

И. Т. РАЗУМОВСКИЙ

**ПИРОМЕТР
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЕРЕГРЕВА СКРУТОК
ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Предлагается пирометр для контроля перегрева скруток проводов в линиях электропередач, установленный на автомобильной платформе и состоящий из измерительного инфракрасного канала, визуального оптического-телевизионного канала и привода наведения. Прибор обслуживается оператором. Уровни контроля перегрева — 200, 400 и 600 °С при температурном разрешении не хуже 2 °С.

Ключевые слова: пирометр, инфракрасный канал, визуальный канал.

Введение. Выход из строя участка линии электропередач не только создает неудобства для потребителей, но и вызывает серьезные финансовые проблемы у предприятий, эксплуатирующих данное энергооборудование. Известно, что из-за перепадов температур окружающей среды или внешних механических воздействий происходят обрывы проводов, при их же восстановлении возникают соединения, так называемые *скрутки*. Однако под действием неблагоприятных атмосферных условий скрутки окисляются, в результате чего их электрическое сопротивление резко возрастает, скрутки начинают перегреваться, и это снова приводит к аварийным ситуациям — разрыву проводов и отключению освещения.

Для контроля перегрева скруток проводов необходимо использовать диагностическое оборудование. Информативным видом такого оборудования может стать инфракрасный (ИК) пирометр. В настоящее время промышленность выпускает значительное число пирометров, близких по необходимым параметрам [1, 2]. Однако обеспечить контроль перегрева скруток, используя серийную аппаратуру, не удастся.

Рассмотрим основные проблемы, возникающие при решении этой задачи. Первая из них связана с малыми размерами скрутки и достаточно большим до нее расстоянием. Если принять размер излучающей поверхности скрутки равным $10 \times 80 \text{ мм}^2$, а среднюю дистанцию до скрутки — 8 м, то требуемое поле зрения прибора будет не более $4,2'$, т.е. показатель визирования прибора должен быть не менее 1:800. Столь малое поле зрения требует длиннофокусной инфракрасной оптики.

Вторая проблема вытекает из первой — для захвата измерительной инфракрасной системой столь малого объекта, как скрутка, прибор должен обладать чувствительной визуальной поисковой системой. Для решения этой проблемы необходим точный механический привод с визирной наблюдательной системой, имеющей сменное увеличение (чтобы реализовать большое поисковое поле и малое измерительное поле).

Третья проблема связана с точным совмещением полей зрения как измерительной, так и визуальной систем. Для этого оптические оси этих систем должны быть аксиальны, чтобы исключить их взаимный параллакс. Это не совсем просто, учитывая, что рабочие спектральные диапазоны измерительной (8—14 мкм) и визуальной (0,4—0,76 мкм) систем различны.

Обеспечить решение перечисленных проблем позволяет разработанный автором специализированный ИК-пирометр, предназначенный именно для диагностики соединений проводов на трассах линий наружного освещения. По показаниям ИК-пирометра, установленного на автомобильной платформе, ремонтная бригада, проезжая вдоль линий электропередач, дистанционным способом осуществляет контроль всех скруток на перегрев, что позволяет своевременно выявить и ликвидировать предаварийную ситуацию.

Устройство специализированного пирометра. Предлагаемый прибор, размещаемый в кузове микроавтомобиля с возможностью питания от его бортовой сети, состоит из измерительного инфракрасного канала 1 (рис. 1), выполненного по классической схеме. По сигналу инфракрасного канала оценивается температура перегрева скрутки (T_n) относительно температуры окружающей среды в диапазоне от 200 до 600 °С при температурной чувствительности 2,5 °С.

