в энергетическом машиностроении, представлено на рисунке 2.

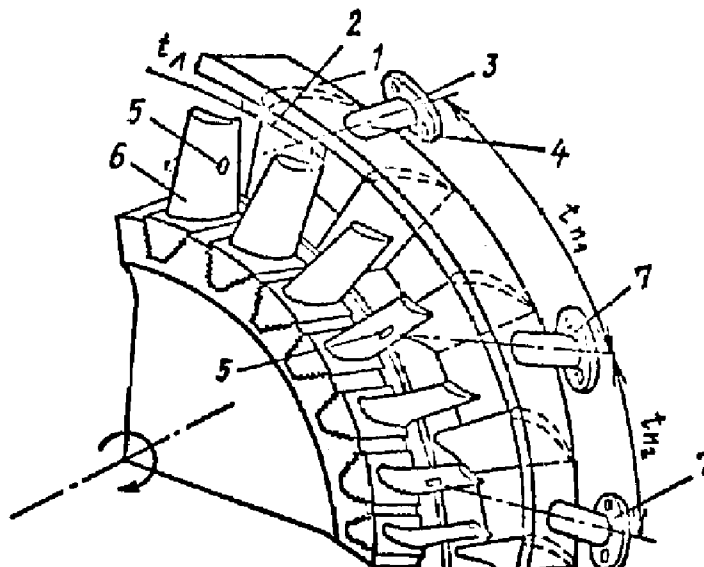


Рис. 2. Устройство для контроля температурных рабочих лопаток газовой турбины

Устройство содержит установленный в корпусе 1 соплового аппарата 2 радиационный пирометр 3, оптическая ось 4 которого ориентирована на поверхность 5 контролируемой лопатки 6. Устройство снабжено по крайней мере одним дополнительным пирометром 7. Пирометры 3, 7 установлены относительно друг друга с шагом  $t_{\text{пи}}$ , кратным шагу  $t_{\text{л}}$  контролируемых лопаток 6, а их оптические оси 4 ориентированы на идентичные участки поверхности 5 контролируемых лопаток 6.

Размещение пирометров 3, 7 относительно друг друга с шагом  $t_{\text{пи}}$ , кратным шагу  $t_{\text{л}}$  контролируемых лопаток 6, позволяет одновременно термометрировать идентичные участки поверхности 5 нескольких лопаток 6. При этом отличие в результатах термометрирования лопаток 6 обуславливается окружной неравномерностью теплового излучения газовой турбины и определяет систематическую ошибку термометрирования лопатки 6.

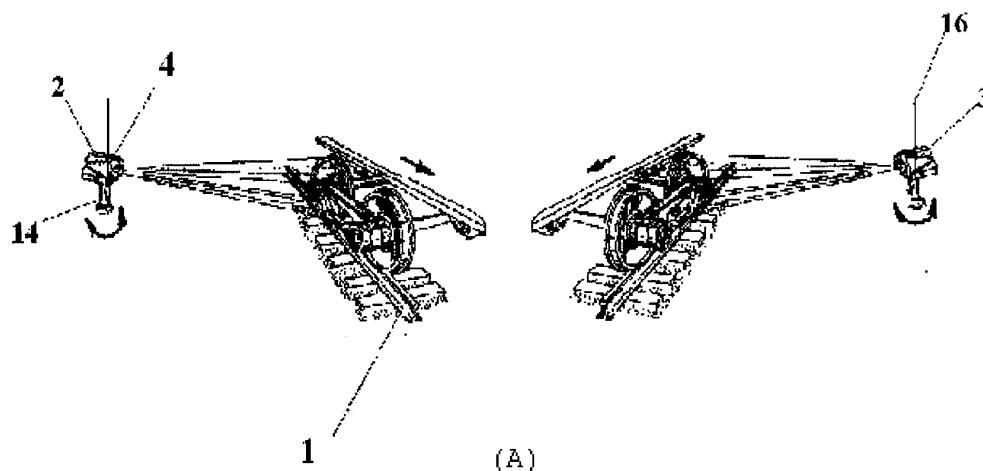
Данное устройство обеспечивает повышение точности контроля рабочих лопаток путем снижения погрешности термометрирования, обусловленной окружной неравномерностью теплового излучения газовой турбины, что положительно сказывается на работе системы в целом. Таким образом, дистанционное измерение температуры в производстве и в частности в энергетическом машиностроении является важнейшим фактором в обеспечении безопасности объекта и окружающей среды [3, 8].