Результат перегрева скрутки выводится на индикатор 2, который представляет собой три разноцветных светодиода, загорающиеся в зависимости от полученного результата: зеленый светодиод — $T_n < 200$ °С — рабочее состояние соединения; желтый светодиод — $T_n = 200 \dots 400$ °С — опасная ситуация, требующая быстрого устранения неисправности линии; красный светодиод — $T_n > 600$ °С — аварийная ситуация, требующая немедленной ликвидации неисправности. Грубое наведение прибора на искомую скрутку осуществляется оператором посредством механического визира 3, и далее поиск ведется при помощи оптико-телевизионного визира 4 с отображением получаемой информации на экране монитора 5 (в поле зрения выводятся два смежных изолятора, провода и скрутки).

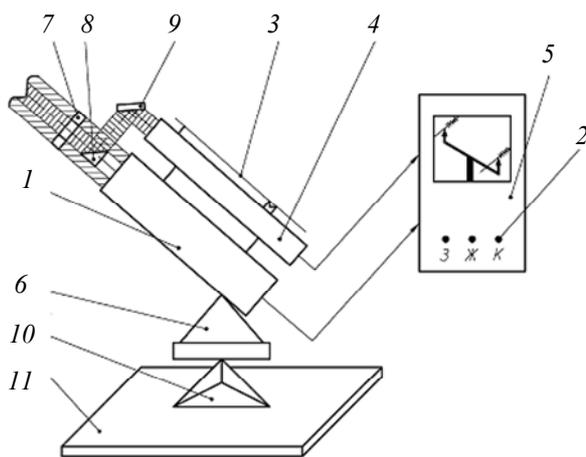


Рис. 1

Поиск скрутки оператор осуществляет вначале при малом увеличении. Окончательное наведение на скрутку достигается при наибольшем увеличении визуального канала.

Непременное условие правильной работы прибора — согласованность полей зрения измерительного и визуального каналов, что достигается точной их юстировкой при помощи подвижек призмы 8 и зеркала 9.

Пирометр установлен на двухкоординатном поворотном устройстве 6. Дополнительным необходимым элементом прибора служит устройство 10 его крепления к полу 11 автомобиля.

Измерительный инфракрасный канал. Измерительный инфракрасный канал (рис. 2) работает следующим образом. Инфракрасное излучение от исследуемой поверхности проходит через зеркальный объектив 1, оптический фильтр 2, прозрачный в области 8—14 мкм, вибратор 3 и фокусируется на фотоприемнике 5. Электрический сигнал U с приемника излучения подается в блок обработки 6, где реализуется синхронное детектирование. С помощью генератора опорного напряжения 4 вырабатываются импульсы тока, которые управляют ра-

ботой электронного реле в блоке 6. Из блока обработки сигнал поступает на пороговое устройство 7 и далее на трехцветный светодиодный индикатор 8.

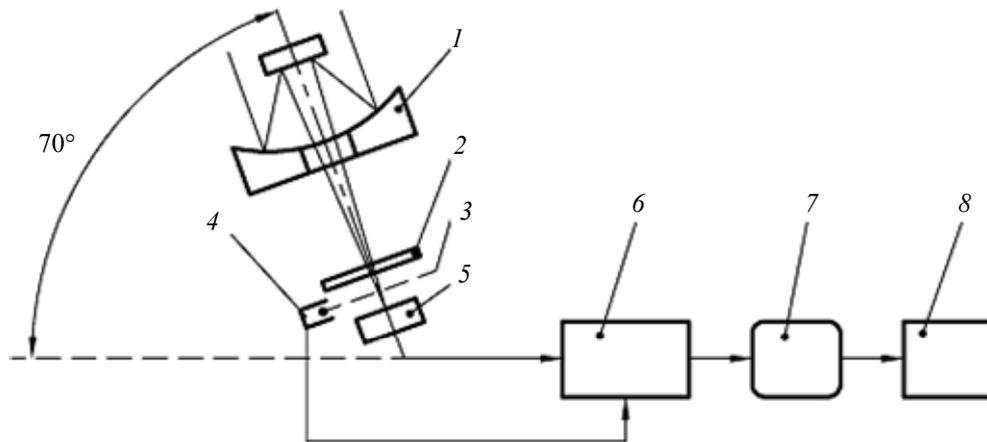


Рис. 2

Основные параметры измерительного канала. Определим угловое поле ($\omega_{об}$) объекта измерения (скрутки) по следующей формуле: $\text{tg}\omega_{об} = a / L$, где a — наименьший размер объекта, L — расстояние до объекта. Пусть размер скрутки $10 \times 80 \text{ мм}^2$, расстояние до объекта 8 м. Тогда, подставив численные значения, получим

$$\text{tg}\omega_{об} = 10 / 8000 = 0,00125, \quad \omega_{об} = 4,2'.$$

По этой же формуле определим угол между двумя ближайшими изоляторами при наблюдении их на дистанции 8 м: $\text{tg}\omega_{из} = l / L'$, где $l = 250 \text{ мм}$ — расстояние между двумя изоляторами, L' — расстояние до изоляторов. Таким образом, получаем

$$\text{tg}\omega_{из} = 250 / 8000 = 0,03125, \quad \omega_{из} = 1^\circ 45'.$$

Исходя из полученных данных максимальное поле зрения визуального канала должно быть не менее $1^\circ 45'$, а минимальное — не более $4,2'$.

В разработанном приборе использован пироэлектрический приемник излучения БП2-6 с диаметром чувствительной площадки $0,3 \text{ мм}$. Чтобы при оценке температуры перегрева показания измерительного канала оставались независимыми от расстояния до скрутки, необходимо реализовать так называемый случай протяженного объекта. Для этого размер изображения скрутки (a') при любых измерениях должен всегда превышать размер чувствительной площадки приемника излучения. С учетом запаса на разброс размеров скруток примем $a' = 0,5 \text{ мм}$. При заданном размере скрутки ($10 \times 80 \text{ мм}^2$) фокусное расстояние объектива измерительного канала определяется в соответствии с условием $\frac{a}{L} = \frac{a'}{f'} \Rightarrow f' = \frac{8000 \cdot 0,5}{10} = 400 \text{ мм}$. При таком значении f' на скрутке вырезается участок шириной не более 4 мм .

Оптические материалы в радиометрических приборах должны соответствовать выбранному для работы участку спектра ($8\text{--}14 \text{ мкм}$), а также эксплуатационным требованиям, предъявляемым к аппаратуре. Поэтому оптика, наряду с высокой прозрачностью, должна быть не критичной к перепадам температур и негигроскопичной.

Центральная зона входного окна (иллюминатора) 7 (см. рис. 1) диаметром 35 мм выполнена прозрачной только для видимых лучей. Поэтому для создания визуального канала аксиальным измеряемому каналу в последнем применен зеркальный объектив, который без световых потерь согласуется с кольцевой зоной иллюминатора, прозрачной лишь в ИК-диапазоне (материал ИКС-29).

Объектив пирометра представляет собой сферическую зеркальную поверхность с контротражателем. Диаметр главного зеркала конструктивно выбран минимальным, размером 57 мм, чтобы его относительное отверстие было не хуже 1:7. Этого достаточно, чтобы аберрации объектива не увеличивали размеры изображения скрутки более чем на 20—30 %. Эффективный световой диаметр объектива при этом равен $D=45$ мм.

Минимальная разность температур двух соседних участков объекта, регистрируемая пирометром, может быть оценена из выражения [3]