Наиболее перспективным методом дистанционного измерения и контроля температуры является метод с использованием тепловизоров. С помощью профессиональных тепловизоров осуществляется дистанционное измерение температуры с точностью не менее  $0,02-0,1$  °С. Тепловизор представляет собой оптико-электронный измерительный прибор, работающий в инфракрасной области электромагнитного спектра, «переводящий» в видимую область спектра собственное тепловое излучение людей или техники. Современные приборы данного типа дают возможность своевременно и оперативно отслеживать все теп-

ловые изменения, которые происходят в отдельно взятых частях машин и механизмов. Как правило, современные тепловизоры отображают принимаемое тепловое поле на встроенном цветном дисплее. Причем более нагретые области обследуемого объекта отображаются желто-красными цветами спектра, холодные или малонагретые области соответственно синеголубыми цветами. В профессиональных тепловизорах обязательно выводится на экране шкала соответствия текущей температуры цвету. Сохраняемый файл данных содержит отсчеты температуры по сканируемому полю, что позволяет проводить различную обработку полученных данных сканирования с помощью специализированного программного обеспечения. Наиболее эффективное и точное измерение осуществляется с помощью охлаждаемых тепловизионных систем.

Дистанционный контроль температуры при помощи тепловизоров в настоящее время активно используется в железнодорожном транспорте. В масштабах мировой экономики настоящего времени проблемы грузоперевозок занимают важнейшее место. Грузоперевозки железнодорожным транспортом являются одним из самых старых и популярных способов транспортировки грузов на средние и дальние расстояния, поэтому невероятно важно обеспечить безопасную и безаварийную транспортировку грузов на железнодорожном транспорте. Авария или сход с рельс поезда, транспортирующего токсичные, горючие или взрывоопасные вещества, может привести к серьезной экологической проблеме в случае утечки этих веществ. Буксы являются важнейшими элементами ходовых частей вагона, от надежности которых во многом зависит безопасность движения поездов.

Работая в таких сложных условиях нагружения и изменяющихся температурных и погодных условиях окружающей среды, буксы должны обеспечивать минимальное сопротивление вращению колесных пар, высокую надежность и безопасность движения вагона. Поэтому к их конструкции, техническому обслуживанию и ремонту предъявляют высокие требования, в особенности при повышении скорости движения поездов и росте нагрузок от колесных пар вагонов. Перегрев букс является одной из основных причин аварий и сходов поездов на пути. Своевременно обнаруженное превышение рабочей температуры букс – гарантия безопасного и безаварийного движения поезда. На рисунке 3 представлены общий вид системы для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов, схемы установки тепловизоров, а также блок-схема управления тепловизорами.



## КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

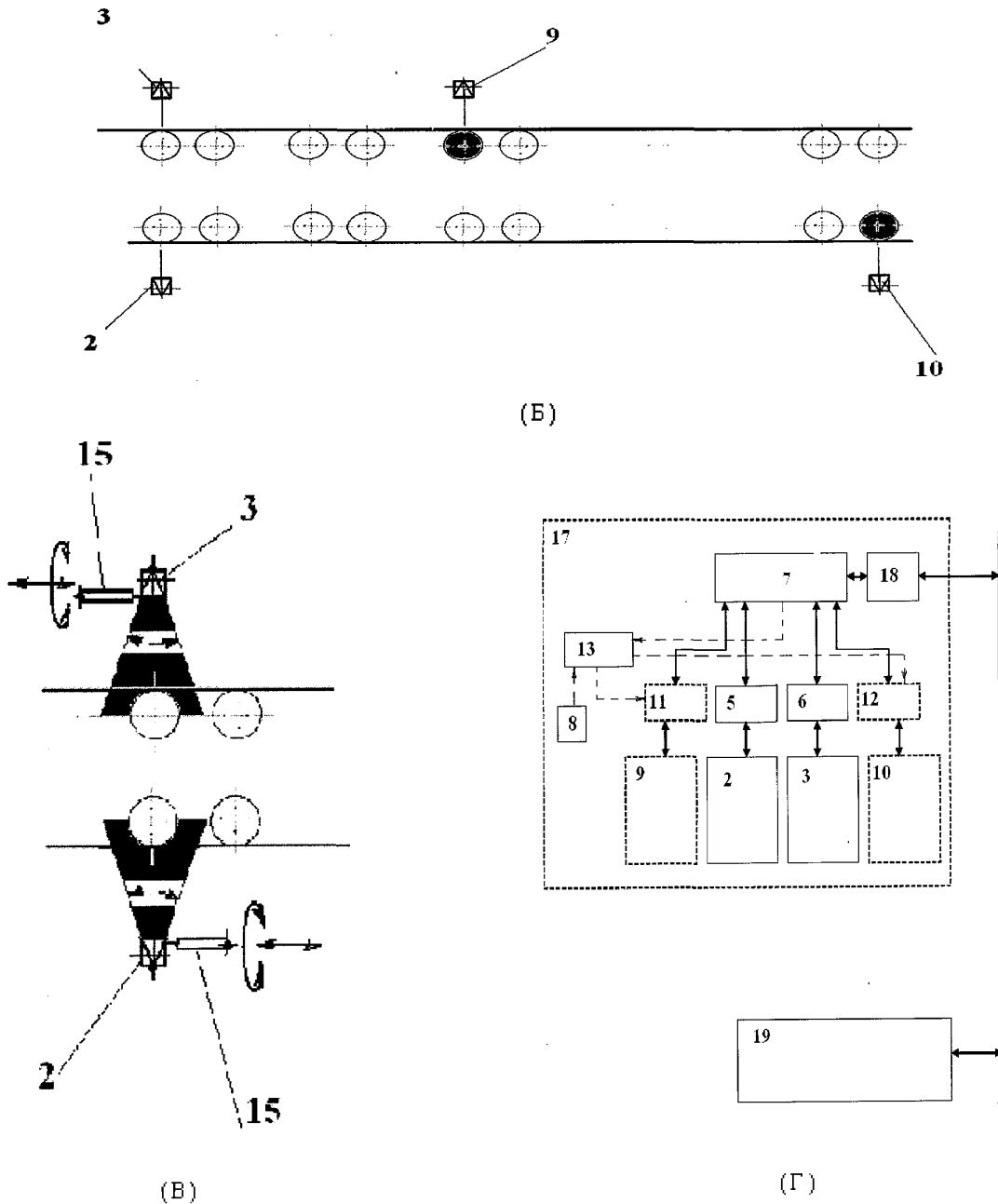


Рис. 3. А: Общий вид системы для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов.

Б: Схема установки тепловизоров.

В: Схема установки первой пары тепловизоров.

Г: Блок-схема управления тепловизорами

Система для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов содержит установленные с обеих сторон железнодорожного пути 1 два основных тепловизора 2 и 3, которые размещены в корпусах 4 (рис. 3 А) и подключены к соответствующим блокам управления 5 и 6, соединенным с микропроцессором 7, и блок 8 задания предельно допустимого значения температуры (рис. 3 Г), два дополнительных тепловизора 9 и 10 (рис. 3 Б) с блоками управ-

ления 11 и 12 и блок 13 сравнения (рис. 3 Г). При этом дополнительные тепловизоры 9 и 10 (рис. 3 Б) размещены в аналогичных корпусах 4 и установлены с обеих сторон железнодорожного пути 1 (рис. 3 А) на расстоянии не менее длины вагона от основных тепловизоров по направлению движения вагонов. Блоки управления 11 и 12 (рис. 3 Г) дополнительных тепловизоров 9 и 10 (рис. 3 Б) подключены к микропроцессору 7, выход которого соединен с входом блока сравнения 13, ко второму входу которого подключен блок 8 (рис. 3 Г) задания предельно допустимого значения температуры. Выход блока сравнения 13 соединен с управляющими входами блоков управления 11 и 12 (рис. 3 Г) дополнительных тепловизоров 9 и 10 (рис. 3 Б). Причем каждый корпус 4 основных тепловизоров 2 или 3 (рис. 3 А) установлен на опоре 14 с возможностью ограниченного поворота приводом 15 (рис. 3 В) относительно вертикальной оси 16 (рис. 3 А).