$$\Delta T_{\min} = \frac{\mu\Phi}{k\varepsilon\sigma T^3 \alpha (1 - \exp(-t_{\text{и}}/\tau))} \frac{f'}{D^2} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{ш}}}{\kappa}} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $\mu = 1$ — коэффициент отношения сигнал/шум; $\Phi = 6,3 \cdot 10^{-8}$ Вт/Гц^{1/2}·см — пороговая чувствительность приемника; $k = 0,3$ — коэффициент использования излучения фотоприемником; $\varepsilon = 0,2$ — коэффициент излучения объекта; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $T = 473$ К — температура объекта; α — угловая разрешающая способность: $\alpha = d/f' = 0,3/400 = 0,00075$ рад, d — размер чувствительной площадки приемника излучения; $t_{\text{и}} = 5$ с — длительность самого короткого импульса излучения; $\tau = 5$ с — постоянная времени системы приемник—усилитель; $\Delta f_{\text{ш}} = 0,1$ Гц — частотная шумовая полоса усилительного тракта; $\kappa = 1$ — число чувствительных элементов приемника излучения.

Для выделения необходимого интервала спектра использован дисперсионный фильтр со следующими параметрами: $\lambda_{\max} = 9,8$ мкм, $\Delta\lambda = 5,0$ мкм, коэффициент пропускания фильтра 55 %.

Инструментальная температурная погрешность пирометра оценивается следующим выражением:

$$\delta T = \sqrt{\delta T_{\text{ш}}^2 + \delta T_{\text{гр}}^2 + \delta T_{\text{р}}^2},$$

где $\delta T_{\text{ш}}$ — погрешность, возникающая из-за шума системы; $\delta T_{\text{гр}}$ — погрешность градуировки прибора; $\delta T_{\text{р}}$ — погрешность, вносимая регистрирующим прибором.

Численное значение инструментальной погрешности оценивается как

$$\delta T = \sqrt{\delta T_{\text{ш}}^2 + \delta T_{\text{гр}}^2 + \delta T_{\text{р}}^2} = 3,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Визуальный оптико-телевизионный канал. С помощью визуального канала осуществляется наведение на объект измерения — скрутку. Обычно на высоковольтном столбе имеется четыре провода и четыре изолятора, а значит, и четыре скрутки. Путем физического моделирования визуализации скрутки было установлено, что увеличение наблюдательного канала должно быть не меньше 30^\times . Однако при таком увеличении из-за малого поля зрения системы одновременно наблюдать хотя бы две скрутки не удастся, что необходимо для правильной идентификации принадлежности скрутки к тому или иному проводу. Отсюда следует, что визуальный канал должен иметь перепад увеличений не менее 2^\times .

Визуальный канал представляет собой телескопическую систему с необходимостью излома визирной оси по эргономическим соображениям. Требование излома оси объясняется тем, что объект находится на расстоянии примерно 8 м под большим углом к прибору и оператору, осуществляющему наблюдение. Для реализации комфортных условий наблюдения было решено применить оптико-телевизионный канал, более „гибкий“ по конфигурации.

Оптико-телевизионный канал (рис. 3) состоит из панкратического прицела I, где 1 — объектив прицела, 2 — система смены увеличения в прицеле, 3 — окуляр прицела, и видео-передающей телекамеры II, где 4 — объектив минивидеокамеры, 5 — ПЗС-матрица, 6 — телемонитор.

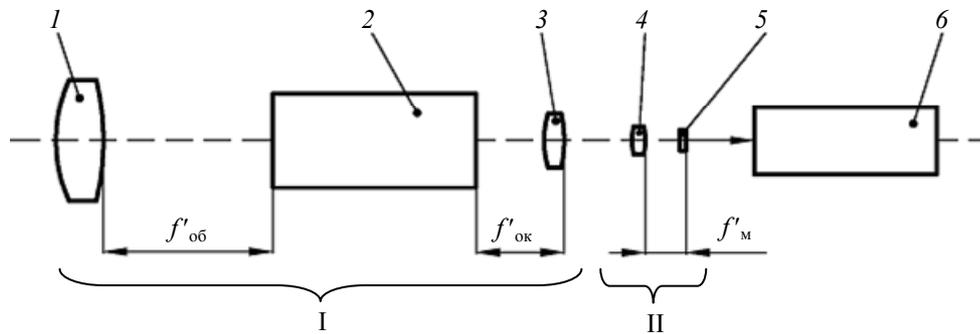


Рис. 3

Для уменьшения затрат на создание прибора в качестве зрительной трубы был применен панкратический прицел ПО Veber (3—7)×20 с перепадом увеличения от 3[×] до 7[×]. Для визуализации поля зрения использован черно-белый монитор с электронно-лучевой трубкой с диагональю экрана 138 мм.