Система включает размещенные вдоль железнодорожного пути 1 (рис. 3 А) линейные посты контроля 17 (рис. 3 Г). Каждый линейный пост контроля 17 подключен через концентратор информации 18 к автоматизированному рабочему месту оператора 19, осуществляющему контроль за температурой буксовых узлов колес проходящих составов поездов (рис. 3 Г).

Система для контроля перегрева буксовых узлов колес вагонов работает следующим образом.

Первая пара основных тепловизоров 2 и 3, размещенных в соответствующих корпусах 4 по обе стороны железнодорожного пути 1, осуществляет тепловой контроль букс, движущихся по этому пути вагонов (рис. 3 А). Сигналы от тепловизоров 2 и 3 (рис. 3 А) через соответствующие блоки 5 и 6 управления поступают в микропроцессор 7, где производится их обработка (рис. 3 Г). Обработанный микропроцессором 7 сигнал подается на вход блока 13 сравнения, на втором входе которого установлено значение предельно допустимой температуры с помощью блока 8 (рис. 3 Г). Если сигнал, поступивший на вход блока 13 сравнения, не превышает установленного на втором входе значения предельно допустимой температуры, то на выходе блока 13 сравнения выходной сигнал будет отсутствовать (рис. 3 Г).

В случае превышения установленного значения температуры одной из букс установленного значения (например, 100 °С) сигнал, поступивший на вход блока 13 сравнения, превысит установленное на втором входе значение и на выходе блока 13 сравнения сформируется выходной сигнал, который поступает на управляющие входы блоков 11 или 12 управления (рис. 3 Г). Последние блоки обеспечивают включение одного или двух дополнительных тепловизоров 9 и 10 (рис. 3 Б). Включение происходит избирательно, поскольку информация, о том какая из букс имеет температуру, превышающую допустимую, поступает из микропроцессора 7 в блоки 11 и 12 управления (рис. 3 Г). Тем самым повышается эффективность контроля буксовых узлов и исключается пропуск перегретых букс при повторном контроле. Тепловизоры 9 и 10 (рис. 3 Б) имеют более высокую стоимость, обладают большей разрешающей способностью и точностью при измерении температуры, чем тепловизоры 2 и 3 (рис. 3 А). Их включение производится избирательно только при обнаружении первой пары тепловизоров 2 и 3 (рис. 3 А) повышенной температуры у одной из букс вагона. Таким образом, будет экономиться расход электроэнергии и их ресурс.

Дополнительные контрольные тепловизоры 9 и 10 (рис. 3 Б) размещены в аналогичных защищенных от погодных условий корпусах 4 по обе стороны железнодорожного пути 1 (рис. 3 А) со сдвигом в сторону движения вагонов. Они располагаются на расстоянии от основных тепловизоров 2 (рис. 3 А) и не менее длины одного вагона. Это необходимо для того, чтобы обработать сигналы, выявить буксы с повышенной температурой и успеть включить дополнительные тепловизоры 9 и 10 (рис. 3 Б).

Каждый основной тепловизор 2 или 3, установленный на опоре 14 (рис. 3 А), следит со своей боковой стороны за прохождением буксы вагона за счет ограниченного поворота

---

---

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

приводом 15 (рис. 3 В) относительно вертикальной оси 16 (рис. 3 А). Это позволяет осуществить полный обзор буксового узла с наружной стороны проходящего вагона. Кроме этого, увеличивается время нахождения луча тепловизора 2 или 3 (рис. 3 А) на нагретом месте буксы при сопровождении им вагонов. Следовательно, повышается надежность обнаружения нагретых букс следящим лучом тепловизора 2 или 3 (рис. 3 А).