Для обеспечения необходимого максимального увеличения визуального канала был выбран микрообъектив с фокусным расстоянием $f'_M = 25$ мм.

Расчет оптического увеличения визуального канала. Увеличение панкратического прицела $\Gamma_1 = 3^{\times} \dots 7^{\times}$. Увеличение оборачивающей системы оптико-телевизионного канала определяется по формуле $\Gamma_2 = f'_M / f'_{ок}$, где $f'_{ок} = 50$ мм — фокусное расстояние окуляра панкратического прицела, $f'_M = 25$ мм; таким образом, $\Gamma_2 = 25 / 50 = 0,5^{\times}$.

Минимальное оптическое увеличение оптико-телевизионного канала $\Gamma_{min} = \Gamma_1 \Gamma_2 = 3 \cdot 0,5 = 1,5^{\times}$, а максимальное — $\Gamma_{max} = \Gamma_1 \Gamma_2 = 7 \cdot 0,5 = 3,5^{\times}$.

Определим электронное увеличение минивидеокамеры. Размер ПЗС-матрицы, согласно паспортным параметрам минивидеокамеры, 10×12 мм². Размер экрана монитора 100×95 мм². Так как диагональ ПЗС-матрицы $l_{ПЗС} = \sqrt{10^2 + 12^2} = 15,6$ мм, а диагональ экрана монитора $l_M = \sqrt{100^2 + 95^2} = 138$ мм, то электронное увеличение $\beta_{эл} = l_M / l_{ПЗС} = 138 / 15,6 = 9^{\times}$.

Общее увеличение оптико-телевизионного канала следующее:

— минимальное: $\Gamma = \Gamma_{min} \beta_{эл} = 1,5 \cdot 9 = 13,5^{\times}$;

— максимальное: $\Gamma = \Gamma_{max} \beta_{эл} = 3,5 \cdot 9 = 31,5^{\times}$.

Методика измерения. В разработанном приборе для удобства предусмотрено грубое и точное наведение на скрутку. Используется готовый привод наведения. Угловая погрешность механизма наводки составляет 1,8'.

1. С помощью механического визира грубой наводки, установленного на корпусе прибора, осуществляется наведение на объект измерения (скрутку) с использованием в поворотном устройстве механизма ускоренной наводки. Механический визир представляет собой мушку и целик.

В результате грубого наведения изображение скрутки должно попасть в поле зрения визуального канала при его минимальном увеличении 13,5[×]. Дальнейший контроль наведения осуществляется по монитору.

2. При помощи поворотного устройства точного наведения изображение скрутки приводится в центр поля зрения.

3. Путем изменения масштаба увеличения визуального канала до максимального значения ($31,5^{\times}$) осуществляется совмещение изображения скрутки с визирной маркой, нанесенной на экране монитора. Размер визирной марки на мониторе соответствует полю зрения измерительного канала.

4. С включением кнопки „Измерение“ на панели управления производится оценка температуры перегрева скрутки. Результат контроля перегрева скрутки выводится на светодиодный индикатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г. С. Радиометр инфракрасного диапазона // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 4. С. 169—171.
2. Васин А. С. и др. Радиационный пирометр // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39, № 2. С. 56—58.
3. Разумовский И. Т. Тепловизионные приборы: Учеб. пособие. Л.: ЛИТМО, 1983. С. 53.

Сведения об авторе

Игорь Тимофеевич Разумовский — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;
E-mail: itraz@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
26.04.11 г.