С линейных постов контроля 17, расположенных вдоль пути следования поезда и снабженных концентраторами информации 18 (рис. 3 Г), информация от тепловизоров 2 и 3 (рис. 3 А), 9 и 10 (рис. 3 Б) о температуре буксовых узлов вагона передается по сети к автоматизированному рабочему месту оператора 19 (рис. 3 Г).

Таким образом, использование тепловизоров определяет повышенную надежность работы системы за счет обнаружения перегретых букс [1, 2, 6].

### Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
2. Волоконно-оптические датчики / под ред. Т. Окоши ; пер. с яп. – Л. : Энергоатомиздат, 1990.
3. Жуков А. Г. Тепловизионные приборы и их применение / А. Г. Жуков, А. Н. Горюнов, А. А. Кальфа. – М. : Радио и связь, 1983. – 168 с.
4. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды : учеб. пос. для вузов / под ред. В. Н. Рождествина. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 528 с.
5. Патент 1450469 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> F01D25/00. Устройство для контроля температуры рабочих лопаток газовой турбины / Шипигусев В. А., Литвинов В. С., Марфин Ю. Н., Губайдуллин И. Т., Валеев М. Т. – № 3987661/06; заявл. 04.11.1985; опубл. 15.05.1994.
6. Патент 53007 Российская Федерация, МПК G01J5/10 Измерительное устройство для контроля температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя / Ураксеев М. А., Камалов С. В. – № 2005133667/22; заявл. 31.10.2005; опубл. 27.04.2006.
7. Патент 95302 Российская Федерация, МПК B61K9/06. Система для контроля нагрева буксовых узлов колес вагонов / Ададунов С. Е., Розенберг Е. Н., Раков В. В., Иконников Е. А., Мионов В. С., Смирнов Д. А. – № 2010112242/22; заявл. 30.03.2010; опубл. 27.06.2010.
8. Режим доступа: [www.ecosystema.ru](http://www.ecosystema.ru), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

### References

1. Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyj kurs dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov / pod red. Je. Udda. – M. : Tehnosfera, 2008. – 520 s.
2. Volokonno-opticheskie datchiki / pod red. T. Okosi ; per. s jap. – L. : Jenergoatomizdat, 1990.
3. Zhukov A. G. Teplovizionnye pribory i ih primenenie / A. G. Zhukov, A. N. Gorjunov, A. A. Kal'fa. – M. : Radio i svjaz', 1983. – 168 s.
4. Optiko-jelektronnye sistemy jekologicheskogo monitoringa prirodnoj sredy : ucheb. pos. dlja vuzov / pod red. V. N. Rozhdestvina. – M. : Izd-vo MGTU im. Baumana, 2002. – 528 s.
5. Patent 1450469 Rossijskaja Federacija, MPK<sup>5</sup> F01D25/00. Ustrojstvo dlja kontrolja temperatury rabochih lopatok gazovoj turbiny / Shipigusev V. A., Litvinov V. S., Marfin Ju. N., Gubajdullin I. T., Valeev M. T. – № 3987661/06; zajavl. 04.11.1985; opubl. 15.05.1994.
6. Patent 53007 Rossijskaja Federacija, MPK G01J5/10 Izmeritel'noe ustrojstvo dlja kontrolja temperatury rabochih lopatok rotora turbiny gazoturbinnogo dvigatelja / Urakseev M. A., Kamalov S. V. – № 2005133667/22; zajavl. 31.10.2005; opubl. 27.04.2006.
7. Patent 95302 Rossijskaja Federacija, MPK B61K9/06. Sistema dlja kontrolja nagreva buk-sovyh uzlov koles vagonov / Adadurov S. E., Rozenberg E. N., Rakov V. V., Ikonnikov E. A., Mironov V. S., Smirnov D. A. – № 2010112242/22; zajavl. 30.03.2010; opubl. 27.06.2010.
8. Rezhim dostupa: [www.ecosystema.ru](http://www.ecosystema.ru), svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.